

TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Medientechnik

FRAUNHOFER INSTITUT DIGITALE MEDIENTECHNOLOGIE IDMT ILMENAU

Untersuchungen zum Einsatz von Flachlautsprechern an schallreflektierenden Grenzflächen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Elektrotechnik und
Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau

von Dipl.-Ing. Daniel Beer
geboren am 29.11.1976 in Stralsund

Vorgelegt am: 06.10.2009

Gutachter: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. nat. h. c. mult. K. Brandenburg
2. Hon.-Prof. Dr.-Ing. habil. W. Klippel
3. Prof. Dr.-Ing. habil. J. Grabow

Verteidigung am: 28.06.2011

Verf.-Nr.: EI 249

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011000359

Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT
Ehrenbergstraße 31
98693 Ilmenau

Danksagung

Das Gelingen dieser Arbeit sehe ich als Geschenk Gottes an. Er verlieh mir das nötige fachliche Verständnis und führte mich mit Personen zusammen, die ganz wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben. An dieser Stelle möchte ich deshalb allen Beteiligten meinen herzlichen Dank aussprechen.

Für meine persönliche Betreuung während der Promotion danke ich meinem Doktorvater, Prof. Brandenburg (TU Ilmenau/Fraunhofer IDMT), und Frau Dr. Brix (Fraunhofer IDMT). Sie ermöglichten mir durch die Promotionstelle am Fraunhofer IDMT eine ideale Forschungsumgebung und halfen durch regelmäßige Gesprächstermine, Herausforderungen zu meistern und die Arbeit zielstrebig und erfolgreich abzuschließen. Weiterhin sei meinen Gutachtern gedankt, zu denen neben Prof. Brandenburg, Prof. Klippel (TU Dresden/Klippel GmbH) und Prof. Grabow (FH Jena/AMESYS Ingenieurbüro) gehören. Trotz ihres fordernden Alltagsgeschäftes an den jeweiligen Lehreinrichtungen und in den eigenen Unternehmen haben sie die Aufgabe übernommen, meine Dissertation zu lesen und zu bewerten.

Weiterhin danke ich Prof. Peissig und Hrn. Grell (Sennheiser electronic GmbH & Co. KG) für die Bereitstellung der Miniaturschallwandler. Ohne diese wären die erforderlichen Untersuchungen und der damit aufgezeigte Lösungsweg nicht möglich gewesen. Prof. Klippel verdanke ich die Bereitstellung aller Software-Module für das Klippel-Messsystem, die ich für die Untersuchungen benötigte. Dr. Watson (Lautsprecherhersteller KEF) danke ich für die Bereitstellung der Aktivkohle zur Untersuchung der Volumenverkleinerung.

Für alle fachlichen Diskussionen und hilfreichen Denkanstöße danke ich Prof. Brandenburg und Prof. Peissig, die mich mit dem Array-Ansatz in die richtige Richtung lenkten, Dr. Marquiss (American Power & Light Inc.), der mich den Kraftansatz als Lösung für die Luftfederproblematik neu überdenken ließ und meinem ehemaligen Diplomanden, Hrn. Mauer, der den ersten Flachlautsprecher aus Miniaturschallwandlern in seiner Diplomarbeit realisierte und so ganz wesentliche Erkenntnisse, z.B. den Einsatz eines Bessel-Arrays im Hochtonzweig, für die Weiterentwicklung erarbeitet hat. Darüber hinaus danke ich Hrn. Sanders (Lautsprecherhersteller Sanders Sound Systems) für den Erfahrungsaustausch bezüglich des Betriebs von Elektrostaten in Wandnähe und im Lautsprechergehäuse. Obwohl der Einsatz psychoakustischer Effekte zur Optimierung des Flachlautsprechers eine untergeordnete Rolle im vorgestellten Lösungsansatz spielt, bin ich dennoch sehr dankbar für alle Unterstützung, die ich hier durch meinen ehemaligen Diplomanden, Hrn. Lubkowitz, und durch Dr. Sporer, Fr. Liebtrau sowie den Teilnehmern der Praxiswerkstatt zur psychoakustischen Tieftonerweiterung erhalten habe.

Was ist ein Doktorand ohne die vielen helfenden Hände? Hier nun ein herzliches Dankeschön an meine ehemalige Praktikanten, Diplomanden und Medienprojektler, deren Namen noch nicht erwähnt wurden, Hr. Boegel, Hr. Fröhlich, Hr. Ehrig, Hr. Jahr, Hr. Reich,

Hr. Wülknitz, Hr. Schnabel, Hr. Mahr, Hr. Hopfe, Fr. Schuster, Fr. Michel, Hr. Ley, Fr. Wöfl, Hr. Spindler, Hr. Zenkert, Hr. Eisold, Hr. Gensicke und Hr. Heeg.

Darüber hinaus danke ich Fr. Heinze für die Erstellung der Konstruktionszeichnungen und Fr. Liebetrau, Hrn. Gatzsche, Fr. Klehs sowie Hrn. Ehrig für das Korrekturlesen meiner Dissertation.

Schlussendlich haben meine Eltern mir diese Ausbildung ermöglicht und mich in Allem unterstützt, wofür ich Ihnen nicht ausreichend danken kann.

Kurzfassung

Mehrkanalige Audiowiedergabesysteme und der Trend zu einem immer flacheren Design bei Mediengeräten haben das Interesse an Flachlautsprechern in den letzten 20 Jahren deutlich gesteigert. Mit einer Bautiefe von wenigen Zentimetern sollen diese eine platzsparende, unauffällige Integration im Raum ermöglichen und gleichzeitig die akustischen Eigenschaften eines konventionellen Lautsprechers aufweisen. Bisher eingesetzte Flachlautsprechertechnologien bieten bereits eine Bautiefe von weniger als 10 cm. Allerdings kommt es zu inakzeptablen Klangbeeinträchtigungen, wenn diese platzsparend direkt an der Wand oder in einem flachen Gehäuse betrieben werden.

Das Ziel dieser Arbeit bestand daher in der Ermittlung der Ursachen der Klangbeeinträchtigungen und in der Herleitung von Lösungsansätzen. Hierzu wurden die bereits auf dem Markt vorhandenen Flachlautsprechertechnologien analysiert. Beim gehäuselosen Flachlautsprecher führen im wandnahen Betrieb Reflexionen und Interferenzen zwischen den Schallanteilen beider Membranseiten zu einer Verstärkung des akustischen Kurzschlusses und zu kammfilterartigen Amplitudenverläufen. Durch die Verwendung eines Lautsprechergehäuses kann dies verhindert werden. Allerdings beeinflusst das Luftvolumen im Gehäuse das Schwingungsverhalten der Membran wie eine zusätzliche Feder. Je kleiner das Gehäuse ist, desto größer ist die Kraft, die diese Feder der Membranbewegung entgegen setzt. Dies führt zu einem geringeren Schalldruckpegel im Tieftonbereich.

Aus diesem Grund wurde eine neue Flachlautsprechertechnologie entwickelt. Die Basis dafür bildet der Einsatz von Miniaturchallwandlern, die in Arrays gruppiert und mit einem Gehäuse versehen werden. Durch die Verwendung von vielen Einzeltreibern kann bei einer geringen Bautiefe genügend Antriebskraft realisiert werden, um der Steifigkeit des Luftvolumens entgegen zu wirken. Die Verteilung der Antriebskraft und die Unterteilung der schallabstrahlenden Fläche in Teilflächen ermöglicht weiterhin ein kolbenförmiges Schwingungsverhalten und eine optimierte Abstrahlcharakteristik.

Der entwickelte Flachlautsprecher besitzt die Abmessungen $75 \text{ cm} \times 55 \text{ cm} \times 2,4 \text{ cm}$ und überträgt den Frequenzbereich von 100 Hz bis 20 kHz (-6 dB-Grenzfrequenzen) mit einem Kennschalldruckpegel von 88 dB/1 W/1 m bei direkter Wandmontage. Im Heimbereich kann dieser Flachlautsprecher in Kombination mit einem Subwoofer den konventionellen Lautsprecher ersetzen. Zur Beschallung von Kino- bzw. Konzertsälen ist der Einsatz mehrere Flachlautsprechern notwendig, um den erforderlichen Schalldruckpegel zu erzielen.

Die Ergebnisse der Entwicklung wurden in Form eines Stereo-Setups auf der Internationalen Funkausstellung 2009 in Berlin präsentiert.

Abstract

During the last two decades multichannel audio reproduction systems and the trend for a more flat design of media devices have led to an increased demand in flat panel speaker technologies. With a depth of a few centimeters these devices shall allow a space saving and unremarkable integration into rooms while providing the acoustic quality of a conventional conus loudspeaker. Current flat panel speakers can be designed with a depth less than 10 cm. However if they are mounted directly in front of a wall or maintained within a flat case an unacceptable quality loss occurs.

In this thesis the reasons for the deterioration of sound quality have been investigated. Therefore existing flat panel speaker technologies have been analysed and possible solutions have been proposed. If flat panel speakers without enclosure are maintained directly in front of a wall, reflections and interferences between sound parts from the front and the back of the membrane lead to an increased acoustic short circuit and to comb filter effects. On the one hand this effect can be prevented applying a loudspeaker enclosure. On the other hand the air volume inside the enclosure acts as an additional spring and influences the vibration behavior of the membrane. The smaller the case is the greater is the springs counterforce. This leads to an decreased sound pressure level in the low frequency range.

Because of this a new flat panel speaker technology based on array like arranged miniature transducers built in a case is proposed. Through the usage of many single transducer enough driving power can be realized counteracting against the air volumes stiffness. Additionally the distribution of the driving force and the subdivision of the sound radiating area in partial areas allows a piston-shaped vibration behavior and a optimized radiation characteristic.

The developed flat panel speakers dimensions are 75 cm × 55 cm × 2.4 cm. The frequency range is 100 Hz to 20 kHz (-6 dB limiting frequency). Mounted on a wall the speakers mean sound pressure level is 88 dB/1 W/1 m. Combined with a subwoofer the new developed flat panel speaker can replace a conventional loudspeaker. To achieve the required sound pressure level within cinemas or concert halls multiple flat panel speakers have to be combined.

The stereo setup of the final flat panel speaker developed within this thesis was presented at the "Internationale Funkausstellung" 2009 in Berlin.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
2	Zielsetzung	5
2.1	Flachlautsprecher – akustische Anforderungen	5
2.2	Anforderungen an die Bautiefe	7
2.3	Weitere Anforderungen	8
3	Grundlagen	11
3.1	Schallarten	11
3.2	Schallwahrnehmung	13
3.2.1	Aufbau und Funktionsweise des menschlichen Ohres	13
3.2.2	Tonhöhenempfindung	15
3.3	Schallanregungsprinzipien bei Flachlautsprechern	19
3.3.1	Kolbenschwinger	19
3.3.2	Biegeschwinger	21
3.3.3	Dicken- bzw. Längenschwinger	25
3.4	Berechnungen zur Schallabstrahlung von Flachlautsprechern	26
3.5	Akustische Kopplung zwischen Schallstrahlern	31
3.6	Effekte bei gestörter Schallabstrahlung	32
3.6.1	Akustischer Kurzschluss	33
3.6.2	Beugungsverluste	33
3.6.3	Kammfilterartefakte	34
4	Stand der Technik	37
4.1	Flachlautsprecher als Kolbenschwinger	38
4.1.1	Flacher Konuslautsprecher	38
4.1.2	Blatthaller	39
4.1.3	Magnetostat	41
4.1.4	Bändchenlautsprecher	42
4.1.5	Elektrostat	44
4.2	Flachlautsprecher als Biegeschwinger	46
4.2.1	Distributed Mode Loudspeaker	46
4.2.2	Mangerschallwandler	48
4.3	Flachlautsprecher als Dicken- bzw. Längenschwinger	49
4.3.1	Piezoelektrische Kristalle und Keramiken	49
4.3.2	Piezoelektrische Polymere	52
4.3.3	Weitere Dicken- bzw. Längenschwinger-Prinzipien	55
4.4	Zusammenfassung	56
5	Problemanalyse – Flachlautsprecher	59
5.1	Flachlautsprecher als Dipolstrahler	59
5.2	Klangbeeinträchtigung beim Betrieb vor reflektierenden Grenzflächen	60

Inhaltsverzeichnis

5.3	Betrieb mit Lautsprechergehäuse	62
5.3.1	Auswirkungen auf die Membranauslenkung	63
5.3.2	Berechnung der Luftfedersteifigkeit	68
5.3.3	Wandreflexionen	71
6	Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion	73
6.1	Flaches Gehäuse mit großem Volumen	73
6.2	Füllmaterialien im Gehäuse	75
6.3	Membranaufhängung mit inverser Federkennlinie	79
6.4	Die akustische Aufhängung als Ausgangspunkt	81
6.5	Aperiodisch bedämpftes Gehäuse	83
6.6	Compound-Prinzip	84
6.7	Passive Equalisierung mittels Hochpassfilter	86
6.8	Aktive Equalisierung	89
6.9	Array-Betrieb	91
6.10	Array-Technologie	93
6.11	Nutzung der rückwärtigen Schallabstrahlung	97
6.12	Gehäusevolumen eliminieren	100
6.13	Psychoakustische Tieftonerweiterung	101
6.14	Vermeidung von Schallreflexionen an Gehäusekanten	105
7	Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren	109
7.1	Verwendeter Miniaturschallwandler	110
7.1.1	Bestimmung der Wandlerparameter	110
7.1.2	Bestimmung des Gehäusevolumens	117
7.1.3	Volumensteifigkeit in Abhängigkeit von der Gehäuseform	119
7.1.4	Vergrößerung des akustisch wirksamen Volumens durch Füllmaterialien	124
7.1.5	Gehäuseverkleinerung durch Compound-Prinzip	127
7.1.6	Bassreflexgehäuse	130
7.2	Dimensionierung des Arrays	132
7.2.1	Hochtonwiedergabe mit einem Wandler	134
7.2.2	Hochtonwiedergabe mit Bessel-Array	135
7.2.3	Tieftonwiedergabe mit Flächen-Array	139
7.3	Konstruktion des Array-Demonstrators	143
7.4	Untersuchung des Array-Demonstrators	145
7.5	Optimierung des Array-Demonstrators	155
7.5.1	Linearisierung des Frequenzganges	156
7.5.2	Gehäuseverkleinerung durch Füllmaterial und elektronische Entzerrung	160
7.6	Untersuchungen zur psychoakustischen Tieftonerweiterung	172
7.6.1	1. Hörtest – Tieftonerweiterung allgemein	172
7.6.2	2. Hörtest – Intensität der Tieftonerweiterung und Klangfarbenänderung	173
7.7	Ergebnisbetrachtung	178
8	Zusammenfassung und Ausblick	181
	Verzeichnisse	183
	Literaturverzeichnis	183
	Abbildungsverzeichnis	199
	Tabellenverzeichnis	211
A	Anhang	213

A.1	Hinweise und Empfehlungen für den Flachlautsprecherentwurf	213
A.1.1	Wandlerprinzip	213
A.1.2	Membran	213
A.1.3	Schallwand	213
A.1.4	Gehäuse und Gehäusefüllung	214
A.1.5	Signalverzerrung	214
A.1.6	Psychoakustik	215
A.2	Miniaturschallwandler	216
A.2.1	Bestimmung der Thiele & Small-Parameter anhand der Impedanzkurve	216
A.2.2	Linearparameter des Miniaturwandlers	217
A.2.3	Großsignalparameter des Miniaturwandlers	218
A.2.4	Linearparameter des 2×2 -Arrays in verschiedenen Gehäusen	219
A.3	Verhalten des Miniaturwandlers bei unterschiedlichem Füllmaterial	222
A.4	Vergleich unterschiedlicher Strahler-Arrays	228
A.5	Balloon-Daten des 24 mm Flachlautsprechers (IFA 2009)	229
A.6	Abklingzeiten des untersuchten Flachlautsprechers	231
A.7	Konstruktionszeichnungen des untersuchten Flachlautsprechers	234
A.8	Konstruktionszeichnungen des Flachlautsprechers (IFA 2009)	236
A.9	Flachlautsprecher-Stereo-Setup im Foyer des Fraunhofer IDMT	238
A.10	Energiebedarf WFS-System	239
A.11	Piezoelektrische Demonstratoren	241
A.12	PVDF-Datenblatt	244
A.13	EMFi-Datenblatt	245

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbole

Symbol	Größe	Einheit
A	Flächeninhalt	m^2
A	Amplitudenfunktion	1
a	Kantenlänge	m
a	Membranradius	m
B	magnetische Flußdichte	T
B'	Biegesteifigkeit	$\text{N}\cdot\text{m}^2$
B_{empf}	empfundene Bandbreite	s^{-1}
B_{phy}	physikalische Bandbreite	s^{-1}
C	Konstante allgemein	1
C_a	akustische Nachgiebigkeit	$\text{mm}\cdot\text{N}^{-1}$
C_e	elektrische Kapazität	F
C_m	mechanische Nachgiebigkeit	$\text{mm}\cdot\text{N}^{-1}$
c	Schallgeschwindigkeit allgemein	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
c_0	Schallgeschwindigkeit in Luft	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
c_B	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
c_g	Gruppengeschwindigkeit	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
c_{gB}	Gruppengeschwindigkeit der Biegewelle	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
c_L	Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Wellen	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
c_p	Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$
c_v	Wärmekapazität bei konstantem Volumen	$\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$
D	Dicke	m
D_0	Ausgangsdicke	m
d	Abstand	m
d_{eff}	effektiver Durchmesser	m
d_{ij}	piezoelektrische Konstante	$\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$
d_T	Bassreflexkanaldurchmesser	m
E	elektrische Feldstärke	$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$
F_{dyn}	maximale Antriebskraft	N
F_F	Rückstellkraft	N
F_i	Kraft auf Wand	N
F_{Lor}	Lorentzkraft	N
F_s	Rückstellkraft der Membranaufhängung	N
F_v	Federkraft des Luftvolumens	N

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Größe	Einheit
f	Frequenz	s^{-1}
f_0	Grundfrequenz	s^{-1}
f_{-3}	-3 dB-Grenzfrequenz	s^{-1}
f_c	Resonanzfrequenz bei Gehäuseeinbau	s^{-1}
f_g	physikalische Grenzfrequenz	s^{-1}
f_K	Koinzidenzfrequenz	s^{-1}
f_{Ks}	Kurzschlussfrequenz	s^{-1}
f_{kt}	Kombinationston	s^{-1}
f_{max}	obere Grenzfrequenz der Nahfeldmessung	s^{-1}
f_s	Resonanzfrequenz, Wandler ohne Gehäuse	s^{-1}
H_1	Struvefunktion 1. Ordnung	1
h	Plattendicke	m
I	elektrischer Strom	A
I_0	Bezugsintensität: $1 \cdot 10^{-12}$	$W \cdot m^{-2}$
I_i	Impuls bewegter Luftmoleküle	N·s
J_1	Besselfunktion 1. Ordnung	1
\bar{I}	Nutzsignalstrom	A
\bar{k}	Kreiswellenzahl	m^{-1}
k	Dämpfung	dB
K_{ms}	Steifigkeit der Membranaufhängung (Klippel)	$N \cdot mm^{-1}$
L	Länge	m
L_0	Ausgangslänge	m
L_{df}	Klirrdämpfung	dB
L_e	elektrische Induktivität	H
L_N	Lautstärkepegel	phon
l	Länge	m
L_p	Schalldruckpegel	dB
l_T	Bassreflexkanallänge	m
M	molare Masse	$kg \cdot mol^{-1}$
M_{md}	bewegte Masse ohne Luftmasse (Klippel)	g
M_{ms}	bewegte Masse mit Luftmasse (Klippel)	g
m	bewegte Masse	kg
m_{eff}	effektive Masse	kg
m_1	verschobene Luftmasse	kg
m_M	Molekülmasse	kg
m_m	Membranmasse	kg
m_{vc}	Masse der mitschwingenden Bauteile	kg
m''	Flächengewicht	$kg \cdot m^{-2}$
N	Lautheit	sone
N	Molekülmenge	1
n	Laufvariable	1
n	Polytrophenexponent	1
P	elektrische Leistung	W
P_w	akustische Wirkleistung	$J \cdot s^{-1}$
p	Schalldruck	$N \cdot m^{-2}$
p	Gesamtdruck	$N \cdot m^{-2}$
p_i	Druck auf Wand	$N \cdot m^{-2}$
Q_{el}	elektrische Güte, Wandler ohne Gehäuse	1
Q_{ms}	mechanische Güte, Wandler ohne Gehäuse	1
Q_{tc}	Gesamtgüte, Wandler im Gehäuse	1
Q_{ts}	Gesamtgüte, Wandler ohne Gehäuse	1

Symbole

Symbol	Größe	Einheit
R	universelle Gaskonstante: 8,314	$\text{J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$
R_e	Gleichstromwiderstand der Schwingspule	$\text{V}\cdot\text{A}^{-1}$
R_{ms}	mechanische Verluste (Klippel)	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
R_s	spezifische Gaskonstante	$\text{J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$
r_{Abst}	Abstand Schallquelle-Raumpunkt	m
r	Schallwandradius	m
r_{Str}	Strahlungswiderstand	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$
S	Strahlerfläche	m^2
s	Weglänge "Wegunterschied"	m
s	Steifigkeit	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
s_s	Aufhängungssteifigkeit	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
s_v	Luftvolumensteifigkeit	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
T	Periodendauer	s
T	absolute Temperatur	K
t	Zeit	s
U	elektrische Spannung	V
V	Volumen	m^3
V_{as}	äquivalentes Luftvolumen	l
V_{B}	Gehäusevolumen	l
V_{D}	verschobenes Luftvolumen	m^3
v	Schallschnelle	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v	Membranschnelle	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v_i	Geschwindigkeit bewegter Luftmoleküle	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Y	Elastizitätsmodul	$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$
Z_0	Schallfeldimpedanz der ebenen Welle in Luft	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$
Z_{max}	Impedanzmaximum	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$
$Z_{\text{spez.}}$	spezifische Schallimpedanz	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$
$Z_{\text{spez.E.W.}}$	spezifische Schallimpedanz der ebenen Welle	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$
$Z_{\text{Str.}}$	Strahlungsimpedanz allgemein	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$
$Z_{\text{Str.Ko.}}$	Strahlungsimpedanz Kolbenmembran	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$
α	s_v/s_s	1
φ	Phase	Grad
δ	Dämpfungsfaktor	1
ϵ_r	relative Permittivitätskonstante	1
ϵ_0	Permittivitätskonstante $8,854\cdot 10^{-12}$	$\text{A}\cdot\text{s}\cdot\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$
η	dynamische Viskosität	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
κ	Isentropenexponent	1
κ	Adiabatexponent	1
λ_0	Wellenlänge der Luftschallwelle	m
λ	Wellenlänge allgemein	m
λ_{B}	Biegewellenlänge	m
λ_{L}	Wellenlänge der longitudinalen Welle	m
λ_{V}	Zähigkeitsgrenzschicht	m
μ	Querkontraktionszahl	1
ω	Kreisfrequenz	s^{-1}
ω_0	Eigenkreisfrequenz	s^{-1}
ω_r	Resonanzkreisfrequenz	s^{-1}
ρ	Massendichte	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ξ	Membranauslenkung	m

Zeichenerklärung

\hat{x}	Spitzenwert von x
\tilde{x}	Effektivwert von x
\bar{x}	Mittelwert von x
\underline{x}	komplexe Größe x
\dot{x}	Zeitableitung von x
\ddot{x}	zweite Zeitableitung von x
$\operatorname{Re}\{x\}$	Realteil der komplexen Größe x
$\operatorname{Im}\{x\}$	Imaginärteil der komplexen Größe x

Abkürzungen

ACE	Acoustic Compliance Enhancement
ANOVA	Analysis of Variance
DML	Distributed Mode Loudspeaker
EMFi	ElectroMechanical Film
FIL	Filter
HFIL	Hochpassfilter
HiFi	High Fidelity
HRTF	Head Related Transfer Function
IFA	Internationale Funkausstellung
IRT	Institut für Rundfunktechnik
ITU	International Telecommunication Union
MUSHRA	Multi Stimulus test with Hidden Reference and Anchors
MDF	Mitteldichte Holzfaserverplatte (medium density fiberboard)
MSW	Mangerschallwandler
NLD	Non Linear Device
PVDF	Polyvinylidenfluorid
SPL	Sound Pressure Level
SRT	Schule für Rundfunktechnik
THD	Total Harmonic Distortion (Klirrfaktor)
VDT	Verband Deutscher Tonmeister
WFS	Wellenfeldsynthese

Kapitel 1

Einleitung und Motivation

„Speakers small enough to be attractively paired in living rooms were now becoming widely available, a fact that, as much as any other, led to the rapid acceptance of stereophonic sound.“ [130]

Obwohl die stereophone Wiedergabe im Vergleich zur monophonen Wiedergabe den Vorteil der räumlichen Abbildung bietet, traf die Notwendigkeit eines zweiten Lautsprechers bis in die 1960er Jahre auf Ablehnung. Der Grund dafür waren die damals prinzipbedingten großen Lautsprechergehäuse. Erst ab 1957 konnte mit der Entwicklung der akustischen Aufhängung¹ durch Villchur das Lautsprechergehäuse bei nahezu gleichbleibender Wiedergabequalität wesentlich kleiner gebaut werden, was laut Landers der stereophonen Wiedergabe zum Durchbruch verhalf [130].

Auch bei mehrkanaligen Wiedergabeverfahren wie z. B. 5.1-Surround oder Wellenfeldsynthese² (WFS) spielt der Platzbedarf der Lautsprecher eine entscheidende Rolle, wenn es um die Anwendung im Heimbereich geht [1], [24], [53], [57], [205]. Der Nutzer ist selten bereit, für eine bessere räumliche Darstellung einen größeren Platzbedarf in Kauf zu nehmen. Hinzu kommt, dass die einzelnen Lautsprecherkanäle eines 5.1-Surround- bzw. WFS-Systems nicht beliebig im Raum aufgestellt werden können. Für Fünfkanal-Surround empfiehlt die International Telecommunication Union (ITU) eine Lautsprecheranordnung, wie sie in Abb. 1.1 zu sehen ist [112]. Die Lautsprecher umgeben die optimale Hörposition kreisförmig auf festgelegten Positionen. Prinzipbedingt werden bei einem WFS-System noch wesentlich mehr Lautsprecher als bei 5.1-Surround benötigt³. Die Abstände zwischen benachbarten Lautsprechern sollten möglichst klein sein. Lücken im Lautsprecherband

¹ siehe Abschnitt 6.4, S. 81

² In Anlehnung an das Huygenssche Prinzip werden bei der Wellenfeldsynthese beliebige Wellenfronten durch das Zusammenspiel vieler Lautsprecher synthetisiert. In erster Linie handelt es sich dabei um Wellenfronten realer Schallquellen.

³ Ähnlich der Signalabtastung in der Informationstheorie bestimmt bei der Wellenfeldsynthese der Abstand benachbarter Lautsprecher die höchste Frequenz, für die die Synthese fehlerfrei möglich ist.

1 Einleitung und Motivation

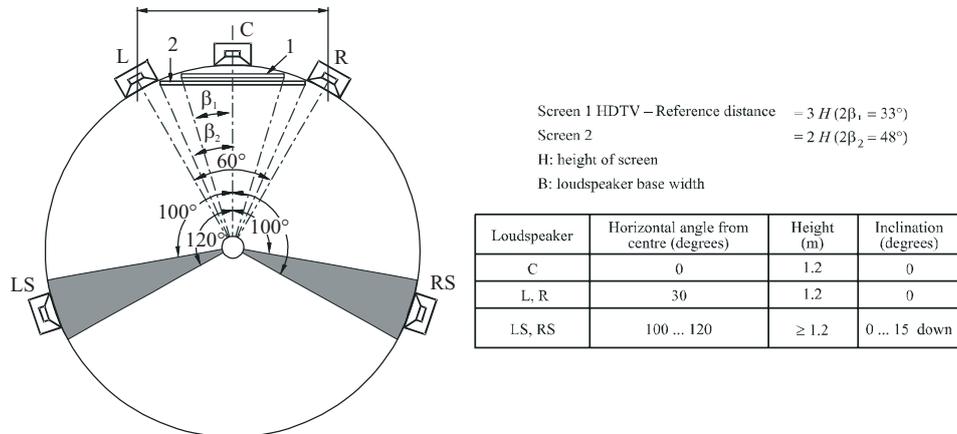


Abb. 1.1: Lautsprecheranordnung für Fünfkanal-Surround entsprechend der ITU-Empfehlung BS.775 mit Videoleinwand nach [112]

sind zu vermeiden (Abb. 1.2). Eine Vergrößerung des Lautsprecherabstandes bzw. eine Lücke im Lautsprecherband verringert unter Umständen die Synthesequalität erheblich [47].

Der Platzbedarf spielt aber nicht nur bei Wiedergabesystemen im Heimbereich eine entscheidende Rolle, sondern auch bei Mediageräten wie z. B. Notebooks und Mobiltelefonen. Durch den Trend zu einem immer flacheren Design bieten diese Geräte nur Platz für kleine Lautsprecher. Die Folge ist eine ungenügende Wiedergabequalität, welche sich durch eine geringe Tieftonwiedergabe und einen hohen Klirrfaktor bemerkbar macht. Zur Lösung des Problems sind unterschiedliche Ansätze bekannt. Eine Möglichkeit besteht im Einbau konventioneller Lautsprecher in die Wand (Abb. 1.3) [40], [181], [192], [102] und in die Decke [177], [105], [97]. Allerdings stößt dieser Ansatz auf eine geringe Akzeptanz im Heimbereich, da dazu bauliche Maßnahmen erforderlich sind. Ebenso ist diese Vorgehensweise bei mobilen Geräten nicht möglich. Ein vielversprechender Ansatz wird in der Verwendung sogenannter Flachlautsprecher gesehen [41]. Aufgrund ihrer geringen Dicke kön-



Abb. 1.2: WFS-System des Fraunhofer IDMT im IOSONO-Demoraum [27]

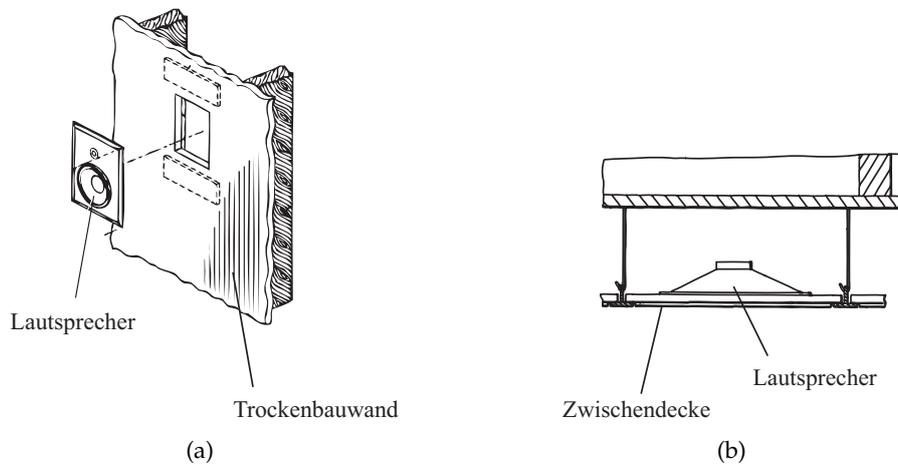


Abb. 1.3: Schematische Darstellung einer Wandlautsprecher- (a) und einer Deckenlautsprecherkonstruktion (b) [97], [251]

nen sie platzsparend an der Wand installiert oder in Möbel [56], [28] bzw. Medien-
geräte [29] integriert werden. Schon 1936 führt Benecke Flachlautsprecher mit einer
Bautiefe von weniger als 6 cm im Stand der Technik seiner Patentanmeldung auf
[48]. Aufgrund ihres geringen Einflusses auf die Ästhetik des Wiedergaberaumes
wurden sie in Hallen und Museen eingesetzt. In Abb. 1.4 ist ein Flachlautsprecher
aus dem Jahre 1938 zu sehen. Er stammt von der Firma Telefunken, für die Benecke
arbeitete, und hatte die Abmessungen 46,5 cm × 5,7 cm × 5 cm [216].

Benecke stellte schon damals fest, dass bei der Nutzung der Flachlautsprecher di-
rekt an der Wand die Wiedergabequalität infolge von Schallreflexionen deutlich
verschlechtert wird [48]. Auch 70 Jahre nach Benecke konnten bisher keine ausrei-

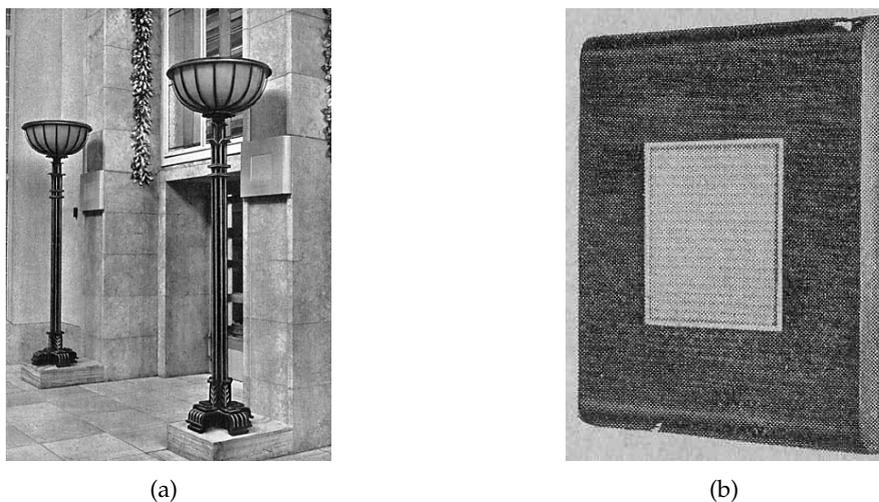


Abb. 1.4: Flachlautsprecher Ela L 605 des Herstellers Telefunken aus dem Jahr 1938 mit nur
5 cm Bautiefe, installiert an einer Hauswand (a) [52], vergrößerte Ansicht (b) [25]

1 Einleitung und Motivation

chenden Lösungen gefunden werden. Nach wie vor verschlechtern sich die akustischen Eigenschaften deutlich, wenn ein Flachlautsprecher ohne Gehäuse direkt vor einer Wand betrieben bzw. in ein flaches Gehäuse eingebaut wird. Aus diesem Grund werden Flachlautsprecher, wie beispielsweise der Elektrostat, immer mit einem Mindestabstand zu Raumwänden statt platzsparend direkt an der Wand installiert [190, S. 180ff.], [247, S. 229ff.], [157, S. 59]. Auf diese Weise kann zwar die Wiedergabequalität vor den Einflüssen von Reflexionen bewahrt werden, gleichzeitig geht aber das Potenzial einer unauffälligen Integration in Räume verloren.

Das Anliegen dieser Arbeit ist es, Lösungen für die bei Flachlautsprechern an schallreflektierenden Grenzflächen auftretenden Probleme zu finden (Kapitel 2, S. 5ff.).

Kapitel 2

Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit werden Ansätze untersucht, die es ermöglichen, Flachlautsprecher direkt an der Wand bzw. in flache Gehäuse installiert zu betreiben und gleichzeitig die Wiedergabequalität konventioneller Konuslautsprecher zu erreichen. Die Arbeit beinhaltet folgende Kernpunkte:

- Vorstellung bekannter Flachlautsprechertechnologien
- Ursachenanalyse für die Klangbeeinträchtigung von Flachlautsprechern bei direkter Wandmontage bzw. beim Einbau in flache Gehäuse
- Untersuchung von Lösungsansätzen
- Entwicklung eines Flachlautsprechers, der trotz eines geringen Wandabstands bzw. flachen Gehäuses die akustischen Eigenschaften eines konventionellen Konuslautsprechers mit einem -6 dB-Wiedergabefrequenzbereich von 100 Hz bis 20 kHz erreicht. Der Wandabstand bzw. die Gehäusetiefe sollen weniger als 5 cm betragen.

Da sich die Anforderungen an Flachlautsprecher für portable Mediengeräte wie z. B. Mobiltelefon und Notebook deutlich von denen festinstallierter Flachlautsprecher im Heimbereich unterscheiden, wird dieser Bereich in der vorliegenden Arbeit nur am Rande betrachtet.

2.1 Flachlautsprecher – akustische Anforderungen

Die Wiedergabequalität von Audiosystemen soll durch den Einsatz von Flachlautsprechern nicht beeinträchtigt werden. Aus diesem Grund sollten Flachlautsprecher die gleichen akustischen Anforderungen wie konventionelle Konuslautsprecher erfüllen.

2 Zielsetzung

Parameter	Einheit/Bedingung	Studio	Heimwiedergabe
Amplitudenfrequenzgang 0°	40 Hz - 16 kHz	± 2 dB	± 2 dB
Amplitudenfrequenzgang $\pm 10^\circ$	40 Hz - 16 kHz Δ zu 0° :	3 dB	–
Amplitudenfrequenzgang $\pm 30^\circ$	40 Hz - 16 kHz Δ zu 0° :	4 dB	–
Kanaldifferenzen	40 Hz - 16 kHz	1 dB	–
Kanaldifferenzen	250 Hz - 2 kHz	0,5 dB	–
Schallbündelungsmaß	250 Hz - 10 kHz	8 dB ± 2 dB	4 dB - 12 dB
Klirrdämpfung	96 dB _{SPL} < 100 Hz	-30 dB	–
Klirrdämpfung	96 dB _{SPL} > 100 Hz	-40 dB	-40 dB
zeitl. Kanaldifferenzen	–	10 μ s	10 μ s
Dynamikbereich	max. L_{eff}	> 112 dB	> 102 dB
Zeit für das Abklingen auf das 1/e-fache	Output = 1/e· Input	< 5/f	≤ 10 ms bei 100 Hz

Tab. 2.1: Anforderungen für Referenz-Monitor-Lautsprecher und Hinweise für Heim-Lautsprecher [94, S. 8]

Es existieren unterschiedliche Normen, in denen Anforderungen an Lautsprecher definiert sind. Eine obere Anforderungsgrenze stellt die Empfehlung BS.1116 der International Telecommunication Union (ITU) dar [110]. Die Gemeinschaftsinitiative des Verbandes Deutsche Tonmeister (VDT), des Instituts für Rundfunktechnik (IRT) und der Schule für Rundfunktechnik (SRT) haben in ihrem Standardisierungsdokument zu Hörbedingungen und Wiedergabeanforderungen für Mehrkanal-Stereofonie auf der Grundlage der BS.1116 und zusätzlicher Normen Anforderungen für Wiedergabesysteme im Studio- und Heimbereich aufgestellt (Tab. 2.1) [94, S. 8]. Demnach sollte sich der Wiedergabefrequenzbereich auf der 0° -Achse von 40 Hz bis 16 kHz erstrecken und dabei Schwankungen kleiner gleich ± 2 dB aufweisen. Vorgaben für die räumliche Schallabstrahlung sind zusätzlich durch die Angabe des Schallbündelungsmaßes für den Frequenzbereich von 250 Hz bis 10 kHz gegeben. Die nichtlinearen Verzerrungen des Lautsprechers sollten bei einem Schalldruckpegel von 96 dB in 1 m Abstand oberhalb von 100 Hz kleiner gleich -40 dB bzw. 1 % betragen. Das Zeitverhalten des Lautsprechers wird durch die Zeit charakterisiert, in der der Eingangsimpuls auf den 1/e-fachen Wert abgeklungen ist. Lautsprechern für den Heimbereich sollten bei 100 Hz eine Abklingdauer kleiner gleich 10 ms besitzen. Entsprechend der Angabe $< 5/f$ soll die Dauer für höhere Frequenzen abnehmen. Der Dynamikumfang der Lautsprecher sollte dem Einsatzzweck entsprechend größer als 112 dB bzw. 102 dB sein.

Bezüglich des Kennschalldruckpegels sind in Tab. 2.1 keine Anforderungen aufgeführt. Üblicherweise liegt dieser bei Lautsprechern für den Heimbereich zwischen 80 dB/1 W/1 m bis 85 dB/1 W/1 m. Am Hörort ist entsprechend den Empfehlungen der Society of Motion Picture and Television Engineers (SMPTE) ein Gesamtschalldruckpegel von 85 dB(C) ausreichend [202].

Da die Raumakustik die vom Nutzer wahrgenommenen Wiedergabeeigenschaften eines Lautsprechers beeinflusst, gibt die Gemeinschaftsinitiative von VDT, IRT und SRT auch dazu Empfehlungen [94, S. 9].

2.2 Anforderungen an die Bautiefe

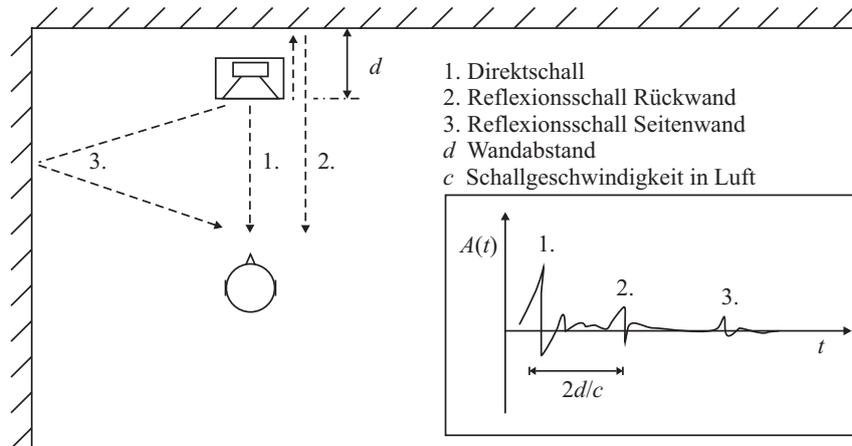


Abb. 2.1: Lautsprecher-Hörer-Konfiguration mit Schallreflexionen von der Rück- und Seitenwand

An die in mobilen Multimedia-Geräten (Mobiltelefon, Laptop) eingesetzten Lautsprecher werden niedrigere akustische Anforderungen (Schalldruckpegel, Frequenzganglinearität, Klirrfaktor) gestellt, da es in erster Linie um eine miniaturisierte Informationswiedergabeeinheit geht. In [113] ist für die Übertragung und Wiedergabe per Telefon mit geringer Qualität der Frequenzbereich von 300 Hz bis 3,4 kHz festgelegt. Durch den kleinen Abstand zwischen Telefon bzw. Laptop und Nutzer sind auch niedrigere Schalldruckpegel erforderlich.

2.2 Anforderungen an die Bautiefe

Der Einsatz konventioneller Konuslautsprechertechnologie begrenzt aufgrund der erforderlichen Bautiefe die Integrationsmöglichkeiten von Audiowiedergabesystemen deutlich. Hinzu kommt, dass eine wandnahe Aufstellung konventioneller Lautsprecher in der Regel mit Klangbeeinträchtigungen verbunden ist. Durch Schallreflexionen an der dahinter liegenden bzw. seitlich angrenzenden Wänden trifft neben dem Direktschall zeitlich verzögert der Reflexionsschall am Hörort ein (Abb. 2.1). Als Folge der Interferenz von Direkt- und Reflexionsschall kommt es zu Klangverfärbungen. Beträgt der zeitliche Versatz zwischen eintreffendem Direkt- und Reflexionsschall weniger als 1 ms, dann können außerdem Lokalisationsfehler auftreten¹ [157, S. 217].

Aus diesem Grund empfiehlt die Gemeinschaftsinitiative von VDT, IRT und SRT für den Heimbereich einen Mindestabstand zwischen Lautsprecher und Wand von 50 cm [94, S. 9] und für den Studiobereich einen Abstand von 1 m, was auch der Empfehlung der ITU entspricht [110]. Diese Abstandsempfehlungen gelten nicht

¹ Haas-Effekt. Der Effekt wurde nach Helmut Haas benannt, der im Jahr 1951 Untersuchungen zum Einfluss eines Einfach-Echos auf die Wahrnehmung von Sprache durchführte [101, S. 49]

2 Zielsetzung

nur für Raumwände, sondern auch für andere reflektierende Oberflächen, deren Größe im Bereich der betrachteten Wellenlängen liegt.

Zur Verhinderung des zeitlichen Versatzes zwischen dem Reflexionsschall von der Rückwand und dem Direktschall kann der Lautsprecher in die Wand eingebaut werden. Auf diese Weise treffen der Direkt- und der Reflexionsschall zeitgleich am Hörort ein. Infolge der phasengleichen Interferenz treten keine Kammfilterartefakte auf. Diese Variante wird in vielen Tonstudios eingesetzt. Sie erfordert allerdings bauliche Maßnahmen und eine spezielle Korrektur des Amplitudenfrequenzganges des Lautsprechers.

Dem Wandeinbau ähnlich ist ein sehr kleiner Wandabstand. Durch die geringe Bautiefe können Flachlautsprecher wesentlich dichter als konventionelle Konuslautsprecher an der Wand positioniert werden. Ob dieser Wandabstand so gering ist, dass die Phasenverschiebungen zwischen dem Direkt- und Reflexionsschall verschwindend klein sind, hängt vom Verhältnis aus Wellenlänge und Bautiefe ab. Bei einem Flachlautsprecher, der in ein Gehäuse eingebaut ist, rührt der an der Wand reflektierte Schall von Frequenzanteilen, die von der Membranvorderseite um das Gehäuse gebeugt werden. In Abschnitt 3.3.1 (S. 19ff.) wird hergeleitet, dass bei einer kreisförmigen Kolbenmembran die Frequenzen ungerichtet abgestrahlt werden, deren Wellenlänge größer als der Membrumfang ist. Beträgt der Umfang einer derartigen Membran beispielsweise 80 cm, so ist für Frequenzen unter 430 Hz mit einer kugelförmigen Schallabstrahlung zu rechnen. Dementsprechend werden diese Frequenzen an der Wand reflektiert und phasenversetzt mit dem Direktschall am Hörort überlagert. Ausgehend von dem in Abschnitt 3.5 (S. 31ff.) betrachteten Sachverhalt der akustischen Kopplung zwischen zwei Schallstrahlern findet bei einem Phasenversatz entsprechend einem Achtel der Wellenlänge eine nahezu ungestörte Überlagerung beider Schallanteile statt. Für die maximale Bautiefe des Flachlautsprechers in dieser Beispielbetrachtung bedeutet dies, dass die Wegdifferenz zwischen dem Direkt- und Reflexionsschall nicht größer als ein Achtel der Wellenlänge von 430 Hz sein darf. Da der Schall zur Wand hin und zurück laufen muss, ist die maximale Bautiefe mit einem Sechzehntel der Wellenlänge von 430 Hz, also 5 cm, festgelegt.

2.3 Weitere Anforderungen

Mit steigender Kanalanzahl spielt der Preis pro Lautsprecher eine entscheidende Rolle. Je nach verwendeter Flachlautsprechertechnologie unterscheiden sich der technische Aufwand und damit die Kosten. Aufgrund der starken Verbreitung von Konuslautsprechern sind die Herstellungsverfahren dieser Technologie für die Massenproduktion optimiert. Flachlautsprecher, die in ähnlicher Weise aufgebaut sind, profitieren davon und können kostengünstiger als andere Technologien produziert werden.

Von Vorteil ist ebenso, wenn der Flachlautsprecher mit herkömmlicher Verstärkertechnologie betrieben werden kann.

2.3 Weitere Anforderungen

Für den Einsatz in batteriebetriebenen Geräten spielt die Energieeffizienz des Flachlautsprechers eine entscheidende Rolle. Wandlern mit hohem Kennschalldruckpegel sind hier vorzuziehen. Aufgrund der großen Lautsprecheranzahl eines WFS-Systems ist auch hier der Kennschalldruckpegel der Lautsprecher zu berücksichtigen. Andernfalls kann es dazu kommen, dass die vorhandenen Elektroinstallationen nicht ausreichend dimensioniert sind (Anhang A.10, S. 239).

Kapitel 3

Grundlagen

Für die weiteren Betrachtungen sind die Grundlagen der Schallanregung, der Schallausbreitung und der Schallwahrnehmung notwendig. In den folgenden Abschnitten wird darauf näher eingegangen.

3.1 Schallarten

Schall entsteht, wenn ein elastisches Medium zu mechanischen Schwingungen angeregt wird. Das Medium kann hierbei gasförmig, flüssig oder fest sein. Daraus leitet sich die Unterteilung z. B. in Luft-, Wasser- oder Körperschall ab. Ist keine Materie vorhanden, kann auch kein Schall entstehen. Durch die Beziehungen der einzelnen Mediumsteilchen untereinander werden die Teilchen in unmittelbarer Nachbarschaft der Anregungsstelle zum Mitschwingen angeregt. Je nach Dämpfung setzt sich diese Schwingungsanregung im gesamten Medium fort, was als Schallausbreitung bezeichnet wird. Die Form der Schallausbreitung ist vom Ausbreitungsmedium abhängig. In Gasen und Flüssigkeiten hängt sie allein von der Volumenelastizität ab. Die Ausbreitung erfolgt in Form von Longitudinalwellen, bei denen die Schwingungsrichtung der Mediumsteilchen mit der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle übereinstimmt. In Festkörpern treten aufgrund der zusätzlichen Formelastizität auch noch Transversalwellen auf, bei denen die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen. Da die betrachteten Körper in der Regel nicht unendlich groß gegenüber der Wellenlänge sind, treten statt reiner Longitudinal- und Transversalwellen Mischformen wie z. B. Biege- und Dehnwellen auf [239, S. 27].

Die Geschwindigkeit, mit der ein Teilchen um seine Ruhelage schwingt, wird als Schallschnelle v bezeichnet. Infolge der Teilchenschwingungen kommt es zu sich ausbreitenden Dichte- und Druckschwankungen. Der räumliche Abstand zweier benachbarter Druckmaxima wird als Wellenlänge λ und der zeitliche Abstand als Periodendauer T bezeichnet. Gebräuchlich für den räumlichen Abstand ist außer-

3 Grundlagen

dem die Kreiswellenzahl $k = 2\pi/\lambda$ und für den zeitlichen Abstand die Frequenz $f = 1/T$.

Angelehnt an das Wahrnehmungsvermögen des menschlichen Gehörs wird Schall in unterschiedliche Frequenzbereiche eingeteilt. Ausgehend vom Hörfrequenzbereich, der zwischen 16 Hz und 20 kHz liegt, wird der Bereich darunter mit Infraschall und der darüber mit Ultraschall bezeichnet. Lautsprecher sind in der Regel¹ zur Schallanregung im Hörfrequenzbereich konzipiert.

Bewegt sich eine Schallwelle in der Zeit $t = T$ um die Länge $s = \lambda$ fort, so kann daraus die Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = \lambda/T$ bestimmt werden. Je nach Medium und Wellenform unterscheiden sich die Geschwindigkeiten. Die Ausbreitung in Form von Longitudinalwellen ist immer am schnellsten [239, S. 27]. Die Schallgeschwindigkeit in Luft kann mit Gl. 3.1 berechnet werden [231, S. 494].

$$c = \sqrt{\frac{\kappa RT}{m_M}} \quad (3.1)$$

Darin wird κ als Isentropenexponent bezeichnet, der von der Art des Gases abhängig ist. Für einatomige Gase (z. B. Edelgase) beträgt er 1,67 und für zweiatomige Gase 1,4. Luft gehört wegen des 98 %igen Sauerstoff-Stickstoff-Anteils zu den zweiatomigen Gasen. Dieser Exponent definiert das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten bei konstantem Druck und konstantem Volumen. $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ist die universelle Gaskonstante, T die absolute Temperatur in Kelvin² und m_M ist die molare Masse des Gases, die für Luft $29 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ beträgt. Bezogen auf das gleiche Gas ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit nur mit der Temperatur und ist frequenzunabhängig.

Die Schallausbreitung in Festkörpern ist je nach Wellenform unterschiedlich. Für die Anregung von Luftschall ist in erster Linie die Biegewelle verantwortlich. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle in einer Platte kann mit Hilfe von Gl. 3.2 berechnet werden [64, S. 99].

$$c_B = \sqrt{2\pi f} \cdot \sqrt[4]{\frac{B'}{m''}} \quad (3.2)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist frequenzabhängig, das heißt dispersiv [64, S. 99]. Demnach breiten sich Biegewellen hoher Frequenzen schneller als Biegewellen niedriger Frequenz in einer Platte aus. Dadurch wird das Anregungssignal verzerrt wiedergegeben. Mit $B' = Y \cdot h^3 / (12(1 - \mu^2))$ ist die Biegesteifigkeit des Materials gekennzeichnet, wobei Y für den Elastizitätsmodul, μ für die Querkontraktionszahl und $m'' = \rho \cdot h$ als Produkt aus Massendichte ρ und Plattendicke h für

¹ Im Kinobereich werden Lautsprechern stellenweise auch Frequenzen unterhalb von 20 Hz abverlangt. Ebenso sind aus dem Militärbereich Untersuchungen an Infraschallwaffen bekannt [73], [91], [171], [197]. Der von Norris [159] und Pompei [174] entwickelte Ultraschalllautsprecher strahlt ein mit Hörfrequenzen moduliertes Ultraschallsignal ab, welches in der Luft demoduliert und somit hörbar wird.

² Die Umrechnung der Temperaturangabe von Celsius nach Kelvin geschieht durch die Addition mit dem Zahlenwert 273,15.

das Flächengewicht stehen [64, S. 152]. Gl. 3.2 ist für isotrope³ Platten, deren konstante Dicke kleiner als ein Sechstel der betrachteten Wellenlänge ist, ausreichend genau [64, S. 155]. Mit Hilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Wellen c_L gibt Cremer eine vereinfachte Formel der Ausbreitungsgeschwindigkeit für BiegeWellen an [64, S. 99].

$$c_B \approx \sqrt{1,8c_L h f} = c_L \sqrt{\frac{1,8h}{\lambda_L}} \quad (3.3)$$

Infolge der dispersiven Wellenausbreitung wird bei breitbandigen Ausbreitungsvorgängen die Ausbreitung der Hüllkurve durch die Gruppengeschwindigkeit c_{gB} beschrieben [64, S. 101].

$$c_{gB} = 2 \sqrt{\frac{B'}{m''}} k = 2c_B \quad (3.4)$$

Bezogen auf die geometrische Form der sich ausbreitenden Wellenfronten im Raum werden drei Ideale unterschieden: die Kugelwelle, die Zylinderwelle und die ebene Welle. Bestimmend für die Form der sich ausbreitenden Wellenfront ist in erster Linie das Größenverhältnis aus der schallanregenden bzw. -abstrahlenden Fläche und der betrachteten Wellenlänge. Schallabstrahlende Gebilde wie ein Lautsprecher bringen in der Regel nur Mischformen der aufgeführten Wellenfronten hervor.

Im Folgenden sollen die für Flachlautsprecher relevanten Schallanregungsformen betrachtet werden.

3.2 Schallwahrnehmung

3.2.1 Aufbau und Funktionsweise des menschlichen Ohres

Der Mensch nimmt Schall in erster Linie mit dem Ohr und den Reizverarbeitungszentren im Gehirn wahr. Frequenzen unter 40 Hz werden zunehmend durch Druckempfindungen im Bauch- und Brustbereich wahrgenommen. Diese Druckempfindungen können derart unangenehm ausgeprägt sein, dass sie Übelkeit und Kreislaufstörungen hervorrufen [99].

Das Ohr wird anatomisch in die Bereiche Außen-, Mittel- und Innenohr eingeteilt (Abb. 3.1). Zum Außenohr gehören die Ohrmuschel, der Ohrkanal und das Trommelfell. Das Mittelohr beinhaltet die Paukenhöhle mit den Gehörknöchelchen (Hammer, Amboss, Steigbügel) und den Mittelohrmuskeln (Trommelfellspanner, Steigbügelmuskel). Der Bereich des Innenohres besteht aus der flüssigkeitsgefüllten Ohrschnecke, die durch die Reissnersche Membran und die Basilarmembran in drei Schläuche unterteilt ist, und dem ovalen und dem runden Fenster. Auf der Basilarmembran befindet sich das Cortische Organ mit den inneren und äußeren

³ Bei einer isotropen Platte ist die Biegesteifigkeit richtungsunabhängig [64, S. 154].

3 Grundlagen

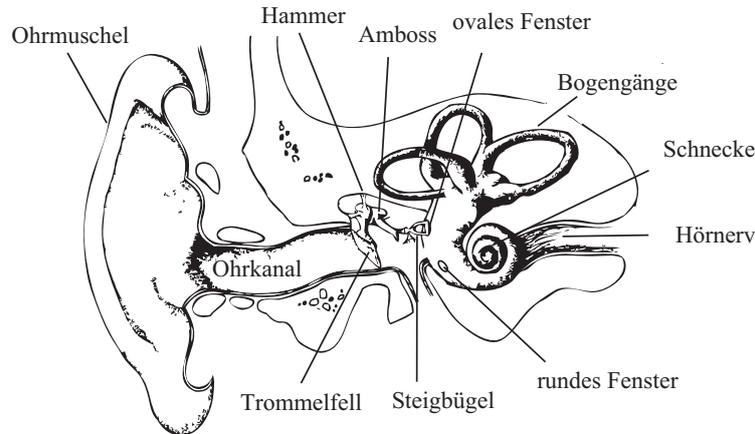


Abb. 3.1: Schnittansicht des Ohres, nach [104, S. 92]

Haarzellen und den zugehörigen Härchen [104, S. 91ff]. Diese Rezeptoren stehen über Nervenfasern mit dem Gehirn in Verbindung.

Der eintreffende Schall wird über den Ohrkanal zum Trommelfell geleitet. Durch den Aufbau der Ohrmuschel und des Ohrkanals, ähnlich einem Trichter, wird der Schall je nach Frequenz und Richtung unterschiedlich aufgenommen. Es entstehen im Ohrkanal richtungsabhängige kammfilterartige Interferenzmuster aus Direktschall und Ohrmuschelreflexionen [98, S. 103]. Die damit vorhandene Übertragungsfunktion des Außenohres (englisch: Head Related Transfer Function, kurz HRTF) ist entscheidend für die horizontale und vertikale Ortung von Schallquellen. Frequenzen von 2 kHz bis 4 kHz werden durch Resonanzerscheinungen im Ohrkanal verstärkt [104, S. 98ff]. Die vom Trommelfell aufgenommenen Schallschwingungen werden über die Gehörknöchelchen auf die Bindegewebehaut des ovalen Fensters übertragen. Das Hebelsystem der Gehörknöchelchen und der Flächenunterschied zwischen Trommelfell und Gewebhaut dienen zur Impedanztransformation zwischen dem Außen-, Mittel- und Innenohr. Die Schwingbewegungen der Bindegewebehaut führen zur Anregung von Flüssigkeitsschall und der Ausbreitungen von Wanderwellen entlang der Basilarmembran. Am runden Fenster findet ein Druckausgleich statt. Durch die mechanischen Eigenschaften der Basilarmembran erreichen diese Wanderwellen abhängig von der Frequenz und ihrer Geschwindigkeit an unterschiedlichen Positionen eine maximale Amplitude (Abb. 3.2). Für hohe Frequenzen befindet sich diese Position nahe dem ovalen Fenster. Für tiefe Frequenzen liegt sie am Ende der Basilarmembran. Kurz nach dieser Position kommt es zu einer starken Verringerung der Auslenkungsamplitude. Durch die Auslenkung der Basilarmembran werden auch die Härchen an dieser Position stark ausgelenkt. Dies löst eine chemische Reaktion aus und führt zur Freisetzung eines Aktionspotenzials in den betreffenden Nervenfasern. Dieser als Reizfolgestrom bezeichnete Stromfluss durch die Sinneszellen entspricht dem zeitlichen Verlauf des Schalldrucksignals. Wegen der räumlichen Abbildung der Frequenzen eines Schallsignals auf der Basilarmembran wird dieser Vorgang als Orts-Transformation bezeichnet. Das komplexe Schallsignal wird dabei in Teilschwingungen zerlegt, weshalb auch von der Fourieranalyse des Ohres gesprochen wird. Nach neueren Erkenntnissen geht

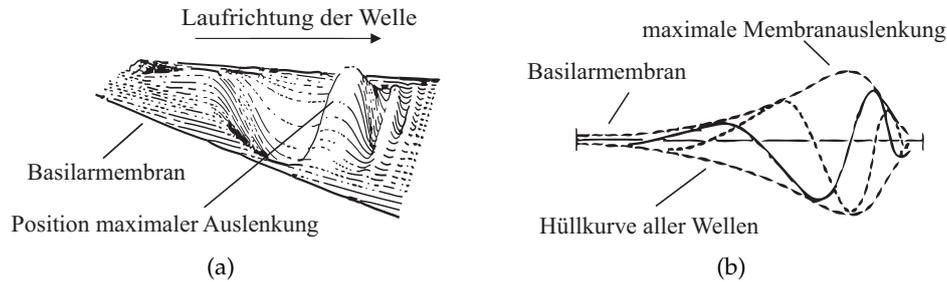


Abb. 3.2: Schematische Darstellung der Wanderwellenausbreitung in der Basilarmembran (a) und Entstehung der maximalen Membranauslenkung durch Hüllkurvenbildung (b) gemäß der Ortstheorie, nach [100]

das hohe Auflösungsvermögen des Ohres neben der mechanischen Auslenkung der Basilarmembran auch auf weitere chemischen Reaktionen in der Ohrschnecke zurück [104, S. 102ff].

3.2.2 Tonhöhenempfindung

Die Empfindung einer Tonhöhe ist unmittelbar mit der dargebotenen Frequenz verbunden. Mit steigender Frequenz steigt auch die empfundene Tonhöhe. Zusätzlich hängt die empfundene Tonhöhe vom Schalldruckpegel ab. Tiefe Töne werden mit steigendem Schalldruck „tiefer“ und hohe Töne „höher“ wahrgenommen [104, S. 117].

Zur Erklärung der Tonhöhenempfindung werden die bereits aufgeführte Ortstheorie⁴ und die nachfolgend dargelegte Salventheorie⁵ kombiniert. Die Kombination beider Theorien ist notwendig, da mittels der Ortstheorie die Wahrnehmung sehr geringer Frequenzabweichungen von etwa 3 Hz bei 1 kHz nicht ausreichend erklärbar ist. Ebenso kann damit nicht gedeutet werden, weswegen der gerade noch wahrgenommene Frequenzunterschied für tiefere und höhere Frequenzbereiche größer wird [104, S. 118].

Die Salventheorie basiert auf dem Gedanken, dass statt nur einer Nervenfaser mehrere zeitlich versetzt feuern, um eine Frequenz darzustellen (Abb. 3.3). Auf diese Weise ist eine ausreichend hohe Feuerrate trotz notwendiger Erholungszeit der Einzelfaser möglich. Die Salventheorie allein kann wiederum die Tonhöhenempfindung oberhalb von 5 kHz nicht ausreichend erklären, da hier die Feuerintervalle zu schnell aufeinanderfolgen und deshalb verschmieren. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass die Tonhöhenenerkennung unterhalb von 1 kHz anhand der Salventheorie, ab 1 kHz bis 5 kHz mit beiden Theorien und oberhalb von 5 kHz mit der Ortstheorie erklärbar ist [104, S. 119ff.].

⁴ Ortstheorie von Helmholtz und Békésy

⁵ Volley-Principle, Wever

3 Grundlagen

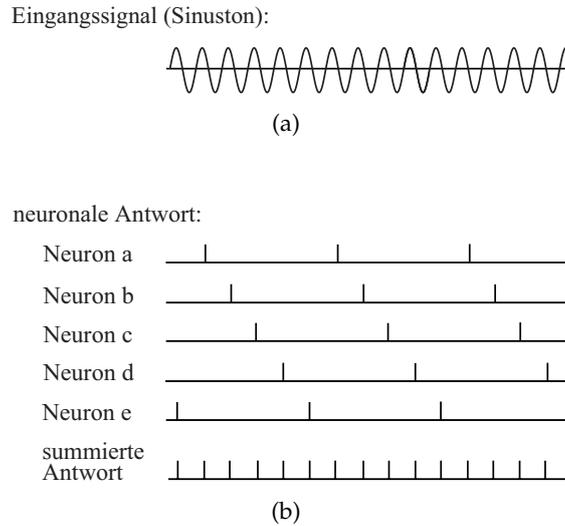


Abb. 3.3: Schematische Darstellung der neuronalen Antwort (b) auf ein Schallsignal (a) entsprechend der Salventheorie, nach [104, S. 119]

Neben der primären Tonhöhenempfindung existieren die als Kombinationstöne⁶ bezeichneten Tonhöhenempfindungen, die weder im Schallsignal noch in den Schwingungen des Trommelfells oder am ovalen Fenster nachweisbar sind. Hervorgerufen werden sie durch nichtlineare Verzerrungen der schwingenden Basilarmembran. Werden dem Ohr zwei Sinustöne ($f_1 < f_2$) mit nahezu gleicher Intensität und ausreichendem Pegel dargeboten, so können infolge der Nichtlinearitäten Summen- ($f_1 + f_2$) und Differenztöne ($f_2 - f_1$) entstehen [104, S. 121], [58]. Somit werden drei Töne wahrgenommen, wobei der Differenzton tiefer und der Summenton höher als f_1 bzw. f_2 liegt (Abb. 3.4).

Nach Roederer spielen Kombinationstöne in der Musik eine geringe Rolle, da sie nur bei gehörschädigenden Lautstärken auftreten. Sogenannte „falsche“ Kombinationstöne können dagegen durch nichtlineare Verzerrungen bei Verstärkern und Lautsprechern auftreten. Entgegen den eigentlichen Kombinationstönen entstehen die „falschen“ Kombinationstöne nicht mehr im Ohr [185, S. 49].

Eine weitere Tonhöhenempfindung, deren Ton nicht im ursprünglichen Schallsignal vorhanden ist, stellt die virtuelle Tonhöhe, auch Residualton⁷ bzw. „missing fundamental“ genannt, dar. Wird dem menschlichen Hörer ein Schallsignal, bestehend aus einem Grundton und den zugehörigen Obertönen (Harmonischen), dargeboten, so entspricht die empfundene Tonhöhe dem Grundton. Wird das gleiche Schallsignal ohne den Grundton wiedergegeben, entsteht trotzdem eine Tonhöhenempfindung entsprechend dem fehlenden Grundton (Abb. 3.5). Anders als

⁶ 1714 entdeckt von Tartini und 1940 von Sorge [58]

⁷ 1938 Schouten

3.2 Schallwahrnehmung

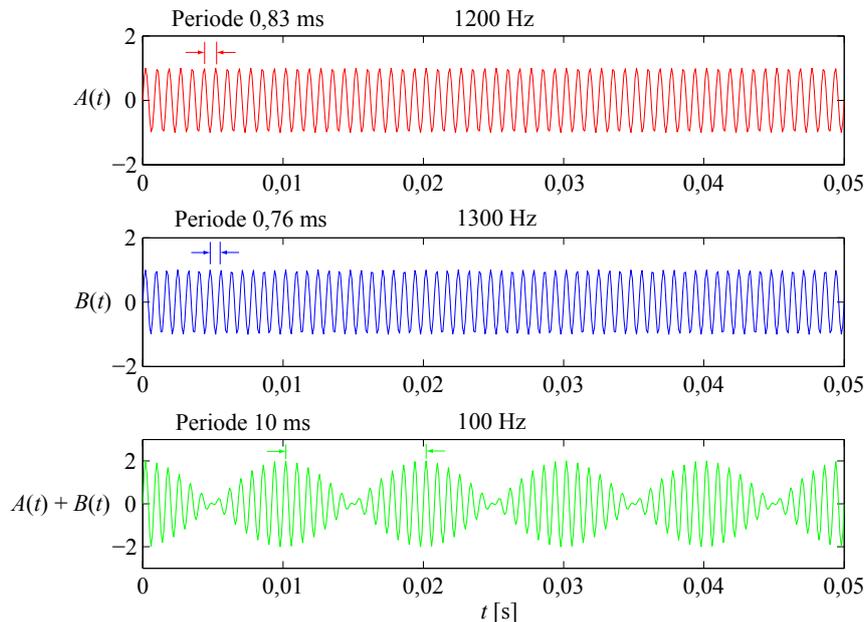


Abb. 3.4: 100 Hz Differenzton durch Ausbildung einer Einhüllenden aus zwei dargebotenen Sinussignalen mit den Frequenzen 1,2 kHz und 1,3 kHz

Kombinationstöne entstehen Residualtöne nicht in der Ohrschnecke, sondern an späterer Stelle in der Verarbeitungskette. Sie sind auch dann vorhanden, wenn die Obertöne den Ohren getrennt bzw. auch schnell hintereinander dargeboten werden [104, S. 123]. Residualtöne werden nach Terhardt insbesondere durch periodische Signale im Frequenzbereich von 70 Hz bis 500 Hz hervorgerufen. Unterhalb von 50 Hz treten sie auch auf, allerdings entsprechen sie hierbei nicht mehr der aus den Obertönen abgeleiteten Grundfrequenz, sondern höheren Frequenzen [217, S. 345]. Oberhalb von 500 Hz ist die Existenz des Residualtones nicht klar eingegrenzt. Nach Terhardt ist oberhalb von 3 kHz nicht mehr mit einem wahrnehmbaren Residualton zu rechnen [11]. In Abb. 3.6 ist der Zusammenhang zwischen dargebotenen

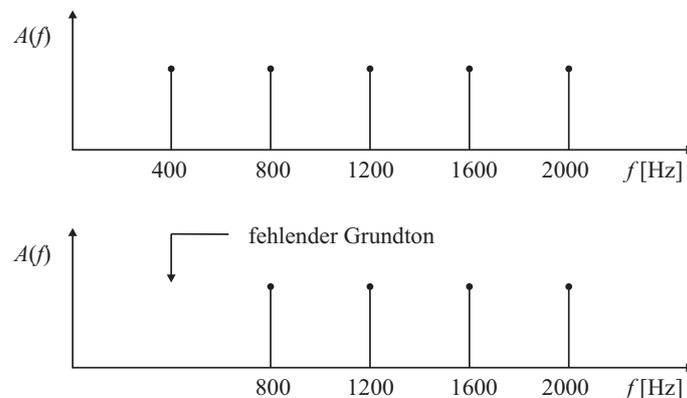


Abb. 3.5: Trotz des fehlenden Grundtones findet beim Phänomen der virtuellen Tonhöhe eine Grundtonwahrnehmung mit Hilfe des Obertonspektrums statt [104, S. 123].

3 Grundlagen

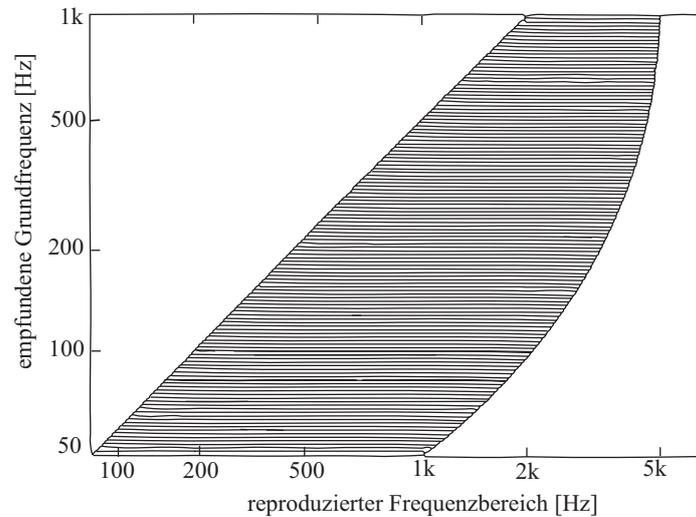


Abb. 3.6: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem reproduzierten Frequenzbereich (Abszisse) und den wahrgenommenen Residualtönen (Ordinate). Die Darbietung Harmonischer innerhalb des schraffierten Bereiches führt zur Wahrnehmung eines Residualtones [82, S. 121].

Harmonischen und empfundenen Residualtönen nochmals dargestellt. Demnach können Residualtöne sicher für den Frequenzbereich 50 Hz bis 1 kHz durch die Darbietung Harmonischer im schraffierten Bereich hervorgerufen werden. Nach Terhardt muss mindestens eine Harmonische aus diesem Bereich vorhanden sein, um eine Residualtonempfindung zu bewirken [217, S. 346]. Je mehr Harmonische vorhanden sind, desto ausgeprägter ist der Effekt. Roederer weist in [185, S. 58ff.] auf Untersuchungen von Ritsma [183] und Smoorenburg [201] hin, wonach für die Residualtonbestimmung besonders die benachbarten Harmonischen im Bereich der vierfachen Grundfrequenz (vierte Harmonische) wichtig sind. Für eine Residualtonempfindung von beispielsweise 200 Hz sind demnach die benachbarten Harmonischen 800 Hz und 1 kHz wichtig. Bei der Darbietung von Harmonischen höherer Ordnung, z. B. der zehnten Ordnung mit 2 kHz und 2,2 kHz, wird ebenso eine Residualtonempfindung von 200 Hz hervorgerufen, welche aber wesentlich schwächer ist [108]. Werden zwei nicht benachbarte Harmonische einer Grundfrequenz dargeboten, Roederer verwendet als Beispiel 900 Hz und 1,1 kHz als neunte und elfte Harmonische der Grundfrequenz 100 Hz, so kommt es statt zu einer eindeutigen Residualtonempfindung bei 100 Hz zu einer kontextabhängigen zweideutigen Empfindung bei 180 Hz bzw. 220 Hz [185, S. 60].

Die Wahrnehmung des Residualton ist von Mensch zu Mensch verschieden. In den Untersuchungen Smoorenburgs nahmen 50 % der Hörtestkandidaten einen Residualton wahr [201].

3.3 Schallanregungsprinzipien bei Flachlautsprechern

3.3.1 Kolbenschwinger

Der Begriff Kolbenschwinger stellt die idealisiert betrachtete Lautsprechermembran dar, die sich für die Schallanregung wie ein Kolben vor und zurück bewegt (Abb. 3.7a). Die Abstrahlcharakteristik der Kolbenmembran ist frequenzabhängig.

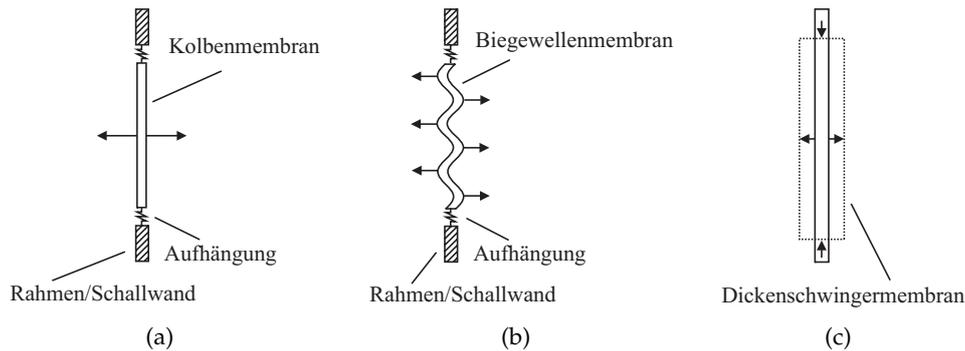


Abb. 3.7: Kolbenschwinger (a), Biegeschwinger (b), Dicken- bzw. Längenschwinger (c)

Verdeutlichen lässt sich dies anhand eines Modells, bei dem die Kolbenmembran mit dem Radius a in eine Vielzahl aneinandergereihter Kugelstrahler 1. Ordnung – auch Dipolstrahler genannt – unterteilt wird (Abb. 3.8a) [86, S. 120], [81, S. 40]. Dipolstrahler sind dadurch gekennzeichnet, dass auf der einen Membranseite ein Überdruck und auf der anderen Seite ein Unterdruck vorhanden ist. Die Kolbenmembran stellt dabei eine akustische Trennwand zwischen den Druckgebieten dar, weshalb ein Druckausgleich nur über den Umweg der Schallwand stattfinden kann (Abb. 3.8b). Jeder der einzelnen Dipolstrahler strahlt Halbkugelwellen in je eine Membranrichtung ab.

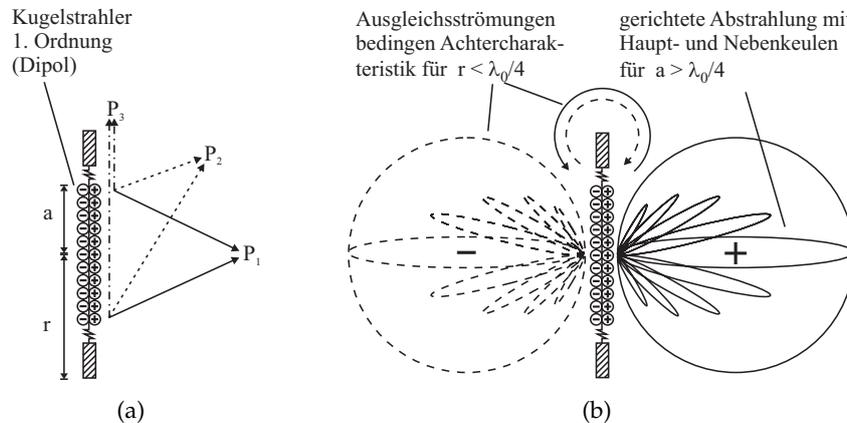


Abb. 3.8: Approximation der Kolbenmembran durch Kugelstrahler 1. Ordnung (a) zur Herleitung der Schallabstrahlung einer Kolbenmembran (b)

3 Grundlagen

Um zu ermitteln, wie unterschiedlich eine solche Strahleranordnung Schall in eine bestimmte Raumrichtung abstrahlt, müssen die Beiträge aller Strahler an jedem Beobachtungspunkt P_1 , P_2 und P_3 nach Betrag und Phase addiert werden.

Für Frequenzen, deren Wellenlänge wesentlich größer als der Abstand d zwischen den am weitesten entfernten Strahlern ist, überlagern sich die Schallbeiträge einer Membranseite für jeden Beobachtungspunkt mit einem geringen Phasenunterschied. Die resultierenden Schalldruckamplituden der drei Beobachtungspunkte unterscheiden sich somit nur geringfügig. Aus diesem Grund strahlt jede Membranseite für sich gesehen ungerichtet Schall ab. In der Membranebene treffen diese ungerichteten Schallbeiträge beider Membranseiten aufeinander. Aufgrund der entgegengesetzten Phasenlage finden Ausgleichsvorgänge statt, die als akustischer Kurzschluss bezeichnet werden. Abgeschätzt werden kann der betroffene Frequenzbereich anhand des Verhältnisses aus der Weglänge zwischen den gegenphasigen Druckgebieten – angenähert durch den Schallwandradius r – und der Wellenlänge λ_0 . Ist der Schallwandradius kleiner als ein Viertel der Wellenlänge, treffen die Schallanteile gegenphasig aufeinander, es kommt zum akustischen Kurzschluss (Abschnitt 3.6.1, S. 33) [190, S. 16]. Die Kurzschlussfrequenz f_{Ks} kann abgeschätzt werden mittels Gl. 3.5.

$$f_{Ks} = \frac{c_0}{4 \cdot r} \quad (3.5)$$

Demzufolge wird aus der eigentlich ungerichteten Schallabstrahlung jeder einzelnen Membranseite für $r < \lambda_0/4$ eine Abstrahlcharakteristik, die die Form einer Acht besitzt (Abb. 3.8b). Der abgestrahlte Schalldruckpegel erfährt eine Dämpfung von 6 dB/Okt. ab der Kurzschlussfrequenz.

Mit steigender Frequenz wird die Wellenlänge kleiner. Der Schall erfährt deshalb auf dem Weg von einer Membranseite zur anderen eine immer größere zusätzliche Phasendrehung. Entspricht der Schallweg einer halben Wellenlänge wird der rückwärtige Schall um weitere 180° gedreht und somit phasenrichtig mit dem Frontschall überlagert. Statt des akustischen Kurzschlusses tritt dann eine Pegelerhöhung auf [261, S. 90]. Dies gilt auch für unmittelbar benachbarte Frequenzen, bei denen die Schallbeiträge der Membranseiten nahezu in Phase sind.

Ebenso entsteht mit steigender Frequenz aus der ungerichteten eine gerichtete Schallabstrahlung. Der Übergang liegt für die Kolbenmembran bei $ka = 1 \dots 2$ [261, S. 95], [188, S. 174]. Aufgrund der kleineren Wellenlängen führen bei diesen Frequenzen bereits kleine Wegunterschiede zu große Phasenverschiebungen an den Beobachtungspunkten P_1 , P_2 und P_3 (Abb. 3.8a). Die Folge sind destruktive Überlagerungen zwischen den Schallanteilen der Kugelstrahler einer jeden Membranseite, was zur Ausbildung von Abstrahlkeulen führt.

Bezogen auf den Beobachtungspunkt P_1 in Abb. 3.8a ist die Wegstrecke zu den zwei äußeren Kugelstrahlern gleich groß, es existiert kein Wegunterschied Δs . Demnach gibt es zwischen den eintreffenden Schallanteilen beider Strahler auch keine Laufzeitdifferenz Δt und keine Phasenverschiebung $\Delta \varphi$. Die Schallüberlagerung ist rein konstruktiv, was zu einer Verdopplung der Schalldruckamplitude führt – vorausgesetzt, die Amplituden der Teilschalldrücke sind gleich groß. In der Regel gilt dies für

3.3 Schallanregungsprinzipien bei Flachlautsprechern

alle Frequenzen und beliebige Abstände im Fernfeld⁸. Es kommt zur Ausbildung der Hauptabstrahlkeule.

Der Abstand vom Beobachtungspunkt P_2 zu den äußeren Kugelstrahlern ist unterschiedlich groß, es existiert eine Laufzeitdifferenz. Die daraus resultierende Phasendifferenz ist abhängig von der Wellenlänge. Für $\lambda_0/2 \gg \Delta s$ ist die Phasenverschiebung zwischen beiden Strahlern so klein, dass die Schalldrucküberlagerung nahezu die gleiche Amplitude wie im Punkt P_1 bewirkt. Mit steigender Frequenz nimmt die Phasenverschiebung zu. Die Folge ist eine zunehmend destruktive Schallüberlagerung bis $\lambda_0/2 = \Delta s$ beträgt. Für diesen Fall kommt es am Überlagerungspunkt zur vollständigen Auslöschung beider Schallanteile, da der Phasenunterschied 180° groß ist – es entsteht eine Nullstelle im Richtdiagramm. Für noch höhere Frequenzen wird der Phasenunterschied größer als 180° . Demzufolge tritt die Nullstelle bereits zwischen P_1 und P_2 auf. An P_2 kommt es dann bereits wieder zu konstruktiven Interferenzen. Neben der schon vorhandenen Hauptkeule und der Nullstelle entsteht dadurch eine Nebenkeule.

Für den Beobachtungspunkt P_3 ergibt sich das gleiche Verhalten wie für P_2 . Der einzige Unterschied besteht darin, dass für diese Konstellation die maximal mögliche Wegdifferenz der gesamten Strahleranordnung, nämlich $\Delta s = d$, erreicht wird. Demzufolge tritt an dieser Position – Abstrahlwinkel 90° – die erste vollständige Auslöschung der Schallbeiträge auf. Nach [261, S. 95] kann dieser Fall mit $ka = 3,8$ approximiert werden. Wie in der Betrachtung zu P_2 dargestellt ist, treten weitere Nullstellen mit den dazwischenliegenden Nebenkeulen bei noch höheren Frequenzen auf. Diese liegen dann im Winkelbereich zwischen 0° und 90° . Benachbarte Abstrahlkeulen besitzen eine entgegengesetzte Phasenlage.

Da nicht nur die zwei äußeren Kugelstrahler einen Beitrag liefern, muss zur genaueren Vorhersage der Abstrahlcharakteristik der Schallbeitrag eines jeden Strahlers an jedem Beobachtungspunkt unter Beachtung der Phasenlage berücksichtigt werden.

Die Achtercharakteristik als Folge des akustischen Kurzschlusses wird so weiter ausgebildet und durch zusätzliche Haupt- und mehrere frequenzabhängige Nebenkeulen ergänzt (Abb. 3.8b). Die Anzahl der Nebenkeulen nimmt mit steigender Frequenz zu.

Eine ausführliche Betrachtung der Schallabstrahlung der Kolbenmembran ist in [208] gegeben. Auf die ebenso auftretenden Beugungserscheinungen an Membran- bzw. Schallwandkanten wird in Abschnitt 3.6 (S. 32) eingegangen.

3.3.2 Biegeschwinger

Die zweite Gruppe von Flachlautsprechern lässt sich aufgrund ihrer Membranbewegung als Biegeschwinger bezeichnen. Anders als beim Konuslautsprecher

⁸ Im Fernfeld ist die Phasenverschiebung zwischen Schalldruck und Schallschnelle vernachlässigbar klein. Nach [188, S. 30ff.] ist sie $\leq 10^\circ$ ab $ka \approx 5$.

3 Grundlagen

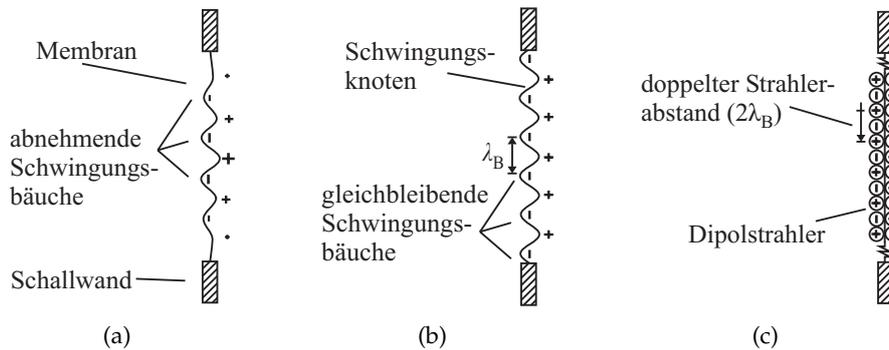


Abb. 3.9: Schematische Darstellung der Biegewellenausbreitung mit abnehmenden Schwingungsbäuchen infolge innerer Dämpfung (a) und mit gleichbleibenden Schwingungsbäuchen infolge fehlender Dämpfung (b), die Additionszeichen kennzeichnen Überdruck- und die Subtraktionszeichen Unterdruckgebiete. Modell zur Herleitung der Abstrahlcharakteristik angelehnt an [64, S. 487] (c)

schwingt die Membran, die in der Regel als Platte ausgebildet ist, partiell unterschiedlich bezüglich Phase und Amplitude. Hervorgerufen wird dieses Verhalten dadurch, dass weder die Membran ausreichend steif, noch die Antriebskraft so gleichmäßig über der Fläche verteilt ist, um eine Kolbenschwungung zu ermöglichen.

In unmittelbarer Nähe des Kraftangriffes wird die Membran ausgelenkt. Infolge der ungenügenden Steifigkeit werden entfernte Nachbarbereiche weniger oder gar nicht ausgelenkt, die Membran verbiegt. Durch das fortwährende Verbiegen an der Erregerposition werden nun die Nachbarbereiche der Membran ebenso zum Schwingen angeregt. Es kommt so zur Körperschallausbreitung in Form von Biegewellen, was dazu führt, dass die gesamte Membran partiell unterschiedlich schwingt.

In der Regel kommt es zur Reflexion der Biegewelle an den Membranrändern. Entspricht der Weg zwischen zwei Reflexionen einem Vielfach der halben Wellenlänge, so kommt es zur Ausbildung von Stehwellen in der Membran – sogenannten Moden. Das Wellenfeld der vom Erregerzentrum kommenden Biegewellen wird somit von einem Stehwellenfeld überlagert. Kennzeichnend für diese Stehwellen ist die Ausbildung von schwingenden und nicht schwingenden Membranbereichen. Die schwingenden werden als Schwingungsbäuche und die nicht schwingenden als Schwingungsknoten bezeichnet. Der Abstand zwischen zwei Schwingungsbäuchen entspricht bei sinusförmiger Anregung mit nur einer Frequenz der Biegewellenlänge λ_B (Abb. 3.9). Diese kann mit Hilfe von Gl. 3.6 berechnet werden.

$$\lambda_B = 2\pi \sqrt{\frac{B'}{m''}} \quad (3.6)$$

B' steht für die Biegesteifigkeit der Membran und m'' für das Flächengewicht.

Je nach innerer Dämpfung der Membran werden die Schwingungsamplituden mit zunehmender Entfernung vom Erregerzentrum kleiner (Abb. 3.9a).

3.3 Schallanregungsprinzipien bei Flachlautsprechern

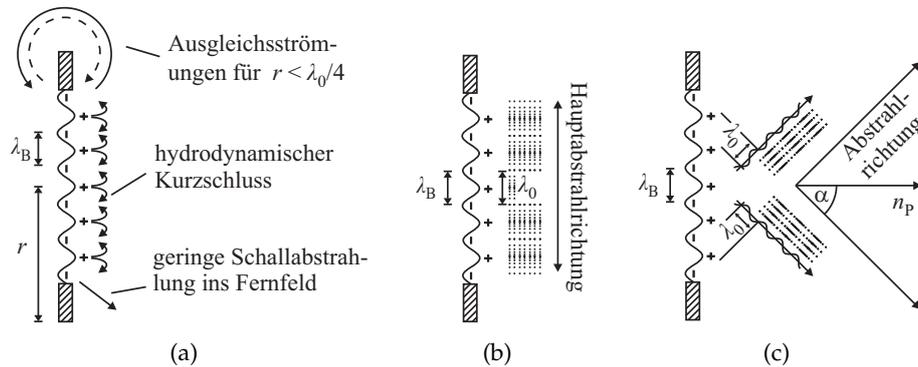


Abb. 3.10: Schematische Darstellung der Schallabstrahlung für $\lambda_B < \lambda_0$ (a), für $\lambda_B = \lambda_0$ (b) und für $\lambda_B > \lambda_0$ (c), Schallabstrahlung ist nur für eine Membranseite dargestellt, sie gilt für beide, Additionszeichen kennzeichnen Überdruck- und Subtraktionszeichen Unterdruckgebiete

In Abb. 3.9b ist eine Situation dargestellt, bei der sich die Biegewelle einer Frequenz ungedämpft in der Membran ausbreitet und am Rand reflektiert wird.

Durch die Biegeschwingungen wird Luftschall angeregt. Zur Herleitung der grundlegenden Charakteristik soll das Modell in Abb. 3.9c dienen. Angelehnt an Cremer [64, S. 487] wird die Biegewellenmembran durch Dipolstrahler angenähert, die entsprechend der Polarität der Schwingungsbäuche ausgerichtet sind. Die Abstrahlcharakteristik ergibt sich wie beim Kolbenstrahler aus der komplexen Überlagerung der Beiträge aller Dipolstrahler. Für sehr tiefe Frequenzen kann der Fall eintreten, dass die halbe Biegewellenlänge größer gleich der größten Membranabmessung ist (Gl. 3.6) [64, S. 498]. Die Membran würde sich demnach ähnlich einer Kolbenmembran bewegen und es würde der akustische Kurzschluss auftreten. Die Schallabstrahlung im darüber liegenden Frequenzbereich ist abhängig vom Verhältnis der Biegewellenlänge zur Luftschallwellenlänge λ_0 . Es werden drei Bereiche unterschieden [64, S. 475ff.]:

- $\lambda_B < \lambda_0$, hydrodynamischer Kurzschluss
- $\lambda_B = \lambda_0$, Koinzidenzfall
- $\lambda_B > \lambda_0$, gerichtete Schallabstrahlung

Für den Fall, dass die Biegewellenlänge wesentlich kürzer als die Luftschallwellenlänge ist, werden überwiegend nur Ausgleichsströmungen durch die Membranbewegung hervorgerufen. Die Luft wird von einem Wellenberg in das nächste Wellental verschoben (Abb. 3.10a). Cremer prägte für diesen Vorgang den Begriff des hydrodynamischen Kurzschlusses [64, S. 477]. Luftkompression und -dekompression finden so gut wie nicht statt, weswegen kaum hörbarer Schall erzeugt und abgestrahlt wird. Allein an den Membranrändern kann es durch unvollständige Auslöschungen zu einer geringfügigen Schallabstrahlung kommen [64, S. 495].

3 Grundlagen

Wenn die Wellenlängen gleich groß sind, liegt der Koinzidenzfall vor (Abb. 3.10b) [64, S. 348]. Für einen Beobachtungspunkt, der in der Membranebene liegt, heben sich der Phasenunterschied von 180° zwischen den benachbarten Dipolen auf, da ihr Abstand der halben Wellenlänge entspricht. Es erfolgt eine maximale Pegeladdition für Punkte in der Membranebene [64, S. 476]. Die Koinzidenzfrequenz f_k kann mit Gl. 3.7 berechnet werden [64, S. 496ff.].

$$f_k = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B'}} \quad (3.7)$$

Cremer vereinfacht Gl. 3.7 für homogene Platten durch Verwendung der Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Wellen im Membranmaterial und der Plattendicke h zu Gl. 3.8.

$$f_k = \frac{c_0^2}{1,8 \cdot c_L \cdot h} \quad (3.8)$$

Ist die Biegewellenlänge größer als die Luftschallwellenlänge, kommt es je nach Beobachtungspunkt zu einer laufzeitbedingten Phasenverschiebung zwischen den benachbarten Strahlern. Diese bewirkt eine Verkleinerung bzw. eine vollständige Kompensation des anfänglichen Phasenunterschiedes benachbarter Quellen. Demnach addieren sich die Schallbeiträge zunehmend konstruktiv. In Abhängigkeit von der Biegewellenlänge ist der Winkel maximaler konstruktiver Überlagerung für jede Frequenz unterschiedlich (Abb. 3.10 c).

Ausgehend von den theoretischen Betrachtungen ist wegen des hydrodynamischen Kurzschlusses unterhalb der Koinzidenzfrequenz keine nennenswerte Schallgenerierung mittels Biegewellen zu erwarten, was dieses Schallanregungsprinzip bezüglich einer effektiven Schallanregung weniger attraktiv als den Kolbenschwinger macht. Aus diesem Grund ist unterhalb der Koinzidenzfrequenz eine kolbenförmige Membranbewegung anzustreben. Die Membran kann beispielsweise ausreichend klein gewählt werden, um die Biegewellenausbreitung gegen eine kolbenförmige Schwingung zu ersetzen. Oberhalb der Koinzidenzfrequenz ist wegen der winkelabhängigen Schallabstrahlung eine sehr diffuse Abstrahlcharakteristik mit starken Nebenkeulen vorhanden. Eine Hauptabstrahlrichtung – wie beim Kolbenschwinger – existiert in der Regel nicht. Da sich je nach Beobachtungswinkel bestimmte Frequenzen auslöschen bzw. maximal konstruktiv überlagern, ist der Amplitudenfrequenzgang von Überhöhungen und Einbrüchen geprägt. Einen weiteren Beitrag zum nichtlinearen Übertragungsverhalten liefert das Auftreten von Membranresonanzen (Stehwellen), die infolge der Biegewellenreflexion am Membranrand oder auch am Schwingerreger entstehen. Die Schwingungsamplituden der Resonanzfrequenzen sind in der Regel größer als die Amplituden anderer Frequenzen. Im Amplitudenfrequenzgang äußert sich dies durch Überhöhungen an den Resonanzstellen. Diese Resonanzen können vermieden werden, indem die Reflexion der Biegewelle am Membranrand bzw. Schwingerreger verhindert wird [144], [127], [42].

3.3 Schallanregungsprinzipien bei Flachlautsprechern

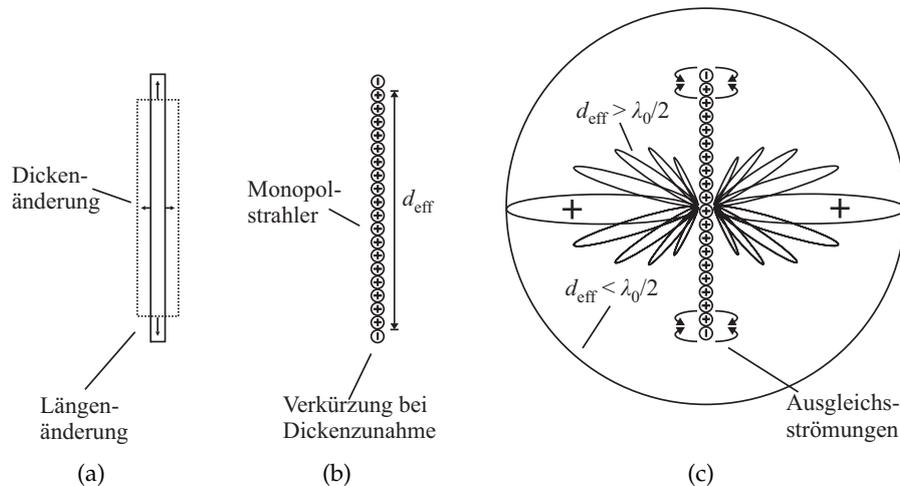


Abb. 3.11: Schematische Darstellung des Dicken- bzw. Längenschwingers (a) und Modell zur Herleitung der Schallabstrahlung für den Fall, dass Dicken- und Längenänderung gekoppelt sind (b, c)

3.3.3 Dicken- bzw. Längenschwinger

Die dritte Gruppe der Schallwandler besitzt im Gegensatz zum Kolben- und Biegeschwinger eine Membran, die nicht als gesamter Körper bewegt wird. Die Schallanregung geschieht durch schwingende Körperoberflächen infolge von Volumenverformungen. Je nach Realisierung ändert sich dabei nur die Geometrie des Körpers wie z. B. bei piezoelektrischen Keramiken oder aber auch das Volumen wie etwa bei einigen piezoelektrischen Polymeren (Abb. 3.11). Die Schallabstrahlung des Dicken- bzw. Längenschwingers ist ähnlich der eines Kolbenstrahlers, da ebenso die ganze Strahleroberfläche idealerweise wie ein Kolben vor und zurück schwingt⁹. Allerdings ist die Schallabstrahlung von der Membranvorder- und Membranrückseite nicht gegenphasig (Abb. 3.11b, c). Es findet demnach kein akustischer Kurzschluss zwischen der Membranvorder- und der Membranrückseite statt. Nur wenn die Dickenänderung mit einer Längenänderung verbunden ist, schwingen die Membranvorder- und die Membranrückseite gegenphasig zu den Stirnseiten, was je nach Größe der gegenphasig schwingenden Flächen eine mehr oder weniger große Kurzschlusswirkung zur Folge hat (Abb. 3.11b, c). Üblicherweise ist die Membrandicke wesentlich kleiner als die Membranfläche. Deswegen ist davon auszugehen, dass lediglich im Randbereich geringe Ausgleichsströmungen stattfinden. Die Abstrahlcharakteristik wird lediglich durch die übrigen Strahler bestimmt. Eine kugelförmige Schallabstrahlung findet demnach für Frequenzen statt, bei denen die Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Strahlerbeiträgen wesentlich geringer als 180° ist. Mit steigender Frequenz kommt es zu größeren Phasenverschiebungen zwischen den Schallbeiträgen. Wie beim Kolbenschwinger treten dadurch

⁹ In der Praxis gibt es nahezu keinen reinen Dicken- bzw. Längenschwinger, da i.d.R. beide Schwingungsarten miteinander verknüpft auftreten.

destruktive Interferenzen auf (Abschnitt 3.3.1). Ähnlich dem Kolbenschwinger ist die Abstrahlcharakteristik deshalb durch eine Hauptkeule und mehrere frequenzabhängige Nebenkeulen gekennzeichnet (Abb. 3.11 c).

3.4 Berechnungen zur Schallabstrahlung von Flachlautsprechern

Ein wichtiger Parameter für die Beschreibung eines Lautsprechers ist die komplexe Schallleistung \underline{P} . Je größer die Schallleistung ist, desto mehr Schwingungsenergie wird von der Membran an das umgebende Medium, z. B. Luft, übertragen. Der leistungsbestimmende Parameter ist das verschobene Luftvolumen, welches aus der Membranfläche S und der Membranauslenkung ξ gebildet wird. Für die Schallwahrnehmung ist der Realteil (Wirkanteil) $\operatorname{Re}\{\underline{P}\}$ der Schallleistung verantwortlich. Nur dieser Teil führt zu einer Schallausbreitung im Raum. Der Imaginärteil (Blindanteil) $\operatorname{Im}\{\underline{P}\}$ geht bei der kompressionslosen Luftmassenverschiebung in andere Energieformen über und liefert keinen hörbaren Beitrag.

$$\underline{P} = \operatorname{Re}\{\underline{P}\} + j\operatorname{Im}\{\underline{P}\} \quad (3.9)$$

Um möglichst viel hörbaren Schall zu erzeugen, sollte die Wirkleistung groß und die Blindleistung klein sein. Auskunft darüber gibt die Strahlungsimpedanz des Lautsprechers. Die Strahlungsimpedanz kennzeichnet den mechanische Widerstand, den das Schallausbreitungsmedium der Membranbewegung entgegensetzt. Die Membran muss diesen mechanischen Widerstand überwinden, damit die umgebenden Luftmoleküle zum Schwingen angeregt werden und sich Druckschwankungen als Schall im Raum ausbreiten [239, S. 51]. Die dazu notwendige Energie wird dem Lautsprecher entzogen. Entsprechend einer Impedanz ist dieser Widerstand frequenzabhängig und besitzt einen Real- und einen Imaginärteil. Der Realteil $\operatorname{Re}\{\underline{Z}_{\text{Str.}}\}$ kennzeichnet den Strahlungswiderstand, über dem die Wirkleistung als hörbarer Schall abfällt. Der Imaginärteil $\operatorname{Im}\{\underline{Z}_{\text{Str.}}\}$ kennzeichnet die kompressionslos mitschwingende Luftmasse m_1 (Gl. 3.10).

$$\underline{Z}_{\text{Str.}} = \operatorname{Re}\{\underline{Z}_{\text{Str.}}\} + j\operatorname{Im}\{\underline{Z}_{\text{Str.}}\} \quad (3.10)$$

Aus dem Realteil der Strahlungsimpedanz und dem Effektivwert der Membranschnelle \tilde{v} kann die abgestrahlte Wirkleistung berechnet werden (Gl. 3.11).

$$\operatorname{Re}\{\underline{P}\} = \tilde{v}^2 \cdot \operatorname{Re}\{\underline{Z}_{\text{Str.}}\} \quad (3.11)$$

Die Strahlungsimpedanz der Kolbenmembran wird nach Gl. 3.12 aus dem Schalldruck p , der Schallschnelle \underline{v} an der Strahleroberfläche und der Größe der abstrahlenden Fläche S bestimmt (Gl. 3.12) [153, S. 117].

$$\underline{Z}_{\text{Str.Ko.}} = \frac{p}{\underline{v}} \cdot S \quad (3.12)$$

3.4 Berechnungen zur Schallabstrahlung von Flachlautsprechern

Das Druck-Schnelle-Verhältnis wird auch als spezifische Schallimpedanz $\underline{Z}_{\text{spez.}} = \underline{p}/\underline{v}$ bezeichnet [239, S. 33]. Damit kann Gl. 3.12 auch in Form von Gl. 3.13 notiert werden.

$$\underline{Z}_{\text{Str.Ko.}} = \underline{Z}_{\text{spez.}} \cdot S \quad (3.13)$$

Die Definition der Strahlungsimpedanz ist in der Literatur nicht einheitlich, da unterschiedliche Betrachtungen möglich sind [71, S. 17]. Entgegen Veit [239, S. 51], Sahm [188, S. 34], Morse und Ingard [155, S. 384] ist die Strahlungsimpedanz von Zollner und Zwicker [261, S. 99] allein als Quotienten von Schalldruck und Schallschnelle definiert. Entsprechend kommt bei der Schallleistungsberechnung Gl. 3.11 in [261, S. 100] die Strahlerfläche hinzu.

Je nach abgestrahlter Wellenform (Kugelwelle, ebene Welle) ist die Phasenbeziehung zwischen Druck und Schnelle verschieden. Bei der Abstrahlung ebener Wellen besteht zwischen dem Druck und der Schnelle keine Phasenverschiebung. Die spezifische Schallimpedanz der ebenen Welle ist somit rein reell¹⁰ und beträgt für Luft 414 Ns/m^3 . Demzufolge ist auch die Strahlungsimpedanz der Kolbenmembran, definiert nach Gl. 3.12, bei der Abstrahlung ebener Wellen rein reell (Gl. 3.14) [153, S. 117].

$$\underline{Z}_{\text{Str.Ko.}} = \rho c_0 \cdot S \quad (3.14)$$

Aus den Betrachtungen zur Abstrahlcharakteristik in Abschnitt 3.3.1 geht hervor, dass die Kolbenmembran nur bei unendlicher Größe ebene Wellen abstrahlt. Da dieser Fall in der Praxis nicht erfüllt wird¹¹, findet je nach Verhältnis aus Wellenlänge und Membrangröße im unteren Frequenzbereich eine ungerichtete (kugelförmige) und im höheren Frequenzbereich eine komplexe Abstrahlung statt.

Mit Hilfe des Modells zur Bestimmung der Abstrahlcharakteristik einer Kolbenmembran (Abb. 3.8) kann auch die Strahlungsimpedanz hergeleitet werden. Nach [261, S. 99] wird für jede Teilfläche, in welche die Membran zerlegt ist, die Kugelwellenimpedanz bestimmt. Dabei ist zu beachten, dass jede Teilfläche gegen den Druck der anderen Teilflächen arbeiten muss. Die Strahlungsimpedanz einer kreisförmigen Kolbenmembran, eingebaut in eine unendliche Schallwand, ist in Form von Gl. 3.15 abgebildet [261, S. 99].

$$\underline{Z}_{\text{Str.Ko.}} = \rho c_0 \left(\underbrace{1 - 2 \frac{J_1(2ka)}{2ka}}_{R(2ka)} + j \underbrace{2 \frac{H_1(2ka)}{2ka}}_{X(2ka)} \right) \quad (3.15)$$

$J_1(2ka)$ stellt die Besselfunktion 1. Ordnung und $H_1(2ka)$ die Struvefunktion 1. Ordnung dar. k steht für die Kreiswellenzahl und a für den Membranradius (Abb. 3.12). In Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen dem Membrumfang $2\pi a$ und der ab-

¹⁰ $\underline{Z}_{\text{spez.E.W.}} = \underline{p}/\underline{v} = \rho c_0$

¹¹ In künstlich geschaffenen Umgebungen wie z. B. im Kundtschen Rohr sind Ausbreitungsvorgänge ähnlich einer ebenen Welle erzielbar, wenn die Wellenlänge wesentlich größer als der Rohrdurchmesser ist.

3 Grundlagen

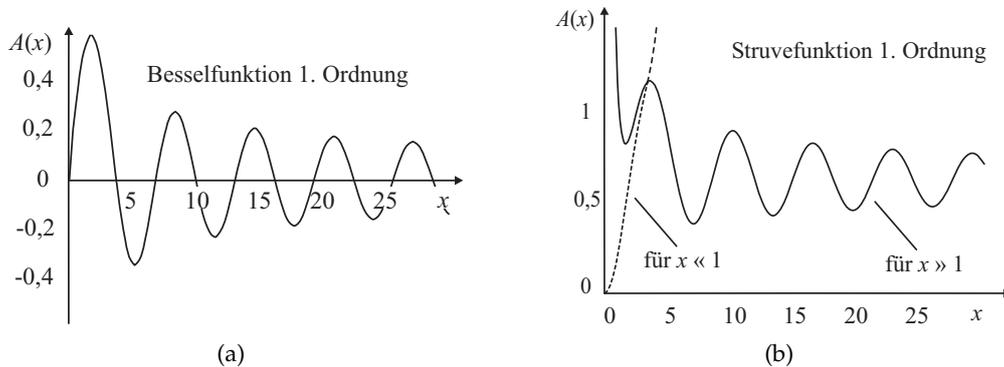


Abb. 3.12: Besselfunktion 1. Ordnung (a) und Struvefunktion 1. Ordnung (b) approximiert durch Reihenentwicklung nach [261, S. 358ff.]

zustrahlenden Wellenlänge λ_0 , die als ka in der Funktionsvariablen enthalten sind, kann anhand der Funktionsverläufe der jeweilige Term bestimmt werden.

Für eine Abschätzung des Impedanzverlaufes sind in [261, S. 99] vereinfachte Funktionsausdrücke für die Terme $R(2ka)$ und $X(2ka)$ gegeben. Diese stellen eine Näherung der Funktionen bei unterschiedlichen Verhältnissen von Membranumfang und Wellenlänge dar (Abb. 3.13). Für den Fall, dass das Verhältnis ka zwischen Membranumfang und Wellenlänge kleiner $\sqrt{2}$ ist, gilt:

$$R(2ka) \approx \frac{1}{2}(ka)^2 \quad (3.16)$$

Ist ka größer als $\sqrt{2}$, gilt:

$$R(2ka) \approx 1 \quad (3.17)$$

In gleicher Weise verändert sich auch der Term $X(2ka)$. Ist das Verhältnis aus Membranumfang und Wellenlänge kleiner als $\sqrt{3}/2$, gilt:

$$X(2ka) \approx \frac{8}{3\pi}ka \quad (3.18)$$

Umgekehrt gilt für das Verhältnis von Membranumfang und Wellenlänge größer als $\sqrt{3}/2$:

$$X(2ka) \approx \frac{2}{\pi ka} \quad (3.19)$$

Das Produkt aus Z_0 und dem Term $R(2ka)$ stellt dabei den Realteil $\text{Re}\{Z_{\text{Str.Ko.}}\}$ und das Produkt aus Z_0 und dem Term $X(2ka)$ den Imaginärteil $\text{Im}\{Z_{\text{Str.Ko.}}\}$ der Strahlungsimpedanz, definiert nach Zollner und Zwicker, dar.

Die abgestrahlte Wirkleistung kann mit Gl. 3.11 berechnet werden. Bei Verwendung der Definition der Strahlungsimpedanz nach Zollner und Zwicker (Gl. 3.15) muss Gl. 3.11 mit der Strahlerfläche S multipliziert werden (Gl. 3.20 [261, S. 101]).

$$\text{Re}\{P\} = \tilde{v}^2 \text{Re}\{Z_{\text{Str.Ko.}}\} S = \tilde{v}^2 R(2ka) Z_0 S \quad (3.20)$$

3.4 Berechnungen zur Schallabstrahlung von Flachlautsprechern

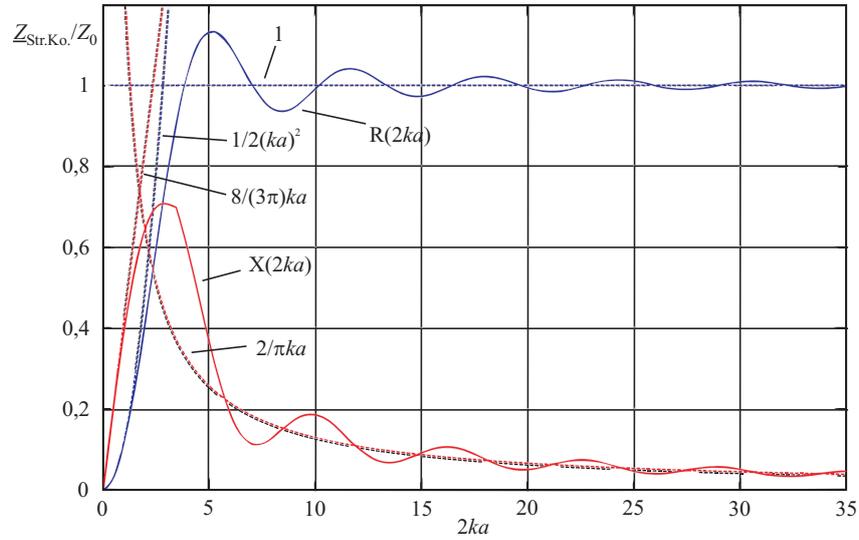


Abb. 3.13: Strahlungsimpedanz der Kolbenmembran in unendlicher Schallwand. Numerisch ermittelt (liniert), angenähert durch einfache Funktionen (gepunktet), vgl. [261, S. 100]

Damit stellt das Verhältnis aus Membranumfang und Wellenlänge eine entscheidende Größe für die Effektivität der Schallabstrahlung dar. Gerade bei der Abstrahlung tiefer Frequenzen werden sehr große Membranen benötigt, damit $R(2ka)$ möglichst groß und damit viel Wirkleistung abgestrahlt wird (Abb. 3.13). Die Forderung $ka > \sqrt{2}$ bedeutet z. B., dass für 100 Hz mit einer Wellenlänge von ca. 3,44 m der Membranumfang größer als das $\sqrt{2}$ -fache der Wellenlänge sein muss. Somit ist ein Membranradius von mehr als 77 cm erforderlich. Ist die Membran kleiner, kann nur mit einer größeren Membranschnelle, also mehr Membranauslenkung $\hat{\xi}$, die Wirkleistung erhöht werden. Der Zusammenhang zwischen der Membranschnelle und der Membranauslenkung ist nach [261, S. 102] durch Gl. 3.21 gegeben.

$$\tilde{v} = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \hat{\xi} \quad (3.21)$$

Für die in eine unendliche Schallwand eingebaute Kolbenmembran kann der Schalldruckpegel¹² auf der 0°-Achse für $ka < \sqrt{2}$ aus den Darstellungen in [261, S. 102] abgeleitet werden zu:

$$L_P|_{ka < \sqrt{2}} = 10 \log \left[\frac{2\pi^4 Z_0}{c^2 I_0} \left(\frac{f^2 a^2 \hat{\xi}}{r_{\text{Abst.}}} \right)^2 \right] \quad (3.22)$$

Mit der Verwendung der Konstanten ($Z_0 = 414 \text{ Ns/m}^5$ und $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ [261, S. 2ff.]) kann Gl. 3.22 angenähert werden durch Gl. 3.23.

$$L_P|_{ka < \sqrt{2}} = 10 \log \left[6,81574 \cdot 10^{11} \left(\frac{f^2 a^2 \hat{\xi}}{r_{\text{Abst.}}} \right)^2 \right] \quad (3.23)$$

¹² Diese Betrachtung gilt für den idealisierten Kolbenstrahler im Fernfeld.

3 Grundlagen

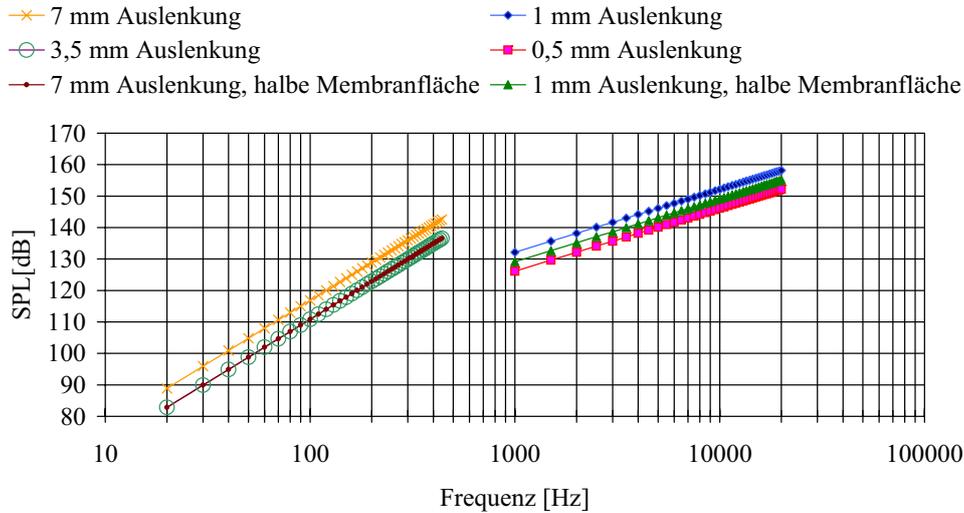


Abb. 3.14: Berechneter Schalldruckpegel einer $0,11 \text{ m}^2$ großen Kolbenmembran in einer unendlichen Schallwand für $ka < \sqrt{2}$ (Kurven unter 500 Hz) und $ka > \sqrt{2}$ (Kurven über 900 Hz) in 3 m Entfernung

Membranhub und Membranfläche können im Verhältnis 1:1 ausgetauscht werden. Eine Halbierung der Auslenkung kann durch eine Verdopplung der Fläche kompensiert werden. Eine Verdopplung entspricht jeweils einer Erhöhung des Schalldruckpegels um 6 dB (Abb. 3.14).

Für den Frequenzbereich $ka > \sqrt{2}$ ist Gl. 3.24 gültig.

$$L_p|_{ka > \sqrt{2}} = 10 \log \left[\frac{\pi^2 Z_0}{I_0} \cdot 10^{15} \left(\frac{f \hat{\xi} a}{r_{\text{Abst.}}} \right)^2 \right] \quad (3.24)$$

Werden in Gl. 3.24 die Konstanten eingesetzt, folgt daraus Gl. 3.25.

$$L_p|_{ka > \sqrt{2}} = 10 \log \left[4,08602 \cdot 10^{15} \left(\frac{f \hat{\xi} a}{r_{\text{Abst.}}} \right)^2 \right] \quad (3.25)$$

In diesem Frequenzbereich ist eine Halbierung des Membranhubs mit einer Ver vierfachung der Membranfläche kompensierbar (Abb. 3.14). Hierbei muss berücksichtigt werden, dass mit steigender Frequenz eine ausgeprägte Richtcharakteristik zu erwarten ist, die neben einer Hauptabstrahlkeule mehrere Nebenkeulen aufweisen kann. Demnach gilt der mit Gl. 3.25 ermittelte Schalldruck nicht für alle Positionen. Ist die Kolbenmembran in ein freistehendes, kleines, schalldichtes Gehäuse eingebaut, verringert sich die Strahlungs impedanz infolge der Kapselung einer Membranseite. In [261, S. 102] ist angegeben, dass für diesen Fall der Realteil der Strahlungs impedanz mit $\left[(ka)^2 + 1,5 \right] / \left[(ka)^2 + 3 \right]$ und der Imaginärteil mit $\left[(ka)^2 + \sqrt{2} \right] / \left[(ka)^2 + 2 \right]$ zu multiplizieren ist.

3.5 Akustische Kopplung zwischen Schallstrahlern

Werden zwei Schallstrahler gleichzeitig betrieben, so überlagern sich die einzelnen Schallfelder. Wie bei der Herleitung der Abstrahlcharakteristik für den Kolbenstrahler entscheidet der Phasenunterschied zwischen den Schallbeiträgen beider Strahler, ob es zu konstruktiven oder destruktiven Interferenzen kommt.

Strahlen beide Strahler das gleiche Signal phasengleich und kugelförmig ab, so findet für alle Frequenzen, deren achtel Wellenlänge größer gleich dem Strahlerabstand ist, eine nahezu konstruktive Überlagerung an jedem beliebigen Beobachtungspunkt statt (Abb. 3.15a) [54, S. 17ff.]. Die abstrahlende Fläche wird durch den zweiten Strahler verdoppelt. Entsprechend der Definition der Strahlungsimpedanz nach [261] in Gl. 3.15 wird dadurch die Strahlungsimpedanz ebenso verdoppelt. Die Verdopplung der Membranfläche S und des Realteils der Strahlungsimpedanz $R(2ka) \cdot Z_0$ führen in Gl. 3.20 zu einer Vervielfachung der Schalleistung. Der Schalldruckpegel erhöht sich infolgedessen um 6 dB (Gl. 3.23). Bezüglich der unteren Grenzfrequenz kommt es durch den Pegelgewinn von 6 dB bei einer abfallenden Flanke von 12 dB/Okt. zu einer Grenzfrequenzverringering. Die neue Grenzfrequenz entspricht dem $1/\sqrt{2}$ -fachen der vorherigen Grenzfrequenz.

Für größere Abstände treten je nach Beobachtungspunkt Phasenverschiebungen auf, die zu Auslöschungen führen. Maximal destruktive Interferenz findet immer dann statt, wenn der Wegunterschied beider Strahleranteile einem ungeradzahligem Vielfachen der halben Wellenlänge entspricht. Bei geradzahligem Vielfachen wird maximal konstruktiv überlagert. Das Abstrahlverhalten weist deshalb für höhere Frequenzen bzw. größere Strahlerabstände keine kugelförmige, sondern eine gerichtete Schallabstrahlung mit Abstrahlkeulen auf (Abb. 3.15b). Der Schalldruckpegel erreicht bei vollständig konstruktiver Überlagerung beider Schallanteile einen um 6 dB höheren Wert gegenüber dem Einzelstrahler. Durch die vorhandenen Nullstellen findet aber keine vollständig konstruktive Überlagerung statt, weshalb die

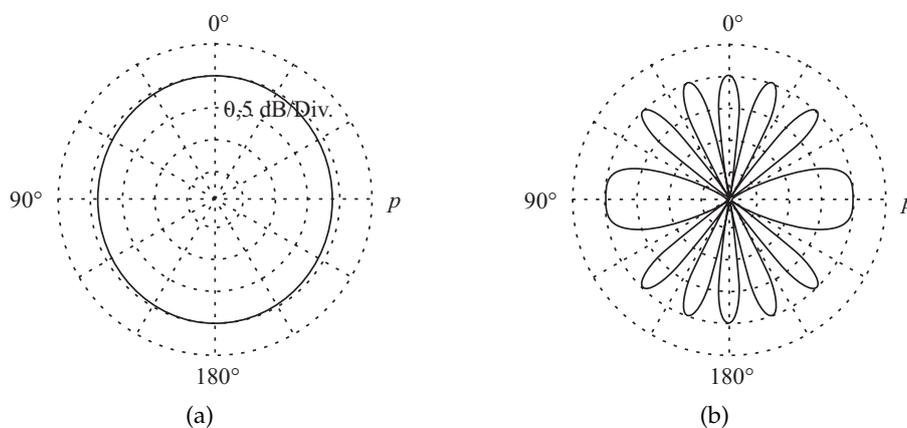


Abb. 3.15: Abstrahlcharakteristik von zwei gleich angesteuerten Kugelstrahlern, deren Abstand $(1/8)\lambda_0$ (a) und $3\lambda_0$ (b) beträgt, nach [54, S. 18]

3 Grundlagen

insgesamt abgestrahlte Schallleistung um 3 dB geringer gegenüber der Kopplung bei einem Abstand entsprechend einem Achtel der Wellenlänge ist [54, S. 20]. Für eine möglichst effektive Schallabstrahlung ist deshalb auf die akustische Kopplung zwischen den Strahlern zu achten.

3.6 Effekte bei gestörter Schallabstrahlung

Trifft Schall auf ein Hindernis, so entscheidet die Differenz zwischen der Schallfeldimpedanz in Luft und im Hindernis, ob es zu einer Reflexion oder Absorption bzw. Transmission kommt. Je größer der Unterschied ist, desto größer ist der Grad der Reflexion. Das Größenverhältnis zwischen der Wellenlänge und den Abmessungen des Hindernisses entscheidet über die Größe der Reflexion. Sind die Abmessungen sehr viel kleiner als die abgestrahlten Wellenlänge, so beugt der Schall sich um das Hindernis herum und breitet sich dahinter weiter aus (Abb. 3.16a). Aufgrund der geringen Abmessungen wird unabhängig vom Impedanzunterschied nahezu keine Energie reflektiert. Sind die Abmessungen sehr viel größer als die Wellenlänge, so kommt es je nach Impedanzdifferenz an der Hindernisoberfläche zu einer deutlichen Reflexion der Schallwelle (Abb. 3.16b). Hinter dem Hindernis entsteht eine Zone, in der nahezu keine Schallausbreitung stattfindet – die so genannte „Schattenzone“.

Da Impedanzsprünge zu Schallreflexionen führen, treten diese nicht nur an den Oberfläche, sondern auch an den Kanten eines Hindernisses auf. Das Gleiche gilt für Schall, der sich in einem Kanal ausbreitet und auf ein offenes Kanalende trifft. Hierbei sorgt die sprunghafte Änderung der Geometrie des Raumes, in dem sich der Schall ausbreitet, für eine sprunghafte Impedanzänderung, was eine Reflexion verursacht [79, S. 240ff.].

Reflexions- und Beugungserscheinungen beeinflussen auch das Übertragungsverhalten eines Lautsprechers. Drei wesentliche Vorgänge sind hierbei der akustische

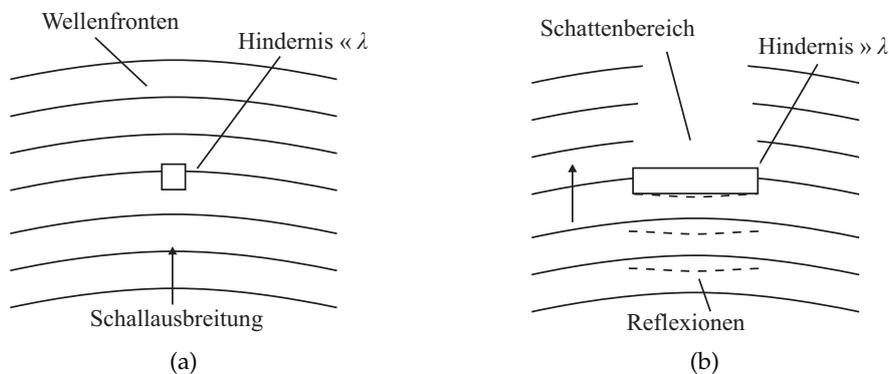


Abb. 3.16: Schematische Darstellung der Schallbeugung und -reflexion in Abhängigkeit von der Größe des Hindernisses

Kurzschluss, die Beugungsverluste am Lautsprechergehäuse und die Reflexionen an Gehäusekanten, die im Folgenden näher erläutert werden.

3.6.1 Akustischer Kurzschluss

Jede Membran erzeugt bei einer kolbenförmigen Bewegung einen Überdruck auf der Vorder- und einen Unterdruck auf der Rückseite. Für $ka \leq 1$ beugt sich der Schall um den Lautsprecher. Gibt es keine räumliche Trennung zwischen der Membranvorder- und Membranrückseite, so führt dies zu Druckausgleichströmungen, was als akustischer Kurzschluss bezeichnet wird. Der Schalldruckpegel erfährt dadurch eine Bedämpfung von 6 dB/Okt. Da die Schallanteile der Membranseiten gegenphasig aufeinander treffen müssen, ist der Einsatz des Kurzschlusses frequenzabhängig. Für einen Lautsprecher, eingebaut in eine endliche Schallwand, kann mit Gl. 3.26 abgeschätzt werden, für welche Frequenzen der Kurzschluss stattfindet [190, S. 16].

$$f \leq \frac{c_0}{4 \cdot r} \quad (3.26)$$

Dabei kennzeichnet r den Schallwandradius. Aus Gl. 3.26 geht hervor, dass zur Verhinderung des Kurzschlusses für tiefe Frequenzen unhandlich große Schallwanddurchmesser (1,72 m bei 100 Hz) erforderlich sind. Aus diesem Grund werden im Bereich konventioneller Lautsprecher vorwiegend Lautsprechergehäuse eingesetzt [180], [87].

3.6.2 Beugungsverluste

Aufgrund der Schallbeugung im Frequenzbereich $ka < 1$ ist der Raum, in den der Gehäuselautsprecher abstrahlt, von entscheidendem Einfluss. Unterschieden wird in erster Linie zwischen der Abstrahlung in den Halb- und den Vollraum. Bei der Abstrahlung in einen Halbraum, auch 2π -Abstrahlung genannt, handelt es sich um einen Lautsprecher, der in eine Schallwand eingebaut ist, die eine Schallbeugung um den Lautsprecher herum verhindert. Erfüllt wird diese Anforderung beispielsweise, wenn der Lautsprecher in eine Wand eingebaut ist. Es trifft aber auch dann zu, wenn der Lautsprecher direkt vor einer Wand hängt oder auf dem Fußboden steht und die Wellenlänge wesentlich größer als der Wand- bzw. Bodenabstand ist (Abb. 3.17a). In Abb. 3.17c ist der Amplitudenfrequenzgang eines Lautsprechers skizziert, der auf die Halbraumabstrahlung abgestimmt ist. Wird ein solcher Lautsprecher verwendet, um unter Vollraumbedingen, 4π , zu arbeiten, so kommt es wegen der Beugung zu Schalldruckpegelverlusten um bis zu 6 dB. Umgekehrt entsteht eine bis zu 6 dB große Schalldruckpegelüberhöhung, wenn ein auf Vollraumbedingungen abgestimmter Lautsprecher an die Wand gehängt oder auf den Fußboden gestellt wird. Aus diesem Grund muss bereits beim Entwurf des Lautsprechers die geplante Aufstellung berücksichtigt werden. Lautsprecher, die als Abhörlautsprecher für Tonstudios entworfen werden, besitzen deshalb in der Regel eine Möglichkeit zur manuellen Anpassung des Amplitudenfrequenzganges durch ein schaltbares Filter.

3 Grundlagen

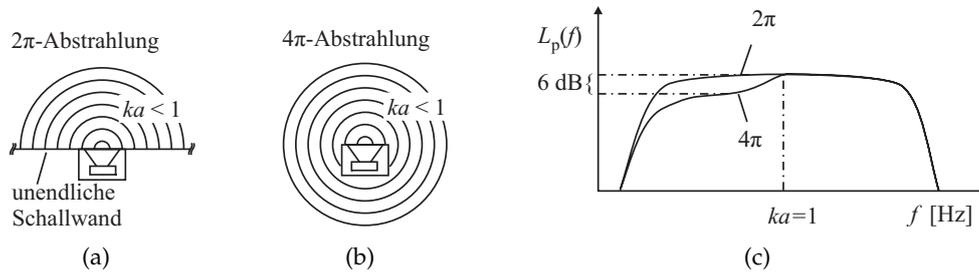


Abb. 3.17: Schematische Darstellung der Schallabstrahlung in einen Halbraum (a) und in einen Vollraum (b) und die damit verbundenen Pegelunterschiede (c)

3.6.3 Kammfilterartefakte

Bei der Ausbreitung der Schallwelle (Primärwelle) entlang der Schallwand eines Lautsprechergehäuses kommt es an den Schallwandkanten zu einer sprunghaften Änderung der Schallfeldimpedanz. Die Schallschnelle unmittelbar an der Gehäuseoberfläche ist nahezu Null (Abschnitt 6.1, S. 73ff.) [153, S. 95ff.]. Da hinter der Gehäusekante die Oberfläche abrupt eine andere Ausrichtung bekommt, findet auch eine sprunghafte Schnelleänderung statt. Diese bewirkt eine sprunghafte Änderung der Schallimpedanz. Da die Schallschnelle der Moleküle nach der Kante zunimmt, wird die Schallimpedanz kleiner. Für die reflektierten Schallanteile bedeutet dies eine Phasendrehung von 180° [153, S. 36] (Abb. 3.18a). Zur modellhaften Vorstellung beider Vorgänge kann die primäre Wellenfront entsprechend dem

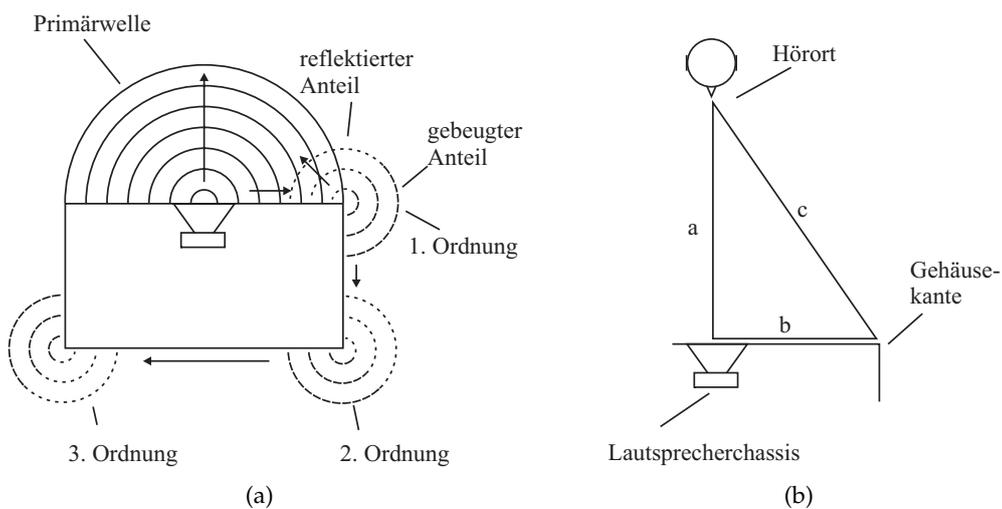


Abb. 3.18: Modell zur Erklärung der Beugungsvorgänge an den Kanten eines Lautsprechergehäuses (a) nach [139] und Gedankenmodell zur Abschätzung des Kammfiltereffektes (b) nach [255]

Huygensschen Prinzip¹³ in Elementarwellen zerlegt werden. Diese bilden durch Überlagerung die neuen Wellenfronten sowohl für den gebeugten als auch für den reflektierten Anteil. Am Hörort trifft neben dem Direktschall auch der an Kanten gebeugte und reflektierte Schall ein. Entsprechend der Kantenvielzahl eines Gehäuses entstehen mehrere Wellenfronten durch Reflexion und Beugung. Wird eine gebeugte Welle erneut gebeugt, so wird sie als Beugungswelle höherer Ordnung bezeichnet (Abb. 3.18a). Mit zunehmender Ordnung wird der Einfluss geringer, da bei jeder Beugung die Energie der gebeugten Welle abnimmt. Im Gegensatz zum Lautsprechergehäuse treten bei der Schallwand auch Beugungswellen auf, die von der rückwärtigen Schallabstrahlung stammen [35]. Je nach zeitlichem Versatz zwischen Direkt- und Reflexions- bzw. Beugungsschall kommt es zu konstruktiven und destruktiven Interferenzen. Die Folge sind Klangverfärbungen in Form von Kammfiltereffekten mit ± 5 dB Pegelschwankungen [164], [55] im Mitten- und Hochtonbereich und Veränderungen im räumlichen Abstrahlverhalten [33].

Ist die Wellenlänge groß im Verhältnis zu den Abmessungen der Schallwand bzw. des Gehäuses, so breitet sich der gebeugte Wellenanteil nahezu im gesamten Raum hinter der Kante aus. Ist die Wellenlänge klein gegenüber den Abmessungen, so findet nur eine beschränkte Ausbreitung statt, es bilden sich Schattenbereiche [261, S. 57]. Im Tieftonbereich kommt es durch die Schallbeugung um das Lautsprechergehäuse zu einem Schalldruckpegelverlust von ca. 6 dB gegenüber den Frequenzbereichen, die nicht gebeugt werden [68, S. 156ff.].

Zur analytischen Berechnung der Beugungsphänomene gibt es unterschiedliche Theorien bzw. Modelle, z. B. [236], [35], [255]. Eine einfache Abschätzung des zu erwartenden Kammfilters leitet Wright aus dem zeitlichen Versatz und der Anfangsphasenlage zwischen der primären und reflektierten Wellenfront her [255]. Demnach finden bei einem Wegunterschied $\Delta s = (2n - 1)\lambda_0/2$, ($n = 1, 2, 3, \dots$) konstruktive und für $\Delta s = n\lambda_0$ destruktive Interferenzen statt (Abb. 3.18b).

Wird die Wellenlänge durch die Schallgeschwindigkeit und die Frequenz ersetzt, $\lambda_0 = c_0/f$, können die Frequenzen der Überhöhungen und Auslöschungen im Amplitudenfrequenzgang bestimmt werden. Für alle $f = nc_0/\Delta s$ tritt eine Auslöschung und für alle $f = (2n - 1)c_0/(2\Delta s)$ eine Überhöhung auf [68, S. 159]. Wird der Lautsprecher genau mittig in eine kreisförmige Schallwand bzw. Gehäusefront eingebaut, ist der Abstand zu allen Kanten gleich groß. Demzufolge sind auch die Laufzeitunterschiede zwischen den Direkt- und den Reflexionsschallanteilen auf der 0° -Abstrahlachse für alle Kanten gleich. Dadurch sind die Kammfilterartefakte besonders stark ausgeprägt. Mit zunehmender Abweichung von der 0° -Achse ändern sich die Laufzeiten zwischen den Kanten und dem Hörort. Einbrüche und Überhöhungen im Amplitudenfrequenzgang, die allein auf der 0° -Achse auftreten, sind somit ein Hinweis auf Reflexions- bzw. Beugungsartefakte.

¹³ Wright verweist in [255] darauf, dass das Huygenssche Prinzip nicht ausreichend ist, um den gesamten Beugungsvorgang zu beschreiben. Er empfiehlt die Kombination aus Huygenschem- und Fresnelschem Prinzip sowie den Betrachtungen Kirchoffs zur Beugung der elektromagnetischen Welle.

Kapitel 4

Stand der Technik

Der Begriff Flachlautsprecher steht für eine Gruppe von Lautsprechern, die im Vergleich zu ihrer Membrangröße eine geringe Konstruktionstiefe aufweisen und einen breiten Frequenzbereich wiedergeben.

Es gibt verschiedene Flachlautsprechertechnologien. Die grundlegenden Bestandteile sind eine Membran¹ und ein Antriebssystem. Die Membran² ist entweder als Platte oder als Folie ausgelegt. Mittels eines elektromechanischen Antriebs wird sie zum Schwingen angeregt und generiert somit Schall. Anhand der Membranbewegung können die auf dem Markt bekannten Flachlautsprecher in die folgenden Kategorien unterteilt werden:

- Kolbenschwinger
- Biegeschwinger
- Dicken- bzw. Längenschwinger

Bei der Klassifizierung wurde das Auftreten unerwünschter Schwingungen nicht beachtet und vom Idealfall ausgegangen. Nachfolgend sind die Kategorien und einzelne Flachlautsprechervertreter dargestellt.

¹ Theoretisch möglich ist auch die Anwendung membranloser Wandlerprinzipien. Die Luftmoleküle werden hierbei direkt und nicht durch eine Membranbewegung in Schwingungen versetzt. Bekannte Vertreter hierfür sind der Plasmalautsprecher [187], [178], [137], [138], [254], [124] und der Lautsprecher auf der Basis von Nanotubes [258].

² Die Begriffe Platte und Membran werden in dieser Arbeit abweichend von ihrer Definition in der Mechanik verwendet.

4.1 Flachlautsprecher als Kolbenschwinger

4.1.1 Flacher Konuslautsprecher

Auf eine Membran wirken unterschiedliche Kräfte wie z. B. die Antriebskraft, die Rückstellkraft der Aufhängung und Trägheitskräfte. Um eine kolbenförmige Bewegung zu gewährleisten, muss entweder die Biegesteifigkeit der Membran ausreichend groß oder die Antriebskraft über der gesamten Membranfläche gleichmäßig verteilt sein. Zur Erhöhung der Biegesteifigkeit kann die Membran mit extra Verstrebungen ausgestattet werden oder eine spezielle Form besitzen. Ersteres bedingt in der Regel einen Massezuwachs, welcher die Empfindlichkeit des Lautsprechers verringert. Aus diesem Grund wird bei konventionellen Lautsprechern mit speziellen Membranformen wie z. B. die Konus- oder Kalottenform gearbeitet. Bereits 1936 ist in einer Patentanmeldung von Benecke ein Flachlautsprecher mit konusförmiger Membran skizziert worden, der direkt an der Wand hängt (Abb. 4.1) [48]. 1938 bewirbt Telefunken unter dem Titel „Eine neue Lautsprecherart: die Flachlautsprecher“ in den firmeneigenen Nachrichten einen Flachlautsprecher mit nur 5 cm Dicke. Um diese geringe Dicke zu erreichen, wurde der Magnet des elektrodynamischen Antriebssystems nicht in üblicher Weise hinter den Membrankonus, sondern in den selbigen eingebaut [216]. In Abb. 1.4 (S. 3) ist ein solcher Flachlautsprecher dargestellt.

Beim elektrodynamischen Antriebsprinzip wird ein beweglicher, vom Signalstrom I durchflossener Leiter der Länge l in einem statischen Magnetfeld mit der Flußdichte B infolge der wirkenden Lorentzkraft F_{Lor} ausgelenkt (Abb. 4.2). Dabei ist das Antriebssystem so gestaltet, dass die Strom- und die Magnetfeldlinienrichtung senkrecht zueinander stehen. Die Lorentzkraft steht wiederum senkrecht zu beiden Richtungen. Aufgrund des Wechselstromsignals ändert sich die Krafrichtung entsprechend der Signalfrequenz.

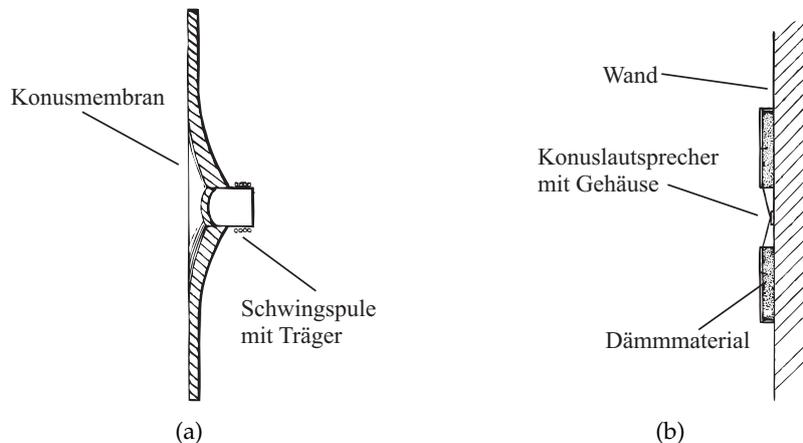


Abb. 4.1: Flachlautsprecher mit konischer Membranform (a) [203], (b) [48]

4.1 Flachlautsprecher als Kolbenschwinger

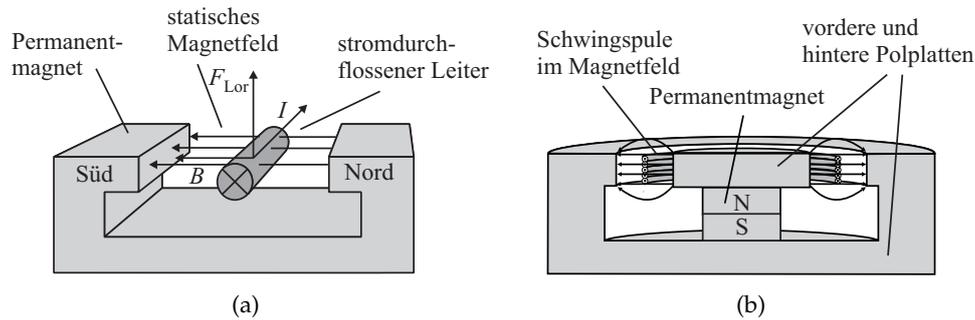


Abb. 4.2: Schematische Darstellung des elektrodynamischen Prinzips (a) und kreisförmige Ausführung (b), wie sie bei konventionellen Konuslautsprechern vorhanden sind.

Im Zusammenhang mit einer geringen Lautsprechertiefe besteht beim Konuslautsprecher die Schwierigkeit, dass die Konusform nicht beliebig flach gestaltet werden kann, ohne gleichzeitig die Steifigkeit zu verringern. Wie in Abschnitt 6.9 (S. 91) gezeigt wird, bietet die Verwendung von vielen kleinen Membranen, angeordnet zu einem Array, die Möglichkeit, eine geringe Bautiefe trotz Konusform zu erzielen. Darüber hinaus sind Patente mit weiteren Ansätzen zur Abflachung des Konuslautsprechers bekannt (Abb. 4.1b) [203].

4.1.2 Blatthaller

Ein weiterer Vertreter aus der Gruppe der Kolbenschwinger ist der Blatthaller. 1923 meldete Riegger das Blatthaller-Prinzip für einen Telefonlautsprecher zum Patent an [182]. 1925 wurde er bei der Einweihung des Deutschen Museums in München auch erstmalig zur Beschallung großer Auditorien eingesetzt. Mit größeren Modellen wie z. B. dem Riesenblatthaller – 53 cm × 53 cm Membranfläche – wurden je nach Wetterlage Entfernungen von einigen Kilometern überbrückt (Abb. 4.3a) [235, S. 200], [234, S. 303]. Der Blatthaller besteht aus einer möglichst biegesteifen,

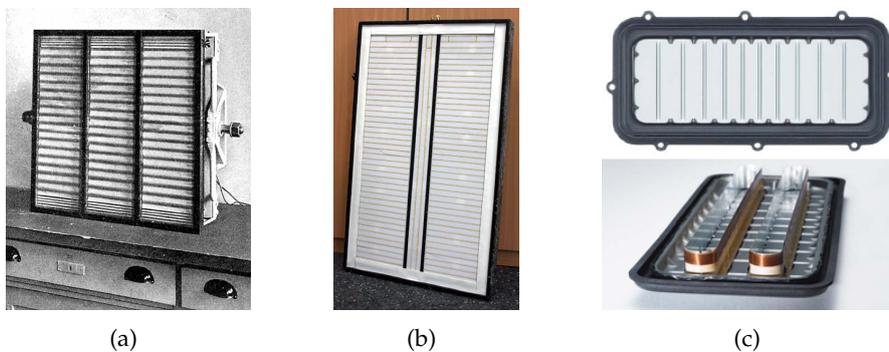


Abb. 4.3: Riesenblatthaller der Siemens & Halske AG (a) [83], Blatthaller EMC 5300 von Electro Magnetic Corporation (b) und ein MRS-Chassis der Firma Infinity nach dem Blatthallerprinzip (c) [232]

4 Stand der Technik

leichten Platte, z. B. Aluminium, die als Membran dient, und einem elektrodynamischen Erregersystem, welches die Platte zum Schwingen angeregt (Abb. 4.4). Damit die Antriebskraft die Platte möglichst gleichmäßig angreift und damit eine kolbenförmige Auslenkung bewirkt, sind die Leiterbahnen mäanderförmig auf der Platte verteilt. Die langen Leiterabschnitte befinden sich jeweils im Magnetfeld eines stabförmigen Permanentmagneten³. Auf jede dieser Leiterbahnabschnitte wirkt die Lorentzkraft. Da die Leiterbahnen und die Membran fest verbunden sind, wird die Kraft auf die Membran an diesen Stellen übertragen. Die angreifende Lorentzkraft errechnet sich nach [235, S. 200] aus Gl. 4.1.

$$F_{\text{Lor}} = B \cdot l \cdot I \quad (4.1)$$

Aufgrund der wesentlich einfacheren Fertigung, der geringeren Fertigungskosten und der steigenden Verstärkerleistungen⁴ wurde der Blatthaller in den 1930er Jahren vom Konuslautsprecher abgelöst [235, S. 200]. Damit ist er aber nicht gänzlich vom Markt verschwunden. In verschiedenen Produkten, z. B. GE'GO Orthophase Lautsprecher [17], EMC 5300 Blatthaller (Abb. 4.3b.) von Electro Magnetic Corporation⁵, und Patenten [146], [210], [259] taucht das Blatthaller-Prinzip immer wieder in verbesserter Form auf. Als aktueller Vertreter des Blatthaller-Prinzips kann beispielsweise der MRS-Mitteltonlautsprecher⁶ der Firma Infinity⁷ betrachtet werden (Abb. 4.3c) [232]. Eine wesentliche Herausforderung für den Blatthaller ist die Realisierung einer möglichst leichten und gleichzeitig steifen Membran, die keine Resonanzen im Übertragungsbereich aufweist. Der Hersteller Infinity setzt

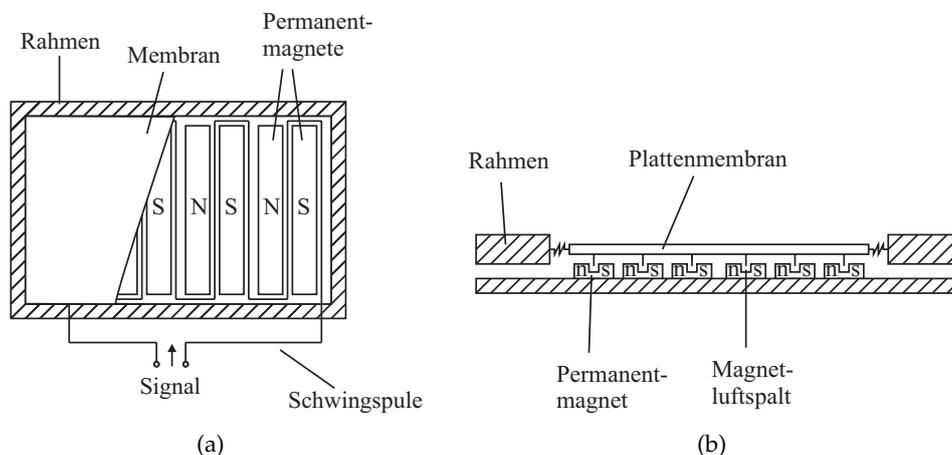


Abb. 4.4: Schematische Darstellung des Blatthaller-Prinzips in der Draufsicht (a) und im Schnitt (b) nach [182], [41]

³ In ersten Aufbauten wurden auch Elektromagneten verwendet, da starke Permanentmagneten nicht zur Verfügung standen [182].

⁴ Durch die größere Membranfläche besaß der Blatthaller einen größeren Strahlungswiderstand. So erzielte er bei gleicher Verstärkerleistung mehr Schalldruckpegel als andere Lautsprecher.

⁵ Electro Magnetic Corporation wurde später in Eymann Marquiss Corporation umbenannt und existierte von 1984 bis 1989.

⁶ MRSTM steht für Maximum Radiation Surface.

⁷ www.infinitysystems.com

4.1 Flachlautsprecher als Kolbenschwinger

dazu als Membran einen dünnen, steifen Aluminiumkern mit beidseitiger Keramikbeschichtung (Alumina) ein. Zusätzlich wird die Membran mit einer Prägung versehen, um eine noch höhere Biegesteifigkeit zu erreichen (Abb. 4.3b, c) [232].

4.1.3 Magnetostat

Der Magnetostat ist dem Blatthaller sehr ähnlich. Erste Patente zum klassischen Aufbau sind von Gamzon, Frei und Tibbetts aus den Jahren 1958/1959 [88], [221]. Es gibt auch noch wesentlich frühere Anmeldungen, z. B. aus dem Jahre 1920 [107]. Die darin vorgestellten Aufbauten enthalten aber sowohl Merkmale des Blatthallers als auch des Magnetostaten. Im Gegensatz zum Blatthaller wird beim Magnetostaten eine Folienmembran mit mäanderförmigen Leiterbahnen eingesetzt (Abb. 4.5). Dadurch wird die Membranmasse verringert, was eine größere Effektivität und bessere Hochtonwiedergabe bewirkt. Die Leiterbahnen befinden sich im Magnetfeld von stabförmigen Permanentmagneten, die in der Regel sowohl vor als auch hinter der Membran angebracht sind und so einen kräftigen, linearen Antrieb ermöglichen. Gemäß dem elektrodynamischen Prinzip wirkt auf die Membran wieder die Lorentzkraft (Gl. 4.1), so dass es zur Auslenkung kommt.

Vorwiegend wird der Magnetostat für die Wiedergabe des Hochtonbereiches eingesetzt. Es sind aber auch Vollbereichsmagnetostaten zu finden. Diese zählen wegen ihrer geringen Konstruktionstiefe zur Gruppe der Flachlautsprecher. Ein aktuell auf dem Markt erhältlicher Zweiwege-Magnetostat ist das Modell MG1.6 der Firma Magnepan⁸ (Abb. 4.6a) [16]. Laut Herstellerangaben besteht er aus einem 2852 cm² großen Tieftonstrahler und einem 619 cm² großen Hochtonstrahler und gibt bei einer Größe von 48 cm × 165 cm × 5 cm den Frequenzbereich von 40 Hz bis 22 kHz

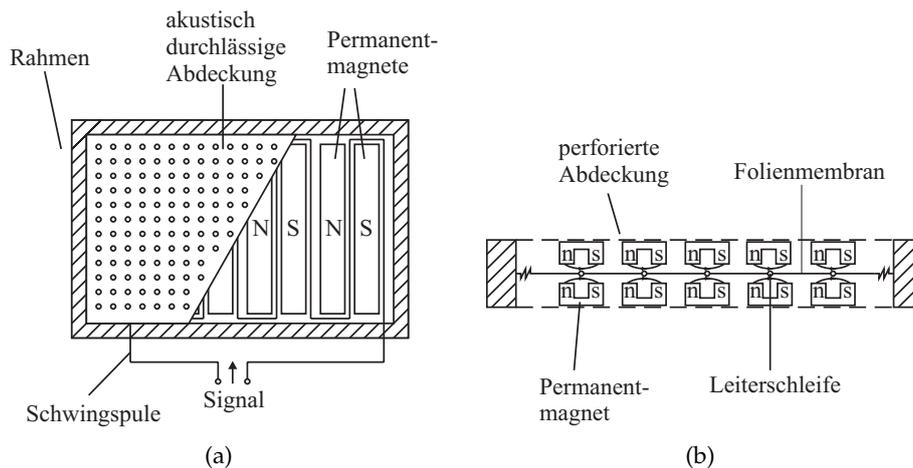


Abb. 4.5: Schematische Darstellung des magnetostatischen Prinzips in der Frontansicht (a) und in der Schnittansicht (b)

⁸ www.magnepan.com

4 Stand der Technik

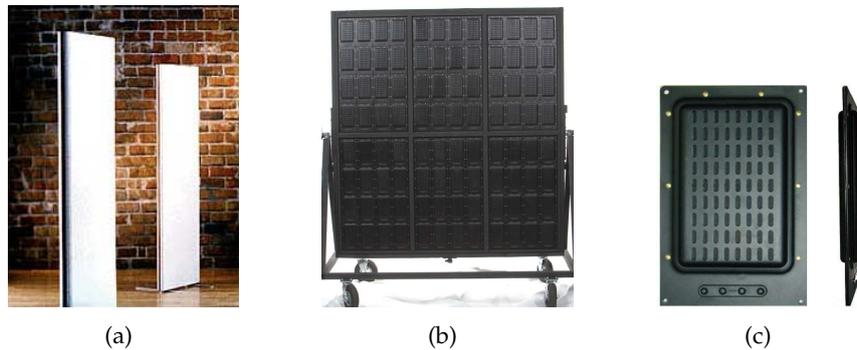


Abb. 4.6: Vollbereichsmagnetostat MG1.6 von Magnepan für den Heimbereich (a) [16] und Vollbereichsmagnetostaten-Array MAD LT-PMS-96 der Firma HPV Technologies LLC (b) aus MAD-Element (c) für den Beschallungsbereich [62]

(± 3 dB) wieder. Die Empfindlichkeit des MG1.6 ist mit $86 \text{ dB}/2,83 \text{ V}/1 \text{ m}$ angegeben [142]. Auch für den Beschallungsbereich gibt es Lautsprechersysteme, die allein auf dem magnetostatischen Prinzip basieren. Hierbei werden mehrere Magnetostaten zu einem Array angeordnet, um dadurch eine Vergrößerung der schallabstrahlenden Flächen zu erreichen. Dies bewirkt einen Pegelgewinn, der gerade im Tieftonbereich notwendig ist. In Abb. 4.6b,c ist ein solches Magnetostaten-Array der Firma HPV Technologies LLC⁹ dargestellt. 96 einzelne Treiber mit der Bezeichnung Magnetic Audio Device (kurz: MAD) und den Maßen $23,5 \text{ cm} \times 15,2 \text{ cm} \times 1,1 \text{ cm}$ sind zu einem $244 \text{ cm} \times 229 \text{ cm}$ großen Array angeordnet [109, S. 2]. Vom Hersteller wird für das Array ein Nutzfrequenzbereich von 70 Hz bis 20 kHz angegeben. Mit dem noch größeren MAD A9-Array kann die untere Grenzfrequenz auf etwa 50 Hz (-3 dB) herabgesetzt werden [63, S. 8]. Die Empfindlichkeit des Systems ist mit $96 \text{ dB}/1 \text{ W}/1 \text{ m}$ bei 3 kHz im Datenblatt aufgeführt [109, S. 2]. Zur Unterbindung der rückwärtigen Schallabstrahlung, z. B. in Bühnenrichtung, werden rückseitig Akustikdecken am Array befestigt [128].

4.1.4 Bändchenlautsprecher

1920 begannen Schottky und Gerlach an einer Membran zu forschen, deren Masse und Aufhängungssteifigkeit so gering¹⁰ sind, dass ihr Schwingungsverhalten allein durch die Massenträgheit und Steifigkeit der Luft bestimmt wird. Schottky betont allerdings in [193], dass dieser Ansatz bereits von mehreren Personen vor ihnen untersucht wurde [240, S. 8]. 1923 erfolgte dann von Gerlach eine Patentanmeldung für das Bändchenprinzip [95]. Der erste kommerzielle Bändchenlautsprecher wurde 1949 von Peter Walker¹¹ vorgestellt [240, S. 10].

⁹ www.getmad.com

¹⁰ Als Flächengewicht sind Werte um $4 \text{ mg}/\text{cm}^2$ typisch [92]

¹¹ Peter Walker gründete 1936 die Firma Acoustical Manufacturing Company. In den 1950ern wurde der Markenname QUAD (Quality Unit Amplified Domestic) für eine Vor-Endverstärkerkombination eingeführt. Dies führte dann zur Änderung des Firmennames in QUAD [20].

4.1 Flachlautsprecher als Kolbenschwinger

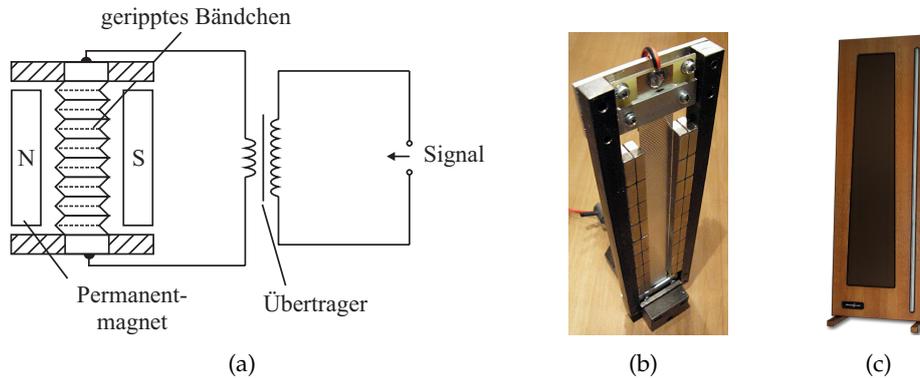


Abb. 4.7: Schematische Darstellung des Bändchenprinzips (a) nach [239, S. 92], Selbstbau-Bändchenlautsprecher (b) [92], Hochmittelton-Bändchenlautsprecher mit magnetostatischem Tieftöner ab 600 Hz (c) [18]

Auch der Bändchenlautsprecher nutzt das elektrodynamische Prinzip, wonach die Membran aufgrund der Lorentzkraft ausgelenkt wird. Die Membran besteht aus einer leitfähigen Folie, die gleichzeitig den einzigen stromdurchflossenen Leiter bildet. Sie befindet sich im Feld von Permanentmagneten (Abb. 4.7a). Da auf den gesamten stromdurchflossenen Leiter die gleiche Kraft wirkt, wird die gesamte Membran kolbenförmig ausgelenkt. Zur Erhöhung der Biegesteifigkeit ist die Membran leicht geriffelt. Da die Magnetsysteme an den Membranseiten angebracht sind, bestimmt die Membranbreite die Luftspaltgröße. Zur Gewährleistung eines ausreichend homogenen Magnetfeldes sind nur schmale, z. B. 1,2 cm breite [92], Membranen im Einsatz (Abb. 4.7b). Durch die geringe Membranbreite ist die Schallabstrahlung von tiefen Frequenzen schwierig. Bezogen auf die Strahlungsimpedanz überwiegt der Blindanteil im Tieftonbereich. Aus diesem Grund sind auf dem Markt keine Vollbereichs-Bändchenlautsprecher vorhanden. Wie beim Magnetostaten-Array von HPV Technologies ist auch hier ein Array-Aufbau zur Vergrößerung des Realteils der Strahlungsimpedanz denkbar. Auf diese Weise könnte ein Vollbereichs-Bändchenlautsprecher realisiert werden.

Bei Flachlautsprechern werden Hochmittelton-Bändchen in der Regel mit z. B. Tieftonmagnetostaten wie beim Modell Amphitryon der Firma Analysis Audio¹² kombiniert (Abb. 4.7c). Bei diesem Modell sind für die Schallwiedergabe oberhalb von 650 Hz mehrere Bändchen zu einer effektiven Membranfläche von ca. 400 cm² zusammengefasst. Im Frequenzbereich darunter wird der Schall durch Tieftonmagnetostaten mit einer effektiven Membranfläche von ca. 4800 cm² erzeugt. Der Lautsprecher gibt auf diese Weise den Frequenzbereich von 22 Hz bis 20 kHz wieder. Seine Abmessungen betragen 215 cm × 71 cm × 7 cm [3].

¹² www.analysisaudio.com

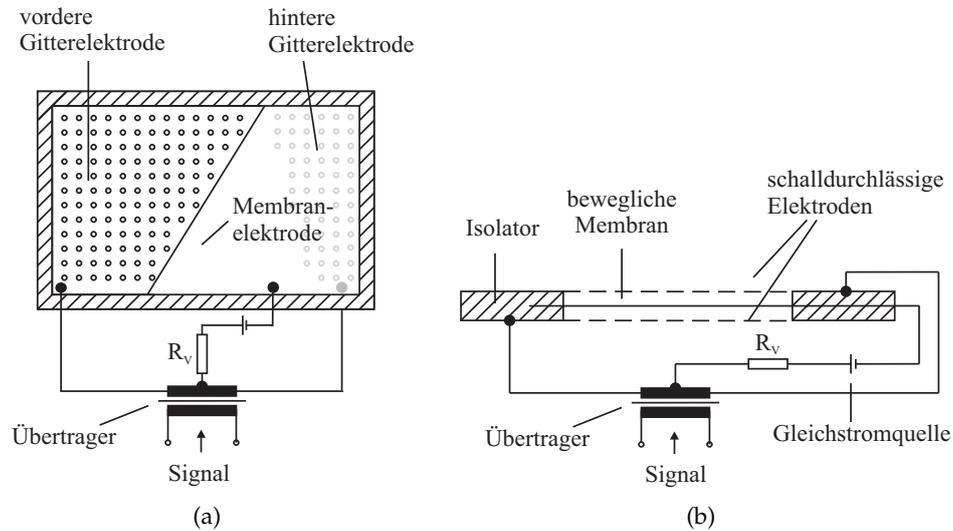


Abb. 4.8: Schematische Darstellung des Elektrostaten-Prinzips in der Frontansicht (a) und in der Schnittansicht (b)

4.1.5 Elektrost

Ein weiterer Kolbenschwinger ist der Elektrost. Fast zeitgleich meldeten sowohl die deutschen Erfinder des Lichttonverfahrens „Tri-Ergon“, Massolle, Vogt und Engl als auch Lee den elektrostatischen Lautsprecher im Jahre 1925 zum Patent an [150], [134]. Das grundlegende Funktionsprinzip findet sich allerdings schon in Patentanmeldung von 1907 und 1919 [246], [149].

Bei elektrostatischen Lautsprechern wird die Kraftwirkung zwischen elektrischen Ladungen ausgenutzt. Der dazu verwendete Aufbau ähnelt einem Plattenkondensator und ist in Abb. 4.8 dargestellt. Eine Kondensatorelektrode stellt die bewegliche Membran dar, die andere Elektrode ein festes Lochgitter. In der Regel wird je eine starre Gitterelektrode vor und hinter der Membran verwendet. Auf die Weise ist der Push-Pull-Betrieb¹³ (auch Gegentaktbetrieb genannt) möglich, der eine verbesserte Wirkungsweise ermöglicht. Als Membran dient eine Metall- bzw. metallisierte Kunststoffolie von ca. $5\ \mu\text{m}$ bis $15\ \mu\text{m}$ Dicke. Diese befindet sich in einem Abstand x von etwa $10\ \mu\text{m}$ zu je einer der schalldurchlässigen Gegenelektroden [86, S. 268]. Die Membranelektrode wird gegenüber den Gegenelektroden mit einer hohen Gleichspannung (ca. $5\ \text{kV}$) aufgeladen. Dies dient zum einen zur Linearisierung der Kraft-Spannungsbeziehung¹⁴ und zum anderen zur Erhöhung der Empfindlichkeit [261, S. 151]. Das wiederzugebende Nutzsignal wird über einen

¹³ Beim Push-Pull-Betrieb erfährt die Membranelektrode gegenüber der einen Gitterelektrode eine anziehende und gegenüber der anderen eine abstoßende Kraft.

¹⁴ Aufgrund des quadratischen Zusammenhangs zwischen der Signalspannung und der hervorgerufenen Antriebskraft treten Signalverzerrungen auf. Um diese Verzerrungen gering zu halten, wird durch eine hohe Gleichspannung zwischen den Gitterelektroden und der Membranelektrode der Arbeitspunkt des Elektrostaten in einen weniger nichtlinearen Bereich verschoben.

4.1 Flachlautsprecher als Kolbenschwinger

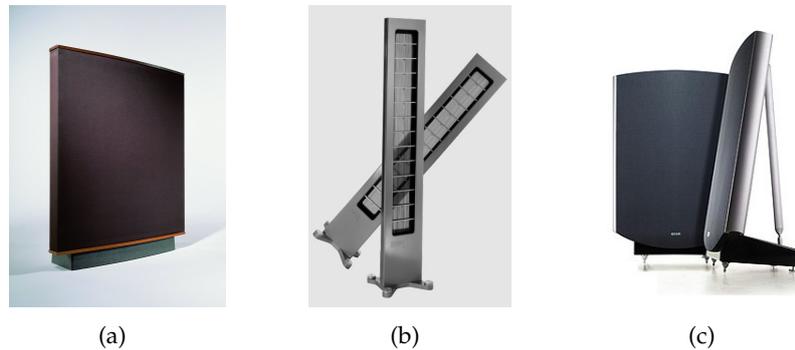


Abb. 4.9: Unterschiedliche Vollbereichselektrostaten: ESL-63 (a) [12], Audiostatic DCI von Audiostatic (b) [4] und Quad ESL-2805 (c) [19]

Transformator in der Spannungsamplitude verstärkt und auf die Membran und die Gegenelektroden geführt. Die zur Polarisation verwendete Hochspannung U wird nun durch die Nutzsignalspannung moduliert, wodurch zwischen der Membranelektrode und den Gegenelektroden je nach Phasenlage der Nutzsignalspannung jeweils eine anziehende und abstoßende Kraft wirkt (Gl. 4.2) [261, S. 151]. Dies führt zur kolbenförmigen Membranauslenkung. Mit \underline{I} ist der Nutzsignalstrom und mit ω die Kreisfrequenz gekennzeichnet.

$$\underline{F} = \frac{U}{x} \cdot \frac{\underline{I}}{j\omega} \quad (4.2)$$

Die maximale Membranauslenkung ist beim Elektrostaten nur wenige Millimeter groß. Der Grund dafür ist der geringe Abstand zwischen den festen Gitterelektroden. Je kleiner dieser ist, desto größer ist die wirkende Kraft auf die Membran. Ebenso treten bei geringen Auslenkungen weniger nichtlineare Verzerrungen auf. Mit einer Vergrößerung der Spannung an den Gitterelektroden könnte zwar bei einem größeren Abstand die gleiche Kraft erzielt werden, es besteht aber die Gefahr, dass ein elektrischer Durchschlag in der Membran stattfindet [261, S. 152].

Die maximal realisierbare Antriebskraft des Elektrostaten ist kleiner als die elektrodynamischer Lautsprecher. Bei Beschränkung auf einen geringen Wirkungsgrad (ca. 1 %) lassen sich Frequenzen um 40 Hz mit Membranflächen von ca. 3000 cm² im Gegentaktprinzip erreichen [86, S. 268]. Die bis zu 12 μm dicke Membranfolie aus beispielsweise Mylar ist sehr anfällig gegen äußere Einflüsse [190, S. 28].

Die im Allgemeinen großen Membranflächen bedingen eine unerwünscht stark gerichtete Schallabstrahlung. Bei dem wohl bekanntesten Elektrostaten, dem ESL-63 von QUAD¹⁵ (Abb. 4.9a), wurde die Membran deshalb in 6 Segmente unterteilt. Jedes dieser Segmente wird mit einer Zeitverzögerung von 20 μs angesteuert [247, S. 181ff.]. Dadurch wird die Schallabstrahlung aufgespreizt. Der ESL-57 und der ESL-63 werden heute nur noch als Nachbauten gefertigt und sind zum Paarpreis

¹⁵ In den 1950er wurde Acoustical Manufacturing in QUAD (Quality Unit Amplified Domestic) umbenannt. Heute gehört QUAD¹⁶ zur International Audio Group¹⁷ [20].

4 Stand der Technik

von ca. 5500 € erhältlich. Der Freifeldamplitudenfrequenzgang des ESL-63 erstreckt sich von etwa 40 Hz bis über 20 kHz bei einer Grenzfrequenzdefinition von -6 dB. Die Schwankungen im Übertragungsbereich sind kleiner ± 3 dB [248], [125, S. 93]. Aktuelle Marktprodukte sind der Vollbereichselektrostat DCI von Audiostatic¹⁸ (Abb. 4.9b) und der QUAD¹⁹ ESL-2805 (Abb. 4.9c). Laut Herstellerangaben überträgt der Audiostatic DCI den Frequenzbereich von 28 Hz bis 22 kHz und besitzt eine Größe von 188 cm \times 31 cm \times 6 cm [5]. Der Wiedergabefrequenzbereich des ESL-2805 ist mit 37 Hz bis 21 kHz angegeben. Seine Abmessungen betragen 104 cm \times 70 cm \times 39 cm [176]. Die große Tiefe ergibt sich wegen des breiten Standfußes.

Bei den Audioelementen des Herstellers Panphonics²⁰ handelt es sich ebenfalls um elektrostatische Lautsprecher. Die Gegenelektroden werden hier durch zwei steife, schalldurchlässige Filzlagen gebildet. Diese werden mit ihren leitfähigen Seiten so aneinander geklebt, dass sich kleine Luftkammern bilden. In diesen Luftkammern befindet sich die Membranelektrode, die durch die Luftkammern in kleine Abschnitte unterteilt ist. Diese Konstruktionsweise ermöglicht zum einen einen sehr flachen Aufbau, laut Herstellerangaben ca. 4 mm, und zum anderen kann die Membran gebogen werden, um die räumliche Schallabstrahlung zu beeinflussen [168]. Aufgrund der geringen Membranauslenkung sind die einzelnen Audioelemente nicht zur Wiedergabe des Frequenzbereiches unter 500 Hz geeignet. Durch den Zusammenschluss mehrerer Elemente und eine entsprechende Equalisierung kann der Übertragungsbereich zu tiefen Frequenzen erweitert werden.

4.2 Flachlautsprecher als Biegeschwinger

4.2.1 Distributed Mode Loudspeaker

Die auf dem Markt erhältlichen BiegeWellenwandler können in zwei Gruppen unterteilt werden. Die eine Gruppe strebt die Anregung aller vorhandenen Biege-Resonanzen der Membran an. Die andere Gruppe versucht, Membranresonanzen möglichst effektiv zu verhindern.

Der „Distributed Mode Loudspeaker“ (DML) gehört zur ersten Gruppe. Es wird mit einer möglichst breitbandigen Anregung aller vorhandener Biege-Resonanzen gearbeitet. Der Vorteil gegenüber den resonanzarmen BiegeWellenwandlern der zweiten Gruppe besteht darin, dass im Resonanzfall wenig Antriebsenergie ausreicht, um große Schwingungsamplituden zu erzeugen. Dies führt dazu, dass DMLs einen höheren Wirkungsgrad aufweisen können als Vertreter des resonanzarmen BiegeWellenwandlers²¹. Mit den Resonanzen treten aber auch Nachteile wie z. B. ein schlechteres Zeit- und Frequenzverhalten auf.

¹⁸ www.audiostatic.com

¹⁹ www.quad-hifi.co.uk

²⁰ www.panphonics.com

²¹ Aufgrund des Partialschwingungsverhaltens des BiegeWellenwandlers muss eine große Membranbewegung nicht automatisch zu einer großen Schallabstrahlung führen.

4.2 Flachlautsprecher als Biegeschwinger

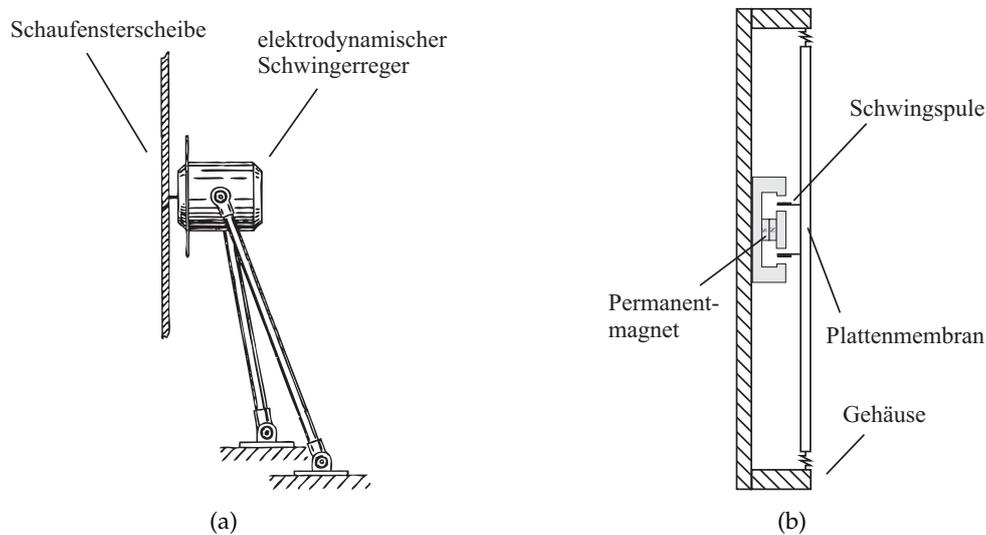


Abb. 4.10: Schematische Darstellung des BiegeWellenwandlers entsprechend der Patentanmeldung von Bauch im Jahre 1927 (a) [38]; moderne Ausführung mit Gehäuse (b)

Das beim DML verwendete Schallerzeugungsprinzip wurde bereits im Jahre 1927 von Bauch zum Patent angemeldet [38]. Bei der angemeldeten Konstruktion wird eine Schaufensterscheibe als Lautsprechermembran verwendet, die mit einem elektrodynamischen Schwingerreger – einem sogenannten „Exciter“ – in mechanische Schwingungen versetzt wird (Abb. 4.10a). Der praktische Nutzen der Patentidee besteht in der akustischen Unterstützung der Schaufensterreklame. 1929 folgte eine ergänzende Anmeldung zum Patententwurf von 1927. W. Bauch, Dietz und Bothe verbesserten das Prinzip, indem die Schwingerregerereinheit mit der Schaufensterscheibe fest verbunden wird [74].

Auch heute besitzen DMLs in der Regel ein elektrodynamisches Antriebssystem, da es die Kombination aus großer Kraft und großer Auslenkung bietet (Abb. 4.10b). Je nach Anwendungsfall sind diese unterschiedlich ausgeführt [184]. Als Membranmaterial können Glas, Holz, Kunststoff usw. verwendet werden. Allerdings werden zur Optimierung der akustischen Eigenschaften vorwiegend spezielle Materialkombinationen eingesetzt. Dadurch sollen das Auftreten und die Verteilung der Membranresonanzen beeinflusst werden, um Schall möglichst gleichmäßig im gesamten Hörfrequenzbereich zu erzeugen. Beliebte sind Sandwichplatten, z. B. mit Waben oder Hartschaumkern (Abb. 4.11a) [22], [21]. Mit diesem Mehrschichtaufbau können zum einen eine hohe Biegesteifigkeit mit einer geringen Eigenmasse vereint und zum anderen die frequenzabhängige Änderung der BiegeWellengeschwindigkeit verringert werden. Dadurch verringert sich die Änderung des Abstrahlwinkels mit der Frequenz²², wodurch – ähnlich dem Verhalten des Kolbenschwingers – für einen breiten Frequenzbereich nahezu die gleiche Hauptabstrahlrichtung erzielt

²² Wie in Abb. 3.9c (S. 22) dargestellt ist, führt der Unterschied zwischen der BiegeWellen- und der Luftschallwellenlänge zu einer Schallabstrahlung, die je nach Frequenz einen anderen Abstrahlwinkel besitzt. Daraus resultiert eine diffuse Schallabstrahlung, der eine Hauptabstrahlrichtung fehlt.

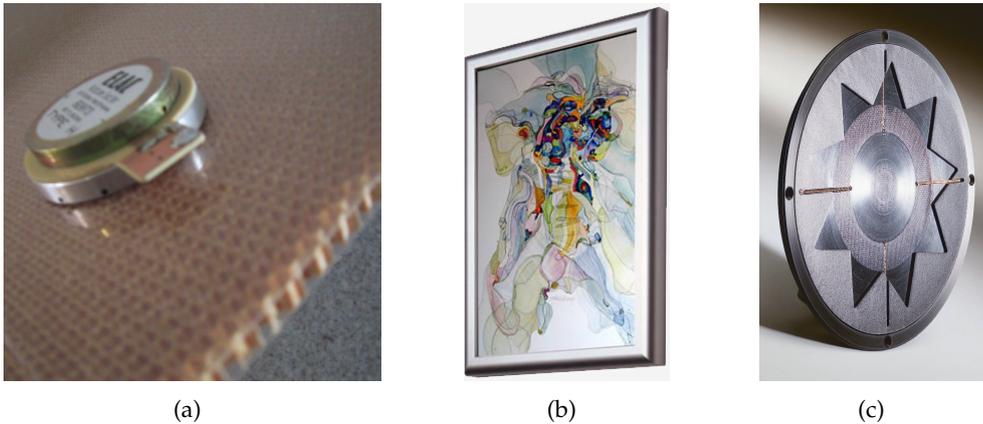


Abb. 4.11: Unterschiedliche Biegewellenwandler: DML mit Wabenkernmembran (a), DML - Imago von Fa. Elac mit Hartschaumkern [9] (b), Mangerschallwandler mit reflexionsarmer Biegewellenmembran [7] (c)

wird [250]. Der Schwingspulenträger und die Biegewellenmembran sind in der Regel miteinander verklebt. Bei einigen DMLs wird die gesamte „Exciter“-Masse über diese Klebung gehalten. Bei anderen Modellen wird der „Exciter“ über eine Brücke zusätzlich befestigt, sodass die „Exciter“-Masse nicht die Membran belastet [32].

Die „Exciter“-Position ist bestimmend für die Anregung der Membranresonanzen. Unterschiedliche Positionen bedingen eine unterschiedliche Resonanzanregung und Resonanzfrequenzverteilung. Das Ziel ist in der Regel eine möglichst gleichmäßige Anregung aller vorhandenen Biegeresonanzfrequenzen der Membran, um so eine breitbandige Schallwiedergabe zu ermöglichen. Bachmann und Krump gehen in einem ihrer Patente auf die Vorhersage entsprechend geeigneter „Exciter“-Positionen ein [31]. Bei der bereits erwähnten Gruppe der resonanzarmen Biegewellenwandler gibt es dementsprechend Ansätze, die „Exciter“-Position so zu wählen, dass so gut wie keine Resonanzanregung stattfindet [260].

Ein DML-Vertreter, der bis 2007 auf dem Markt erhältlich war, ist das Modell Imago 50/70 von Elac [10]. Laut Herstellerangaben erstreckt sich sein Wiedergabefrequenzbereich von 120 Hz bis 20 kHz bei einer Größe von 76 cm × 56 cm × 7 cm.

4.2.2 Mangerschallwandler

Im Gegensatz zum DML-Prinzip, bei dem bewusst Membranresonanzen zur Schallanregung genutzt werden, arbeitet die zweite Gruppe der Biegewellenwandler unter möglichst resonanzfreien Bedingungen. Dies kann auf zweierlei Weise erreicht werden. Zum einen kann die Anregungsposition der Membran so gewählt werden, dass wenig Resonanzen auftreten [260]. Dazu muss die Kraftangriffsstelle so gewählt werden, dass sie einer Knotenlinie der betreffenden Frequenz entspricht [260]. Zum anderen kann durch die Vermeidung der Biegewellenreflexion am Membranrand die Resonanzentstehung verhindert werden [42], [30], [61].

4.3 Flachlautsprecher als Dicken- bzw. Längenschwinger

Ein bekannter Vertreter des resonanzarmen BiegeWellenwandlers ist der Manger-schallwandler (MSW), den Manger 1972 zum Patent anmeldete (Abb. 4.11 c) [144]. Dieser BiegeWellenwandler besitzt eine gespannte Kunststoffmembran, deren Eigenschaften so beschaffen sind, dass auf dem Rand eintreffende BiegeWellen so gut wie nicht reflektiert und somit Resonanzen verhindert werden. Das Erregersystem arbeitet nach dem elektrodynamischen Prinzip. Aufgrund der angestrebten Resonanzverhinderung ist der Amplitudenfrequenzgang weniger von Resonanzeinbrüchen und -überhöhungen geprägt, als es bei einem DML der Fall ist [7]. Die Kombination der speziellen Membran und des darauf abgestimmten Erregersystems ermöglichen zudem ein sehr gutes Impulsverhalten, was zu einem der Hauptziele bei der Entwicklung dieses Wandlers zählte [145], [7].

Eine Membran arbeitet nur dann als Biegeschwinger, wenn die BiegeWellenlänge der wiederzugebenden Frequenzen kleiner gleich der größten geometrischen Abmessung ist. Ist dies nicht gegeben, so ähnelt das Schwingungsverhalten einem Kolbenschwinger. Bewusst wird dieses frequenzabhängige Verhalten beim MSW eingesetzt, um den hydrodynamischen Kurzschluss zu verringern. Der Mangerwandler arbeitet deshalb im unteren Frequenzbereich (< 150 Hz) ähnlich einem Kolbenschwinger und erst im Mittel- und Hochtonbereich als Biegeschwinger. Vom Hersteller wird als Übertragungsfrequenzbereich²³ 80 Hz bis 35 kHz angegeben [7]. Um nichtlineare Verzerrungen im Tieftonbereich zu minimieren, wird der MSW aber häufig erst ab 200 Hz eingesetzt und für die Tieftonwiedergabe ein konventioneller Tieftöner verwendet [143].

4.3 Flachlautsprecher als Dicken- bzw. Längenschwinger

4.3.1 Piezoelektrische Kristalle und Keramiken

Der piezoelektrische Dicken- bzw. Längenschwinger basiert auf dem umgekehrten piezoelektrischen Effekt. Dieser wurde 1881 von dem französischen Physiker Lippmann durch theoretische Betrachtungen vorhergesagt und von den Gebrütern Curie experimentell nachgewiesen [148]. Zur Erklärung soll zunächst vom direkten piezoelektrischen Effekt bei Kristallen ausgegangen werden.

Die in Abb. 4.12a vereinfachte Darstellung einer Kristallstruktur weist aufgrund ihrer Ionenanordnung drei polare Achsen ($A_1 - A_3$) auf. Diese zeigen die Dipolausrichtung an. In dieser Formation wirkt die Struktur nach außen elektrisch neutral, da sich die von den Ionen gebildeten Ladungsschwerpunkte der Dipole aufheben. Wird die Kristallstruktur durch mechanische Einflüsse von außen deformiert, kommt es zu Ladungsverschiebungen in der Struktur (Abb. 4.12b und c). Die Folge ist eine elektrische Polarisation, die an der Kristalloberfläche in Form einer elektrischen Spannung nachweisbar ist. Stimmen die Richtungen der deformierenden Kraft und

²³ Die Abweichungen gegenüber der Messkurve im Datenblatt beruhen laut Manger auf den nicht idealen Messbedingungen.

4 Stand der Technik

des elektrischen Feldes überein, so wird vom longitudinalen Effekt gesprochen (Abb. 4.12b). Stehen beide Richtungen senkrecht zueinander, handelt es sich um den transversalen Effekt (Abb. 4.12 c).

Beim umgekehrten piezoelektrischen Effekt kommt es durch das Anlegen einer elektrischen Spannung an der Oberfläche der Kristallstruktur zur geometrischen Deformation. Infolge des elektrischen Feldes wirken Kräfte, die zu einer Verschiebung der Ionen führen.

Da mit piezoelektrischen Kristallen nur sehr geringe Deformationen möglich sind, wurden ab den 1950er Jahren piezoelektrische Keramiken eingesetzt. Diese bestehen aus einer Vielzahl von Kristallkörnern. Entgegen der regelmäßigen Gitterstruktur bei Einkristallen wird durch das nicht ausgerichtete Zusammenfügen vieler Kristallkörner zur Herstellung von Keramiken eine unregelmäßige Gitterstruktur gebildet. Aufgrund der unregelmäßigen Orientierung der elektrischen Dipole heben sich die durch Deformation entstehenden Oberflächenladungen zum großen Teil gegenseitig auf. Die Struktur wirkt nach außen elektrisch neutral. Aus diesem Grund muss die Keramik in einem starken elektrischen Gleichfeld²⁴ bei Temperaturen über der Curie-Temperatur²⁵ vorpolarisiert werden, so dass sich die Anzahl der Dipole mit gleicher Orientierung erhöht.

Nach [172] kann die beim umgekehrten piezoelektrischen Effekt entstehende Dicken- bzw. Längenänderung ΔD bzw. ΔL anhand der Gleichungen 4.3 und 4.4 approximiert werden.

$$\Delta D \approx \pm E \cdot d_{33} \cdot D_0 \quad (4.3)$$

$$\Delta L \approx \pm E \cdot d_{31} \cdot L_0 \quad (4.4)$$

Hierbei stellen E die elektrische Feldstärke zwischen den Oberflächen, d_{33} und d_{31} den jeweiligen piezoelektrischen Konstanten und D_0 bzw. L_0 die Dicke bzw. -länge des piezoelektrischen Körpers im Ruhezustand dar. Für den longitudinalen

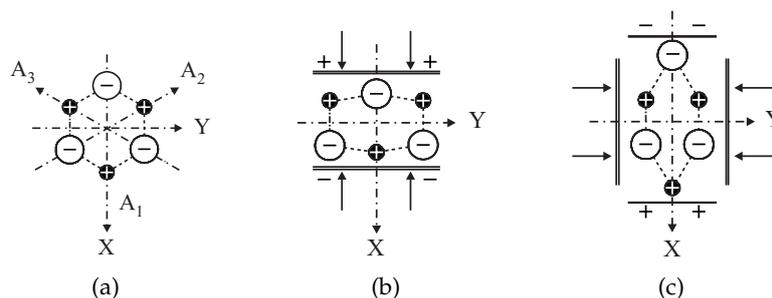


Abb. 4.12: Schematische Darstellung des piezoelektrischen Effektes anhand einer vereinfachten Kristallstruktur nach [123]

²⁴ z. B. 2 kV/mm

²⁵ Als Curie-Temperatur wird die Temperatur bezeichnet, oberhalb welcher keine permanente Polarisation vorhanden ist. Gelegentlich werden auch die Begriffe Übergangs- bzw. kritische Temperatur verwendet [66, S. 80ff.].

4.3 Flachlautsprecher als Dicken- bzw. Längenschwinger

Effekt ist d_{33} und für den transversalen Piezoeffekt d_{31} zu verwenden. Je größer das elektrische Feld, die piezoelektrischen Konstanten und die Anfangsdicke bzw. -länge sind, desto größer ist die Deformation. Die Feldstärke kann nicht beliebig vergrößert werden, da es sonst zur Depolarisation kommt. Die maximalen Dicken- bzw. Längenänderungen sind deshalb begrenzt. Der Hersteller PI-Ceramic gibt als Näherung für die maximal erreichbare Dicken- bzw. Längenänderung 0,1 % der Ausgangsdicke bzw. -länge an [179].

Im Vergleich zu Piezokristallen sind Keramiken mit geringeren Kosten in großen Mengen herstellbar. Ebenso bieten sie den Vorteil, vor dem Sintern beliebig formbar zu sein. Infolge der nachträglichen Polarisation ist die Dipolausrichtung frei wählbar. Außerdem weisen sie Piezomodule auf, die etwa um den Faktor 100 größer als die von Kristallen sind (Tab. 4.2, S. 55).

Keramiken besitzen gegenüber Kristallen jedoch auch Nachteile. So neigen sie zur Depolarisation, die besonders durch Temperaturen nahe der Curie-Temperatur verursacht wird [158]. Ebenso schwanken ihre Piezomodule stärker mit der Temperatur [90], [136].

Die maximale Antriebskraft F_{dyn} einer Piezokeramik bei sinusförmigem Betrieb ist mit Gl. 4.5 [172, S. 4-24] abschätzbar.

$$F_{\text{dyn}} = \pm 4\pi^2 \cdot m_{\text{eff}} \left(\frac{\Delta D}{2} \right) f^2 \quad (4.5)$$

Hierbei stehen m_{eff} für die effektive Masse der Piezokeramik und evtl. Zusatzmassen, ΔD für die maximale Dickenänderung (Spitze-Spitze) und f für die Signalfrequenz.

Aufgrund der kleinen Schwingungsamplituden und dem gleichzeitigen Auftreten des longitudinalen und des transversalen Effektes bei piezoelektrischen Kristallen und Keramiken werden piezoelektrische Dicken- bzw. Längenschwinger nicht direkt zur Schallanregung verwendet. Durch eine Transformation der Dicken- bzw. Längenschwingungen in Biegeschwingungen können größere Schwingungsamplituden erreicht werden (Abb.4.13). Aufgrund der veränderten Membranbewegung zählen diese Lautsprecher dann nicht mehr zur Gruppe der Dicken- bzw. Längenschwinger, sondern zu den Kolben- bzw. Biegeschwingern. In Abb. 4.13a dienen

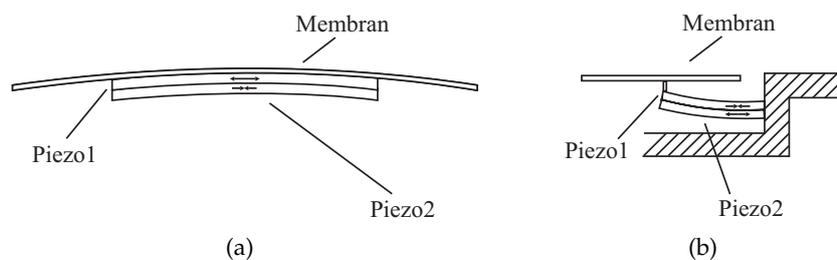


Abb. 4.13: Nutzung zweier gegenpolig betriebener Längenschwinger als Lautsprecherantrieb für einen Biegeschwinger (a) und einen Kolbenschwinger (b)

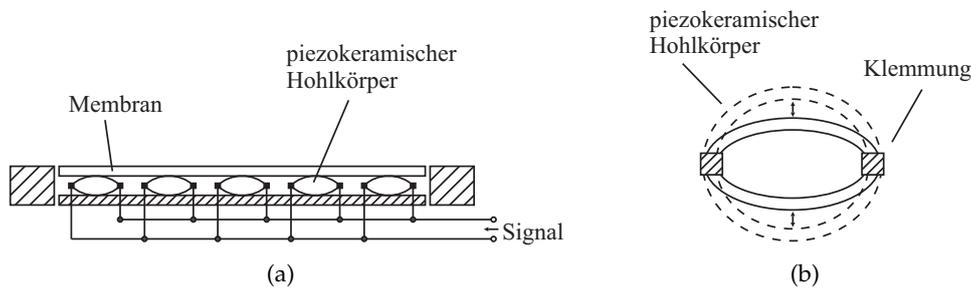


Abb. 4.14: Kolbenschwinger mit piezoelektrischen Hohlkörpern (a), realisiert durch kombinierte Biegeschwinger (b) als Antrieb

zwei gegensätzlich gepolte Piezoscheiben als Antriebssystem. Während die eine Scheibe eine Verkürzung in der Länge erfährt, wird die andere gestreckt. Durch die feste Verbindung der Scheiben kommt es zu einem Verbiegen, was auf die Membran übertragen wird. In Abb. 4.13b wird das Verbiegen der Piezoscheiben zur Auslenkung einer Kolbenmembran verwendet. Eine weitere Möglichkeit ist in Abb. 4.14 dargestellt. Zwei gebogene Piezokeramiken werden an den Enden aneinander befestigt und zusätzlich festgeklemmt. Auf diese Weise bilden sie einen Hohlkörper mit elliptischem Querschnitt. Infolge einer Längenänderung kommt es zu einer pulsierenden Querschnittsveränderung. Diese wird auf die angekoppelte Kolbenmembran übertragen.

4.3.2 Piezoelektrische Polymere

Bei piezoelektrischen Polymeren handelt es sich um flexible, piezoelektrische Materialien, die auf unebene, flexible Oberflächen aufgebracht werden können. Dazu zählen beispielsweise Polyvinylidenfluorid (PVDF) und geschäumtes Polypropylen, welches von der Firma Emfit²⁶ unter der Bezeichnung EMFi (ElectroMechanical Film) vertrieben wird. Wie piezoelektrische Keramiken müssen Polymere einer Polarisierung bei Temperaturen über der Curie-Temperatur unterzogen werden, damit sie piezoelektrische Eigenschaften aufweisen.

PVDF

1969 entdeckte Kawai den piezoelektrischen Effekt in PVDF [116]. Er stellte fest, dass im Vergleich mit anderen Polymeren die piezoelektrischen Eigenschaften bei PVDF über viele Jahre erhalten bleiben [77]. Die Curie-Temperatur liegt bei ca. 80 °C und liegt somit tiefer als bei Keramiken und Kristallen. Neben dem Überschreiten der Curie-Temperatur besteht durch die hygroskopische Einlagerung von Wasser die Gefahr der Depolarisation [136, S. 239].

²⁶ www.emfit.com

4.3 Flachlautsprecher als Dicken- bzw. Längenschwinger

Wie bei piezoelektrische Keramiken gibt es bei PVDF einen longitudinalen und einen transversalen Effekt. Aufgrund der geringen Foliendicke sind Änderung in Dickenrichtung zu gering für eine Schallanregung. Die Längenänderungen sind infolge der größeren Ausdehnung der Folie in Längsrichtung größer. Da aber durch die Längenschwingungen so gut wie keine Luftmoleküle zur Anregung von Schall verschoben werden, wird die PVDF-Folie gebogen bzw. gewellt verwendet. Dadurch kommt es bei einer Längenveränderung zu einer Luftverschiebung in den Faltenspalten (Abb. 4.15a) [162]. Durch die Falten wird die Längenschwingung der Folie ideal betrachtet in eine Kolbenschwingung transformiert. Damit die Schallbeiträge benachbarter Falten sich nicht gegenseitig auslöschen, muss entweder die Polarität der Ansteuerung zwischen benachbarten Falten wechseln oder jede zweite Falte festgeklemmt werden. In [162] und in [167] werden verschiedene Ausführungen dieser gefalteten PVDF-Konstruktion vorgestellt. Mit einer mehrfach gefalteten $74\ \mu\text{m}$ dicken und $24\ \text{cm} \times 11,4\ \text{cm}$ großen PVDF-Folie werden dort $72,8\ \text{dB}$ in $30\ \text{cm}$ Abstand bei $25\ \text{mW}$ an $2,1\ \text{k}\Omega$ erreicht. Die Folie ist in ein geschlossenes Gehäuse eingebaut (Abb. 4.15a). Die Faltenbreite beträgt $9\ \text{mm}$, die Tiefe wurde variiert (Abb. 4.15b). Der Amplitudenfrequenzgang beider Konstruktionen weist Schwankungen von bis zu $\pm 10\ \text{dB}$ auf [162]. Bei größerer Faltentiefe zeigt sich ein Tieftongewinn. Dies wird darauf zurückgeführt, dass zum einen mehr Luft bewegt wird und zum anderen die bewegte Masse aus Luft- und Membranmasse die Grundresonanz jeder Falte herabsetzt [162]. Infolgedessen erfolgt der Schnelleabfall erst bei tieferen Frequenzen. In [69] ist die PVDF-Folie zur Stabilisierung auf einem gebogenen Trägermaterial angebracht. In [209] wird ein gebogenes Display vorgestellt, welches infolge der darauf klebenden PVDF-Folie gleichzeitig Schall wiedergeben kann.

EMFi

1984 meldete Kirjavainen piezoelektrischen Polypropylenschaum zum Patent an [121]. Im Gegensatz zu PVDF und Keramiken weisen piezoelektrische Polymer-schäume einen wesentlich geringeren transversale piezoelektrische Konstante auf [93]. Deshalb erfüllen sie wesentlich besser die Anforderungen an einen reinen Dickenschwinger. Vorstellbar ist, dass ein solcher Dickenschwinger, angebracht an

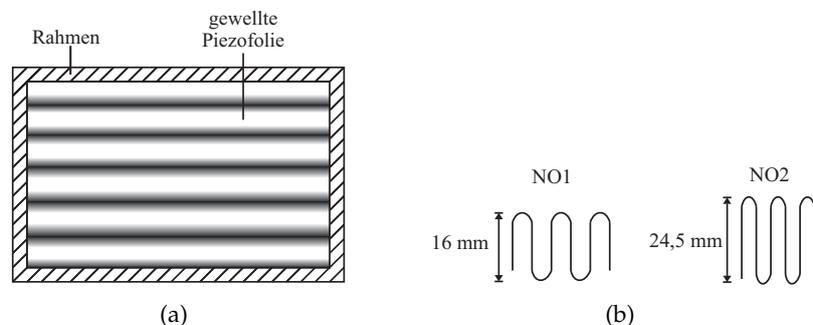


Abb. 4.15: Lautsprechermembran aus gewellter PVDF-Folie mit 16 mm und mit 24,5 mm Faltentiefe [162]

4 Stand der Technik

einer Wand, durch Dickenschwingung Schall erzeugt. Bei EMFi handelt es sich um eine sehr dünne Kunststoffolie²⁷ mit zahlreichen linsenförmigen Lufteinschlüssen im Mikrometerbereich. Um piezoelektrische Eigenschaften zu erhalten, wird die Folie in ein hohes elektrisches Gleichfeld gebracht, bei dem es in den Lufteinschlüssen zu elektrischen Durchschlägen kommt. Dies hat zur Folge, dass die inneren Flächen der Hohlräume elektrisch geladen sind und damit Dipole darstellen (Abb. 4.16a) [93]. Die Dipol-Ausrichtung sorgt weiterhin dafür, dass die Folie ein Elektret darstellt, also eine eingeprägte elektrische Oberflächenspannung besitzt. Diese innere elektrische Spannung bewirkt einen Kraftangriff an den Dipolen, weshalb bereits im Ruhezustand eine statische Dickenverringerung vorhanden ist. Durch Anlegen einer zusätzlichen „äußeren“ elektrischen Spannung kommt es zu einer Erhöhung bzw. Verringerung dieser Kompression bezüglich der Richtung des elektrischen Feldes (Abb. 4.16b) [135]. Trotz großem longitudinalen Piezomodul sind die Dickenänderungen gering, da die Foliendicke lediglich $70\ \mu\text{m}$ beträgt. Nach [135] kann die Dickenänderung mit Gl. 4.6 berechnet werden.

$$\Delta D = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\Delta U^2 + 2U\Delta U}{YD_0} \quad (4.6)$$

Hierbei kennzeichnen ΔD die Dickenänderung, D_0 die Foliendicke im Ruhezustand, ϵ_0 und ϵ_r die Permittivitäts- und relative Permittivitätskonstante, U die Spannung im Material infolge der Dipole, ΔU die Spannung des Nutzsignals und Y den Elastizitätsmodul (Y-Modul). In Tab. 4.1 sind die Herstellerangaben zu zwei EMFi-Folien aufgeführt [135]. Aus Gl. 4.6 geht hervor, dass die Dickenänderung durch eine Erhöhung der Signalspannung vergrößert werden kann. Nach [135] sind für den EMFi-Typ O01 1 kV und für den Typ HS01 2 kV Maximalspannung zulässig. Werden diese Spannungen überschritten, kommt es zu Durchschlägen zwischen den Elektroden und damit zur Zerstörung.

Wie auch bei Keramiken kann die Dickenänderung durch eine Schichtung mehrerer Folien bzw. die Faltung einer Folie zu mehreren Schichten erhöht werden. Probleme

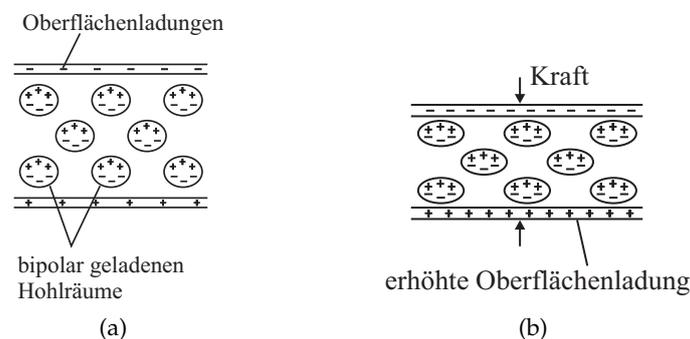


Abb. 4.16: Schematischer Aufbau einer EMFi-Folie zur Verdeutlichung des piezoelektrischen Verhaltens im unbelasteten (a) und im belasteten Zustand (b), nach [93].

²⁷ Die Dicke ist abhängig von der Ausführungsform und liegt bei ca. $50\ \mu\text{m}$ [135].

4.3 Flachlautsprecher als Dicken- bzw. Längenschwinger

Parameter	Typ O01	TypO02	Einheit
Empfindlichkeit	30	160	pC/N
Dicke	37	70	μm
Dichte	550	330	kg/m^3
rel. Permittivität	1,6	1,2	–
Verlustfaktor	< 0,01	< 0,01	–
Kapazität	40	14	pF/cm^2
Y-Modul	$\approx 9 \cdot 10^6$	$\approx 1 \cdot 10^6$	Pa
Temperaturbereich	-40 bis 50	-40 bis 50	$^{\circ}\text{C}$

Tab. 4.1: Herstellerangaben zu zwei verschiedenen EMFi-Folien [135]

matisch ist hierbei die Verhinderung von Lufteinschlüssen zwischen den Folien. Dies kann zu einem zusätzlich elektrostatisch wirkenden Effekt führen.

In Tab. 4.2 sind abschließend ausgewählte Eigenschaften der drei vorgestellten Gruppen piezoelektrischer Dickenschwinger dargestellt. Der zulässige Temperaturbereich für EMFi beträgt je nach Ausführungsform -20°C bis 50°C [135].

4.3.3 Weitere Dicken- bzw. Längenschwinger-Prinzipien

Neben dem piezoelektrischen Effekt gibt es noch andere Phänomene, die eine Volumendeformation hervorrufen. Dazu zählen unter anderem die Magnetostriktion und die Elektrostriktion.

Ähnlich den Vorgängen bei piezoelektrischen Materialien erfährt bei der Elektrostriktion jedes polarisierbare Material eine mechanische Deformation, wenn es einem elektrischen Feld ausgesetzt ist. Diese ist im Gegensatz zur Piezoelektrik, wo zwischen Dehnung und elektrischer Feldstärke eine lineare Beziehung vorliegt, proportional zum Quadrat der elektrischen Feldstärke. Damit ändert sich die Deformation nicht bei der Umkehr der Feldrichtung [58]. Nach [152] ist die Elektrostriktion immer dem piezoelektrischen Effekt überlagert, aber bei den meisten piezoelektrischen Materialien vernachlässigbar klein.

Parameter	Quarz	Keramik	Polymer (PVDF)	Einheit
d_{33}	2,3	ca. 12 - 540	-27	10^{-12} m/V
d_{31}	-2,3	ca. -5 - (-260)	20	10^{-12} m/V
Dicke	–	≥ 20	≥ 5	μm
Polarisationsspannung	–	2	100	kV/mm
Curie-Temperatur	575	≤ 365	80	$^{\circ}\text{C}$

Tab. 4.2: Ausgewählte Eigenschaften von Quarz, Piezokeramik und Polymer (PVDF) [136, S. 237ff.]

4 Stand der Technik

Bei der Magnetostriktion erfahren ferromagnetische Körper eine Längenänderung, wenn sie einem Magnetfeld ausgesetzt werden [239, S. 92ff.]. Hierbei werden die Luftspalte zwischen den Molekülen des ferromagnetischen Materials verändert. Die relativen Längenänderungen liegen allerdings nur im Mikrometerbereich. Dennoch liegt der Wirkungsgrad mit 90 % ungewöhnlich hoch. Der Wiedergabefrequenzbereich erstreckt sich von 10 kHz bis 500 kHz. Das hauptsächliche Einsatzgebiet dieser Technik ist die Erzeugung von Unterwasserschall, beispielsweise für Echolotwendungen.

4.4 Zusammenfassung

Die Betrachtungen in den vorhergehenden Abschnitten verdeutlichen, dass die meisten Flachlautsprechertechnologien bereits älter als 60 Jahre sind. Bei einer Bautiefe von nur wenigen Zentimetern ist je nach Technologie die Wiedergabe des Frequenzbereiches von 50 Hz bis 20 kHz möglich. In der Regel werden dazu mehrerer Technologien kombiniert. Trotz dieser Eigenschaften bieten Flachlautsprecher nicht ohne Weiteres die Möglichkeit einer platzsparenden Installation. Bereits im Jahre 1936 war bekannt, dass die Installation von Flachlautsprechern direkt an der Wand zu einer verringerten Tieftonwiedergabe und zu kammfilterartigen Klangverfärbungen im Mittentonbereich führt [48]. Diesem Problem entgegenwirkend werden Elektrostaten, Magnetostaten und BiegeWellenwandler in der Regel nicht direkt an der Wand, sondern mit einem Mindestabstand²⁸ betrieben. Zusätzlich zum Wandabstand soll bei Elektrostaten eine wandparallele Aufstellung vermieden werden, da sonst die reflektierten Schallwellen auf die Membran treffen und das Schwingungsverhalten beeinflussen [190, S. 180ff.], [247, S. 229].

Die Ursache für die Klangbeeinträchtigungen bei direkter Wandmontage ist die durch Reflexionen an der Wand verursachte Interferenz zwischen den Schallanteilen der Membranvorder- und Membranrückseite (Abschnitt 5.2, S. 60ff.). Als Gegenmaßnahme ist das Einbringen von Schallabsorptionsmaterialien zwischen Flachlautsprecher und Wand bekannt [48], [190, S. 19], [175]. Für eine ausreichende Reflexionsunterdrückung sind allerdings derart große Mengen Absorptionsmaterial erforderlich, dass eine Lautsprecherdicke²⁹ von weniger als 5 cm nicht möglich ist [80, S. 72]. Die Verwendung eines Lautsprechergehäuses – sei es zur Verhinderung der Interferenzen oder anwendungsbedingt erforderlich – führt je nach Größe ebenso zu einer Verringerung der Tieftonwiedergabe [190, S. 18], [45].

Der Einsatz herkömmlicher Flachlautsprechertechnologien ermöglicht somit keine platzsparende Alternative gegenüber konventionellen Konuslautsprechern (Tab. 4.3). Da aber gerade die Suche nach einer unauffälligen Integration von Wiedergabesystemen das Interesse an Flachlautsprechern in den letzten Jahren gesteigert hat,

²⁸ In den Bedienungsanleitungen aktueller Elektrostaten und Magnetostaten sind Angaben von mindestens 60 cm zu finden [13], [142].

²⁹ Für eine 80 %ige Schallabsorption bei 100 Hz ist eine Absorptionsschicht von etwa 40 cm Dicke erforderlich [80, S. 72].

4.4 Zusammenfassung

wurde im Rahmen dieser Arbeit nach neuen Lösungsmöglichkeiten gesucht. Dazu war eine genaue Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der wandnahen Aufstellung bzw. dem Einbau in ein flaches Gehäuse und den daraus resultierenden Klangbeeinflussungen notwendig (Kapitel 5, S. 59ff.).

Parameter	Elektrostat DCI, ESL 2850	Magnetostat MAD MG1.6	Bändchen Aphitryon	gewölbte PVDF-Folie	Konus Canton Ergo 610	DML Elac Imago 40/50	Blathaller EMC 5300
Übliche Bautiefe [mm]	40 - 400	20 - 50	70	10 - 20	100	65	70
Wandabstand [mm]	> 700	> 900	-	-	-	-	-
Übertragungsbereich [Hz]	28 - 22 k	40 - 22 k	600 - 20 k	> 1k	50 - 20 k	150 - 20 k	200 - 15 k
Schalldruckpegel [dB/1 W/1 m]	85	86	86	50	86	86	86
Klangbeeinträchtigung bei Wandbetrieb	Tiefertonverlust und kammfilterartige Klangfärbung im Mittenbereich durch Interferenz zwischen Direkt- und Reflexionsschall von der Wand bzw. den Schallwandkanten, Gefahr der Zerstörung bei Folienmembranen						
Lautsprechergehäuse Gehäuseeinbau	nicht vorhanden ungeeignet, Gehäuse verringert bei Folienmembranen bewegte Masse erheblich, dies erhöht untere Grenzfrequenz/Tiefertonverlust						
Abstrahlcharakteristik	Dipol, starkbündelnd						
Robustheit	sehr anfällige Folienmembranen						
Betriebsspannung	kV-Bereich - - - - - einige 10 V - 100 V						
Verfügbarkeit	Nischenprodukte - - - - - keine Produktion						
	Massenprodukt Nischenprodukt keine Produktion						

Tab. 4.3: Gegenüberstellung verschiedener Flachlautsprechertechnologien bezüglich entscheidender Parameter [4], [176], [16], [62], [3], [6], [10], [78]

Kapitel 5

Problemanalyse – Flachlautsprecher

5.1 Flachlautsprecher als Dipolstrahler

Aus den Betrachtungen im vorangegangenen Kapitel 4 (S. 37ff.) geht hervor, dass die meisten kommerziellen Flachlautsprechertechnologien Kolben- oder Biegeschwinger sind. Wird ein Kolben- oder Biegeschwinger ohne Gehäuse eingesetzt, stellt er ein Dipolstrahler dar (Abb. 5.1a). Bei diesem treten der akustische Kurzschluss sowie Reflexions- und Beugungserscheinungen an den Schallwandkanten auf (Abschnitt 3.6, S. 32). Die Folge des akustischen Kurzschlusses ist eine Verringerung der Schallabstrahlung unterhalb der Kurzschlussfrequenz (Gl. 3.26, S. 33) mit 6 dB/Okt. (Abb. 5.1b). Dadurch ist der im Tieftonbereich erzielte Schalldruckpegel von Flachlautsprechern in der Regel gering, weshalb häufig mit sogenannten Hybridsystemen gearbeitet wird. Bei diesen dient ein konventioneller Subwoofer zur Wiedergabe des Frequenzbereiches unterhalb von z. B. 100 Hz [190, S. 170ff.]. Zusätzlich

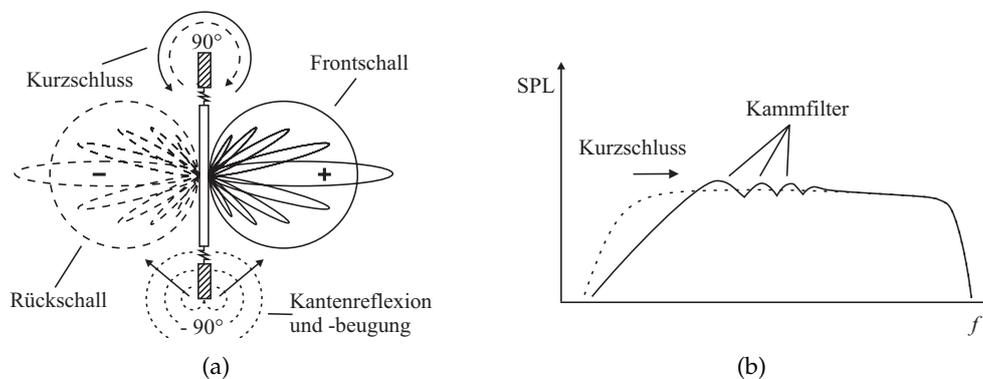


Abb. 5.1: Schallabstrahlung eines Dipolstrahlers mit Kurzschluss-, Reflexions- und Beugungserscheinungen (a), skizzierter Amplitudenfrequenzgang eines solchen Dipols (b)

zum akustischen Kurzschluss führen Schallbeugungs- und Schallreflexionsvorgänge an den Membran- bzw. Schallwandkanten je nach Abstrahlwinkel zu kammfilterartigen Pegeländerungen von bis zu ± 5 dB im Amplitudenfrequenzgang (Abschnitt 3.6.3, S. 34ff.).

5.2 Tieftonverlust und Kammfilterartefakte beim Betrieb vor reflektierenden Grenzflächen

Wird ein Dipol-Flachlautsprecher direkt vor einer schallreflektierenden Grenzfläche betrieben, so wird die Schallabstrahlung davon beeinflusst. Der Schall der Membranrückseite wird an der Wand reflektiert. Ein Teil des Schalls wird auf die Membran zurückgeworfen und stört deren Schwingungsverhalten¹, ein weiterer Teil gelangt durch Reflexions- und Beugungserscheinungen direkt zur Vorderseite des Lautsprechers und überlagert dort den Frontschall (Abb. 5.2a). Daraus resultieren eine Verstärkung des akustischen Kurzschlusses und der Kammfilterartefakte, die durch Schallreflexion- und -beugung oberhalb der Kurzschlussfrequenz entstehen (Abb. 5.2b). Die Verstärkung des akustischen Kurzschlusses beruht darauf, dass infolge der Reflexionen an der Wand die noch vorhandene Tieftonenergie beider Membranseiten überlagert wird. Der Pegelabfall von bisher 6 dB/Okt. wird um die Größe des reflektierten Rückschalls erhöht. Findet eine totale Reflexion statt und ist der Wandabstand verschwindend klein gegenüber der Wellenlänge, so kommt

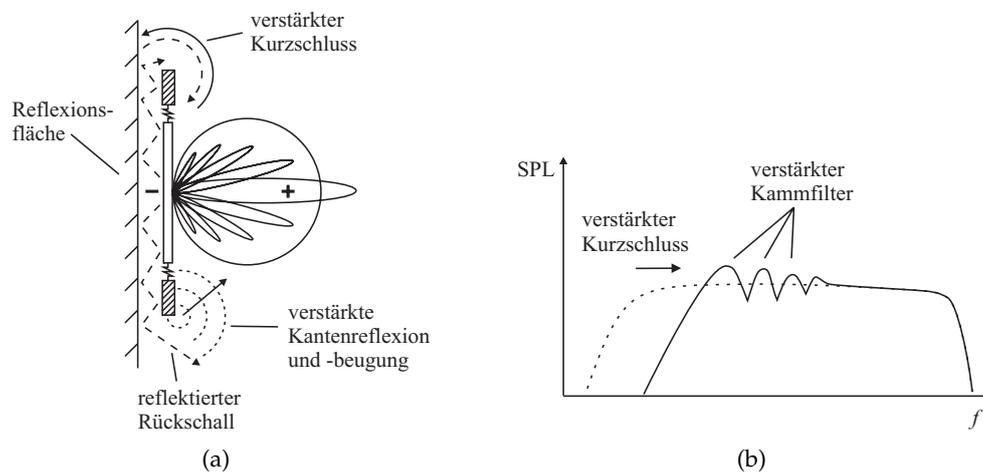


Abb. 5.2: Gestörte Schallabstrahlung eines Dipolstrahlers in Wandnähe mit verstärkten Kurzschluss-, und Reflexions- bzw. Beugungserscheinungen (a), skizzierter Amplitudenfrequenzgang eines solchen Dipols (b).

¹ Beim Betrieb von Flachlautsprechern mit Folienmembran kommt es bei auf der Membran eintreffenden Schallanteilen der Wandreflexion zu erheblichen Störungen der Membranform und -bewegung [190, S. 179ff.]. Aus diesem Grund wird statt einer wandparallelen eine gewinkelte Aufstellung empfohlen, um den reflektierten Schall am Lautsprecher vorbei zu führen.

5.2 Klangbeeinträchtigung beim Betrieb vor reflektierenden Grenzflächen

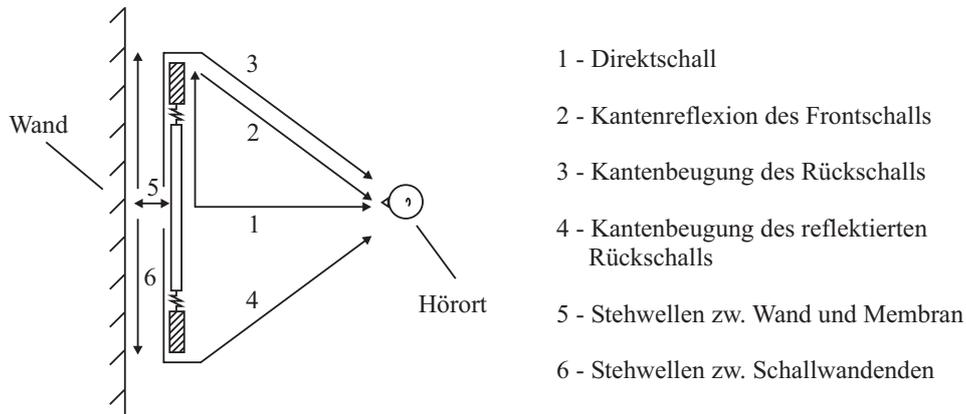


Abb. 5.3: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Einflussfaktoren

es zu einer Überlagerung zweier gegenphasiger Schallanteile gleicher Amplitude. Daraus folgt bei der betreffenden Frequenz eine nahezu vollständige Auslöschung²

Mit zunehmender Frequenz ändert sich das Verhältnis der Wellenlänge zur reflektierenden Begrenzungsfläche. Der reflektierte Schall der Membranrückseite trifft mit einer immer geringeren Phasendifferenz auf den Schall der Vorderseite. Die Überlagerung wird zunehmend konstruktiv. Frequenzen, die bei der Ausbreitung von der Membranrück- zur Membranvorderseite eine Phasendrehung von 180° erfahren, überlagern sich am Hörort maximal konstruktiv (Abb. 5.3). Bei weiter steigender Frequenz werden die Phasenverschiebungen wieder größer und die Überlagerungen zunehmend destruktiv, bis ein Minimum bei 180° Phasenverschiebung durchschritten wird. Dann wird wieder zunehmend konstruktiv überlagert, bis das nächste Maximum erreicht ist. Frequenz, bei denen die Phasenverschiebung zwischen reflektiertem Rück- und Frontschall 0° bzw. ein Vielfaches von 360° beträgt, erfahren eine maximal konstruktive Überlagerung. Beträgt die Phasenverschiebung am Hörort 180° bzw. ein ungeradzahliges Vielfaches davon, dann findet eine maximal destruktive Überlagerung statt. Der Phasenunterschied wird durch den Wandabstand, den Weg um die Membran bzw. Schallwand, den Ort der Überlagerung und die betrachtete Frequenz bestimmt. Da beim Durchlaufen der Frequenzen abwechselnd destruktive und konstruktive Interferenzen stattfinden, bildet sich die beschriebene kammfilterartige Übertragungsfunktion aus.

Für Frequenzen, deren Wellenlängen wesentlich kleiner als die Membran- bzw. Schallwandabmessungen sind, wird der Schattenbereich des reflektierten Rückschalls auf der Membranvorderseite bei steigender Frequenz immer größer. Kammfilter entstehen dann im Wesentlichen nur durch die Überlagerung des Direktschalls mit dem Reflexionsschall von den Membran- bzw. Schallwandkanten (Abb. 5.3). Entspricht der Wandabstand einem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge, dann kann es zusätzlich zur Stehwellenbildung zwischen Wand und Schall-

² Als Gedankenexperiment können zwei Subwoofer betrachtet werden, die den gleichen Sinuston (Wellenlänge wesentlich größer als Membranabstand) mit gleicher Amplitude aber mit umgekehrter Phase wiedergeben und direkt aufeinander stehen.

wandler kommen. Diese beeinflusst ebenso das Schwingungsverhalten der Membran und damit die akustischen Eigenschaften des Flachlautsprechers. Stehwellen entstehen darüber hinaus an den Enden des Schallkanals, den ein Flachlautsprecher in einer Schallwand mit der dahinter liegenden Wand bildet. Die Ursache ist wie bei der Schallreflexion an Kanten eine abrupte Änderung der Schallimpedanz [79, S. 242].

Weiterhin variieren die Wiedergabeeigenschaften des Flachlautsprechers mit dem Wandabstand [48]. Der Nutzer ist darauf angewiesen, den Flachlautsprecher in gleichem Abstand wie in der Entwicklung installieren zu können, um die gleichen Wiedergabeeigenschaften zu erzielen. Gerade im Hinblick auf den Einsatz von Flachlautsprechern in portablen Mediengeräten stellt diese Forderung ein Problem dar.

Die Aufstellung von Flachlautsprechern, die als Dipol arbeiten, ist aus den genannten Gründen äußerst kritisch und mit großen klanglichen Auswirkungen verbunden. Eine platzsparende Nutzung ist trotz flacher Bauweise nicht möglich, ohne dass es zu deutlichen Klangbeeinträchtigungen kommt.

5.3 Betrieb mit Lautsprechergehäuse

Sowohl die Verwendung einer großen Schallwand als auch der Einsatz eines Lautsprechergehäuses ermöglichen die Verhinderung des akustischen Kurzschlusses [87]. Aufgrund der Bestrebung einen Flachlautsprecher mit möglichst kleinen Abmessungen zu realisieren, ist der Einsatz eines Lautsprechergehäuses einer Schallwand vorzuziehen³. Gleichzeitig kann beim Gehäuse der Schall von der Membranrückseite nicht durch Reflexion und Beugung zur Vorderseite des Lautsprechers gelangen und den Frontschall überlagern. Kammfilterartefakte, die dadurch beim gehäuselosen Flachlautsprecher auftreten, werden so vollständig verhindert.

Auch bei der Verwendung eines Gehäuses beeinflusst der Wandabstand die Wiedergabeeigenschaften. Der Einfluss beschränkt sich hierbei auf den ungerichtet abgestrahlten Schall des Tieftonbereiches. Dieser gelangt durch Beugung um das Gehäuse zur Wand hinter dem Lautsprecher, wird dort reflektiert und phasenverschoben mit dem Frontschall überlagert. Je nach Phasenlage werden so Kammfilter im Amplitudenfrequenzgang verursacht.

Mit zunehmendem Wandabstand wird der Schall nicht mehr in einen Halbraum, sondern in einen Vollraum abgestrahlt. Entsprechend nimmt der Pegel für den ungerichtet abgestrahlten Schall ab (Abschnitt 3.6.2, S. 33 und Abschnitt 5.3.3, S. 71).

³ Zur Verhinderung des akustischen Kurzschlusses muss der Schallwandradius größer gleich der viertel Wellenlänge der tiefsten Frequenz sein (Gl. 3.26, S. 33). Dies führt zu unhandlich großen Schallwandabmessungen.

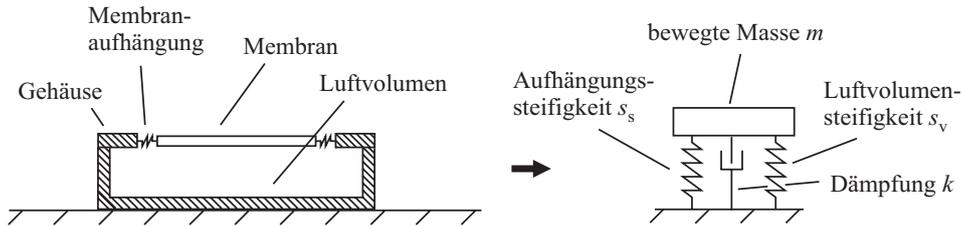


Abb. 5.4: Feder-Masse-Schwingermodell eines Kolbenschwingers mit Gehäuse

Die Verwendung eines Lautsprechergehäuses weist auch Nachteile auf. Das im Gehäuse eingeschlossene Luftvolumen beeinflusst beispielsweise das Schwingungsverhalten der Lautsprechermembran. Dies kann dazu führen, dass trotz Verhinderung des akustischen Kurzschlusses nur eine geringe Tieftonwiedergabe vorhanden ist.

5.3.1 Auswirkungen auf die Membranauslenkung

Die Verwendung eines Lautsprechergehäuses verhindert nicht nur die destruktiven Interferenzen zwischen den Membranseiten. Abhängig von der Gehäusegröße kann es zu einer verringerten Tieftonwiedergabe und zu einer Schalldruckpegelüberhöhung im Bereich der Resonanzfrequenz kommen. Stehwellen im Gehäuse können das Schwingungsverhalten der Membran zusätzlich beeinflussen.

Die Schalldruckpegelverringering im Tieftonbereich und die Überhöhung im Resonanzbereich werden durch das im Gehäuse eingeschlossene Luftvolumen verursacht. Bei der Bewegung der Membran in das Gehäuse hinein wird das Luftvolumen komprimiert und bei der Bewegung hinaus dekomprimiert. Die Lautsprechermembran muss zur Komprimierung und Dekomprimierung des Luftvolumens eine Gegenkraft F_F überwinden. Diese Kraft kann mit der Rückstellkraft einer mechanischen Feder verglichen werden, welche mit zunehmender Auslenkung ξ größer wird. Im einfachsten Fall besitzt die Feder eine lineare Kennlinie. Die Steifigkeit s stellt dann eine Proportionalitätskonstante zwischen der Rückstellkraft und der Auslenkung dar (Gl. 5.1).

$$F_F = -s \cdot \xi \quad (5.1)$$

Das Antriebssystem der Membran muss deswegen nicht nur die Rückstellkraft der Membranaufhängung, sondern zusätzlich die des Gehäusevolumens überwinden. Die Wirkung der zusätzlichen „Luftfeder“ kann anhand der Darstellung des Lautsprechers als Feder-Masse-Dämpfer-System betrachtet werden (Abb. 5.4). Allerdings ist die nachfolgende Darstellung nur für Lautsprecher mit einer kolbenförmigen Membranschwingung gültig. Der Lautsprecher wird dazu in seine Feder-, Masse- und Dämpferelemente zerlegt. Die Federsteifigkeit des Systems s ergibt sich aus der Steifigkeit s_s der Membranaufhängung, die beim konventionellen Konuslautsprecher von der Sicke und der Zentrierspinne gebildet wird und der zusätzlichen Steifigkeit des eingeschlossenen Luftvolumens s_v . Die gesamte bewegte Masse

5 Problemanalyse – Flachlautsprecher

m besteht aus der Membranmasse m_m , der Masse der daran befestigten und mit-schwingenden Bauteile m_{vc} und der verschobenen Luftmasse m_l . Die Dämpfung k repräsentiert die mechanischen Verluste in der Membranaufhängung und dem Antriebsystem sowie die Luftreibung. Beschrieben wird solch ein Schwinger durch Gl. 5.2 [169, S. 501ff.]. Dabei findet eine periodische Schwingungsanregung in Form von $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$ statt.

$$\hat{F} \sin(\omega t) = m \ddot{\xi} + k \dot{\xi} + s \xi \quad (5.2)$$

Aus der Lösung dieser Gleichung ergibt sich der Amplitudenfrequenzgang $A(\omega)$ (Gl. 5.3).

$$A(\omega) = \frac{\hat{F}}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} \quad (5.3)$$

Darin stellen $\omega_0 = \sqrt{s/m}$ die Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Schwingers und $\delta = k/(2m)$ den Dämpfungsfaktor dar. Begonnen bei $\omega = 0$ wächst die Amplitude mit zunehmender Frequenz. Der Einfluss der Steifigkeit, proportional zu ω_0 , ist vorerst größer als der Einfluss der Masse.

Erreicht die Anregungsfrequenz die Resonanzkreisfrequenz ω_r , erlangt der Amplitudenfrequenzgang sein Maximum (Gl. 5.4).

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} = \sqrt{\frac{s}{m} - \frac{1}{2} \left(\frac{k}{m}\right)^2} \quad (5.4)$$

Oberhalb der Resonanzkreisfrequenz nimmt die Amplitude wieder ab. Das Verhalten des Systems wird nun von der Masse dominiert.

Der Einfluss der Dämpfung auf die Resonanzfrequenz geht aus Gl. 5.4 hervor und ist in Abb. 5.5 für verschiedene Dämpfungsfaktoren dargestellt. Ist keine Dämpfung vorhanden, was praktisch nie vorkommt, so sind Resonanzkreisfrequenz und Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems identisch. Die Resonanzüberhöhung

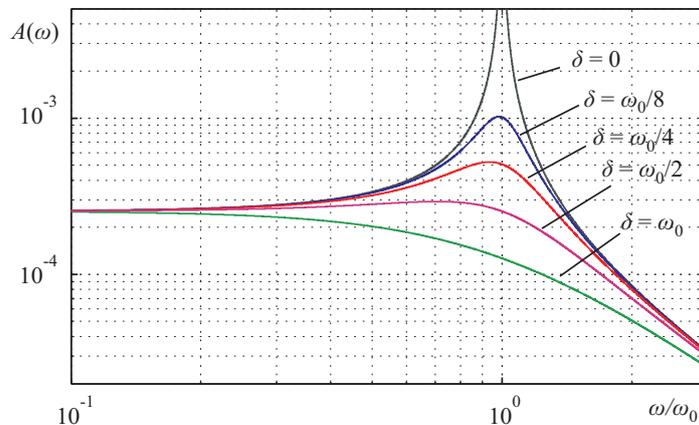


Abb. 5.5: Amplitudenfrequenzgang der Auslenkung des Feder-Masse-Dämpfer-Systems bei verschiedenen Dämpfungsfaktoren

wird unendlich groß. Mit zunehmender Dämpfung weichen Eigen- und Resonanzfrequenz voneinander ab; die Resonanzüberhöhung verringert sich.

Das Lautsprechergehäuse bewirkt demnach eine seiner Steifigkeit entsprechende Erhöhung der Resonanzfrequenz⁴. Abb. 5.6 zeigt von oben nach unten, wie dies die Membranauslenkung, die Membranschnelle, die Membranbeschleunigung bzw. den Schalldruck, den Realteil der Strahlungsimpedanz und der abgestrahlten Schallleistung des Lautsprechers beeinflusst. Bei ausreichender Dämpfung ist die Membranauslenkung bis zur Resonanzfrequenz konstant. Oberhalb der Resonanzfrequenz verringert sich die Membranauslenkung mit 12 dB/Okt., da der Masseinfluss zunimmt. Entsprechend verringert sich die Membranschnelle oberhalb der Resonanzfrequenz mit 6 dB/Okt. Die durch die Membranschnelle und den Realteil der Strahlungsimpedanz (auch Strahlungswiderstand r_{Str} genannt) bestimmte akustische Wirkleistung $\text{Re}\left\{\underline{P}\right\}$ verläuft ab der Resonanzstelle konstant. Die fallende Flanke der Schnelle und die ansteigende Flanke des Strahlungswiderstandes kompensieren sich gegenseitig. Erst wenn der Strahlungswiderstand seinen maximalen Wert bei $ka = \sqrt{2}$ erreicht hat, findet keine Kompensation mehr statt. Als Folge nimmt auch die abgestrahlte Wirkleistung mit 12 dB/Okt. ab.

Anhand des Kurvenverlaufs der einzelnen Parameter können die Einflüsse einer Parametrieränderung vorherbestimmt werden. In [261, S. 202ff.] sind dieser Thematik mehrere Abschnitte gewidmet, von denen hier einige wiedergegeben werden. So bewirkt beispielsweise eine Vervierfachung der Gesamtsteifigkeit eine Verdopplung der Resonanzfrequenz. Die Membranauslenkung und die Membranschnelle werden dadurch auf ein Viertel verringert, wodurch unterhalb der Resonanzfrequenz die abgestrahlte Wirkleistung auf ein Sechzehntel sinkt. Wird zur Kompensation eines Steifigkeitsanstieges die bewegte Masse erhöht, um die Resonanzfrequenz konstant zu halten, wirkt sich dies negativ auf die abgestrahlte Wirkleistung aus. Bei einer Vervierfachung der Masse sinkt der elektroakustische Wirkungsgrad auf ein Sechzehntel. Eine Verdopplung des Membrandurchmessers, die ohne Massezunahme geschieht, erhöht den Wirkungsgrad für $ka \leq \sqrt{2}$ auf das Sechzehnfache und für $ka > \sqrt{2}$ auf das Vierfache. Oberhalb von $ka = \sqrt{2}$ sind die Phasenunterschiede zwischen den Schallbeiträgen aller Membranpunkte so groß, dass es zu destruktiven Interferenzen kommt. Die Folge ist eine gerichtete und verringerte Wirkleistungsabstrahlung.

Der Einsatz eines Lautsprechergehäuses, dessen eingeschlossenes Luftvolumen die Gesamtsteifigkeit wesentlich beeinflusst, führt nicht nur zu einer höheren Resonanzfrequenz des Systems, sondern auch zu einem Pegelanstieg im Bereich der

⁴ Im Hinblick auf den Gehäuseeinbau von Elektrostaten ist laut Sanders nicht die Steifigkeit, sondern die bewegte Masse des Systems das ausschlaggebende Kriterium. Die Membranfolie ist so fest eingespannt, dass sich durch den Gehäuseeinbau die Steifigkeit nur wenig verändert. Da die Folie sehr leicht ist, wird die bewegte Masse vordergründig von der mitschwingenden Luft bestimmt. Das Kapseln einer Membranseite führt zu einer deutlichen Verringerung der mitschwingende Luftmasse und bewirkt so einen Anstieg der Resonanzfrequenz [190, S. 18ff.]. Aus diesem Grund wird bei Elektrostaten von der Verwendung eines Gehäuses abgeraten, wenn es um die Wiedergabe tiefer Frequenzen geht.

5 Problemanalyse – Flachlautsprecher

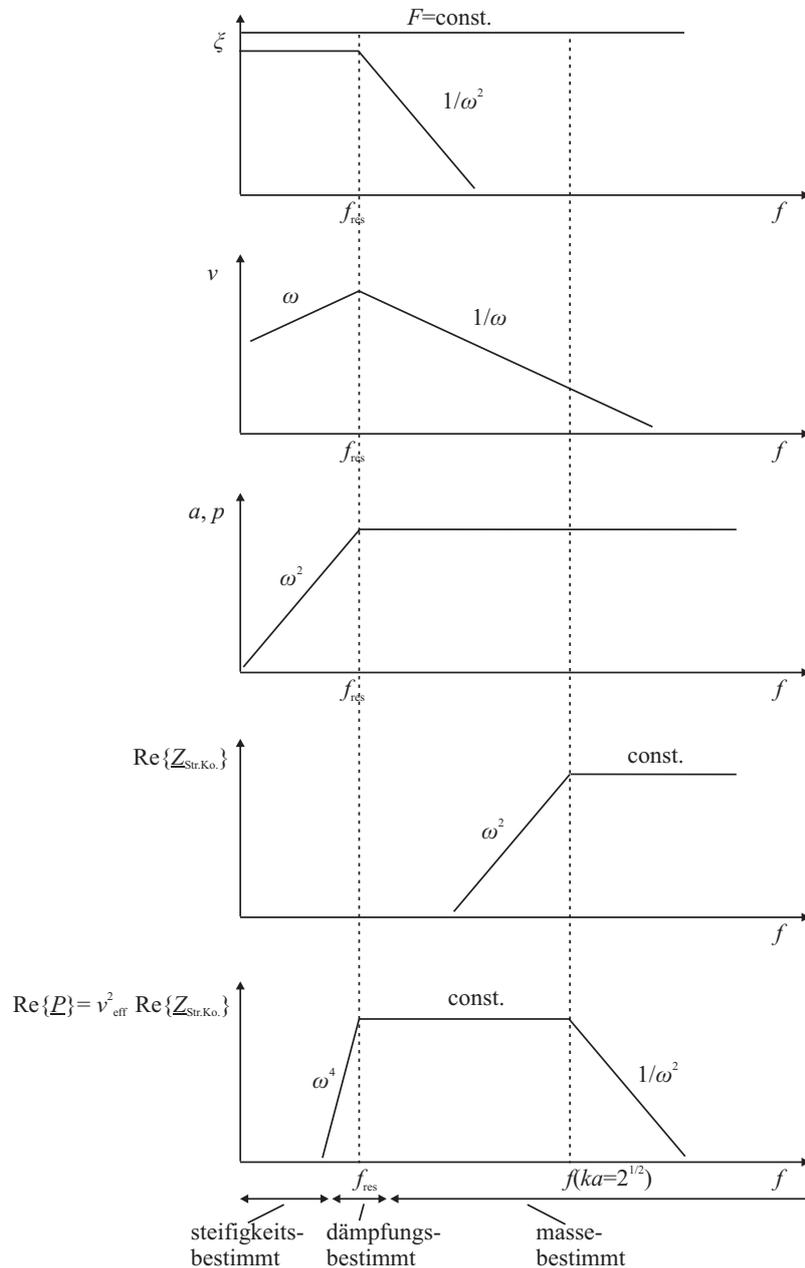


Abb. 5.6: Herleitung des zu erwartenden Amplitudenfrequenzganges der abgestrahlten Wirkleistung einer Kolbenmembran in einer unendlichen Schallwand nach [261, S. 201] und [131, S. 17], ($\omega \equiv 6 \text{ dB/Okt.}$, $\omega^2 \equiv 12 \text{ dB/Okt.}$, $\omega^4 \equiv 24 \text{ dB/Okt.}$)

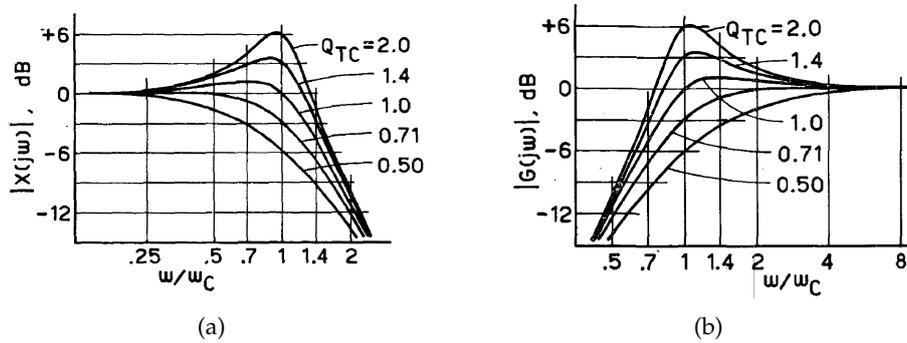


Abb. 5.7: Zusammenhang zwischen der normalisierten Membranauslenkung (hier $X(j\omega)$) eines elektrodynamischen Lautsprechers in verschiedenen geschlossenen Gehäusen mit unterschiedlicher Gehäusegüte Q_{tc} und dem daraus resultierenden Amplitudenfrequenzgang (hier $G(j\omega)$), ω_c steht für die Resonanzfrequenz [198].

Resonanzfrequenz. Dieser kann je nach System eine Überhöhung im Amplitudenfrequenzgang darstellen (Abb. 5.7). Mit Gl. 5.5 kann anhand der Gehäusegüte Q_{tc} ⁵ die Frequenz f_{Π} und mit Gl. 5.6 der Pegelwert Π der Überhöhung berechnet werden [72, S. 45].

$$f_{\Pi} = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{1}{2Q_{tc}^2}}} \quad (5.5)$$

$$\Pi = 20 \log \sqrt{\frac{Q_{TC}^4}{Q_{TC}^2 - 0,25}} \quad (5.6)$$

Da ein zu kleines Gehäuse eine starke Beeinflussung der Systemsteifigkeit darstellt, sollte für eine gute Tieftonwiedergabe die Gesamtsteifigkeit möglichst gering gehalten werden. Eine beliebige Verringerung der Aufhängungssteifigkeit s_s (Abb. 5.4) ist nicht möglich, da sie für die Rückstellkraft und Führung der Membran verantwortlich ist. Die Volumensteifigkeit s_v ist hingegen die unerwünschte Folge der Verwendung eines Lautsprechergehäuses. Aus diesem Grund werden in Kapitel 6 (S. 73ff.) verschiedene Ansätze zum Umgang mit dieser Steifigkeit vorgestellt. Der nachfolgenden Abschnitt 5.3.2 widmet sich der näheren Betrachtung der Luftfedersteifigkeit und ihrer Berechnung.

⁵ Die Gehäusegüte Q_{tc} beschreibt das Verhältnis zwischen dem Energieanteil, der im Lautsprecher als Schwingungsenergie verbleibt, und dem Anteil, der über Dämpfungverluste dem schwingenden System entzogen und an die Umgebung abgegeben wird. Je kleiner die Güte ist, desto höher ist die Dämpfung im System, was in der Regel vorteilhaft für das Impulsverhalten des Systems ist, da nur ein geringes Nachschwingen auftritt. Dementsprechend wird die Gehäusegüte im Lautsprecherbau als Zielparame- ter für das Gehäusedesign verwendet (Abschnitt 7.1.2, S. 117).

5.3.2 Berechnung der Luftfedersteifigkeit

Die Federwirkung eines Luftvolumens hängt mit dessen endlicher Kompressibilität zusammen. Anders als bei Festkörpern herrschen nur sehr geringe Anziehungskräfte⁶ zwischen den Gasmolekülen. Infolgedessen befinden sie sich in größerem Abstand und in unbestimmter Lage zueinander und können frei verschoben werden. Aus diesem Grund besitzen Gase wie auch Flüssigkeiten keine Gestaltelastizität. Sie sind bestrebt, das ihnen gebotene Volumen gänzlich auszufüllen. Die Bewegung der Gasmoleküle wird von der herrschenden Umgebungstemperatur bestimmt. Es findet entgegen der Molekülbewegung in Festkörpern kein Schwingen⁷ um eine feste Ruhelage statt [96].

Bei der Betrachtung der molekularen Vorgänge in abgeschlossenen Systemen wird häufig – wegen der weniger komplizierten Zusammenhänge – die Annahme getroffen, dass es sich um ein ideales Gas handelt. Trotz dieser Vereinfachung sind mit diesem Modell die grundlegenden thermodynamischen Vorgängen im Lautsprechergehäuse beschreibbar.

Vorgänge in idealen Gasen sind dadurch gekennzeichnet, dass die Teilchen Punktmassen sind, die vollelastisch aufeinander stoßen. Eine weitere Vereinfachung wird bei der Wahl des betrachteten Volumens getroffen. Es wird so gewählt, dass bei einer Kompression die Moleküle in alle Richtungen gleichmäßig verteilt werden.

Die in einem geschlossenen Gehäuse der Kantenlänge a mit der Geschwindigkeit v_i bewegten Luftmoleküle führen elastische Stöße untereinander aus. Dabei kommt es zur Impulsweiterleitung bis zu den als unendlich starr angenommenen Gehäusewänden der Fläche A [106, S. 152]. Beim Zusammenstoß und der nachfolgenden Reflexion eines Moleküls der Masse m_M mit einer Gehäusewand kommt es zur Impulsänderung ΔI_i (Gl. 5.7).

$$\Delta I_i = m_M \cdot v_i - (m_M \cdot (-v_i)) \quad (5.7)$$

$$\Delta I_i = 2m_M \cdot v_i \quad (5.8)$$

Dadurch wird eine Kraft F_i auf die Wand ausgeübt⁸. Durch die Reflexion an der Wand wird der Impuls weitergeleitet, z. B. bis zur gegenüberliegenden Gehäusewand, wo er wieder reflektiert und zurückgeworfen wird zur anfänglichen Gehäusewand. Für diese Strecke – angenommen mit $2a$ – benötigt die Weiterleitung die Zeit Δt . Die mittlere von einem Molekül auf die Wand übertragenen Kraft \overline{F}_i ergibt sich aus Gl. 5.9.

$$\overline{F}_i = \frac{\Delta \overline{I}_i}{\Delta t} = \frac{2m_M \cdot \overline{v}_i}{2a/\overline{v}_i} = \frac{m_M \cdot \overline{v}_i^2}{a} \quad (5.9)$$

⁶ Van-der-Waals-Kräfte

⁷ 1827 wurde die Bewegung von dem Botaniker Robert Brown erstmals beschrieben. Ihm zu Ehren wird sie Brown'sche Molekularbewegung genannt [58].

⁸ 1738 erklärte damit Bernoulli den Druck eines Gases auf die Gefäßwände [106, S. 151].

Entsprechend ergibt sich der von einem Molekül verursachte mittlere Druck \bar{p}_i auf die Wand des Gehäuses mit dem Volumen V aus Gl. 5.10.

$$\bar{p}_i = \frac{\bar{F}_i}{A} = \frac{m_M \cdot \bar{v}_i^2}{a^3} = \frac{m_M \cdot \bar{v}_i^2}{V} \quad (5.10)$$

Bereits Gl. 5.10 zeigt, dass der Druck mit zunehmender Molekülgeschwindigkeit – welche proportional zur Temperatur ist – und mit kleiner werdendem Volumen steigt. In einem luftgefüllten Gehäuse trifft im Normzustand nicht nur ein Molekül, sondern eine Molekülmenge N von etwa $3 \cdot 10^{23}$ Teilchen pro Sekunde auf einen Quadratcentimeter Wandfläche auf [106, S. 152]. Daraus ergibt sich bei einer mittleren Molekülgeschwindigkeit \bar{v} der Gesamtdruck p aus Gl. 5.11.

$$p = \frac{1}{3} \frac{m_M}{V} \cdot N \cdot \bar{v}^2 \quad (5.11)$$

Gl. 5.11 ist die Grundgleichung der kinematischen Gastheorie, die sowohl bei zusammenstoßenden Teilchen als auch für beliebige Gehäuseformen gültig ist, solange eine gleichmäßige Teilchenverteilung garantiert ist [106, S. 152]. Durch Verwendung der Dichte $\rho = m/V = m_M \cdot N/V$ kann Gl. 5.11 in Gl. 5.12 überführt werden.

$$p = \frac{1}{3} \rho \cdot \bar{v}^2 \quad (5.12)$$

Bei der Auslenkung der Membran in das Gehäuse hinein wird das Volumen V verkleinert. Die im Volumen befindlichen Moleküle werden zusammengeschoben und treffen aufgrund der gleichbleibenden Molekülmenge nun öfters auf die Wand. Dadurch nimmt die Dichte der auf eine Gefäßfläche treffenden Teilchen zu, was zu einer größeren wirksamen Kraft und einem erhöhten Gesamtdruck führt. Die bei dieser Kompression wirkende Federkraft F_v des Luftvolumens ist definiert durch die Membranauslenkung ξ und den Proportionalitätsfaktor s_v , der als Federsteifigkeit bezeichnet wird (Gl. 5.13).

$$dF_v = -s_v \cdot d\xi \quad (5.13)$$

Umgestellt nach der gesuchten Federsteifigkeit ergibt sich Gl. 5.14.

$$-s_v = \frac{dF_v}{d\xi} \quad (5.14)$$

Wird die Kraft $dF = A \cdot dp$ durch den Druck ersetzt, entsteht Gl. 5.15.

$$-s_v = A \cdot \frac{dp}{d\xi} \quad (5.15)$$

Durch die Erweiterung mit dV/dV kann Gl. 5.15 in Gl. 5.16 umgewandelt werden.

$$-s_v = A \frac{dV}{d\xi} \cdot \frac{dp}{dV} \quad (5.16)$$

Der Quotient $dV/d\xi$ entspricht der Fläche A . Über den Quotienten dp/dV kann die Adiabatangleichung $p \cdot V^\kappa = \text{const.} = C$ eingebunden werden. Für die Konstante wird das Symbol C verwendet. Mit $p = C \cdot V^{-\kappa}$ lässt sich Gl. 5.16 in Gl. 5.17 überführen.

$$-s_v = A^2 \cdot \frac{d(C \cdot V^{-\kappa})}{dV} = A^2 \cdot C \cdot \frac{dV^{-\kappa}}{dV} \quad (5.17)$$

5 Problemanalyse – Flachlautsprecher

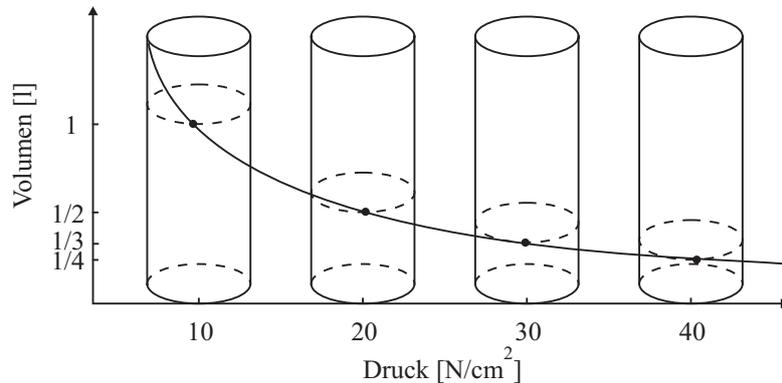


Abb. 5.8: Zusammenhang zwischen Druck und Volumen in einem geschlossenen Gehäuse

Aus Gl. 5.17 entsteht nach der Differentiation Gl. 5.18.

$$-s_v = -A^2 \cdot \frac{\kappa \cdot C}{V \cdot V^\kappa} \quad (5.18)$$

Da $p = C/V^\kappa$ gilt, kann Gl. 5.18 auch in Form von Gl. 5.19 geschrieben werden.

$$s_v = \left| A^2 \cdot \kappa \cdot \frac{p}{V} \right| \quad (5.19)$$

Um den Bezug zur Molekülbewegung herzustellen, kann p ersetzt werden durch Gl. 5.12. Die darin enthaltene mittlere Molekülgeschwindigkeit \bar{v}_m^2 ist auch mittels der spezifischen Gaskonstante R_S und der Temperatur T beschreibbar, wodurch aus Gl. 5.19 Gl. 5.20 entsteht.

$$s_v = \frac{\kappa \cdot \rho \cdot R_S \cdot T \cdot A^2}{V} \quad (5.20)$$

Unter Verwendung der Schallgeschwindigkeit $c_0 = \sqrt{\kappa \cdot R_S \cdot T}$ entsteht Gl. 5.21.

$$s_v = \frac{\rho \cdot c_0^2 \cdot A^2}{V} \quad (5.21)$$

Gl. 5.21 ist die in der Literatur gängige Formel zur Bestimmung der Federsteifigkeit eines Luftvolumens [261, S. 140], [120, S. 284], [188, S. 190]. Die Volumensteifigkeit ist demnach von den geometrischen Parameter – Volumengröße V bzw. Membrangröße A – und von den physikalischen Eigenschaften – Dichte ρ bzw. Schallgeschwindigkeit c_0 – des Gases abhängig. Einige der in Kapitel 6 (S. 73ff.) vorgestellten Ansätze zur Steifigkeitsverringern beruhen auf der Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Gases.

Streng genommen ist die Federkraft nicht nur von der Membranauslenkung, sondern auch von der Auslenkungsrichtung abhängig [157, S. 321ff.]. Für die Bewegung der Membran in das Lautsprechergehäuse hinein, also die Kompression des Luftvolumens, ist mehr Kraft erforderlich als für die Expansion (Abb. 5.8). Dies bedingt, dass der gleiche Lautsprecher bei gleichem Schalldruckpegel in einem kleinen Gehäuse mehr Verzerrungen produziert als in einem großen Gehäuse [157, S. 324].

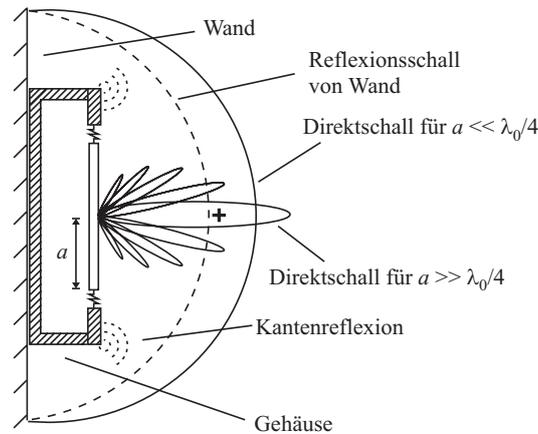


Abb. 5.9: Schematische Darstellung der Schallabstrahlung eines Gehäuselautsprechers in unmittelbarer Wandnähe

5.3.3 Wandreflexionen

Bei der Betrachtung des Dipollautsprechers in Wandnähe wurde der Einfluss des an der Wand reflektierten Schalls von der Membranrückseite betrachtet. Durch die Verwendung eines Lautsprechergehäuses kann dieser Einfluss unterbunden werden. Die Wandnähe wirkt sich aber auch auf die Schallabstrahlung eines Gehäuselautsprechers aus. Die Betrachtung der Abstrahleigenschaften der Kolbenmembran in Abschnitt 3.3.1 (S. 19) zeigt, dass für Frequenzen, deren Wellenlänge wesentlich größer als der Membrandurchmesser ist, eine kugelförmige Schallabstrahlung stattfindet. Aufgrund des Gehäuses breitet sich der tieffrequente Schall kugelförmig im Raum aus. Trifft er dabei auf eine schallharte Wand, wird er reflektiert (Abb. 5.9). Am Hörort überlagern sich somit Direkt- und Reflexionsschall. Dabei ist die Phasenlage der Schallbeiträge entscheidend. Ist der Abstand zwischen Membran und Wand wesentlich kleiner als die halbe Wellenlänge, dann finden konstruktive Überlagerungen statt. Diese führen zu einer Erhöhung des Schalldruckpegels am Hörort um bis zu 6 dB. Auch für höhere Frequenzen, deren halbe Wellenlänge in einem ganzzahligen Vielfachen zum Abstand steht, findet eine konstruktive Überlagerung statt. Der Phasenunterschied am Hörort kommt einem Vielfachen von 360° gleich. Entspricht der Abstand hingegen einem Vielfachen der viertel Wellenlänge, führt dies zur Auslöschung.

Die wandnahe Aufstellung bewirkt somit einen Tieftongewinn und Kammfiltererscheinungen. Der Tieftongewinn ist als Vorteil zu bewerten. Bis zu 6 dB mehr Schalldruckpegel entstehen am Hörort gegenüber der wandfernen Aufstellung⁹. Die Kammfiltererscheinungen sind unerwünscht. Sie treten nicht auf, wenn die

⁹ Der Pegelgewinn von maximal 6 dB bezieht sich auf die Situation, dass nur eine Reflexionsfläche vorhanden ist. Wird ein Lautsprecher hingegen in eine Raumecke gestellt, so erhöht sich die Anzahl der Reflexionsflächen, z.B. auf zwei, und damit auch der maximal mögliche Pegelgewinn. Im Idealfall führt jede hinzukommende Reflexionsfläche zu einer Halbierung des Raumes, in den der Lautsprecher frei abstrahlen kann. Daraus resultiert ein Pegelgewinn pro Halbierung von bis zu 6 dB [233, S. 184].

5 Problemanalyse – Flachlautsprecher

Gehäusetiefe so gering gewählt, dass für alle kugelförmig abgestrahlten Frequenzen der Abstand zwischen Membran und Wand wesentlich kleiner als die halbe Wellenlänge ist, da dann allein konstruktive Überlagerungen stattfinden. Höhere Frequenzen werden nicht kugelförmig abgestrahlt und können so auch nicht von der Wand reflektiert werden. Wie auch beim gehäuselosen Flachlautsprecher treten an Kanten Schallreflexionen mit den daraus resultierenden Einflüssen auf das Wiedergabeverhalten auf.

Kapitel 6

Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

In Kapitel 5 (S. 59ff.) wurde dargestellt, dass das grundlegende Problem der Klangbeeinträchtigungen die Überlagerung der Schallanteile beider Membranseiten ist. Durch den Einsatz eines Lautsprechergehäuses kann dies verhindert werden. Je nach Gehäusegröße wird dadurch aber auch die Gesamtsteifigkeit des Lautsprechers um den Betrag der Volumensteifigkeit des Gehäuses erhöht, was inakzeptable Klangbeeinträchtigungen zur Folge haben kann. Aus diesem Grund werden in den folgenden Abschnitten Ansätze zur Verringerung bzw. zur Kompensation der Volumensteifigkeit betrachtet.

6.1 Flaches Gehäuse mit großem Volumen

Aus Abschnitt 5.3 (S. 62ff.) ist bekannt, dass ein zu klein dimensioniertes Gehäuse zu einer Tieftonverringern und einer Überhöhung im Amplitudenfrequenzgang im Bereich der Resonanzfrequenz führt. Demzufolge wäre es vorteilhaft, wenn das Gehäusevolumen eines Flachlautsprechers ausreichend groß und gleichzeitig extrem flach gestaltet sein kann (Abb. 6.1). Das in Abb. 6.1a dargestellte quaderförmige Gehäuse mit einer Kantenlänge von 20 cm hat ein Volumen von 8 l. Wird die Gehäusetiefe auf beispielsweise 5 cm herabgesetzt, müssen die Gehäusehöhe und -breite auf je 40 cm verdoppelt werden, um dasselbe Volumen zu erhalten. Voraussetzung für dieses Vorgehen ist die Unabhängigkeit der Volumensteifigkeit von der Volumenform, wie es in Gl. 5.21 (S. 70) dargestellt ist. Demnach tritt bei einer Verringerung der Gehäusetiefe bei konstantem Volumen keine Erhöhung der Resonanzfrequenz und damit keine verringerte Tieftonabstrahlung auf.

Dieser Annahme ist entgegenzuhalten, dass die Teilchenschnelle in der Nähe von Begrenzungsflächen abnimmt und dabei Reibungsverluste zwischen den Schichten unterschiedlicher Schnelle entstehen [51, S. 134], [153, S. 95ff.] (Abb. 6.2). In [153, S. 96] wird der Bereich abnehmender Schnelle als „Zähigkeitsgrenzschicht“

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

bezeichnet. Die Amplitude der wandparallelen Teilchenschnelle \hat{v} sinkt an einer schallharten Wand ($y = 0$) auf Null (Gl. 6.1).

$$\hat{v}(y) = \hat{v}_0 \left(1 - e^{-\sqrt{\frac{\omega\rho}{\eta}} y} \right) \quad (6.1)$$

Die Größen η und ρ kennzeichnet die dynamische Viskosität und die Dichte. Das Verhältnis aus beiden Größen definiert Meyer als kinematische Zähigkeit [153, S. 97]. Zusätzlich zur Amplitudenänderung ändert sich die Phase der Schnelle um 45° . Die Dicke der Zähigkeitsgrenzschicht ist durch die Zähigkeitswellenlänge¹ λ_V beschrieben (Gl. 6.2).

$$\lambda_V = 2\pi \sqrt{\frac{2\eta}{\omega\rho}} \quad (6.2)$$

Für Luft beträgt die kinematische Zähigkeit $\eta/\rho = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Gl. 6.2 kann daher für das Ausbreitungsmedium Luft zu Gl. 6.3 vereinfacht werden [153, S. 96].

$$\lambda_V = \frac{1,4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-\frac{1}{2}}}{\sqrt{f}} \quad (6.3)$$

Für eine Frequenz von beispielsweise 100 Hz ist demzufolge die Zähigkeitsgrenzschicht einer Begrenzungsfläche 1,8 mm groß. In der Zähigkeitsgrenzschicht nimmt die Schnelle nicht kontinuierlich, sondern schwach oszillierend ab und zu. In einem Abstand zur Begrenzungsfläche von $\lambda_V/4$ wird erstmals die maximale Schnelle \hat{v}_0 erreicht [153, S. 97].

Bei einem immer flacher werdendem Gehäuse wird das Verhältnis zwischen dem Querschnitt und der Zähigkeitsgrenzschicht zunehmend geringer. Dadurch ist auch das physikalische Verhalten des Volumens aus Sicht der Steifigkeit und Dämpfung einer Änderung unterzogen. Beispielsweise kann es durch die Verringerung der Teilchenschnelle zu einer Minderung der Impulsübertragungen auf die Gehäusewände kommen. Die Folge ist eine Verringerung des Gehäusedrucks und der Federsteifigkeit (Gl. 5.11). Dies führt zu einer Verringerung der Resonanzfrequenz

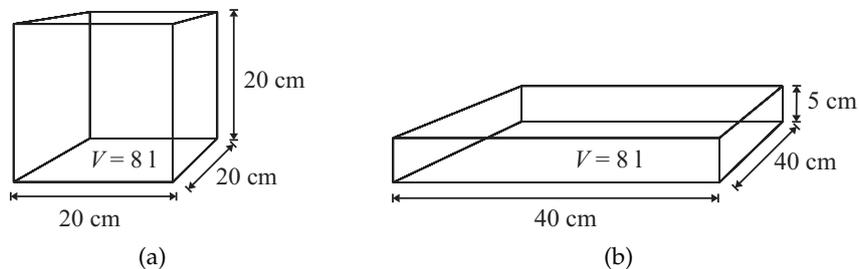


Abb. 6.1: Zwei Gehäuseformen mit gleichem Volumen aber unterschiedlicher Gehäusetiefe, 20 cm (a), 5 cm (b)

¹ Die Zähigkeitswellenlänge kennzeichnet den wandnahen Bereich, in dem die Teilchenschnelle infolge der Reibungsverluste zwischen den Schichten unterschiedlicher Viskosität stark abnimmt.

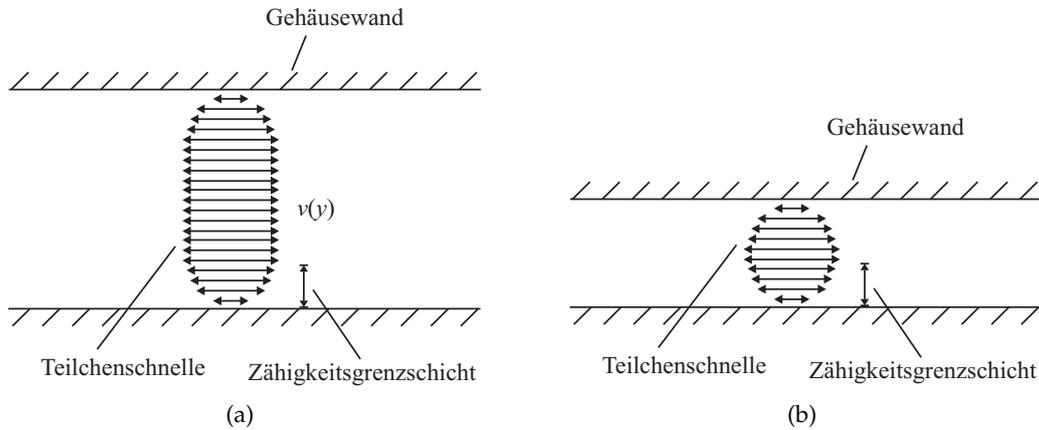


Abb. 6.2: Schnelleverteilung bei Viskositätsunterschieden zwischen zwei Begrenzungsflächen, z. B. Gehäusewänden, nach [51, S. 134]

des Systems (Gl. 5.4). Der damit verbundene Pegelabfall von 12 dB/Okt. setzt somit erst bei tieferen Frequenzen ein. Im Umkehrschluss wird mehr tieffrequenter Schall abgestrahlt. Zur Überprüfung dieses Sachverhaltes wurden unterschiedliche Gehäusetiefen bei gleichbleibender Volumengröße untersucht. Die Details und Ergebnisse sind in Abschnitt 7.1.3 (S. 119ff.) dargestellt.

6.2 Füllmaterialien im Gehäuse

Aus der Herleitung der Luftfederproblematik in Abschnitt 5.3.2 (S. 68ff.) geht hervor, dass die Volumensteifigkeit auch von der Art der thermodynamischen Zustandsänderung abhängig ist. Der in Gl. 5.20 (S. 70) aufgeführte Adiabatenexponent κ wird in der Regel mit 1,4 angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass bei den Kompressions- und Expansionsvorgängen im Lautsprechergehäuse kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet. Stattdessen kommt es zu einer ständigen Erwärmung und Abkühlung. Durch die Verwendung von Füllmaterialien, die eine größere Wärmekapazität als Luft bieten, können diese Temperaturschwankungen ausgeglichen werden, so dass kein Erwärmen und Abkühlen mehr stattfindet. Idealerweise wird dadurch der adiabatische Prozess in einen isothermen Prozess überführt. Der Adiabatenexponent wird dann als Polytropenexponent n bezeichnet und nimmt den Wert 1 an. Der Polytropenexponent berechnet sich aus der Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p und konstantem Volumen c_v (Gl. 6.4).

$$n = \frac{c_p}{c_v} \quad (6.4)$$

Aus der Änderung von $\kappa = 1,4$ zu $n = 1,0$ verringert sich auch die Volumensteifigkeit s_{alt} zu s_{neu} (Gl. 6.5).

$$s_{\text{neu}} = \frac{n}{\kappa} s_{\text{alt}} \quad (6.5)$$

Unter rein isothermen Bedingungen würde der Faktor $n/\kappa = 1,0/1,4 = 0,71$ betragen und somit die Steifigkeit um 29 % verringern bzw. die Nachgiebigkeit um

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

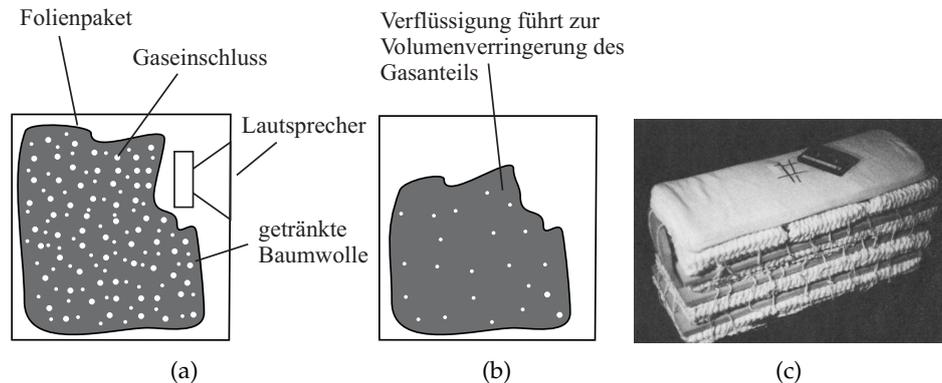


Abb. 6.3: Überführung der Flüssigkeit im Baumwollpaket in den gasförmigen Zustand bei Unterdruck (a) und Verflüssigung des Gases bei Überdruck im Lautsprechergehäuse (b), Baumwollpaket (c) [147]

40 % erhöhen. Nach Dickason sind in der Praxis 15 % bis 25 % typisch [72, S. 60]. Es muss berücksichtigt werden, dass die eingebrachten Dämmmaterialien selbst auch eine Volumenverdrängung bewirken. Der Steifigkeitsverringerng infolge des veränderten Adiabaten- bzw. Polytropenexponenten strebt die Volumenverdrängung des Füllmaterials entgegen. Mit der Verringerung der Volumensteifigkeit verkleinert sich auch die Grundresonanzfrequenz des Lautsprechers. Aus Gl. 5.4 (S. 64) geht mit einer 29 % geringeren Steifigkeit eine 16 % tiefere Resonanzfrequenz hervor, wenn die Volumensteifigkeit wesentlich größer als die Sickensteifigkeit ist. Unter realen Bedingungen sind es entsprechend nur ca. 10 %. Zusätzlich zur Resonanzfrequenz ändert sich auch die Gehäusegüte durch die Verwendung von Füllmaterial. In [72, S. 61ff.] wird auf eine von Small und Margolis in [200] beschriebene Methode verwiesen, welche es ermöglicht, die Auswirkung einer 100 %igen Glaswollefüllung analytisch abzuschätzen. Mit dieser Methode kann auch das neue akustisch wirksame Volumen bei konstanter Gehäusegüte ermittelt werden.

Einen weiteren Ansatz zur Verkleinerung des Lautsprechergehäuses stellt Marrs in [147] vor. Ausgehend von der thermischen Zustandsgleichung idealer Gase (Gl. 6.6) soll die Masse m des Gases im Lautsprechergehäuse variabel statt konstant sein.

$$\frac{p \cdot V}{T} = m \cdot R_s \quad (6.6)$$

Dazu wird das Gehäusevolumen mit einem in Folie verpackten Paket nahezu vollständig ausgefüllt. In diesem Paket befinden sich flüssigkeitsgetränkte Baumwolle und Gas (Abb. 6.3c). Die Baumwolle hat im Gegensatz zu herkömmlicher Baumwolle eine bis zu tausendfach größere Oberfläche. Die Flüssigkeit ist ein Gemisch, das mit Detergenzien² versehen ist. Das Mischungsverhältnis ist so gewählt, dass es bei Raumtemperatur und geringsten Druckeinwirkungen zum Verdampfen bzw. zum Kondensieren der Flüssigkeiten bzw. des Gases während der Kompression und Dekompression kommt. Wenn die Luft im Gehäuse komprimiert wird und

² Detergenzien sind Substanzen, die die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten herabsetzen [58].

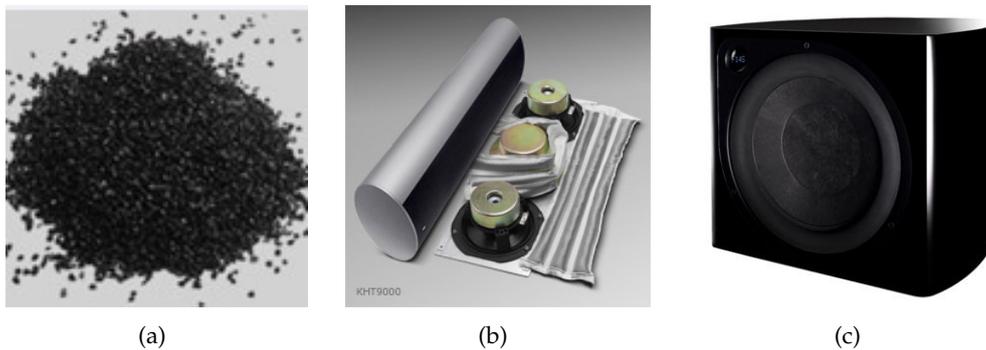


Abb. 6.4: Verwendung von Aktivkohle (a) in luftdurchlässiger Ummantelung (b) in verschiedenen Produkten von KEF Audio wie z. B. dem Subwoofer 209 (c) [2], [15]

der Druck steigt, setzt die Verflüssigung einer Teilmenge des Gases ein, was zu einer Reduktion der Gasmasse m führt (Abb. 6.3a). Die Volumenverkleinerung hat dadurch ein wesentlich geringeren Druckanstieg als bei einer reinen Luftfüllung zur Folge (Gl. 6.6). Bei der Dekompression wird ein Teil der Flüssigkeit gasförmig (Abb. 6.3b). Dadurch erhöht sich die Masse des Gases und das freiwerdende Volumen wird gefüllt. Die Druckänderung ist wieder geringer als bei einem luftgefüllten Gehäuse. Marrs kompensiert demnach den Druckanstieg im Luftvolumen durch eine Änderung der Gasmasse. Dadurch gewinnt er akustisch wirksames Volumen. Der Vorgang funktioniert besonders gut bei tiefen Frequenzen. Es findet immer eine der Membranbewegung proportionale Änderung der Gas-Flüssigkeitsmenge statt. Die dazu benötigte Energie wird dem Schallfeld entzogen. Bei höheren Frequenzen findet der Wechsel der Aggregatzustände nicht mehr schnell genug statt, weshalb sich das akustische Volumen nicht mehr vergrößert. Marrs gibt für Lautsprecher mit einem Gehäusevolumen von kleiner als 16 l einen Volumengewinn von 50 % bis 60 % an [147]. Als Bedingung nennt er einen bevorzugten Temperaturbereich für das Gehäuseinnere von 18 °C bis 27 °C und die geschlossene Gehäuseform. Nach etwa fünf Jahren sollte das Paket im Gehäuse gewechselt werden, da sich durch eindringende Luft die Eigenschaften verändern.

Ein weiterer Ansatz zur dynamischen Änderung des Gasvolumens besteht in der Verwendung von Aktivkohle im Lautsprechergehäuse [256], [257], [249]. Dazu wird das Lautsprechergehäuse mit Aktivkohle ausgekleidet (Abb. 6.4). Beim Kompressionsvorgang werden die Gasmoleküle durch physikalische Adsorptionsvorgänge an die Aktivkohle infolge auftretender van-der-Waals-Kräfte gebunden. Dadurch verringert sich die Menge der frei beweglichen Gasmoleküle. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen den Impulsübertragungen der Gasmoleküle und dem Gasdruck auf die Gehäusewände kommt es somit zu einer Druckverringerung (Gl. 5.10, S. 69). Bei der Dekompression lösen sich die Gasmoleküle von der Aktivkohle und bewegen sich wieder frei im Gehäuse. Nach Wright entspricht dies einer temporären Änderung der Gasdichte, die eine entsprechend veränderte Volumensteifigkeit zur Folge hat (Gl. 5.21, S. 70) [256]. Entscheidend für die Menge der gebundenen Moleküle ist die vorhandene Porenoberfläche, damit möglichst viel Luft mit der Aktivkohle reagieren kann. Wright empfiehlt Aktivkohle mit so-

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

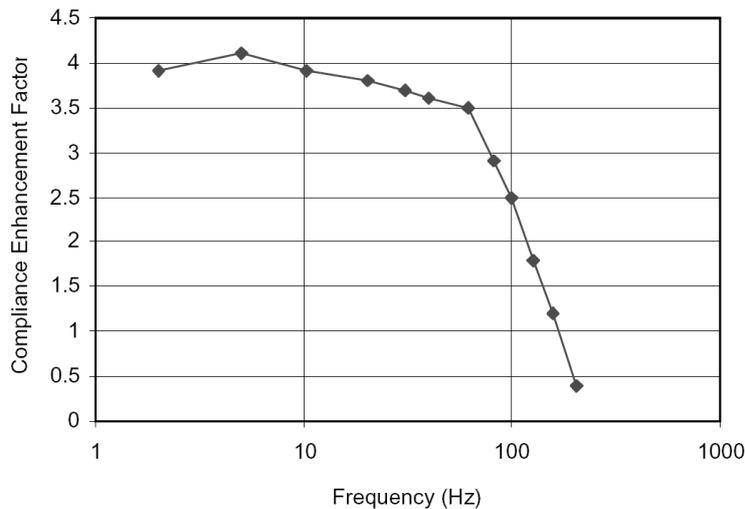


Abb. 6.5: Vergrößerung der Nachgiebigkeit durch Verwendung von Aktivkohle unter optimalen Bedingungen [256]

genannte Mikroporen, die einen Querschnitt von weniger als 2 nm besitzen [256]. Die Adsorptionsvorgänge sind nur im Frequenzbereich unterhalb ca. 100 Hz so wirksam, dass es zu einer deutlichen Verringerung der Volumensteifigkeit kommt. Für höhere Frequenzen ist der Wechsel zwischen Kompression und Dekompression zu schnell, als dass sich effektiv Bindungen mit der Aktivkohle aufbauen können. Unter optimalen Bedingungen erreicht Wright eine Steifigkeitsreduktion um den Faktor 4 (Abb. 6.5). Praktisch sind Faktoren 1,5 bis 3 realisierbar, woraus sich ein Volumengewinn von ca. 40 % ergibt [256]. Zu beachten ist, dass Aktivkohle leicht Feuchtigkeit bindet, wodurch die Poren verschlossen werden und somit die Gasadsorption verringert wird. Sie sollte deshalb so trocken wie möglich im Gehäuse untergebracht werden [256]. KEF Audio³ nennt den Aktivkohle-Ansatz „Acoustic Compliance Enhancement“ (ACE) und setzt diesen beispielsweise beim Subwoofer 209 ein. Dieser Subwoofer erreicht bei Abmessungen von 50 cm × 63 cm × 63 cm eine untere -6 dB-Grenzfrequenz von 12 Hz (Abb. 6.4 b).

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur volumenvergrößernden Wirkung von Aktivkohle sind in Abschnitt 7.1.4 (S. 124ff.) und Abschnitt 7.5.2 (S. 160ff.) aufgeführt.

Neben der Füllung des Lautsprechergehäuses mit verschiedenen Materialien gibt es auch Ansätze, bei denen im Gehäuse ein Vakuum erzeugt wird (Abb. 6.6) [161]. Vordergründig kann bei einem solchen Gehäuse das Gehäusevolumen keine Rückstellkraft in Form einer Luft- bzw. Gasfeder ausüben. Allerdings muss im Ruhezustand der Druckunterschied zwischen atmosphärischem Außendruck und dem fehlenden Innendruck ausgeglichen werden. Die dazu notwendige Gegenkraft wird in [161] durch ein Magnetsystem realisiert. In den unterschiedlichen Ausführungen werden auch Systeme mit Abstandssensoren vorgestellt. Über einen Regelkreis ist

³ www2.kef.com/de

6.3 Membranaufhängung mit inverser Federkennlinie

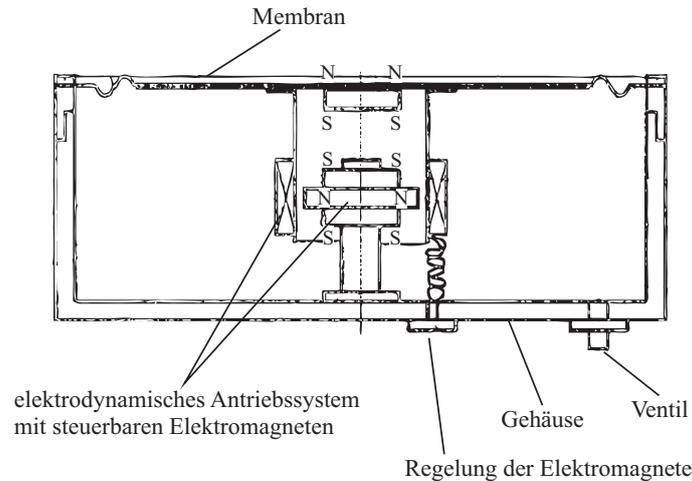


Abb. 6.6: Lautsprecher mit Vakuumgehäuse zur Eliminierung der Luftfedersteifigkeit [161]

es somit möglich, die Gleichgewichtslage der Membran zu steuern. Dennoch hat sich dieses Prinzip bisher nicht im Lautsprecherbau durchsetzen können. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Bereitstellung der geregelten Gegenkraft bisher nicht optimal umgesetzt wurde.

6.3 Membranaufhängung mit inverser Federkennlinie

Bei den bisher betrachteten Ansätzen wurde angenommen, dass die Rückstellkraft F_s der Membranaufhängung mit der Membranauslenkung ξ zunimmt (Abb. 6.7a). Gemeinsam mit der Rückstellkraft des Luftvolumens im Gehäuse wirkt sie der Membranbewegung entgegen. Es gibt einige Ansätze, bei denen die Membranaufhängung eine „inverse“ Federkennlinie besitzt, so wird die Rückstellkraft mit zunehmender Auslenkung geringer [59], [60] bzw. sogar entgegen der Rückstellkraft des Luftvolumens [154] wirksam (Abb. 6.7b). Auf diese Weise soll der Einfluss des Luftvolumens weitestgehend kompensiert werden. Dazu kann die Membranauf-

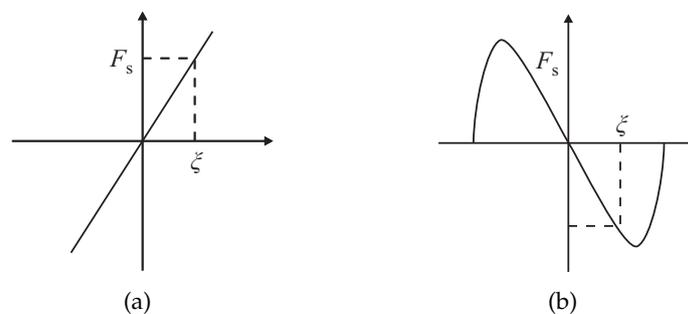


Abb. 6.7: Darstellung einer gewöhnlichen (a) und einer inversen (b) Federkennlinie mit F_s als inverse Rückstellkraft und ξ als Auslenkung [75]

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

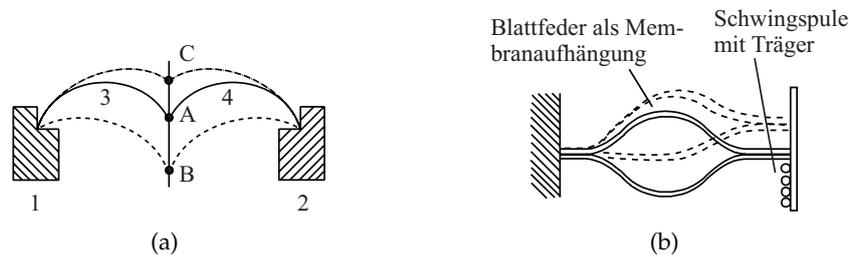


Abb. 6.8: Membranaufhängungsformen mit inverser Federkennlinie (a) [154], (b) [75]

hängung wie in Abb. 6.8 ausgebildet sein. Die Teile 3 und 4 in Abb. 6.8a bilden die Membranaufhängung und sind zwischen den Teilen 1 und 2 eingespannt. Dadurch befindet sich die Membranaufhängung in einem instabilen Zustand. Findet eine Auslenkung von Punkt A nach Punkt B statt, geht von den Teilen 3 und 4 eine unterstützende Kraft von A nach B aus, da sie bestrebt sind, die Spannung zu verringern, um in einen stabileren Zustand zu gelangen. Die Rückstellkraft des Luftvolumens wird somit um die wirkende Kraft der Membranaufhängung verringert. In [154] wird sogar von der Möglichkeit der vollständigen Kompensation gesprochen. Auf diese Weise kann das Lautsprechergehäuse so klein ausfallen, dass es durch einen geschlossenen Lautsprecherkorb⁴ gebildet wird. Ebenso kann nach [154] die Kompensation nicht nur durch mechanische Feder Elemente, sondern auch mittels magnetischer Kräfte realisiert werden. Dazu wird ein Magnet mit den Schwingteilen verbunden und ein anderer Magnet fest am Lautsprecherkorb installiert. Beide sind mit gleicher Polung zueinander ausgerichtet. Dadurch stoßen sie sich voneinander ab, was einen instabilen Gleichgewichtszustand hervorruft. Bei kleinster Auslenkung der Membran wird die abstoßende Kraft zwischen den Magneten in Auslenkungsrichtung unterstützend wirksam (Abb. 6.9). In späteren Patentanmeldungen geht es besonders um konstruktive Verbesserungen. Zum

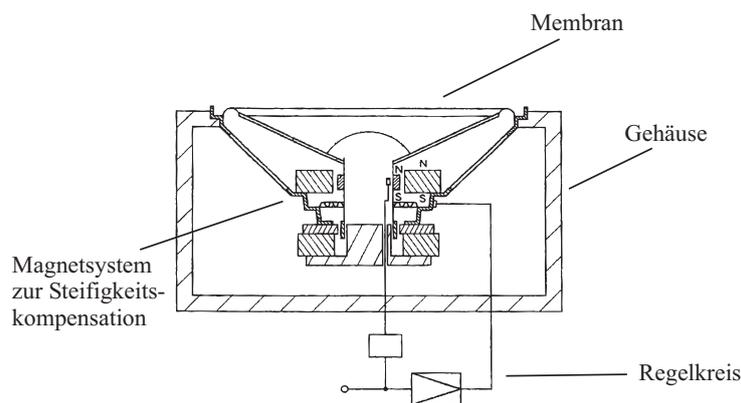


Abb. 6.9: Realisierung einer inversen Rückstellkraft über eine Magnetvorrichtung mit Regelkreis [213]

⁴ Der Korb bildet beim konventionellen Konuslautsprecher das physische Gerüst, an dem alle Schwingteile befestigt sind.

einen werden die in [154] beschriebenen mechanischen Federelemente für die inverse Rückstellkraft wegen zu großer Nichtlinearitäten gegen Blattfederelemente ausgetauscht (Abb. 6.8) [75]. Zum anderen wird die Realisierung der inversen Rückstellkraft über eine Magnetvorrichtung um einen Regelkreis erweitert, der sowohl eine Einstellung der Rückstellkraft als auch der Nulllage der Membran ermöglicht (Abb. 6.9) [213].

Obwohl die Membranaufhängung mit inverser Federkennlinie laut [154] die Möglichkeit der vollständigen Luftfederkompensation und damit sehr kleine Lautsprechergehäuse ermöglicht, hat sich dieser Ansatz im Lautsprecherbereich nicht durchgesetzt. Dies legt die Vermutung nahe, dass die praktische Realisierung noch immer Probleme hervorruft, die bisher nicht zufriedenstellend gelöst wurden.

6.4 Die akustische Aufhängung als Ausgangspunkt

Damit das Gehäuse für elektrodynamische Lautsprecher keinen Einfluss auf die Steifigkeit des Systems hat, wurden diese bis in die 1960er Jahre sehr groß gebaut. So war für das Schwingungsverhalten nur die Steifigkeit der Membranaufhängung bestimmend. Sie musste der Membran auch die erforderliche Rückstellkraft und mechanische Führung bieten.

Da viele der heutigen Flachlautsprecher als Dipolstrahler, also für den Betrieb ohne Gehäuse ausgelegt sind, ist auch hier die Steifigkeit der Membranaufhängung so gewählt, dass sie die Rückstellkraft und die mechanische Führung darstellt. Soll der akustische Kurzschluss bei einem solchen Flachlautsprecher durch ein Gehäuse verhindert werden, so ist es ausreichend groß zu wählen, damit kein unnötiger Anstieg der Gesamtsteifigkeit entsteht⁵.

Bis zu den 1960er Jahren war die Tieftonwiedergabe konventioneller Konuslautsprecher mit Klirrfaktoren bis 30 % Klirrfaktor unbefriedigend [241]. Als Ursachen nennt Villchur die bei größeren Auslenkungen aus dem Magnetfeld bewegte Schwingspule und das nichtlineare Verhalten der Membranaufhängung. Für das erste Problem empfiehlt er die Wickelhöhe der Spule größer als die Luftspalthöhe zu wählen. Das zweite Problem löste er mit der akustischen Aufhängung, die er im Jahre 1954 zum Patent anmeldete [243]⁶. Die Grundidee der akustischen Aufhängung besteht darin,

⁵ Wie bereits in Abschnitt 5.3.1 (S. 63ff.) erwähnt wurde, stellt bei Flachlautsprechern mit Folienmembran, z.B. Elektrostaten, die Verwendung eines Lautsprechergehäuses in erster Linie eine Reduktion der schwingenden Masse dar. Der Einfluss der Volumensteifigkeit steht hier erst an zweiter Stelle [190, S. 18ff.].

⁶ Infolge einer späteren Patentstreitigkeit mit der Fa. Elektro-Voice wurde das Patent neu geprüft und im Jahre 1962 als ungültig erklärt. Die Prüfungskommission kam zu dem Ergebnis, dass bereits eine frühere Patentanmeldung von Olson aus dem Jahr 1944 diese Idee beschreibt [166]. Im Nachhinein bereut Villchur, dass er wegen der Anwaltskosten die Anmeldung allein verfasste. Bei einer gründlichen Vorabrecherche durch den Patentanwalt hätte sich Villchur von diesem Patent ohne Schwierigkeiten absetzen können [129].

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

statt der Federsteifigkeit der Membranaufhängung die wesentlich lineareren Eigenschaften des eingeschlossenen Luftvolumens zu nutzen. In Abb. 6.10 ist diese Idee in Form des elektroakustischen Ersatzschaltbildes dargestellt. Statt die Steifigkeit der mechanischen Membranaufhängung s_s um den Faktor 10 größer als die Steifigkeit des Luftvolumens s_v zu wählen (Abb. 6.10a), werden die Verhältnisse umgedreht (Abb. 6.10b). Dadurch wird das Schwingungsverhalten der Membran von den wesentlich lineareren Federeigenschaften des Luftvolumens bestimmt, ohne dass sich die Gesamtsteifigkeit erhöht. Im Interview mit Landers schilderte Villchur:

„I thought, well, what we need is a linear restoring force, one that doesn't bind, one that allows the cone to move a large distance and brings it back elastically. That's when the light went on. This linear spring had been there all the time. The cushion of air in the cabinet was exactly the kind of spring I wanted.“ [129]

Die Notwendigkeit, die Rückstellkraft der Membranaufhängung nun zu einem großen Teil durch die Rückstellkraft der Luftfeder zu ersetzen, bedingte dann die Verkleinerung des Lautsprechergehäuses, weshalb Villchur dies als zusätzlichen Gewinn seiner Erfindung bezeichnet. Primär ging es aber um die Verringerung des Klirrfaktors im Tieftonbereich [129].

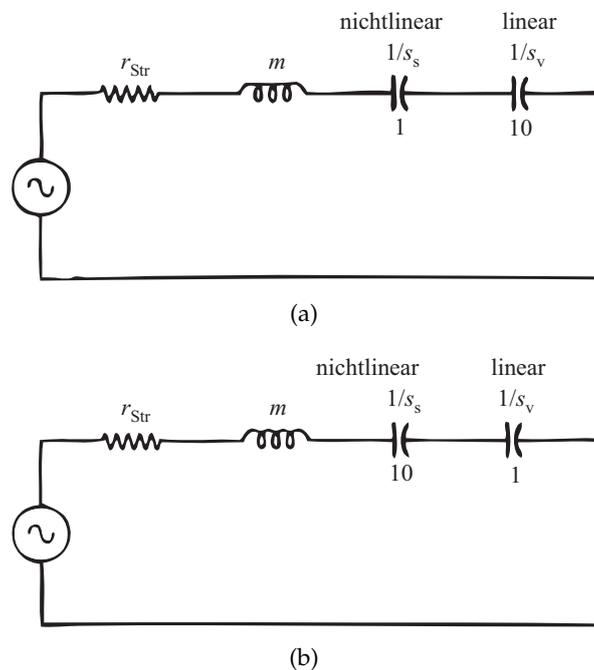


Abb. 6.10: Vereinfachtes Ersatzschaltbild der von der Aufhängungssteifigkeit bestimmten mechanischen Aufhängung (a) und der durch das Luftvolumen dominierten akustischen Aufhängung (b). Die Gesamtsteifigkeit des Systems bleibt dabei unverändert. Lediglich das Verhältnis von Aufhängungssteifigkeit (s_s) zu Luftsteifigkeit (s_v) kehrt sich um [241]. r_{Str} steht für den Strahlungswiderstand und m für die bewegte Masse. (FU-Analogie)

6.5 Aperiodisch bedämpftes Gehäuse

Die erste Umsetzung der akustischen Aufhängung fand bei der Entwicklung des Lautsprechers AR1 durch Villchur und Kloss statt. Bei einer Kantenlänge von $64\text{ cm} \times 36\text{ cm} \times 28\text{ cm}$ konnte dieser Lautsprecher Frequenzen bis 32 Hz wiedergeben. Die gleiche Tieftonwiedergabe erreichten Lautsprecher ohne akustische Aufhängung nur bei wesentlich größeren Abmessungen [103].

Bei nahezu allen aktuellen Gehäuselautsprechern kommt das Prinzip der akustischen Aufhängung zur Anwendung. Je nach Lautsprecherchassis und erwünschter Übertragungskurve wird die Gehäusesteifigkeit gegenüber der Aufhängungssteifigkeit um den Faktor 3 bis 32 (Besselabstimmung 2. Ordnung) größer gewählt. In den für die Berechnung von Lautsprechergehäusen verwendeten Thiele & Small-Parametern findet das Steifigkeitsverhältnis im Parameter α seine Berücksichtigung (Abschnitt 7.1.2, S. 117ff.) [198], [72, S. 50ff.].

Für den Entwurf eines Flachlautsprechers mit Gehäuse sollte die Steifigkeit der Membranaufhängung um den Grad herabgesetzt werden, um den das Luftvolumen diese Aufgabe übernehmen kann. Eine komplette Eliminierung der Aufhängungssteifigkeit ist wegen der notwendigen mechanischen Führung nicht möglich [242, S. 81].

6.5 Aperiodisch bedämpftes Gehäuse

Nach Dickason geht die Geschichte des aperiodisch bedämpften Gehäuses auf die 1960er Jahre zurück [72, S. 87]. Dynaudio und Scan-Speak bauten die Lautsprecherreihe A-25, deren geschlossenes Lautsprechergehäuse mit einer kontrollierten Undichtigkeit (KU) in Form eines Loches⁷ mit dahinterliegendem Dämmmaterial ausgestattet war (Abb. 6.11). Infolge der Gehäuseundichtigkeit werden die resistiven Verluste des geschlossenen Gehäuses erhöht [72, S. 87]. Damit sinken die

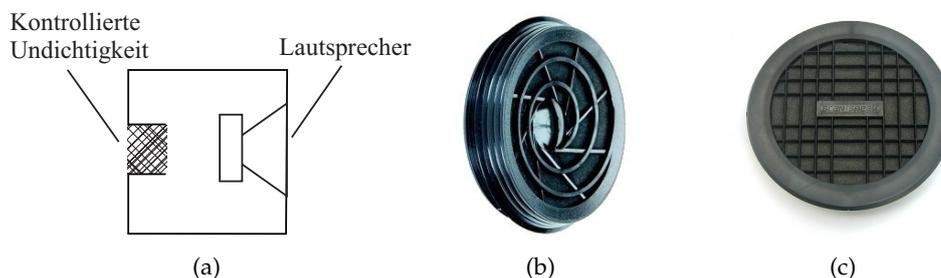


Abb. 6.11: Prinzip der kontrollierten Undichtigkeit (a) und verschiedene Einbausätze der Industrie zur Realisierung: Variovent von Dynaudio (b) [23] und Flow Resistor von Scan-Speak (c) [14]

⁷ Da in der Gehäuseöffnung Dämmwolle eingebracht ist, darf die Undichtigkeit nicht als Bassreflex-Prinzip verstanden werden [72, S. 87].

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

mechanische Güte und die Gesamtgüte Q_{tc} des Gehäuselautsprechers. Die bei einem zu kleinen Gehäuse vorhandene Resonanzüberhöhung wird somit verringert bzw. beseitigt (Abschnitt 5.3.1, S. 63ff.). Demzufolge ist ein „zu kleines“ Gehäuse verwendbar (Gl. 7.3, S. 118). Die Impedanzkurve weist als Folge der KU eine bis zu 50 % verringerte Resonanzamplitude und eine vergrößerte Resonanzbreite auf⁸. Der Lautsprecher stellt somit ein aperiodisch bedämpftes System dar, was gleichzeitig mit einer größeren Impulstreue verbunden ist [8].

Dickason sieht im aperiodisch bedämpften Gehäuse eine Variante des geschlossenen Gehäuses mit spezieller Dämpfungstechnik. Demnach kommt die kontrollierte Undichtigkeit in der Wirkung einer 100 %igen Gehäusefüllung gleich. Beide Ansätze vergrößern das akustisch wirksame Volumen. Der Schalldruckpegelverlauf gleicht einem Gehäuse mit 50 %iger Füllung. Dickason bezeichnet das aperiodische Gehäuse als Alternative zur Verwendung einiger Dämmmaterialien im Gehäuse [72, S. 87ff.]. Infolge der größeren Bedämpfung verringert sich der Wirkungsgrad.

Die Firma Dynaudio bietet die KU als kompakten Einsatz unter dem Namen „Variovent“ an (Abb. 6.11b). Je nach Gehäusegröße⁹ sind davon 1 St. bis 3 St. in das Gehäuse auf der Rückseite¹⁰ einzusetzen. Das Gehäuse wird zu 2/3 mit Dämmmaterial gefüllt. Zwischen Variovent und Lautsprechermembran muss ein Kanal frei bleiben [8]. Scan-Speak vertreibt ebenso einen Einsatz unter der Bezeichnung „Flow Resistor“ (Abb. 6.11c). Statt des Einsatzes industriell gefertigter Einbauten können KUs auch im Eigenbau gefertigt werden. Timmermanns stellt in [228] einen Miniatur-Satelliten-Lautsprecher vor, dessen Gehäusegüte Q_{tc} durch eine KU von 1,6 auf 0,9 gesenkt wurde. Durch die Kombination der KU mit einem Hochpasskondensator (Abschnitt 6.7, S. 86ff.) konnte die Resonanzüberhöhung von ca. 5 dB im Amplitudenfrequenzgang eliminiert werden.

6.6 Compound-Prinzip

Im Jahre 1951 meldete Olson die heute unter dem Namen Compound-Prinzip geführte Lautsprecherbauweise zum Patent an [165]. Das Compound-Prinzip sieht vor, dass zwei identische Lautsprecher auf das Gehäusevolumen arbeiten (Abb. 6.12). Dabei ist das Volumen in zwei Kammern unterteilt, in das Volumen der Koppelkammer und das Restvolumen. Das Volumen der Koppelkammer ist wesentlich kleiner als das Restvolumen. Der Abstand zwischen beiden Lautsprechern ist für alle betrachteten Wellenlängen klein, um relevante Phasenunterschiede zu vermeiden. Das Grundprinzip beruht darauf, dass der innere Lautsprecher die Druckschwankungen in der Koppelkammer ausgleicht und der äußere Lautsprecher deshalb

⁸ Demnach wird die Leistungsaufnahme des Lautsprechers als Lastimpedanz des Verstärkers verändert.

⁹ Dynaudio empfiehlt folgende Kombinationen aus Gehäusevolumen und Anzahl an Einbausätzen: 50 l mit 1 St., 80 l mit 2 St., >80 l mit 3 St. [8].

¹⁰ Es ist eine 11 cm Bohrung auf der Gehäuserückseite erforderlich.

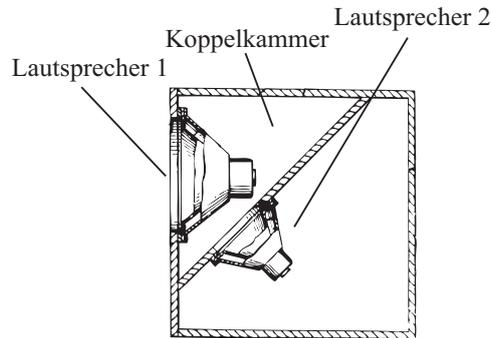


Abb. 6.12: Schematische Treiberanordnung beim Compound-Prinzip [165]

unter quasi isobaren Zuständen arbeitet. Dies hätte zur Folge, dass die Resonanzfrequenz des äußeren Treibers nicht mehr vom Luftvolumen der Koppelkammer abhängig ist. Im Jahre 1982 meldeten Shelton und George eine Erweiterung des Compound-Prinzips zum Patent an [196]. Mit Hilfe eines Regelkreises soll gewährleistet werden, dass sich die beiden Lautsprecher trotz qualitativer Abweichungen gleich verhalten. Dazu wird ein Mikrofon in der Koppelkammer als Drucksensor verwendet und das Signal für den inneren Lautsprecher entsprechend den Ergebnissen der Mikrofonmessung modifiziert. Auf diese Weise können preisgünstigere Lautsprecher eingesetzt werden, bei denen die Herstellertoleranzen in der Regel größer sind.

Der Gewinn der Compound-Bauweise besteht darin, dass zwei Lautsprecher auf das Gehäusevolumen und damit die Luftfeder arbeiten. Dadurch verdoppeln sich die Antriebskraft, die bewegte Masse und die Aufhängungssteifigkeit. Die mechanische und elektrische Güte bleiben gegenüber der Verwendung von nur einem Lautsprecher gleich. Bei richtiger Dimensionierung kann das Gehäusevolumen halbiert werden, ohne dass es zu einem Anstieg der Resonanzfrequenz kommt. Umgekehrt kann eine tiefere untere Grenzfrequenz erreicht werden, wenn das Volumen nicht halbiert wird (Abb. 6.13). Da der innere Lautsprecher aber auf das endliche Restvolumen arbeitet, kann er die Druckschwankungen in der Koppelkammer nur zu einem gewissen Grad ausgleichen. Wirkliche isobare Zustände werden demnach nicht erreicht [226]. Zusätzlich kann bei einer spiegelsymmetrischen Anordnung

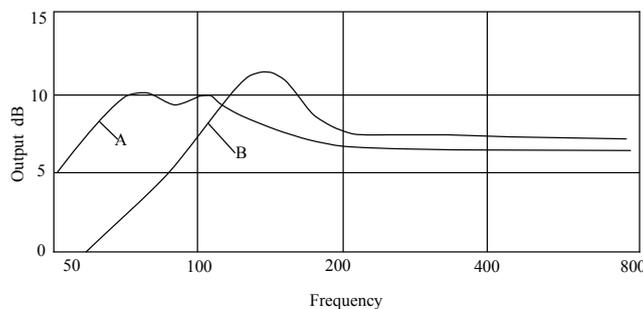


Abb. 6.13: Amplitudenfrequenzgang mit Compound-Bauweise (A) und ohne Compound (B) bei gleichem Gehäusevolumen [165]

des Lautsprecherpaares ein Großteil das unsymmetrische Schwingungsverhalten der Membranen kompensiert¹¹ werden, was einen geringeren Klirrfaktor zur Folge [226]. Der Preis für das Compound-Prinzip ist dafür die doppelte Anzahl an benötigten Wandlern und die Vergrößerung der minimalen Bautiefe, da zwei Wandler hintereinander angeordnet sind.

6.7 Passive Equalisierung mittels Hochpassfilter

Nach Dickason sind die Arbeiten Thieles [218], [219] über die Beeinflussung der Übertragungskurve im unteren Frequenzbereich durch vorgeschaltete passive Filter der Ausgangspunkt für weitere Entwicklungen gewesen [72, S. 78]. Thiele zeigt, dass die Übertragungskurve bei Bassreflexlautsprechern im unteren Übertragungsbereich mittels vorgeschalteten elektrischen Netzwerken an bekannte Filterkurven, z. B. Butterworth und Chebyshev, angenähert werden kann. Prinzipiell werden die Übertragungskurve des Lautsprechers und die des vorgeschalteten Netzwerkes zu einer neuen Übertragungsfunktion kombiniert. Benson und v. Recklinghausen greifen diese Idee auf und adaptieren sie für die Tieftonerweiterung bei geschlossenen Boxen [49], [244]. V. Recklinghausen meldete mehrere Ausführungsformen im Jahre 1980 zum Patent an [245]. Er kombiniert hierbei den geschlossenen Lautsprecher als Hochpassfilter 2. Ordnung mit unterschiedlichen Filtern und erzeugt so Filterstrukturen bis 6. Ordnung. Heute sind besonders die Strukturen 3. und 4. Ordnung bekannt [222]. Dazu wird dem Lautsprecher ein Hochpassfilter 1. Ordnung in Form eines Kondensators bzw. 2. Ordnung in Form eines Kondensators zusammen mit einer Spule vorgeschaltet (Abb. 6.14). Bei der richtigen Kombination der Lautsprecher- und Filterparameter gelingt es, die Übertragungskurve einer wesentlich größeren Box zu erreichen. Die dabei mögliche Volumensparnis ist unterschiedlich. In den Ausführungsbeispielen von v. Recklinghausen beträgt die Volumensparnis 16 % bei Verwendung eines Hochpassfilters 1. Ordnung in Kombination mit einer maximal flachen Gehäuseabstimmung von $Q_{tc} = 0,707$. Bei Verwendung eines Hochpassfilters 2. Ordnung in Kombination mit einer Gehäuseabstimmung von $Q_{tc} = 0,890$ beträgt die Volumensparnis 77 % [245]. Demnach kann der Lautsprecher in ein wesentlich kleineres Gehäuse eingebaut werden, ohne dass im unteren Übertragungsbereich eine Resonanzüberhöhung im Amplitudenfrequenzgang auftritt (Abb. 6.15a).

Der eigentliche Wirkmechanismus der Hochpassfilterung wird anhand der veränderten Impedanzkurve deutlich (Abb. 6.15b). Unmittelbar unterhalb der Resonanzfrequenz erfährt die Impedanz eine Absenkung. Oberhalb der Resonanzfrequenz wird sie leicht angehoben. Die Lautsprecherimpedanz steigt bis zur Resonanzfrequenz an. Damit weist sie induktiven Charakter auf. Mit dem Hochpasskondensator bildet sie so einen Schwingkreis, um dessen Eigenfrequenz die Gesamtimpedanz

¹¹ Das Verhalten wesentlicher Lautsprecherparameter, z.B. Aufhängungssteifigkeit und Kraftfaktor, unterscheidet sich je nach Auslenkungsrichtung und -stärke (Abb. 7.3, S. 112).

6.7 Passive Equalisierung mittels Hochpassfilter

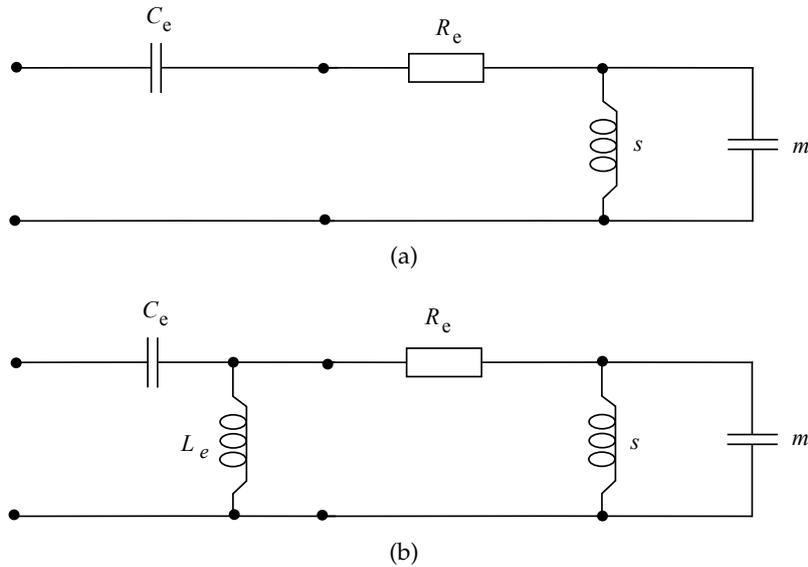


Abb. 6.14: Ersatzschaltbild des geschlossenen Lautsprechers mit vorgeschaltetem Hochpassfilter 1. Ordnung (a) bzw. 2. Ordnung (b) zur Tieftonerweiterung [245]. C_e kennzeichnet den Kondensator und L_e kennzeichnet die Spule des Hochpassfilters. R_e steht für den Schwingspulenwiderstand. Zur Verdeutlichung wurde für die Steifigkeit das Symbol s statt L und für die bewegte Masse das Symbol m statt C verwendet (FI-Analogie).

geringer ist als jede Teilimpedanz, da sich die induktiven und kapazitiven Anteile aufheben. In diesem Frequenzbereich kann entsprechend mehr Strom fließen, und die Membran mit mehr Kraft ausgelenkt werden (Gl. 4.1, S. 40). Unmittelbar oberhalb der Resonanzfrequenz fällt die Impedanz und zeigt somit kapazitives Verhalten. Zusammen mit dem Hochpasskondensator bildet sie einen kapazitiven Spannungsteiler. Auf diese Weise fließt weniger Strom durch die Schwingspule und die Membranauslenkung wird kleiner. Die Schalldrucküberhöhung eines zu klein gewählten Gehäuses kann so equalisiert und der Pegel am unteren Ende des Übertragungsbereiches angehoben werden [222], [227], [230]. Entsprechend der in Abb. 6.14 dargestellten Ersatzschaltbilder entsteht aus dem System 2. Ordnung, was dem Lautsprecher im geschlossenen Gehäuse entspricht, ein System 3. bzw. 4. Ordnung, dessen untere Flanke des Übertragungsbereiches mit 18 dB/Okt. bzw. mit 24 dB/Okt. statt der 12 dB/Okt. fällt. In [222], [227], [230] und [229] wird der Ansatz der Hochpassfilterung für aktuelle Lautsprecherentwicklungen mit geschlossenem, Bassreflex- und Bandpass-Gehäuse eingesetzt.

Nach v. Recklinghausen ist bei der Verwendung des Hochpassfilters 2. Ordnung wegen der ansteigenden Güte des Lautsprechersystems eine Reduktion des Antriebmagnets möglich. Im Gegenzug vergrößert sich bei allen gefilterten Varianten die Gruppenlaufzeit des Lautsprechers. Für die Hochpassfilterung mit nur einem Kondensator gibt Dickason in [72, S. 79] zur Berechnung der Kondensatorkapazität folgende Berechnungsformel an (Gl. 6.7):

$$C = \frac{0,234}{R_e \cdot f_c} \quad (6.7)$$

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

Die Verwendung eines Hochpasskondensators ist besonders für Tieftonlautsprecher mit hoher Freiluftgüte (Q_{ts}) geeignet, die ein großes Gehäuse für eine Butterworth-Abstimmung ($Q_{tc} = 0,707$) benötigen. Bei Verwendung des Hochpasskondensators kann das Gehäuse soweit verkleinert werden, dass Q_{tc} ohne Kondensator zwischen 1,0 und 1,1 liegt. Der Kondensator sorgt dafür, dass der Amplitudenfrequenzgang ohne Überhöhungen entsprechend einer Butterworth-Abstimmung verläuft (Abb. 6.15a) [225]. Allerdings ändert sich wegen des Hochpasses 1. Ordnung die Flankensteilheit unterhalb der unteren Grenzfrequenz von 12 dB/Okt. auf 18 dB/Okt. In [225] wird durch das Vorschalten eines Hochpasskondensators von $680 \mu\text{F}$ eine Volumenverkleinerung von 35 l auf 10 l bei einem Schalldruckpegelverlauf entsprechend einer Butterworth-Abstimmung erreicht.

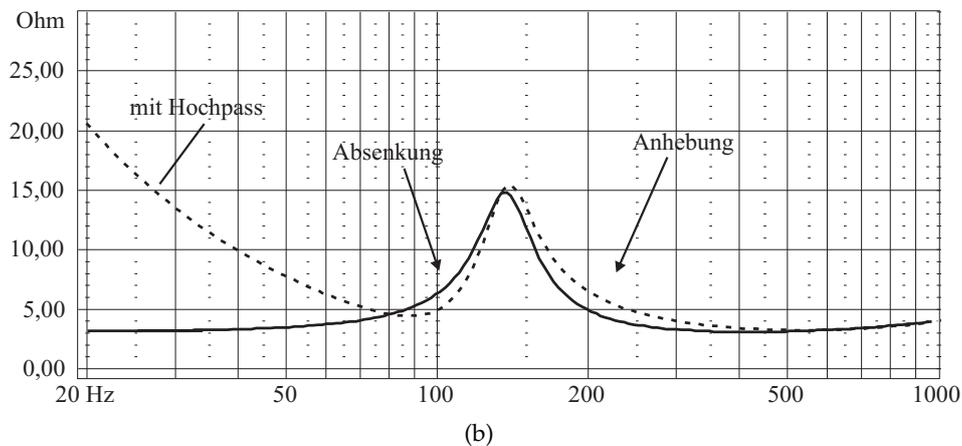
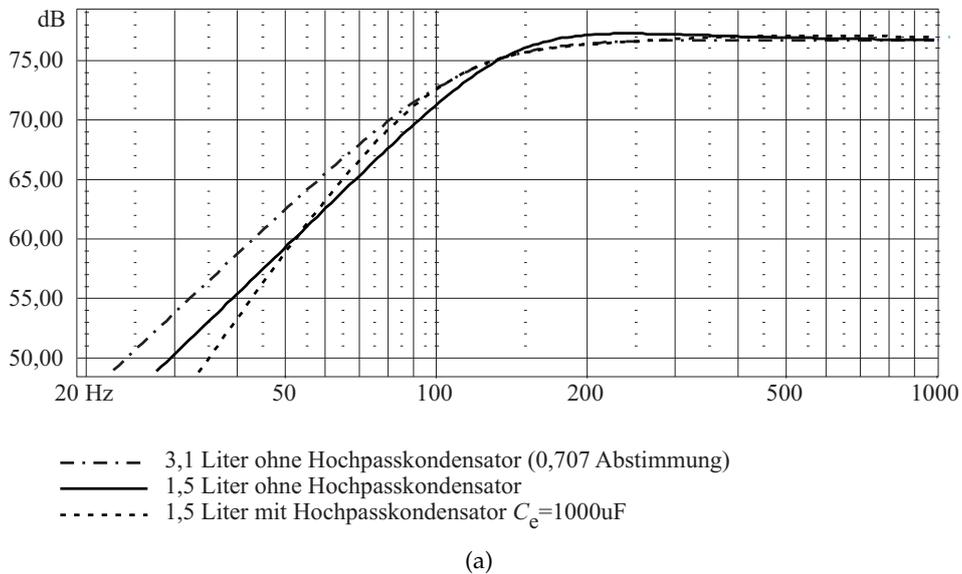


Abb. 6.15: Simulierter Amplitudenfrequenzgang (a) und Impedanzverlauf (b) eines Lautsprechers in verschiedenen Gehäusegrößen ohne und mit Hochpasskondensator

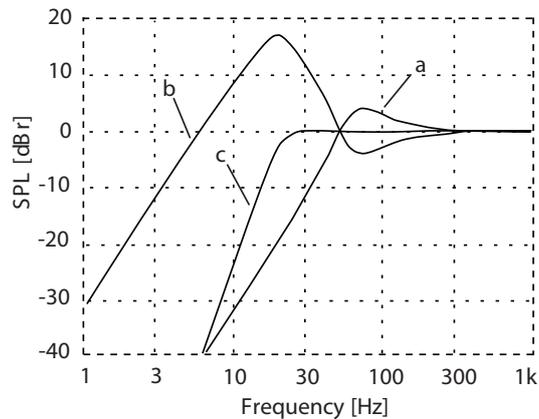


Abb. 6.16: Frequenzganglinearisierung und -erweiterung mittels aktiver Entzerrung, a - ungefilterte Übertragungskurve des Lautsprechers, b - Filterkurve, c - gefiltert Übertragungskurve des Lautsprechers [133]

6.8 Aktive Equalisierung

Wie bei der passiven Equalisierung kann auch mit aktiver Entzerrung Einfluss auf die Auswirkungen der Volumensteifigkeit des Lautsprechergehäuses genommen werden. Durch eine frequenzabhängige Vergrößerung der Antriebskraft wird der Rückstellkraft der Luftfeder entgegengewirkt. Das Eingangssignal wird dabei derart vorverzerrt, dass sich für den Lautsprecher mit Filter beispielsweise eine lineare Übertragungsfunktion mit geringerer unterer Grenzfrequenz ergibt. Die Kombination der Übertragungsfunktionen eines aktiven Filters und eines Lautsprechers wurde bereits um das Jahr 1970 in verschiedenen Untersuchungen aufgegriffen [218], [219], [49]. Im Jahre 1980 beschreibt Leach in [132] die Kombination eines geschlossenen Lautsprechers mit einem aktiven Butterworth-Filter 2. Ordnung. Dadurch gelingt ihm für eine Butterworth-Abstimmung 2. Ordnung eine Grenzfrequenzverschiebung um 0,886 Oktaven. Im Gegensatz zu früheren Veröffentlichungen sieht er Vorteile darin, dass das Filter-Design und das Lautsprecher-Design unabhängig voneinander gewählt werden können. In [133] erweitert Leach seinen Ansatz auf beliebige Ziel-Übertragungsfunktionen geschlossener Lautsprecher. In Abb. 6.16 sind Simulationsergebnisse von Leach dargestellt [133]. Die durch ein zu kleines geschlossenes Lautsprechergehäuse entstehende Übertragungskurve (a) besitzt eine starke Resonanzüberhöhung und eine untere Grenzfrequenz, die verringert werden soll. Zu diesem Zweck kombiniert Leach die Übertragungsfunktion des Lautsprechers mit der Übertragungsfunktion eines aktiven Filters (b). Das Ergebnis ist die aus den Kurven a und b kombinierte Übertragungsfunktion c. Die Resonanzüberhöhung ist aufgehoben und die untere Grenzfrequenz verringert worden. Nach Leach eignet sich diese Methode für alle Gehäusegüten (Q_{tc}) eines geschlossenen Gehäuses. Zur Equalisierung können beliebig Filtercharakteristiken gewählt werden. Die Flanken des Filters sollte zu tiefen Frequenzen hin aber mit mindestens 12 dB/Okt. abfallen, damit der Lautsprecher vor unerwünscht großen

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

Membranauslenkungen gerade im unteren Frequenzbereich geschützt ist¹². Für die Realisierung des in Abb. 6.16 dargestellten Übertragungsverhaltens wurde eine Butterworth-Charakteristik 2. Ordnung verwendet. Zusammen mit dem geschlossenen Lautsprecher als Hochpass 2. Ordnung entstand insgesamt eine Butterworth-Charakteristik 4. Ordnung. Mit diesem Ansatz sind theoretisch beliebig tiefe Grenzfrequenzen erzielbar. Für die Praxis ist allerdings zu beachten, dass die notwendige Membranauslenkung, die größere erforderliche Verstärkerleistung zur Pegelanhhebung und die damit verbundene Verlustleistung bzw. Abwärme nicht beliebig wählbar sind. Gerade die größeren Membranauslenkungen führen bei nicht darauf optimierten Membranaufhängungen und Antriebssystemen zu deutlich höheren Klirrfaktoren.

Staggs empfiehlt, bei der Wahl der Gehäuseabstimmung und der Filterordnung das damit verbundene Zeitverhalten des Gesamtsystems zu berücksichtigen [206]. Eine hohe Filterordnung bzw. Gehäusegüte führt zu lang andauernden Ein- und Ausschwingvorgängen. Allerdings hält er unnötig geringe Gehäusegüte, z.B. $Q_{tc} = 0,5$ (Linkwitz-Abstimmung), trotz ihres sehr guten Zeitverhalten für nicht praktikabel, da wegen des frühzeitigen Pegelabfalls eine enorme Tieftonanhebung notwendig ist, die eine erhebliche Phasenverschiebung¹³ bedingt. Staggs empfiehlt Gehäusegüten von z. B. $Q_{tc} = 1,1$ (Chebyshev-Abstimmung). Die tiefer liegende untere Grenzfrequenz erfordert eine wesentlich geringere Tieftonanhebung und führt damit zu einer geringeren Phasenverschiebung. Weiterhin empfiehlt er, statt der Kaskadierung einfacher Hochpassfilter biquadratische Filter einzusetzen. Auf diese Weise gelingt es, einen ungefilterten geschlossenen Lautsprecher mit Chebyshev-Abstimmung 2. Ordnung mittels Filter in ein System mit Bessel-Abstimmung 3. Ordnung ($Q_{tc} = 0,577$) mit gleicher Grenzfrequenz zu überführen.

Von den bisherigen Betrachtungen hebt sich die Verwendung linearphasiger digitaler Finite-Impulse-Response-Filter (FIR-Filter) ab. Bei diesen Filtern besteht zwischen dem Amplitudenfrequenzgang und dem Phasenfrequenzgang nicht mehr die Abhängigkeit wie bei den oben genannten analogen Filtern bzw. den digitalen Infinite-Impulse-Response-Filtern (IIR-Filtern). Nachteilig gegenüber IIR-Filtern ist, dass für die gleiche Flankensteilheit eine höhere Filterordnung und ein größeres Filterdelay erforderlich sind.

Die Firma Bag End¹⁴ verwendet die Tieftonerweiterung mittels aktivem Filter bei Subwoofer unter der Bezeichnung „Extended Low Frequencies“ („ELF“). Die Umsetzung mittels zweier kaskadierter Integratoren wurde 1982 patentiert [140]. Entsprechend der abfallenden Flanke eines geschlossenen Lautsprechersystems steigt die Flanke der zwei Integratoren, wodurch keine zusätzliche Dämpfung der hohen Frequenzen nötig ist. Durch den Phasengang der Integratoren wird der Phasengang des geschlossenen Lautsprechersystems auf ein kurzes konstantes Delay gesetzt.

¹² Bei einer zu klein gewählten Flankensteilheit, wird dem Lautsprecher unter Umständen so viel Leistung zugeführt, dass es zur mechanischen oder thermischen Zerstörung kommt.

¹³ Bei einer Verwendung von Finite-Impulse-Response-Filtern (FIR-Filtern) kann die Tieftonanhebung ohne Phasenverschiebung geschehen.

¹⁴ www.bagend.com

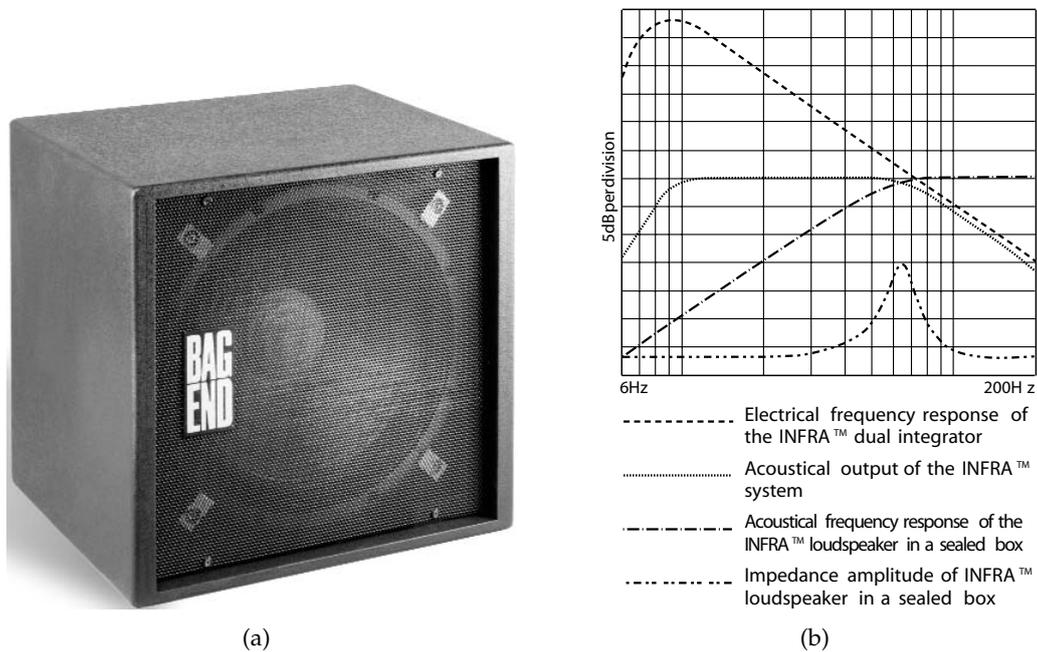


Abb. 6.17: Subwoofer S18E-I von Bag End (a), der mittels aktiver Filtertechnik „ELF“ einen ± 3 dB Übertragungsbereich im Halbraum von 8 Hz bis 95 Hz hat (b) [36, 37]

Auf diese Weise gelingt Bag End die Realisierung des Subwoofers S18E-I mit einem ± 3 dB-Wiedergabefrequenzbereich von 8 Hz bis 95 Hz im Halbraum. Das eingesetzte 18-Zoll-Chassis arbeitet in einem geschlossenen Gehäuse mit 139 l Volumen. Die Empfindlichkeit für den Halbraum liegt bei 96 dB SPL @ 80 Hz/1 W/1 m (Abb. 6.17) [36], [37]. Die für die Tieftonanhebung erforderliche Auslenkungsvergrößerung der Membran muss trotz Rückstellkraft der Luftfeder des Lautsprechergehäuses realisiert werden. Dazu muss der Membrantrieb entsprechend kräftig ausgelegt und die Membranaufhängung für große Auslenkungen geeignet sein. Untersuchungen dazu sind von Vanderkooy u. a. für konventionelle Lautsprecher gemacht worden [237], [238], [119]. Der Einsatz von Lautsprecherantrieben mit großem Kraftfaktor, z. B. $Bl = 40$ N/A, bedingt eine aktive Equalisierung und Verstärker mit einem großen Aussteuerbereich für die Ausgangsspannung [119]. Weiterhin ist für eine kolbenförmige Membranbewegung die Membran ausreichend steif bzw. die Kraftangriffsfläche optimal auszulegen, andernfalls treten störende Partialschwingungen auf.

6.9 Array-Betrieb

Anhand der im Abschnitt 3.4 (S. 26ff.) dargestellten Zusammenhänge zwischen der von einer Lautsprechermembran verschobenen Luftmenge und dem daraus resultierenden Schalldruckpegel wird deutlich, dass der Kolbenschwinger aufgrund der konphasen Membranbewegung besser als der Biegeschwinger zur Erzeugung von

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

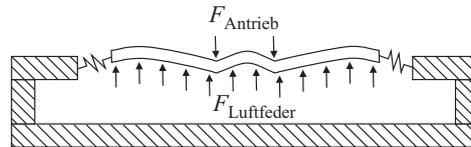


Abb. 6.18: Schematische Darstellung einer Plattenmembran mit konzentriertem Kraftangriff. Aufgrund der ungleichmäßigen Kraftverteilung und der ungenügenden Biegesteifigkeit kommt es zur Entstehung von Partialauslenkungen.

Schall geeignet ist. Besonders das Auftreten des hydrodynamischen Kurzschlusses bei Biegeschwingern zeigt, dass trotz großer Membranauslenkung kaum Wirkleistung abgestrahlt wird. Demnach ist es wichtig, dass die hohe Antriebskraft zur Luftfederüberwindung so auf die Lautsprechermembran übertragen wird, dass diese sich kolbenförmig bewegt. Plane Membrane wie z. B. Platten oder Folien sind in der Regel nicht steif genug, um von einer konzentrierten Antriebskraft kolbenförmig ausgelenkt zu werden. Stattdessen kommt es zum Verbiegen der Membran und damit zu Partialauslenkungen (Abb.6.18). Zusätzliche konstruktive Versteifungen können durch mehr Material oder durch spezielle Formgebungen bewirkt werden. Ersteres bedeutet aber auch mehr bewegte Masse und damit eine Verschlechterung des Wirkungsgrades. Die zur Steifigkeitserhöhung beitragende Form der Konusmembran kann wiederum beim Flachlautsprecher nur ansatzweise realisiert werden. In der Regel ermöglicht die erforderliche Konustiefe keinen flachen Aufbau.

Wird die Antriebskraft gleichmäßig über der Membranfläche verteilt, ist eine nahezu kolbenförmige Auslenkung auch bei geringer Membransteifigkeit möglich (Abb. 6.19). Allerdings ist die Realisierung einer derart gleichmäßigen Kraftverteilung bisher nicht gelungen. Sowohl bei Folienmembranen als auch bei Plattenmembranen bilden sich Partialauslenkungen [86, S. 265], [125, S.94], [240, S. 59ff.]. Aus diesem Grund ist zusätzlich zur Kraftverteilung eine Unterteilung der Membran in kleinere Membranen erforderlich. Die Membrangröße sollte so gewählt werden, dass der Membrandurchmesser klein gegenüber den resonanzverursachenden Biegewellenlängen ist (Gl. 3.6, S. 22). Auf diese Weise können sich die betreffenden Biegewellen nicht mehr in der Membran ausbilden. Je höher die wiederzugebenden Frequenzen sind, desto kleiner ist demnach die Membran zu wählen.

Aus der Kombination des verteilten Kraftangriffs und der unterteilten Membranfläche folgt ein Flachlautsprecher, der aus einer Vielzahl von Miniaturschallwandlern besteht, die zu einem Array angeordnet und in ein Gehäuse eingebaut sind (Abb. 6.20). Da jeder Miniaturwandler sein eigenes – bevorzugt elektrodynamische –

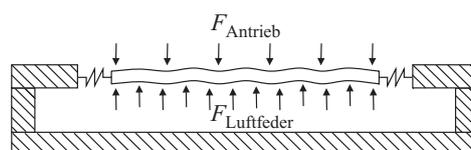


Abb. 6.19: Die gleichmäßige Verteilung der Antriebskraft über der Membran ermöglicht bei gleicher Steifigkeit eine Verringerung von Partialauslenkungen.

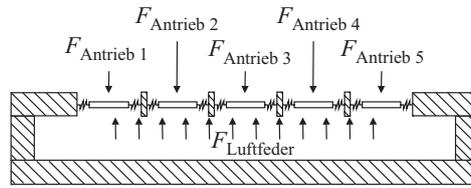


Abb. 6.20: Die Bildung eines Arrays aus Miniaturkolbenschwingern ermöglicht einen verteilten Kraftangriff und eine unterteilte Membranfläche.

ches¹⁵ – Antriebssystem besitzt, ist nicht nur eine gute Verteilung der Antriebskraft pro Flächeneinheit gegeben, sondern auch eine geringe Bautiefe des gesamten Wandlers und damit des Flachlautsprechers möglich. Darüber hinaus kann durch die geringe Membrangröße eine versteifende Membranform verwendet werden, die nur eine geringe Bautiefe erfordert. Zusätzlich bietet der Array-Ansatz die Möglichkeit, mittels geeigneter Ansteuerung der Miniaturwandler die Abstrahlcharakteristik des Flachlautsprechers zu ändern¹⁶.

Da Flachlautsprecher mit Folienmembran ungeeignet für die Verwendung eines Lautsprechergehäuses sind, ist für den Array-Ansatz die Verwendung von Miniaturschallwandlern mit steifen Membranen erforderlich (Abschnitt 5.3.1, S. 63ff.).

6.10 Array-Technologie

Bereits im Jahre 1930 stellte Seabert fest, dass eine große¹⁷ Membran mit einem konzentrierten Antriebssystem keine kolbenförmige Schwingung ausführt [194]. Deshalb meldete er in seiner Erfindung einen Lautsprecher an, bei dem eine große Membran in sieben Teilflächen unterteilt ist und jede ihr eigenes Antriebssystem besitzt (Abb. 6.21). Jede Teilfläche ist konusförmig ausgeführt und wird idealerweise kolbenförmig ausgelenkt. Auch in [76] werden mehrere Lautsprecher zu einem Array angeordnet, um eine große Membran möglichst partialschwingungsfrei zu betreiben (Abb. 6.22a). Zur Verhinderung der mit der Membrangröße zunehmenden gerichteten Schallabstrahlung wird die Array-Front leicht gekrümmt (Abb. 6.22b). Bezüglich der Anordnung von kreisförmigen Membranen wird zur Minimierung der Membranabstände eine versetzte Anordnung empfohlen (Abb. 6.22c).

¹⁵ Bezüglich der möglichen Antriebsprinzipien eines Kolbenschwingers geht ebenso aus Abschnitt 4.1 (S. 38ff.) hervor, dass der elektrodynamische Antrieb das größte Potenzial für die Kombination einer großen Membranauslenkung und einer großen Antriebskraft besitzt.

¹⁶ Aus den Betrachtungen zum Abstrahlverhalten des Kolbenschwingers in Abschnitt 3.3.1 (S. 19ff.) geht hervor, dass das Größenverhältnis zwischen der schallabstrahlenden Membranfläche und der betrachteten Wellenlänge die Abstrahlcharakteristik bestimmt. Bei einem Array-Lautsprecher kann durch die Unterteilung des Arrays dieses Verhältnis variiert werden.

¹⁷ Gemäß Abb. 3.13 (S. 29) ist für $ka < 2$ die abgestrahlte Wirkleistung kleiner als die Blindleistung. Demnach sollte die Membran aus energetischer Sicht so groß gewählt werden, dass $ka > 2$ ist. Für eine Frequenz von 100 Hz ist somit ein Membrandurchmesser von 1,09 m erforderlich.

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

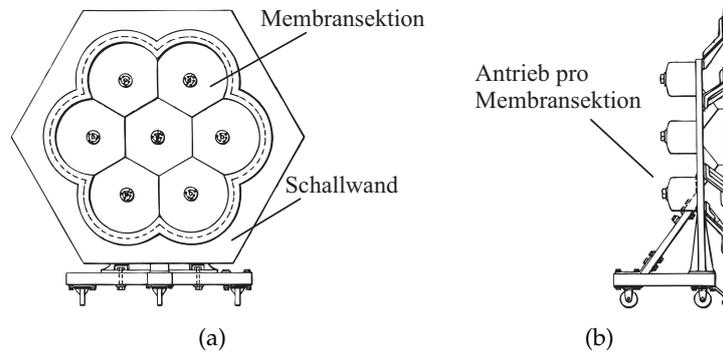


Abb. 6.21: Lautsprecher-Array in einer Schallwand in der Front- (a) und Seitenansicht (b) [194]

Die Herleitung der Abstrahlcharakteristik einer Kolbenmembran und einer Anordnung aus zwei Strahlern in Abschnitt 3.3.1 (S. 19ff.) zeigt, dass sowohl bei großen Membranabmessungen als auch bei großen Abständen zwischen benachbarten Lautsprechern Seitenkeulen auftreten (Abb. 3.8b, S. 19 und Abb. 3.15b, S. 31). Bei der Verwendung eines Lautsprecher-Arrays kann durch eine gezielte Ansteuerung der Einzeltreiber die schallabstrahlende Fläche an den jeweiligen Frequenzbereich angepasst werden, um diese Seitenkeulen zu verhindern. Sind die Array-Abmessungen beispielsweise kleiner gleich einem Achtel der abgestrahlten Wellenlänge, so werden die Teilbeiträge der Array-Elemente nahezu gleichphasig für jeden beliebigen Hörort überlagert (Abschnitt 3.5, S. 31). Die abstrahlende Fläche kann soweit verkleinert werden, bis nur noch ein Array-Element aktiv ist. Aus diesem Grund gibt es Ansätze, bei denen nur im Tieftonbereich ein Lautsprecher-Array verwendet wird und im Hoch- und Mitteltonbereich je nur ein Wandler im Einsatz ist (Abb. 6.23) [170].

Es gibt Anwendungen, bei denen eine gerichtete Schallabstrahlung erwünscht ist. Bei einem Array kann dies dadurch erreicht werden, dass die Beiträge der Einzelelemente an bestimmten Hörpositionen deutliche Phasenunterschiede aufweisen und

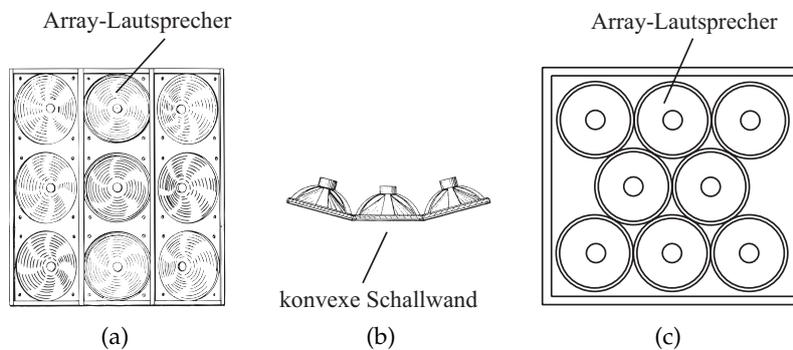


Abb. 6.22: Lautsprecher-Array in einer gekrümmten Schallwand (a, b). Eine versetzte Anordnung der Wandler ermöglicht eine Verkleinerung der Strahlerfläche bei gleicher aktiver Strahlerfläche (c) [76].

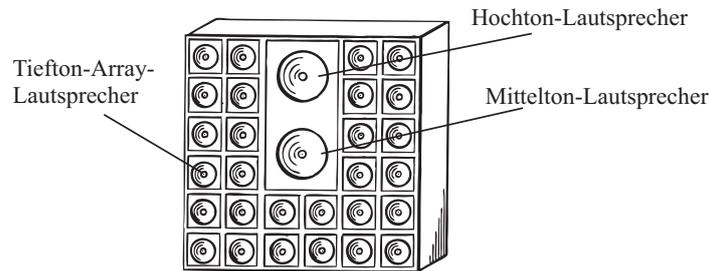


Abb. 6.23: Lautsprechersystem bestehend aus einem Lautsprecher-Array zur Tieftonwiedergabe und je einem Lautsprecher für den Hoch- und Mittelton [170]

es so zu destruktiven Interferenzen kommt. Die Richtwirkung ist aber auch mit dem Auftreten unerwünschter Seitenkeulen verbunden. Eine Verkleinerung der Strahlerfläche zur Verhinderung der Seitenkeulen würde zum Verlust der Richtwirkung führen. Aus diesem Grund wird die abstrahlende Fläche nicht verkleinert, sondern der Schallbeitrag der Array-Elemente in der Amplitude und stellenweise auch in der Phase verändert. In der Regel werden die äußeren Array-Elemente gegenüber denen im Array-Zentrum in der Signalamplitude ($A(x)$) bedämpft (Abb. 6.24). Dies ermöglicht eine gerichtete Schallabstrahlung mit einer deutlichen Unterdrückung der Seitenkeulen. In [215] wird eine Amplitudenverteilung entsprechend einer an den Enden beschnittenen Gauß-Funktion beschrieben. Die Amplitude der äußeren Lautsprecher soll dabei wenigstens 20 % und maximal 60 % der Amplitude der mittleren Lautsprecher betragen. Eine andere Amplitudengewichtung für lineare Arrays wird in [65, S. 62ff.] beschrieben. Die Amplituden sind an den Verlauf einer \cos^2 -Funktion angelehnt.

Aus praktischer Sicht ist eine möglichst einfache, kostengünstige Umsetzung der Amplituden- und Phasengewichtung erwünscht. Im Jahre 1960 meldete Franssen eine Gewichtung zum Patent an, die allein durch Verpolen und Seriell- bzw. Parallelschalten der Einzellautsprecher realisierbar ist [85], [84]. Diese Gewichtung basiert auf den Funktionswerten der Bessel-Funktion 1. Art unterschiedlicher Ordnung. Dabei wird dem mittleren Lautsprecher des Arrays die Bessel-Funktion 0. Ord-

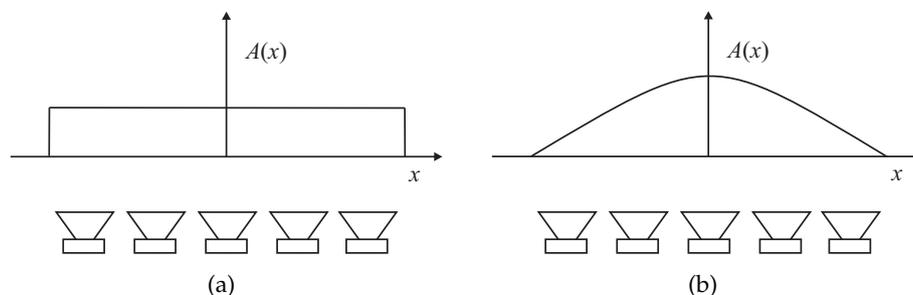


Abb. 6.24: Schematische Darstellung eines linearen Arrays mit gleicher (a) und mit unterschiedlicher Amplitudengewichtung (b) zur Unterdrückung von Seitenkeulen. Die x -Achse dient zur Beschreibung der Lautsprecherposition im Array.

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

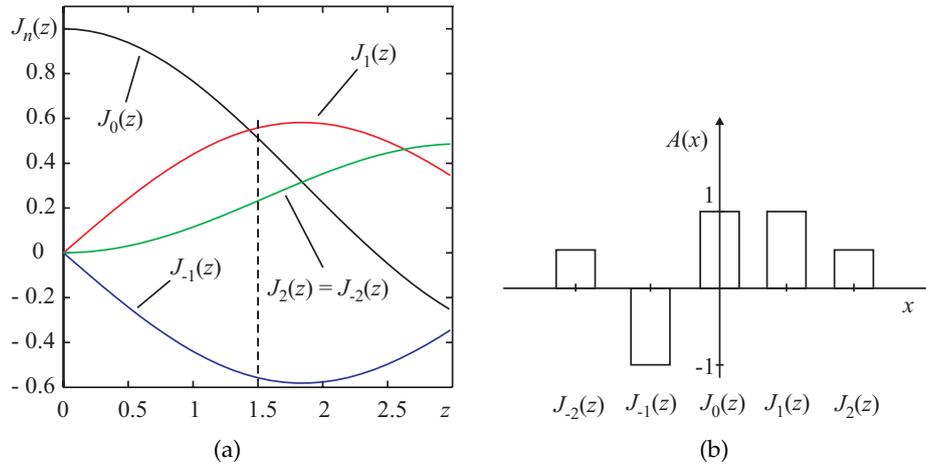


Abb. 6.25: Bessel-Funktion erster Art für verschiedene Ordnungen (a), Amplitudengewichtung eines 5er-Bessel-Arrays (b)

nung zugewiesen. Der linke Nachbar bekommt die Bessel-Funktion -1. Ordnung¹⁸ und der rechte Nachbar die Bessel-Funktion +1. Ordnung. Die restlichen Array-Elemente bekommen entsprechend Bessel-Funktionen höherer Ordnungen zugewiesen. Für ein festgelegtes Argument wird der zugehörige Funktionswert der jeweiligen Bessel-Funktion abgelesen. Als Argument wird ein Wert gewählt, bei dem die Funktionswerte aller betrachteter Ordnungen annähernd im Verhältnis von ± 1 oder ± 2 zueinander stehen. Aufgrund der ganzzahligen Verhältnisse kann die Gewichtung durch die Parallel- und Reihenschaltung der Array-Elemente realisiert werden. Nach [118] ist dies beispielsweise $z = 1,5$. In Abb. 6.25a sind die Ordnungen $n = -5$ bis $n = +5$ der Bessel-Funktion erster Art dargestellt. Für das Argument $z = 1,5$ können aus Abb. 6.25a die gerundeten Koeffizienten $J_{-2} = 0,25$, $J_{-1} = -0,5$, $J_0 = 0,5$, $J_1 = 0,5$, $J_2 = 0,25$ abgelesen werden. Dementsprechend werden die fünf¹⁹ Einzellautsprecher im Amplitudenverhältnis $0,5 : -1 : 1 : 1 : 0,5$ gewichtet (Abb. 6.25b). Die einfache Umsetzung gestaltet sich derart, dass die Gewichtung 0,5 durch eine Parallelschaltung der seriell verbundenen äußeren Lautsprecher und die Gewichtung -1 mit einer Verpolung gegenüber den restlichen Lautsprechern erzielt wird (Abb. 6.26).

In den bisherigen Betrachtungen wurde davon ausgegangen, dass der Lautsprecherabstand hinreichend klein gegenüber der Wellenlänge ist und somit eine räumliche Unterabtastung nicht auftritt. Soll der gesamte Hörfrequenzbereich von einem Lautsprecher-Array wiedergegeben werden, so ist die Realisierung ausreichend kleiner Lautsprecherabstände ($< \lambda_0/2$ [207]) kaum möglich. Aus diesem Grund treten im Richtdiagramm durch räumliches Aliasing zusätzliche Seitenkeulen auf.

¹⁸ Der Zusammenhang aus negativer ($-n$) und positiver Ordnung ($+n$) ergibt sich aus $J_{-n}(x) = (-1)^n J_n(x)$. Dabei wird jede negative ungerade Ordnung durch eine Spiegelung der positiven ungeraden Ordnung an der Abszisse erzeugt.

¹⁹ Bezüglich der unterschiedlichen Größen eines Bessel-Arrays kommt Keele in [118] zu dem Ergebnis, dass das Bessel-Array aus fünf Elementen gegenüber den Arrays mit mehr Elementen die besten Eigenschaften aufweist.

6.11 Nutzung der rückwärtigen Schallabstrahlung

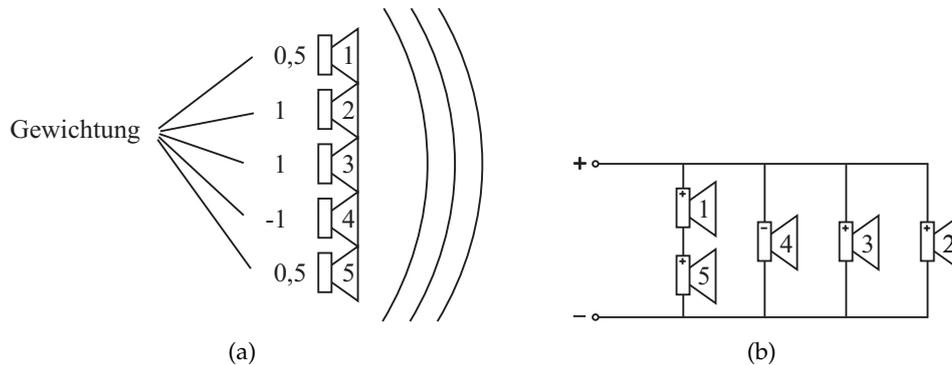


Abb. 6.26: Gewichtung der Einzellautsprecher eines 5er-Bessel-Arrays (a), Realisierung der Besselgewichtung durch Seriell-, Parallelschaltung und Verpolung (b)

Durch die Verwendung von Lautsprechern mit einer stark richtenden Abstrahlcharakteristik können diese Seitenkeulen verringert werden [39], [207], [47].

6.11 Nutzung der rückwärtigen Schallabstrahlung

Wie die Problemanalyse (Kapitel 5, S. 59ff.) zeigt, muss die Überlagerung der gegenphasigen Schallanteile der Membranvorder- und -rückseite verhindert werden. Eine akustische Trennung der Schallanteile bedingt die Verwendung einer Schallwand bzw. eines Lautsprechergehäuses mit den oben aufgeführten Herausforderungen. Da im Kern aber nicht die Schallüberlagerung an sich, sondern die Überlagerung zweier gegenphasiger Anteile das Problem darstellt, könnte statt einer akustischen Trennung der Phasenunterschied beseitigt werden. In den folgenden Abschnitten werden Maßnahmen dazu vorgestellt. Alle vorgestellten Methoden dienen einer Phasendrehung im unteren Frequenzbereich, wo der Schall ungerichtet abstrahlt wird.

Laufzeitglied – Schallkanal

Ein naheliegender Ansatz der Phasenkompensation ist das Einfügen eines Laufzeitgliedes, welches den Phasenunterschied kompensiert. Eine Möglichkeit der Realisierung stellt die Verwendung eines Schallkanals dar. Der Schall der Membranrückseite erfährt beim Durchlaufen dieses Kanals eine Phasendrehung, so dass er konstruktiv mit dem Schall der Vorderseite interferiert. Bekannt ist diese Bauweise auch unter dem Begriff Transmission-Line-Gehäuse (Abb. 6.27a). Dickason beschreibt das Transmission-Line-Gehäuse direkt als Phaseninverter für tiefe Frequenzen [72, S. 147]. Bereits 1934 meldete Olney dieses Gehäuseprinzip zum Patent an [163]. In [214] wird die Transmission-Line-Technologie für einen Flachlautsprecher eingesetzt. Das zugehörige Patent wurde im Jahre 1986 angemeldet [115], [211]. Darin wird ein Flachlautsprecher beschrieben, dessen Tieftonmembran in

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

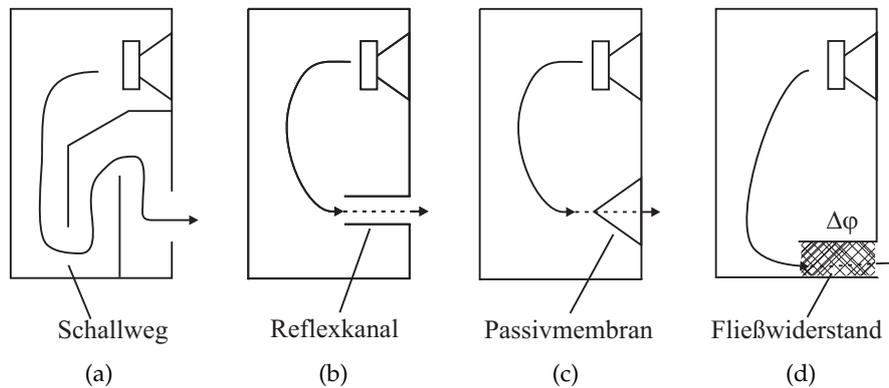


Abb. 6.27: Maßnahmen, um die Phase der rückwärtigen Schallabstrahlung im Tieftonbereich zu drehen; Transmission-Line-Gehäuse (a), Gehäuse mit Bassreflexkanal (b) bzw. Passivmembran (c), Gehäuse mit Fließwiderstand (d)

ein nach hinten offenes Gehäuse eingebaut ist. Diese bildet beim Betrieb direkt an der Wand einen Transmission-Line-Kanal mit der Wand aus (Abb. 6.28). Durch die zusätzliche Phasendrehung des rückwärtigen Schalls finden idealerweise weniger destruktive Interferenzen zwischen den Membranseiten und damit eine bessere Tieftonabstrahlung statt. Weitere Patente zur Realisierung eines Laufzeitkanals bei Flachlautsprechern sind z. B. [146] und [61]. In [72, S. 147ff.] werden verschiedene Realisierungsformen für Transmission-Line-Gehäuse vorgestellt. Demnach ist ein zum Ausgang verjüngender Transmission-Line-Kanal besser geeignet als ein linearer oder sich aufweitender Kanal, da damit eine tiefere Resonanzfrequenz erreichbar ist. Die im Kanal angeregten Stehwellen und damit verursachten Nichtlinearitäten im Amplitudenfrequenzgang können durch die Faltung des Kanals und Auskleidung mit Dämmmaterialien verringert werden. Der Schallkanal, der als Lambda-Viertel-Kanal ausgeführt ist, ist auf diese Weise platzsparend realisiert. Die Faltung bewirkt eine leichte Anhebung der unteren Grenzfrequenz [72, S. 150].

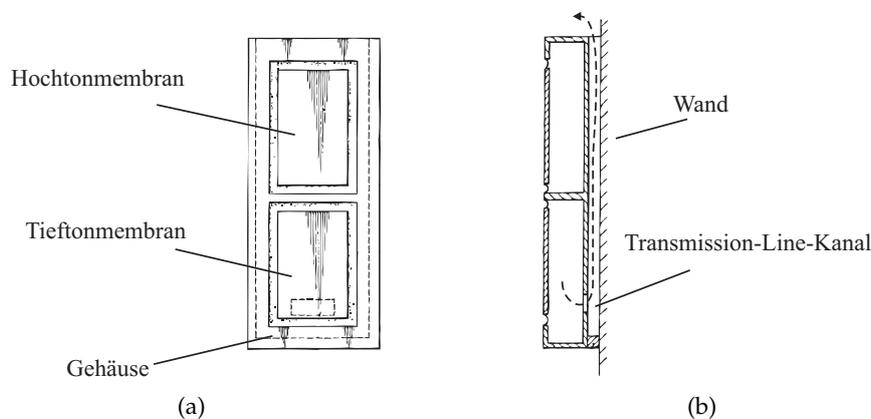


Abb. 6.28: Flachlautsprecher mit rückwärtig ausgebildetem Transmission-Line-Kanal in der Frontansicht (a) und in der Schnittansicht (b) [211]

Resonator als „Phasenschieber“

Statt einer Vergrößerung des rückwärtigen Schallkanals kann auch die phasenverändernde Wirkung von Resonatoren verwendet werden. Bekannt ist dies beispielsweise vom Gehäuse mit Bassreflexkanal bzw. Passivmembran aus dem Jahre 1930 [220]. Bei beiden Ausführungsformen wird durch die Schwingungen der Tieftonmembran ein angekoppelter Resonator zum Schwingen angeregt. Im Falle des Bassreflex-Prinzips besteht der Resonator aus der Luftmasse im Reflextunnel²⁰ und der Federwirkung des Gehäusevolumens (Abb. 6.27b). Statt des Reflextunnels kann die Resonatormasse auch durch eine Passivmembran ersetzt werden (Abb. 6.27c). Diese besitzt entgegen der Tieftonmembran kein Antriebssystem. Die Verwendung einer Passivmembran bedeutet in der Regel einen größeren finanziellen Aufwand, da der gleiche Wandler ohne Antriebssystem statt eines einfachen Bassreflexrohres verwendet wird. Dafür bietet die Passivmembran die Vorteile, dass keine Schallanteile vom Mitten- und Hochtonbereich aus dem Gehäuseinneren nach außen gelangen, was beim Bassreflexkanal auftritt. Ebenso ist unter Umständen der Platzbedarf eines Bassreflexkanals größer als der einer Passivmembran.

Infolge des bei Resonanz bestehenden Phasenversatzes zwischen dem anregenden System – also der Tieftonmembran – und dem angeregten System – nämlich der schwingenden Resonatormasse – gelingt es, den rückwärtigen Schall bei der Abstrahlung durch den Bassreflexkanal bzw. die Passivmembran um 90° bei der Abstimmfrequenz zu drehen. Auf diese Weise können der Schall von der Vorderseite der Tieftonmembran und der Schall von der Rückseite konstruktiv überlagert werden. In [114] werden die Resonatoröffnungen zusätzlich mit einem akustischen Reibungswiderstand, etwa in Form mehrerer Filzlagen, versehen. Dadurch soll der Grad der Phasenverschiebung beeinflusst werden.

Fließwiderstand als „Phasenschieber“

Breitet sich Schall statt in Luft in einem Absorber aus, so ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Auf diese Weise kann die Phase gegenüber der Schallausbreitung in Luft verschoben werden. Im Bereich konventioneller Lautsprecher- und Kopfhörertechnologie werden dazu akustischen Fließwiderstände eingesetzt. Die Firma Musikelectronic Geithain GmbH²¹ erreicht dadurch bei Subwoofern eine nierenförmige Schallabstrahlung [156].

Zur Verhinderung des akustischen Kurzschluss muss die Phasenverschiebung zwischen den interferierenden Schallanteilen wesentlich kleiner als 180° sein. Bei einem Absorber ist die erreichbare Phasenverschiebung von der durchströmten Absorberdicke abhängig. Für eine Phasenverschiebung von >100° muss die durchströmte

²⁰ Die Abstimmung eines Bassreflexkanals ist in [72, S. 103ff.] beschrieben.

²¹ www.me-geithain.de

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

Absoberdicke mindestens einem Achtel der Wellenlänge entsprechen [80, S. 72]²². Gleichzeitig erfolgt dabei eine 80 %ige Schallabsorption.

Im Hinblick auf Flachlautsprecher könnte das Lautsprechergehäuse Öffnungen haben, zu denen der rückwärtige Schall nur nach dem Durchlaufen eines Absorbers gelangt. Die Anforderungen an die durchströmte Schichtdicke und die gleichzeitige Bedämpfung des Schalls lassen diesen Ansatz für Flachlautsprecher jedoch ungeeignet erscheinen.

6.12 Gehäusevolumen eliminieren

Die bisherige Betrachtung ging davon aus, dass die Lautsprechermembran zu beiden Seiten Schall mit entgegengesetzter Phase abstrahlt. In diesem Abschnitt wird ein Ansatz vorgestellt, bei dem die Lautsprechermembran zu beiden Seiten gleichphasig abstrahlt. Auf diese Weise ist weder eine akustische Trennung noch eine Phasenverschiebung zwischen den Schallanteile beider Membranseiten nötig. Demzufolge treten auch keine Herausforderungen wie die Luftfederproblematik auf.

Zu diesem Zweck wird statt einer bewegten Membran ein Körper verwendet, der frequenzabhängig seine Geometrie, z. B. in der Dicke, ändert und so Schall anregt (Abb. 6.29). In Abschnitt 3.3.3 (S. 25ff.) sind derartige Körper als Dicken- bzw. Längenschwinger dargestellt. Für Aufbauten gemäß Abb. 6.29 ist die Dickenänderung

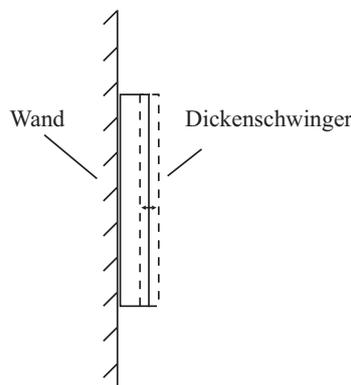


Abb. 6.29: Luftfedereliminierung durch Verwendung von Dickenschwingern, die direkt auf der Wand befestigt sind

²² Der Grund dafür ist der gegenläufige Trend einer wirksamen Einkopplung des Schalls in den Absorber und einer guten Bedämpfung des Schalls im Absorber. Auf der einen Seite steigt das Absorptionsvermögen mit dem spezifischen Strömungswiderstand, welcher wiederum mit der Schichtdicke zunimmt, auf der anderen Seite kann der Schall bei zu großem spezifischen Strömungswiderstand nicht eindringen und wird reflektiert [80, S. 72], [153, S. 75]. Um beiden Anforderungen gerecht zu werden, benötigt der Absorber eine entsprechende Dicke.

des Körpers entscheidend. In der Regel ist diese mit einer für diese Anwendung ungeeigneten Längenänderung verbunden. Deshalb erscheint der Einsatz piezoelektrischer Polymerer als besonders geeignet, da bei diesen nur eine geringe Verkopplung zwischen der Dicken- und Längenänderung besteht (Abschnitt 4.3.2, S. 52). Da die Oberflächenauslenkungen piezoelektrischer Schäume sehr klein sind, muss die schwingende Oberfläche entsprechend vergrößert werden. Dies ist beispielsweise in Form einer auf eine Wand fixierten Matrix aus Dickenschwinger denkbar. Die erforderliche Größe kann mit Hilfe von Gl. 3.23, S. 29 bei gegebener Auslenkung und erwünschtem Schalldruckpegel berechnet werden.

Da piezoelektrische Dickenschwinger mit weniger als 1 mm Dicke²³ gefertigt werden können, sind wesentlich flachere Aufbauten als mit anderen Wandlertechnologien möglich. Inwiefern eine geeignete Schallanregung mittels piezoelektrischer Keramiken und piezoelektrischer Polymere möglich ist, wurde im Rahmen betreuter Studentenprojekte untersucht [78], [253] und [252]. Ein kurzer Überblick über die gefertigten Demonstratoren und Messergebnisse ist im Anhang A.11, S. 241 zu finden. Grundlegend ermöglichen piezoelektrische Materialien millimeterdünne Flachlautsprecherkonstruktionen. Für eine Lautsprechertapete ist neben der geringen Dicke die Flexibilität der piezoelektrischen Polymere ein großer Vorteil gegenüber anderen Technologien. Aufgrund der geringen Schwingungsamplitude ist der abgestrahlte Schalldruckpegel aber sehr gering. Aus diesem Grund ist der Einsatz piezoelektrischer Wandler als Flachlautsprecher vorerst nur für die Schallwiedergabe oberhalb von 1 kHz geeignet.

6.13 Psychoakustische Tieftonerweiterung

Die bisher dargestellten Ansätze haben zum Ziel, die physikalisch messbare Tieftonwiedergabe eines Lautsprecher – speziell eines Flachlautsprechers – zu verbessern. All diesen Ansätzen sind physikalische Grenzen gesetzt, weshalb sie in ihrer Wirkung begrenzt bzw. für Flachlautsprecher nicht immer geeignet sind. Dennoch kann über die Wirkung dieser Ansätze hinaus eine verstärkte Tieftonwiedergabe erzielt werden. Diese beschränkt sich allerdings auf die vom Menschen empfundene Tieftonwiedergabe, da sie auf dem Einsatz psychoakustischer Effekte beruht.

In den meisten Anwendungsfällen spielt die messbare physikalische Bandbreite B_{phy} gegenüber der empfundenen Wiedergabebandbreite B_{empf} des Lautsprechers eine untergeordnete Rolle, da die Schallwiedergabe für das menschliche Gehör bestimmt ist. Demzufolge kann durch eine Erweiterung der empfundenen Bandbreite zu tiefen Frequenzen hin eine Verbesserung der Tieftonwiedergabe erzielt werden (Abb. 6.30). In Abschnitt 3.2.2 (S. 15ff.) ist dargestellt, dass es durch psychoakustische Effekte zur Wahrnehmung von Tönen kommen kann, die im ursprünglichen Schallsignal nicht vorhanden sind. Larsen und Aarts zeigen in [131, S. 55ff.], wie

²³ Je nach Material und gewünschter Dickenänderung unterscheidet sich die Dicke. Piezoelektrische Polymer-Folien sind mit wenigen Mikrometern Dicke möglich.

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

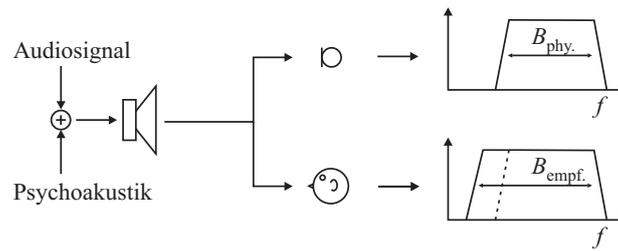


Abb. 6.30: Unterschied zwischen physikalischer und empfundener Wiedergabebandbreite

die psychoakustischen Phänomene Frequenzverdopplung, Kombinationston und Residualton zur Tieftonerweiterung bei Lautsprechern eingesetzt werden können.

Frequenzverdopplung

Der Grundgedanke der Frequenzverdopplung besteht darin, dass Frequenzanteile, die unterhalb der physikalischen Grenzfrequenz f_g des Lautsprechers liegen, durch eine Frequenzverdopplung in den Frequenzbereich oberhalb der Grenzfrequenz verschoben werden, wo der Lautsprecher mit größerem Pegel Schall abstrahlt (Abb. 6.31a). Außerdem werden diese Anteile dann in einem Bereich wiedergegeben, in dem das menschliche Gehör – entsprechend den Kurven gleicher Lautheit – wesentlich empfindlicher ist (Abb. 6.32). Auf diese Weise wird das ursprüngliche Signal zu einem Signal mit gesteigerter Lautheit im Tieftonbereich. Der Vorteil der Frequenzverdopplung ist nach Larsen und Aarts die einfache Implementierung, z. B. durch einen Gleichrichter. Nachteilig ist die infolge der Verdopplung der Tonhöhe eintretende Veränderung des Originalsignals [131, S. 55ff.].

Residualton

Im Abschnitt 3.2.2 (S. 15ff.) wurde aufgezeigt, dass das menschliche Gehör auch dann eine Grundtonempfindung hat, wenn das Signal nur die Harmonischen der Grundwelle enthält. Dieser Effekt wird als Residualton bezeichnet. Bereits bei der Wahrnehmung einer Person über das Telefon treten Residualtöne in Erscheinung.

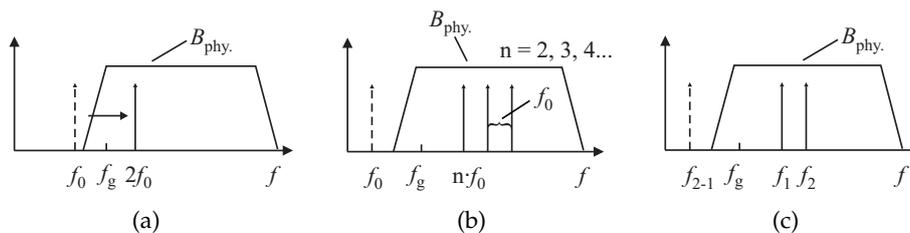


Abb. 6.31: Schematische Darstellung zur Prinzipverdeutlichung der Frequenzverdopplung (a), des Residualtones (b) und des Differenztones (c)

6.13 Psychoakustische Tieftonerweiterung

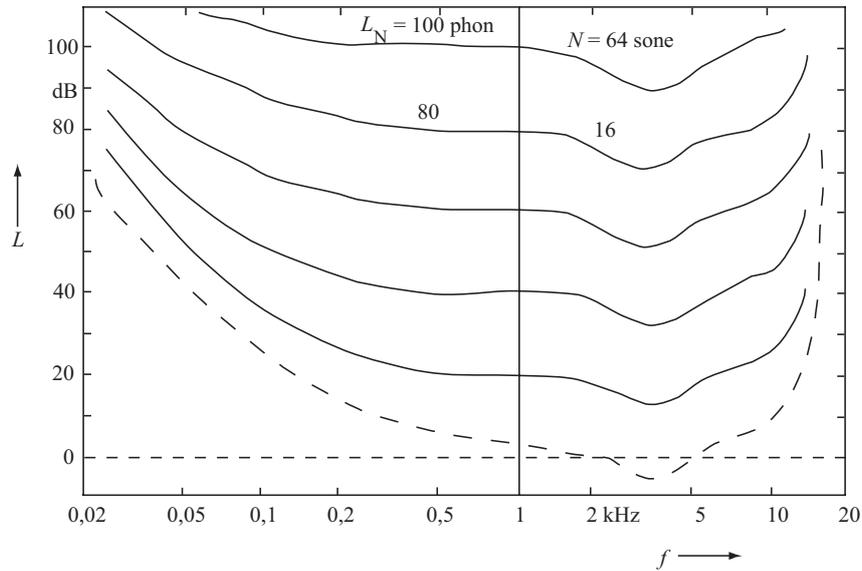


Abb. 6.32: Darstellung der Kurven gleicher Lautheit, von denen die unterste die Hörschwelle darstellt. Frequenzen, deren Schalldruckpegel entlang der selben Kurve verlaufen, werden gleich laut wahrgenommen [262, S. 74].

Wegen der begrenzten Übertragungsbandbreite von 300 Hz bis 3,4 kHz wird der Grundtonbereich von Männerstimmen (ca. 140 Hz) und Frauen- bzw. Kinderstimmen (ca. 280 Hz) nicht übertragen. Aufgrund des Residualton-Phänomens können dennoch Stimmen entsprechend dem Geschlecht unterschieden werden [104, S. 122]. Diese Tatsache lässt sich auch für Lautsprecher verwenden, die eine ungenügende Tieftonwiedergabe haben. Dazu wird gezielt die Struktur der Harmonischen derart beeinflusst, dass trotz mangelhafter bzw. fehlender Tieftonwiedergabe eine Tieftonempfindung vorhanden ist (Abb. 6.31b). Bei hohen Schalldruckpegeln kommt es durch die auftretenden Verzerrungsprodukte zu einer zusätzlichen Beeinflussung des Obertonspektrums, was zu einer Verstärkung des Residualton-Phänomens führen kann [131, S. 57]. Obwohl der Residualton-Ansatz in unterschiedlichen Produkten [195], [122], [212], [89] auf dem Markt vertreten ist, gibt es keine Garantie dafür, dass er bei allen Hörern seine Wirkung entfaltet. In den Untersuchungen Smoorenburgs zeigte der Ansatz nur bei 50 % der Testkandidaten eine Wirkung [201].

Kombinationston – Differenzton

Der Kombinationston f_{kt} entsteht durch nichtlineare physikalische Verzerrungen in der Ohrschnecke. Aus diesem Grund sind – im Gegensatz zum Residualton – hohe Signalpegel erforderlich. Wird beispielsweise ein Signal mit sehr hohem Pegel wiedergegeben, können sowohl Residualtöne als auch Kombinationstöne auftreten [131, S. 57]. Für die Tieftonerweiterung sind besonders die Kombinationstöne, die durch Differenzbildung entstehen, interessant (Abb. 6.31c). Nach [131, S. 57] werden die stärksten Tieftonempfindungen beim einfachen ($f_{kt} = f_2 - f_1$) und beim kubi-

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

schen Differenzton ($f_{kt} = 2f_1 - f_2$) hervorgerufen. Für den praktischen Einsatz ist die Notwendigkeit hoher Schalldrücke ein Hindernis, weshalb der Kombinationston-Effekt weniger als die Ansätze Frequenzverdopplung und Residualton Verwendung findet.

Grundlegendes Bearbeitungsschema zur psychoakustischen Tieftonerweiterung

Die Bearbeitung eines Audiosignals, bei dem mit Hilfe psychoakustischer Effekte eine Tieftonerweiterung stattfinden soll, erfolgt entsprechend der schematischen Darstellung in Abb. 6.33 [131, S. 60]. Aus dem wiederzugebenden Stereosignal (x_l , x_r) werden die Signalanteile, die der Lautsprecher wiedergeben kann, durch Hochpassfilter (HFIL) von den darunter liegenden Signalanteilen getrennt und entsprechend dem psychoakustisch bearbeiteten Signal verzögert (Delay) auf die Ausgänge (y_l , y_r) geführt.

Die Signalanteile unterhalb der Lautsprecher Grenzfrequenz werden durch ein weiteres Filter (FIL1) aus dem Gesamtsignal extrahiert. Dabei wird angenommen, dass sich im Tieftonbereich die Inhalte des linken und rechten Kanals nicht unterscheiden und deshalb eine einkanalige Verarbeitung ausreicht. Dann werden mit Hilfe der nichtlinearen Übertragungskennlinie einer folgenden Verarbeitungsstufe (NLD) bewusst Signalveränderungen durchgeführt, um psychoakustische Effekte hervorzurufen. Im Anschluss sorgen ein weiteres Filter (FIL2) und ein Verstärker (G) für die Nachbearbeitung und die Anpassung des psychoakustisch veränderten Signals an die unbearbeiteten verzögerten Signalanteile des linken und rechten Kanals.

An die Verarbeitungsstufe, in der die psychoakustische Signalveränderung stattfindet, werden zwei Anforderungen gestellt. Zum einen muss das System bzw. der Algorithmus eine nichtlineare Übertragungsfunktion besitzen, um die zusätzlichen Spektralkomponenten in Form der Harmonischen erzeugen zu können, zum anderen muss amplitudenlinear gearbeitet werden, d. h. Eingangs- und Ausgangspegel sind linear miteinander verknüpft [131, S. 1]. Die bei nichtlinearen Systemen auftretenden Intermodulationsverzerrungen, die zusätzlich disharmonische Spektralkomponenten ausbilden, besitzen in der Regel so geringe Amplituden, dass

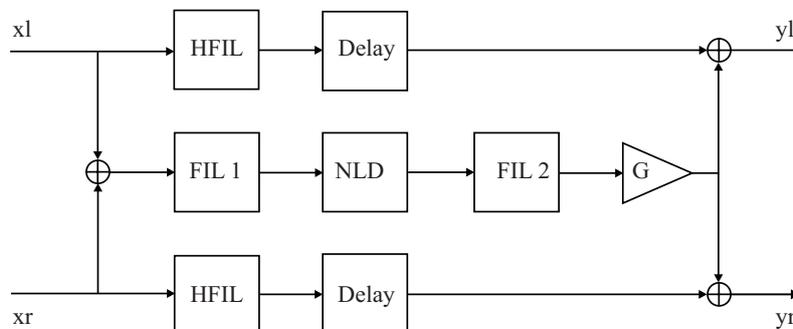


Abb. 6.33: Grundlegendes Blockschaltbild zur psychoakustischen Tieftonerweiterung [131, S. 60]

6.14 Vermeidung von Schallreflexionen an Gehäusekanten

sie von den größeren Amplituden der generierten Harmonischen verdeckt werden [131, S. 65]. In [131, S. 74ff.] werden u.a. der Gleichrichter und der Integrator zur Realisierung des nichtlinearen Systems vorgestellt. Der Gleichrichter erzeugt nur gerade Harmonische. Diese werden mit steigender Frequenz um 12 dB/Okt. gedämpft [131, S. 66]. Da nur gerade Harmonische erzeugt werden, setzen Larsen und Aarts ihn für die Frequenzverdopplung ein. Der Gleichrichter kann auch für den Residualton-Effekt verwendet werden. Da aber eine größere Dichte an Harmonischen einen größeren Residualton-Effekt bewirkt, verwenden Larsen und Aarts dafür bevorzugt den Integrator, der sowohl gerade als auch ungerade Harmonische erzeugt [131, S. 70]. Beim Integrator werden die Harmonischen mit steigender Frequenzen nur um 6 dB/Okt. gedämpft [131, S. 71].

Wird das Obertonspektrum gegenüber dem des Originalsignals stark verändert, führt dies zu einer deutlichen Beeinflussung der Klangfarbe [131, S. 57]. Das gleiche Ergebnis weisen die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zum Einsatz psychoakustischer Effekte zur Verbesserung der Tieftonwiedergabe bei Flachlautsprechern auf (Abschnitt 7.6, S. 172ff.). Demzufolge ist der Einsatz der psychoakustischen Tieftonerweiterung da zu empfehlen, wo es in erster Linie um die Verstärkung der Tieftonempfindung geht und Klangfarbenänderungen nebensächlich sind.

Einige der bereits auf dem Markt existierenden Algorithmen zur psychoakustischen Tieftonerweiterung sind MaxxBass von der Firma Waves Audio Limited [195], Ultra Bass und Ultra Bass II von der US. Philips Corporation [70], [173], TruBass von SRS-Labs [122] und Virtual Bass von der Technischen Universität Nanyang [212], [89].

6.14 Vermeidung von Schallreflexionen an Gehäusekanten

Mit der Verwendung eines Lautsprechergehäuses treten neben der Luftfederproblematik weitere Effekte wie z.B. die klangfarbenändernde Wirkung von Schallreflexionen an den Gehäusekanten auf. Im Abschnitt 3.6.3 (S. 34ff.) und im Kapitel 5 (S. 59ff.) werden Kantenreflexionen als eine Ursache für kammfilterartige Einbrüche und Überhöhungen von bis zu ± 5 dB im Amplitudenfrequenzgang genannt. Erste Untersuchungen und Lösungsansätze zu diesem Problem stammen von Olson [164]. Er empfiehlt eine dezentrale Anordnung des Lautsprechers in der Schallwand bzw. Gehäusefront, so dass der Abstand zu reflektierenden Kanten unterschiedlich groß ist. Auf diese Weise treffen die an den Kanten reflektierten Schallanteile mit unterschiedlichen Phasenlage am Hörort ein. Wegen der unterschiedlichen Phasenlage verteilen sich konstruktive und destruktive Anteile über mehrere Frequenzen, was zu weniger stark ausgeprägten Kammfilterartefakten führt (Abb. 6.34a, b). Olson stellt als weiteren Lösungsansatz verschiedene Kantenrundungen und -fasungen vor [164]. Hierdurch wird zum einen der abrupte Impedanzsprung²⁴ verhindert

²⁴ sh. Abschnitt 3.6.3, S. 34ff.

6 Lösungsansätze zur Luftfeder und Kantenreflexion

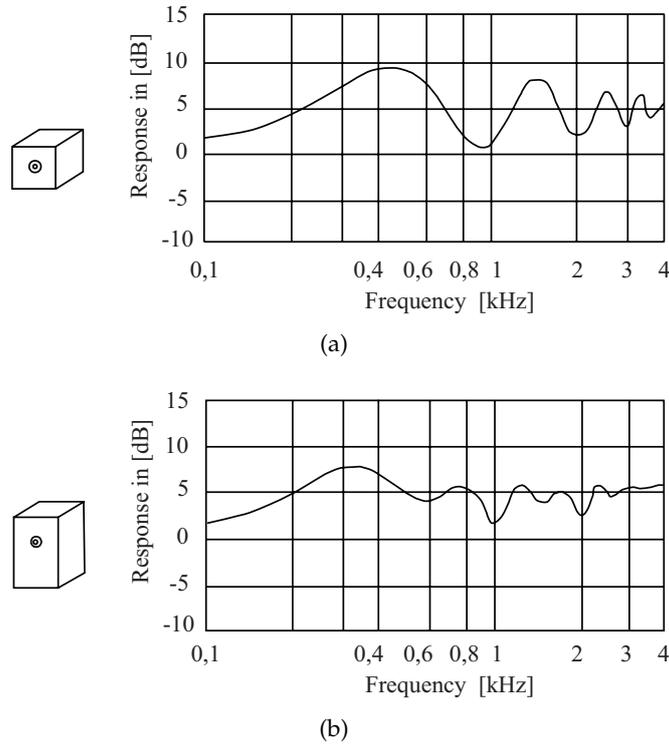


Abb. 6.34: Amplitudenfrequenzgang bei zentraler (a) und dezentraler Lautsprecheranordnung auf der Gehäusefront [164]

und zum anderen der Reflexionsvorgang über der Rundungsfläche verteilt²⁵. Die reflexionsbedingten Kammfilterartefakte können so verringert werden. Nach [68, S. 160] muss der Rundungsradius der Wellenlänge entsprechen. Bei 1 kHz sind dies etwa 34 cm. Da derart große Kantenrundungen unpraktisch sind, werden alternativ die Kanten angefast. In [223] wird eine Fase mit 22° bis 45° empfohlen. Die Fase sollte sich dabei mindestens über 7,5 % der Schallwandbreite erstrecken. In Abb. 6.35a ist der Amplitudenfrequenzgang eines quaderförmigen Lautsprechergehäuses mit angefasten Kanten und dezentraler Anordnung des Wandlers auf der Gehäusefront abgebildet. Werden alle Gehäusekanten mit dem maximal möglichen Rundungsradius versehen, entsteht das von Olson als optimal betrachtete Kugelgehäuse mit einem nahezu linearen Amplitudenfrequenzgang (Abb. 6.35b). Da quaderförmige Gehäuse in der Regel einfacher und kostengünstiger zu fertigen sind, werden sie dennoch deutlich häufiger als kugelförmige Gehäuse verwendet.

Auch das Aufbringen schallabsorbierender Materialien auf die Schallwand hat sich als positiv erwiesen [191], [55], [255]. Allerdings wirkt diese Maßnahme infolge der frequenzselektiven Absorptionseigenschaften der verwendeten Materialien nur in

²⁵ Backman stellt dazu in seinem Model die Kantenrundung als eine Vielzahl aufeinander folgender Kanten dar, an denen jeweils ein Schallanteil reflektiert wird. Aufgrund der Wegunterschiede zwischen den Kanten ist die Phasenlage der reflektierten Anteile unterschiedlich [33]. Ebenso wird der reflektierte Schall stärker gestreut, was zu einer geringeren Kammfilterausbildung führt.

6.14 Vermeidung von Schallreflexionen an Gehäusekanten

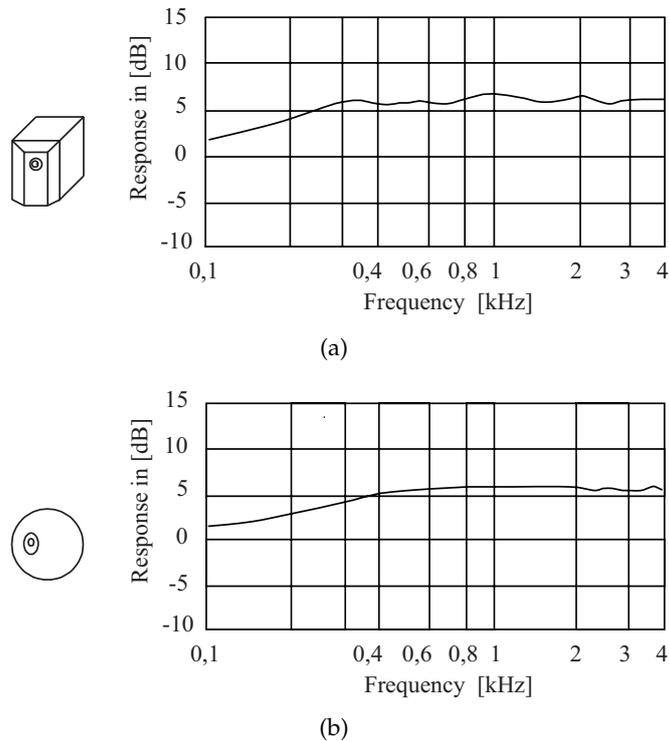


Abb. 6.35: Amplitudenfrequenzgang eines angefasten quaderförmigen Lautsprechergehäuses mit dezentraler Lautsprecheranordnung auf der Gehäusefront (a) und eines Kugelgehäuses (b) [164]

einem begrenzten Frequenzbereich. Deshalb muss berücksichtigt werden, dass die nur schmalbandige Wirkungsweise unter Umständen als ebenso störend empfunden werden kann wie eine unbehandelte Schallwandfront [55].

In [160] wird ein Ansatz vorgestellt, bei dem durch eine konvex geformte Schallwand die Ausbreitungsrichtung der reflektierten Wellen beeinflusst wird. Die reflektierten Schallanteile gelangen dadurch nicht zum Hörort, weshalb es nicht zur Interferenz mit dem Direktschall kommt.

Schallführungsformen wie Hörner oder Wave-Guides können den sprunghaften Impedanzwechsel und damit die Kantenreflexionen verringern. Allerdings benötigen sie dazu Abmessungen, die für Flachlautsprecher ungeeignet sind.

Kapitel 7

Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

Die Betrachtungen in Kapitel 6 (S. 73ff.) haben gezeigt, dass der Flachlautsprecher für den Betrieb direkt an einer Wand ein Lautsprechergehäuse zur Verhinderung der destruktiven Interferenzen zwischen beiden Membranseiten benötigt. Infolge der Steifigkeit des darin eingeschlossenen Luftvolumens sind Maßnahmen zur Steifigkeitsverringern, z.B. durch die Änderung der thermodynamischen Zustände mit Hilfe von Füllmaterialien, bzw. zur Kompensation der Luftfederwirkung, z.B. in Form einer ausreichend hohen Membranantriebskraft erforderlich. Damit trotz der hohen Kräfte, die auf die Membran wirken, eine kolbenförmige Membranbewegung erzielt wird, ist mit einem verteilten Kraftantrieb und einer Unterteilung der aktiven schallabstrahlenden Fläche zu arbeiten. Dies führt zu einem Flachlautsprecher, der aus einem unterteilten Array von Miniaturschallwandlern und einem Lautsprechergehäuse aufgebaut ist. Die erforderliche Gehäusegröße wurde durch Untersuchungen am einzelnen Wandler bestimmt. Anhand der daraus gewonnen Parameter wurde die Array-Unterteilung für die Wiedergabe der einzelnen Frequenzbereiche dimensioniert und die Ansteuerung der Wandler optimiert.

Im folgenden Abschnitt 7.1 werden zunächst die Untersuchungen am einzelnen Miniaturwandler vorgestellt. Anschließend werden die Entwicklung und die Optimierung des Array-Flachlautsprechers beschrieben (Abschnitt 7.2, S. 132ff.). Dabei beruht ein Teil der grundlegenden Erkenntnisse – beispielsweise die Verwendung eines Bessel-Arrays für die Hochtonwiedergabe – auf Untersuchungen, die im Rahmen einer betreuten Diplomarbeit an Vorgängermodellen durchgeführt wurden und in [151] und [44] dokumentiert sind. Abschließend wird in Abschnitt 7.6 (S. 172ff.) auf ausgewählte Ergebnisse der Untersuchungen zur psychoakustischen Tieftonerweiterung eingegangen. Die Untersuchungen zur psychoakustischen Tieftonerweiterung fanden im Rahmen einer betreuten Praxiswerkstatt und einer betreuten Diplomarbeit statt. Veröffentlichungen dazu sind [141], [43], [46].

7.1 Verwendeter Miniaturschallwandler

7.1.1 Bestimmung der Wandlerparameter

Wie in den Abschnitten 3.3.1 (S. 19ff.) und 6.9 (S. 91ff.) gezeigt wurde, sollte der Miniaturwandler idealerweise als Kolbenschwinger mit elektrodynamischem Antriebssystem ausgeführt sein. Das Übertragungsverhalten sollte einen linearen Amplitudenfrequenzgang, eine große Übertragungsbandbreite mit niedriger unterer Grenzfrequenz und einen möglichst großen maximalen Schalldruckpegel bei geringen Verzerrungen aufweisen. Um eine geringe Bautiefe realisieren zu können, ist eine geringe Wandlertiefe anzustreben.

Ein von der Firma Sennheiser für Kopfhörer entworfener Wandler erwies sich für diesen Zweck als geeignet. Dieser ist in Abb. 7.1a dargestellt.

Da die technischen Parameter dieses elektrodynamischen Wandlers nicht zur Verfügung standen, wurden sie mit Hilfe eines Klippel-Systems¹ ermittelt (Abb. 7.1b, Abb. 7.2). Der Wandler wurde dazu vom Generator mit unterschiedlichen Signalen angeregt. Dabei wurden sowohl das Verhalten des Stromes und der Spannung an den Lautsprecherklemmen als auch die Membranauslenkung mittels Laser gemessen. Daraus berechnet das Klippel-System in vorprogrammierten Routinen unterschiedliche Lautsprecherparameter. Mit Hilfe der Routine zur Linearparametermessung wurden die Thiele & Small-Parameter bestimmt, die später zur Bestimmung der Gehäuseart und -größe dienten (Tab. 7.1). Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden die Thiele & Small-Parameter auch manuell aus der Impedanzkurve² nach den Berechnungsvorschriften in [68, S. 48ff.] ermittelt (Abschnitt A.2.1, S. 216ff.).

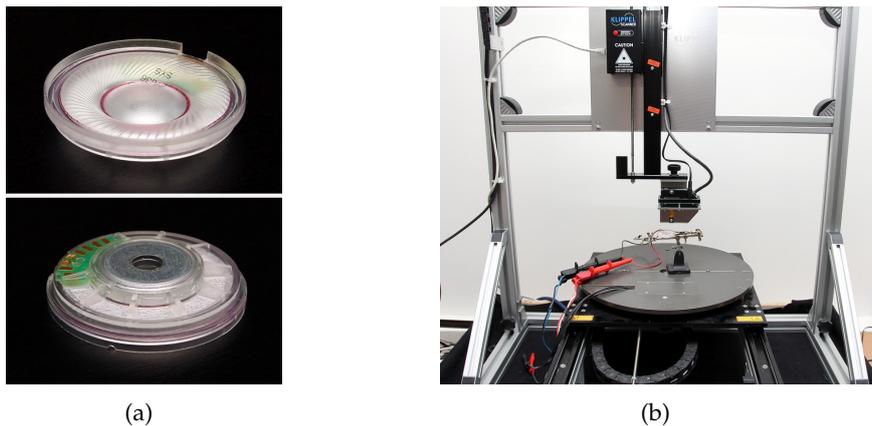


Abb. 7.1: Der verwendete elektrodynamische Miniaturwandler in der Vorder- und Rückansicht (a) im Klippel-Messtank (b)

¹ www.klippel.de

² Die Impedanzkurve wurde mit einem Rohde & Schwarz-Analyzer gemessen.

7.1 Verwendeter Miniaturschallwandler

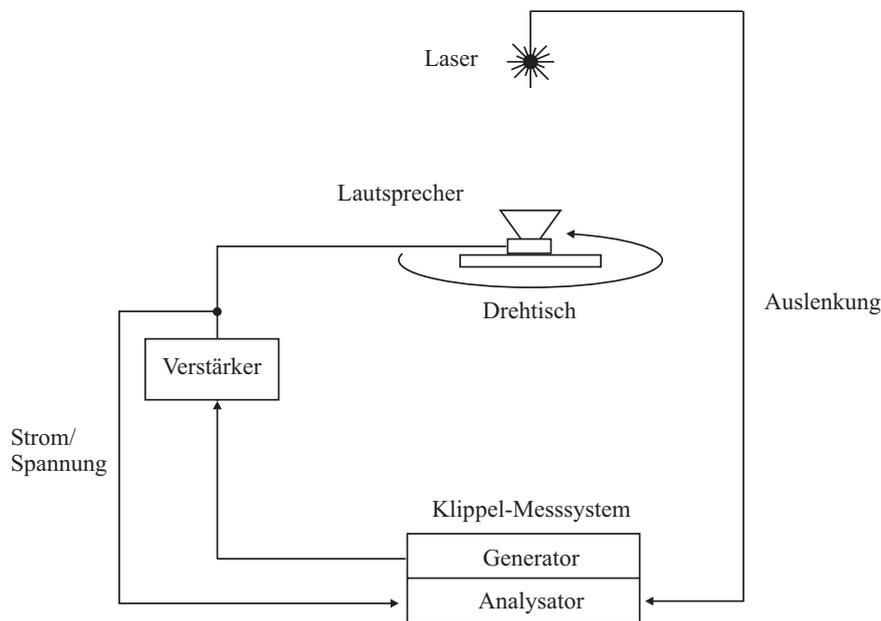


Abb. 7.2: Skizzierter Messaufbau bei Verwendung des Klippel-Systems

Parameter	Wert	Einheit
Gleichstromwiderstand R_e	52,00	Ω
Schwingspuleninduktivität L_e	0,66	mH
Freiluftresonanzfrequenz f_s	118,40	Hz
Mechanische Güte Q_{ms}	1,96	–
Elektrische Güte Q_{el}	0,35	–
Gesamtgüte (free air) Q_{ts}	0,298	–
Äquivalentes Luftvolumen V_{as}	0,74	l
Bewegte Masse ohne Luftmasse M_{md}	0,16	g
Bewegte Masse mit Luftmasse M_{ms}	0,17	g
Mechanische Aufhängungssteifigkeit K_{ms}	0,10	N/mm
Mechanische Verluste R_{ms}	0,07	kg/s
Krafftaktor Bl	4,36	N/A
Effektiver Membrandurchmesser	30,00	mm
Effektive Membranfläche	707,00	mm ²
Gesamtdurchmesser	41,80	mm
Gesamttiefe	10,60	mm
Schwingspulenhöhe	3,06	mm
Schwingspulendurchmesser	18,76	mm
Maximale physikalische Auslenkung	< 0,75	mm
Membranauslenkung bei $C_{ms} = 75\%$	0,50	mm
Membranauslenkung bei $Bl = 82\%$	> 0,60	mm
Membranauslenkung bei $Z_{max} = 10\%$	> 0,60	mm
Membranauslenkung bei $d2 = 10\%$	7,7	mm

Tab. 7.1: Ausgewählte Daten des nicht eingebauten Miniaturwandlers

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

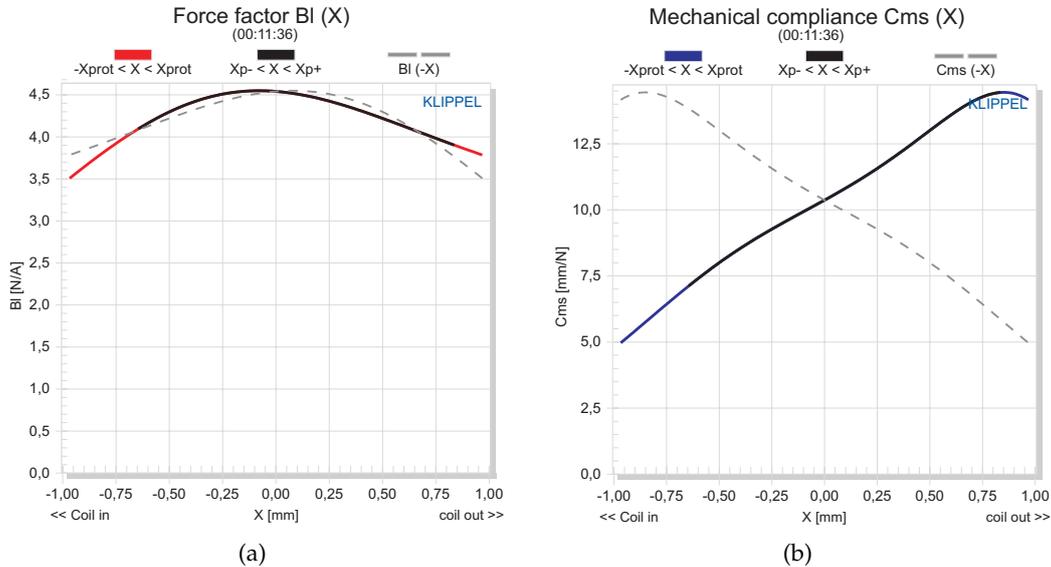


Abb. 7.3: Abhängigkeit des Kraftfaktors (a) und der Nachgiebigkeit der Membranaufhängung (b) des Wandlers im nicht eingebauten Zustand

Der Vergleich zwischen den automatisch und manuell ermittelten Thiele & Small-Parametern zeigte an der Variation³ des Parameters V_{as} , dass von den 3,5 mm Membrandurchmesser nur 3 mm effektiv an der Schallerzeugung beteiligt sind. Tab. 7.1 enthält die korrigierten Parameter.

Da die Lautsprecherparameter auch bei größeren elektrischen Leistungen von Interesse sind, wurde zusätzlich die Großsignalparameter-Analyse durchgeführt. Hierbei wird die elektrische Leistung an den Lautsprecherklemmen automatisch so lange erhöht, bis die vom Nutzer definierten Parameterabweichungen für den Kraftfaktor, die Aufhängungssteifigkeit, die Schwingspulentemperatur und die Schwingspuleninduktivität überschritten werden. In Abb. 7.3 sind die Messkurven für den Verlauf des Kraftfaktors und der Nachgiebigkeit dargestellt. Tab. 7.1 enthält ausgewählte Parameter. Eine Darstellung aller Großsignalparameter ist in Tab. A.2 (S. 218) zu finden. Mit zunehmender Signalamplitude bewegt sich die Schwingspule aus dem homogenen Bereich des Magnetfeldes heraus. Dies hat zur Folge, dass der Kraftfaktor und das Übertragungsverhalten nichtlinear wird. Schwankt der Kraftfaktor ca. 18 %, werden dadurch Intermodulationsverzerrungen von ca. 10 % hervorgerufen [126]. Wie aus Abb. 7.3a zu erkennen ist, werden Schwankungen von 18 % erst bei Auslenkungen größer 0,9 mm erreicht. Ebenso ist ein leicht unsymmetrisches Verhalten des Kraftfaktors und ein Schwingspulen-Offset zu erkennen.

Auch die Nachgiebigkeit⁴ der Membranaufhängung ändert sich mit zunehmender Auslenkung. Bewegt sich die Membran zurück, verringert sich die Nachgiebigkeit.

³ V_{as} betrug ohne Korrektur 1,35l. Da in der automatischen V_{as} -Bestimmung die aktive Membranfläche eingeht, war diese genau zu bestimmen und dann die Korrektur erforderlich.

⁴ Die Nachgiebigkeit ist der Kehrwert der Steifigkeit.

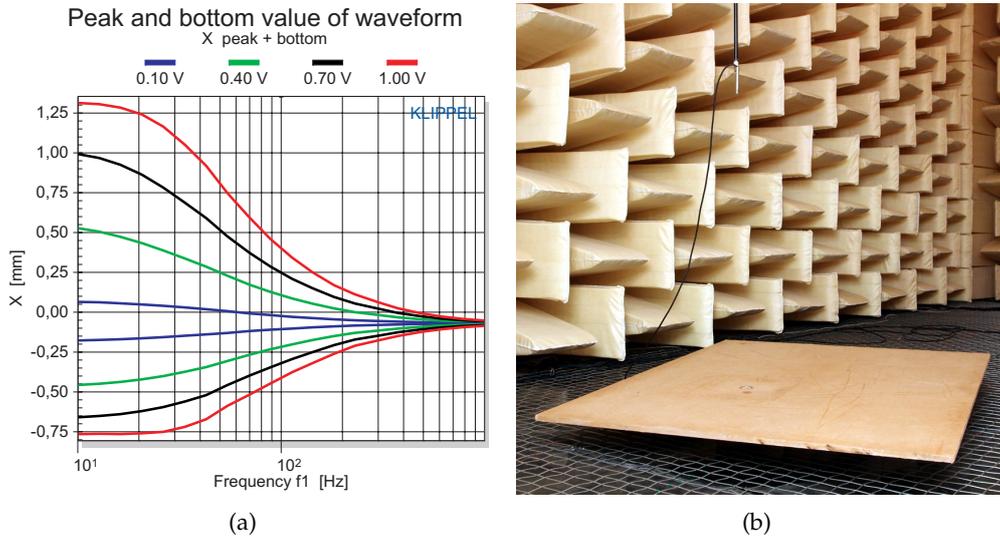


Abb. 7.4: Auslenkung der Schwingspule bei unterschiedlichen elektrischen Klemmspannungen [V_{rms}] im nicht eingebauten Zustand (a) und Messaufbau für die Messung des Amplitudenfrequenzganges des Miniaturschallwandlers in der Normschallwand im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer IMDT (b)

Im umgekehrten Fall nimmt sie zu (Abb. 7.3b). Entsprechend wird für die gleiche Membranauslenkung mehr Kraft für die Rückwärtsbewegung benötigt. Bei einer Auslenkung von 0,5 mm schwankt die Nachgiebig um ca. 25 %. Gemäß [126] bewirkt dies einen Gesamtklirrfaktor⁵ (Total Harmonic Distortion, THD) von ca. 10 %. Aus diesem Grund wurden die 0,5 mm als Auslenkungsgrenze festgelegt⁶.

Die Messung der maximal möglichen physikalischen Auslenkung ergab, dass bei 0,75 mm die Schwingspule auf die hintere Polplatte aufschlägt. Ersichtlich ist dies in Abb. 7.4a. Darin wird die Auslenkung für unterschiedliche Klemmspannungen über der Frequenz dargestellt. Bei einer Spannung von 1 V wird die Auslenkung für Frequenzen unterhalb von ca. 30 Hz durch die hintere Polplatte des elektrodynamischen Antriebs begrenzt. Die Auslenkungskurve geht in einen waagerechten Verlauf über. Wird der Wandler oberhalb von 30 Hz eingesetzt, kommt es dagegen erst bei höheren Spannungen zum Aufschlagen. Um die Wandler des entwickelten Array-Flachlautsprecher vor einem Aufschlagen der Schwingspule zu schützen und gleichzeitig die maximal mögliche Auslenkung von 0,5 mm bei 100 Hz zu erzielen, wurde bei 80 Hz ein Hochpassfilter eingesetzt. Beim später verwendeten Wandler im Gehäuse konnte die Klemmspannung darüber hinaus erhöht werden, da Rückstellkraft des eingeschlossenen Luftvolumens hinzukam und die Auslenkung bei gleichen Klemmspannungen verringerte (Abb. 7.9). Aus Abb. 7.4 geht

⁵ Der Gesamtklirrfaktor ist das Verhältnis des Effektivwertes der Oberwellenspannung zum Effektivwert der gesamten Signalspannung [58].

⁶ Idealerweise sollten die Verzerrungen im Sinne einer hochwertigen Schallwiedergabe so gering wie möglich sein. Allerdings ist in der Praxis ein Kompromiss zu treffen, da andernfalls immer nur sehr geringe Auslenkungen nutzbar und somit nur sehr geringe Schalldrücke erzielbar sind.

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

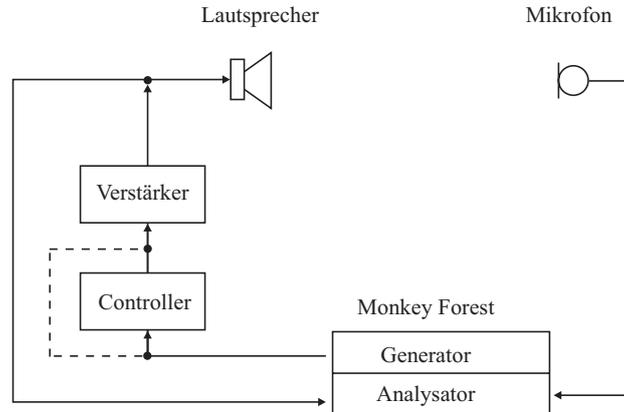


Abb. 7.5: Skizzierter Messaufbau für die akustischen Messungen mit Monkey Forest

ebenso der Schwingspulen-Offset aus der verschobenen Nulllage hervor.

Zur Ermittlung des Schalldruckpegelfrequenzganges wurde der Wandler mittig in eine Normschallwand der Größe $165\text{ cm} \times 135\text{ cm}$ nach [26] eingebaut und im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer IDMT mit dem Messsystem Monkey Forest vermessen (Abb. 7.4b). Die prinzipielle Messkette ist in Abb. 7.5 dargestellt. Über den Generator des Messsystems wird der Lautsprecher zum Schwingen angeregt. Je nach Messung wurde mit einem externen Lautsprecher-Controller eine Filterung des Messsignals vorgenommen. Der abgestrahlte Schalldruckpegel wurde mit einem Messmikrofon aufgenommen und vom Analyzer ausgewertet. Der Amplitudenfrequenzgang wurde in 1,5 m und 2 mm Abstand gemessen. Die Nahfeldmessungen dienten zur Bestimmung der Kammfilterartefakte infolge der Schallbeugung und -reflexion an den Schallwandkanten (Abschnitt 3.6, S. 32ff.) Nach [117] ist die Nahfeldmessung in diesem Fall bis 3,2 kHz⁷ mit Fehlern von weniger als 1 dB behaftet [68, S. 166]. Zwischen 1 kHz und 2 kHz können der gültige Teil der Nahfeldmessung mit dem Teil der Fernfeldmessung für den darüber liegenden Frequenzbereich kombiniert werden. Auf diese Weise können die Kammfilterartefakte infolge der Reflexionen an den Kanten der Normschallwand ausgeblendet werden.

Entsprechend Abb. 7.6 besitzt der Wandler einen Wiedergabefrequenzbereich (-6 dB) von ca. 200 Hz bis 20 kHz. Der Amplitudenfrequenzgang der Fernfeldmessung zeigt gegenüber der Nahfeldmessung die vorhergesagten Kammfilterartefakte. Dadurch liegt die untere Grenzfrequenz etwas tiefer. Da beim entwickelten Array-Lautsprecher ein geschlossenes Gehäuse eingesetzt wurde und der Betrieb direkt vor einer Wand geplant war, sind im unteren Frequenzbereich die Ergebnisse der Nahfeldmessung entscheidend. Oberhalb von 3,2 kHz ist die Nahfeldmessung nicht mehr gültig. Der dort verzeichnete Pegelabfall ist deshalb irrelevant. Die Fernfeldmessung zeigt eine leichte Überbetonung ab 5 kHz. Die sprunghafte Pegeländerung bei ca. 5 kHz weist auf eine Resonanz, verursacht beispielsweise durch

⁷ Die Gültigkeitsgrenze ergibt sich aus $f_{\max} = \frac{109,5}{2a} \cdot m \cdot \text{Hz}$ [68, S. 166]. Der Messabstand muss kleiner gleich 11 % des Membranradius betragen.

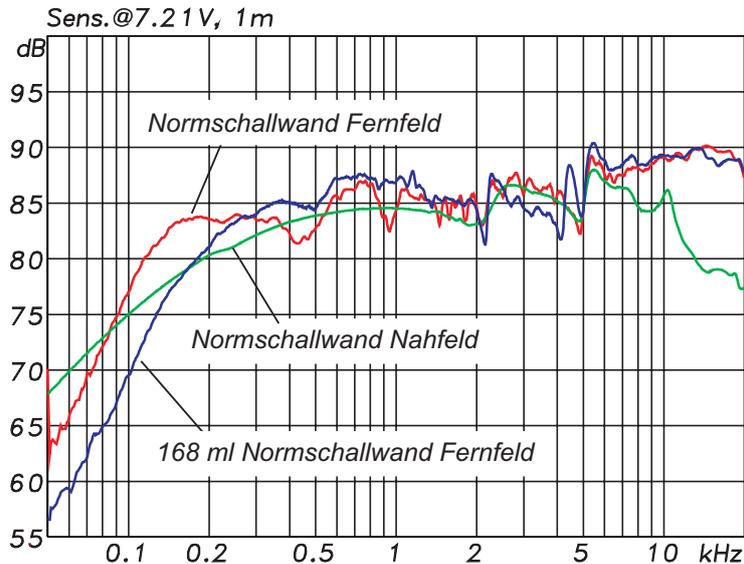


Abb. 7.6: Auf 1 W normierter Vollraum-Amplitudenfrequenzgang des verwendeten Miniaturschallwandlers beim Betrieb in einer Norm-Schallwand ohne und mit einem 168 ml Gehäuse

Partialschwingungen der Membran, hin. Unterhalb von 400 Hz nimmt der Schalldruckpegel kontinuierlich ab. Beim gehäuselosen Lautsprecher setzt der akustische Kurzschluss bei etwa 162 Hz ein. Die Empfindlichkeit des Miniaturwandlers beträgt ca. 85 dB bei 1 W an 52 Ω in 1 m Abstand. Entsprechend den Messungen zur maximalen physikalischen Auslenkung der Schwingspule wird der Miniaturwandler bei 1 W elektrischer Leistung – ca. 7,3 V – überlastet.

Zur Überprüfung des kolbenförmigen Schwingungsverhaltens wurde mit dem Klippel-System die Bewegung der Membranoberfläche gemessen. Der Wandler wird mit einem Messsignal in Schwingungen versetzt (Abb. 7.2, S. 111). Dabei wird vom Laser die Oberflächenauslenkung an nutzerdefinierten Punkten gemessen⁸. Die Schwingungsbilder für ausgewählte Frequenzen sind in Abb. 7.7 dargestellt. Erkennbar ist, dass die Membran nicht im gesamten Wiedergabefrequenzbereich kolbenförmig schwingt. Je größer der Farbunterschied ist, desto größer ist die Phasenverschiebung zwischen den Membranbereichen. Blaue Membranbereiche schwingen gegenphasig zu roten Bereichen. Dies führt dazu, dass die Schallbeiträge der einzelnen Membranbereiche unter Umständen gegenphasig am Hörort eintreffen und sich destruktiv überlagern. Es kann somit dazu kommen, dass trotz großer Membranschnelle kaum akustische Wirkleistung in Form von hörbarem Schall abgestrahlt wird. Zur genaueren Interpretation der Oberflächenschwingung bietet das Klippel-System die automatische Zerlegung der Schallbeiträge entsprechend ihrer Phasenlage zueinander (Abb. 7.8) So kann ermittelt werden, welchen Beitrag jeder Membranbereiche für den abgestrahlten Schalldruck liefert. Die Kurve

⁸ Die durchsichtige Membran wurde zur Erhöhung der Laser-Reflexion mit weißer Farbe beschichtet. Zu beachten ist, dass die Farbbehandlung möglichst keine Änderungen des Schwingungsverhaltens bewirkt.

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

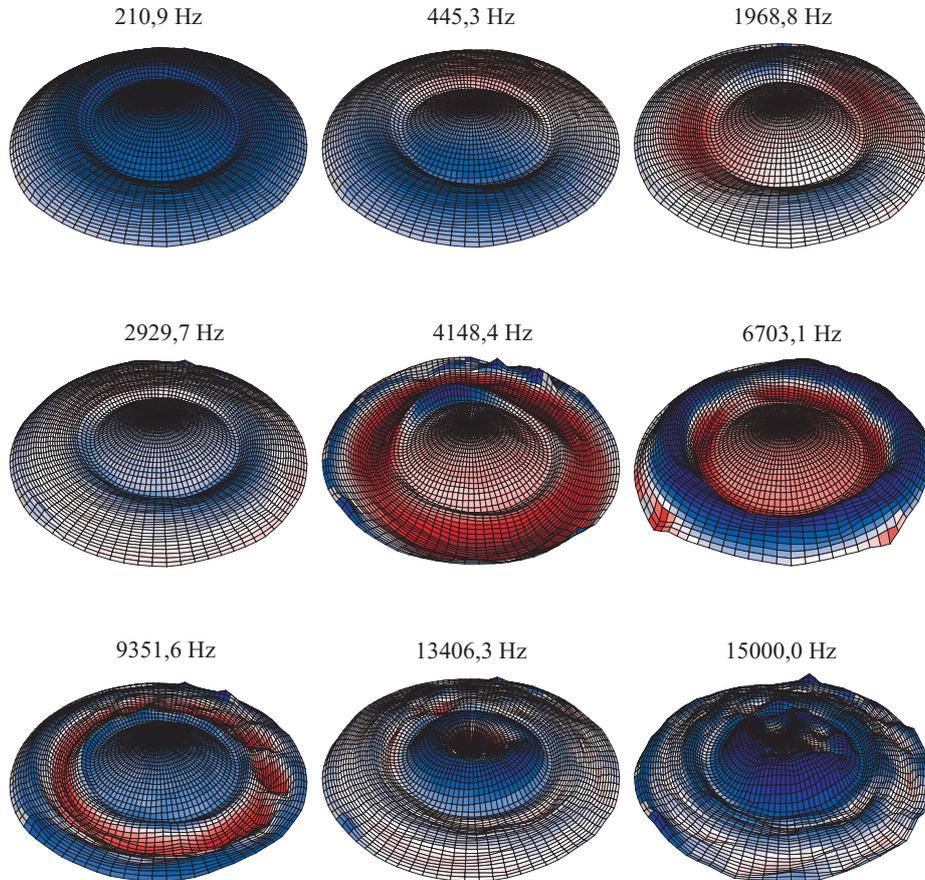


Abb. 7.7: Schwingungsbilder der Membran des nicht eingebauten Miniaturwandlers für ausgewählte Frequenzen

für die quadrierte Membranbeschleunigung weist besonders auf Kippelbewegungen der Membran hin. Im Frequenzbereich um 445 Hz zeigt sich wegen der bereits

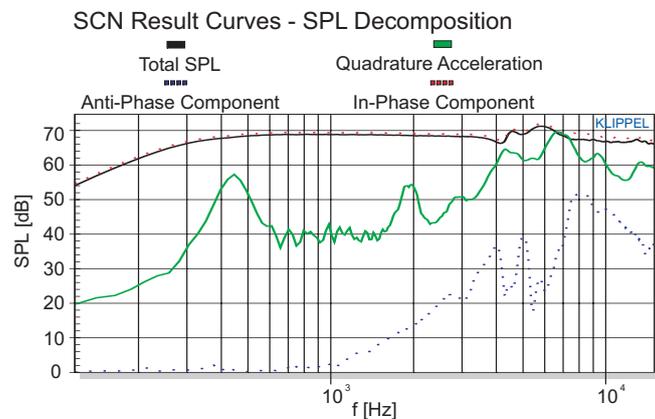


Abb. 7.8: Zerlegung der Schallbeiträge entsprechend ihrer Phase gegenüber dem Hörort, z.B. 0°-Grad Abstrahlrichtung und 1m Abstand, in In-Phase- und Anti-Phase-Komponenten

in Abb. 7.7 erkennbaren Kippelbewegung ein Maximum. Bei etwa 2 kHz tritt ein weiteres Maximum auf. Oberhalb von 2 kHz steigt die Kurve zu dicht benachbarten Maxima bei ca. 4 kHz, 7 kHz und 9 kHz an. Nach Abb. 7.7 sind bei diesen Frequenzen Partialschwingungen besonders deutlich ausgeprägt. Deshalb entsteht für diese Frequenzen trotz großer Schnelle nicht mehr Schalldruck als für andere Frequenzen. Die gegenphasigen Beiträge nehmen ab 1 kHz zu (Anti-Phase Component-Kurve). Bei 13 kHz und 15 kHz ist zu erkennen, dass die bis dahin nahezu kolbenförmige Bewegung des mittleren Membranbereiches auch in Partialschwingungen zerfällt. Gleichzeitig wird die Dämpfung der Partialschwingungen zum Membranrand für hohe Frequenzen immer größer. Der dadurch erzielte Amplitudenfrequenzgang ist auch in Abb. 7.8 dargestellt. Im Gegensatz zum Amplitudenfrequenzgang in Abb. 7.6 ist dieser nicht auf 1 W normiert und liegt somit bei einem geringeren Schalldruckpegel. Idealerweise ist die Steifigkeit der Membran so hoch, dass keine Partialschwingungen auftreten. Trotz spezieller Formgebung konnte dies für diese Membran nicht erreicht werden. Verursacht werden dadurch einige Resonanzüberhöhungen und -einbrüche im Amplitudenfrequenzgang, z. B. bei ca. 2 kHz und bei ca. 4 kHz (Abb. 7.6). Gleichzeitig tritt eine Abstrahlcharakteristik auf, die sich von der einer kolbenförmig schwingenden Membran unterscheidet.

Da das Abstrahlverhalten und auch der Gesamtklirrfaktor eines Lautsprechers auch vom verwendeten Gehäuse abhängig sind, wurden beide Größen nach der Dimensionierung des Gehäuses genauer betrachtet (Abschnitt 7.1.2).

7.1.2 Bestimmung des Gehäusevolumens

Da der akustische Kurzschluss und Teile der Kammfilterartefakte bei wandnahem Betrieb durch die Überlagerung des Front- und Rückschalls zustande kommen, wurden die Wandler des Array-Flachlautsprechers in ein geschlossenes⁹ Gehäuse eingebaut. Zur Bestimmung des benötigten Gehäusevolumens¹⁰ pro Miniaturwandler V_B wurde auf Gl. 7.1 bis Gl. 7.3 und die Thiele & Small-Parameter aus Tab. 7.1 (S. 111) zurückgegriffen [72, S. 54].

$$V_B = \frac{V_{as}}{\alpha} \quad (7.1)$$

$$\alpha = \left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} \right)^2 - 1 \quad (7.2)$$

⁹ Entsprechend der Gesamtgüte Q_{ts} des Miniaturwandlers von ca. 0,3 ist sowohl ein Bassreflex- als auch ein geschlossenes Gehäuse verwendbar. Aufgrund des mindestens doppelt so großen Volumenbedarfs (Abschnitt 7.1.6, S. 130ff.) und der Problematik, das später dann verwendete flache Lautsprechergehäuse mit einem Reflextunnel sauber abzustimmen [151], fiel die Entscheidung für ein geschlossenes Gehäuse.

¹⁰ Es handelt sich hierbei um das Nettovolumen. Die Luftverdrängung durch die Wandler bzw. Versteifungen und Kabel im Gehäuse muss zusätzlich berücksichtigt werden. Es wird dann vom Bruttovolumen gesprochen.

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

$$f_{-3} = \left(\frac{Q_{TC}^{-2} - 2 + \sqrt{(Q_{tc}^{-2} - 2)^2 + 4}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot f_c \quad (7.3)$$

$$f_c = Q_{tc} \cdot \frac{f_s}{Q_{ts}} \quad (7.4)$$

Neben der Bestimmung des Gehäusevolumens ermöglichen diese Parameter die Berechnung der -3 dB-Grenzfrequenz f_{-3} und der Gehäuseresonanzfrequenz f_c bei unterschiedlichen Gehäusegüten Q_{tc} . Um eine möglichst tiefe untere Grenzfrequenz bei kleinem Gehäusevolumen und maximal flachem Amplitudenverlauf im unteren Übertragungsbereich zu erzielen, wurde eine Gehäuseabstimmung von $Q_{tc} = 0,707$ angestrebt [72, S. 45]. Nach Gl. 7.1 und Gl. 7.2 ist dazu ein Gehäusevolumen von ca. 150 ml erforderlich. Das gefertigte Gehäuse hatte ein Volumen von ca. 168 ml¹¹. Die damit erzielte Gesamtgüte lag bei $Q_{tc} = 0,702$.

Der Amplitudenfrequenzgang für den Miniaturschallwandler mit Gehäuse, eingebaut in die Normschallwand, ist in Abb. 7.6 dargestellt. Bei ca. 2,2 kHz und 4,1 kHz treten schmalbandige Einbrüche und Überhöhungen auf, die auf Stehwellen im Gehäuse zurückzuführen sind. Durch das Einbringen von Dämmmaterial konnten diese verhindert werden (Abschnitt 7.1.4, S. 124ff.). Da bei der Normschallwand Beugungsverluste vorhanden sind, ist im Hinblick auf die Montage des Flachlautsprechers an der Wand mit einem höheren Schalldruckpegel im unteren Übertragungsbereich¹² zu rechnen; idealerweise mit 6 dB mehr.

Abb. 7.9 zeigt, wie sich durch das Gehäuse die Membranauslenkung gegenüber dem gehäuselosen Betrieb (Abb. 7.4, S. 113) verringert. Das Antriebssystem arbeitet nicht nur gegen die Rückstellkraft der Membranaufhängung, sondern auch gegen die Rückstellkraft des eingeschlossenen Luftvolumens. Eine Auslenkung von 0,5 mm bei 100 Hz und sinusförmiger Ansteuerung wird erst mit 2,28 V_{rms} erreicht. An 52 Ω entspricht dies einer Sinusleistung von 100 mW¹³. Der bei dieser Ansteuerung erzielte Gesamtklirrfaktor der akustischen Abstrahlung wurde in 1 m Abstand im reflexionsarmen Raum gemessen (Abb. 7.10). Bei 100 Hz beträgt der Klirrfaktor ca. 5,6 % (-25 dB Klirrdämpfung) und nimmt mit steigender Frequenz deutlich ab¹⁴. Bei 1 kHz werden etwa 0,6 % (-45 dB) erreicht. Entsprechend der großen Membranauslenkungen im unteren Übertragungsbereich nimmt der Klirrfaktor zu tiefen Frequenzen hin zu. Beim Array-Flachlautsprecher wird deshalb ein Hochpassfilter bei 80 Hz eingesetzt. Die Ursache für die schmalbandige Überhöhung des Klirrfaktors bei ca. 2 kHz ist wiederum eine Stehwelle im Gehäuse.

¹¹ Die lichten Gehäuseabmessungen betragen 7 cm in der Tiefe, 4,7 cm in der Breite und 4,6 cm in der Höhe, wobei die Frontplatte, in die der Wandler eingelassen war, infolge ihrer Stärke zusätzliche 16 ml beisteuerte.

¹² Betroffen ist der Bereich, für den der Flachlautsprecher eine ungerichtete Abstrahlcharakteristik besitzt. Infolge der Wandreflexion kommt es zur Verdopplung des Schalldruckpegels, wenn der Phasenversatz zwischen den sich überlagernden Schallanteilen nahezu null ist und keine Schallabsorption stattfand.

¹³ Die akustischen Messungen wurden jeweils bei 106 mW durchgeführt.

¹⁴ Die Umrechnung zwischen der Klirrdämpfung in Dezibel ($L_{dt}[\text{dB}]$) und dem Gesamtklirrfaktor in Prozent erfolgt über $10^{(L_{dt}/20)} \cdot 100$

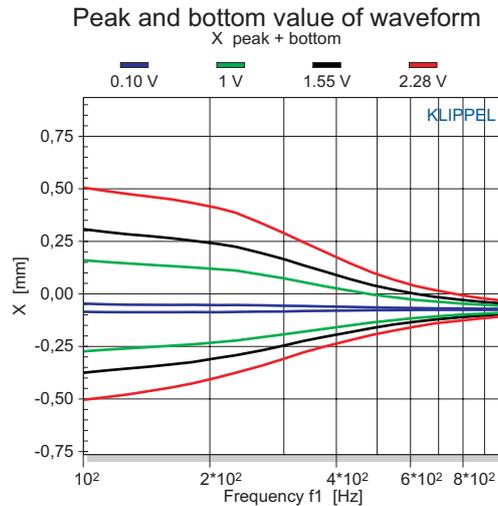


Abb. 7.9: Membranauslenkung des Miniaturwandlers im 168 ml Gehäuse bei unterschiedlichen Klemmspannungen

Das räumliche Abstrahlverhalten des Einzelwandlers mit Gehäuse wurde ebenso im reflexionsarmen Raum gemessen. Da der Wandler mittig in der Gehäusefront eingesetzt war, wurde nur das horizontale Verhalten untersucht; das vertikale muss identisch sein (Abb. 7.11). Entsprechend der geringen Membrangröße strahlt der Wandler bis zu etwa 1 kHz ungerichtet Schall ab. Für die bei höheren Frequenzen sprunghaft wechselnde Richtwirkung sind Faktoren wie die in Abb. 7.7 dargestellten Partialschwingungen der Membran und die auch bei diesem Gehäuse auftretenden Schallreflexionen an den Gehäusekanten verantwortlich.

7.1.3 Volumensteifigkeit in Abhängigkeit von der Gehäuseform

Bei der Bestimmung des Gehäusevolumens konventioneller Konuslautsprecher anhand der Thiele & Small-Parameter wird die Steifigkeit des Luftvolumens als formunabhängig betrachtet. Die Überlegungen in Abschnitt 6.1 (S. 73ff.) haben allerdings gezeigt, dass bei sehr geringen Gehäusetiefen die Volumenform an Einfluss zunimmt. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen mit Gehäusen unterschiedlicher Form aber konstantem Volumen durchgeführt. Entgegen den bisherigen Untersuchungen wurden in jedes Gehäuse vier Wandler eingesetzt, um dadurch der Situation eines Arrays gerecht zu werden. Die vier Miniaturtreiber wurden zu einem 2×2 -Array angeordnet und elektrisch parallel verschaltet (Abb. 7.12). Die Innenmaße der drei verwendeten Gehäuse sind in (Tab. 7.2) aufgelistet. Die Abweichungen zwischen den Innenmaßen und dem rechnerisch resultierenden Innenvolumen ergeben sich aus der berücksichtigten Luftverdrängung durch die ins Gehäuse eingeklebten Stabilisierungsklötze und Kabel.

Für den Fall, dass die Volumensteifigkeit unabhängig von der Volumenform ist, sollte die Gehäuseresonanzfrequenz bei allen drei Gehäusen gleich sein, da sie in erster Linie durch die bewegte Masse und die Systemsteifigkeit bestimmt wird

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

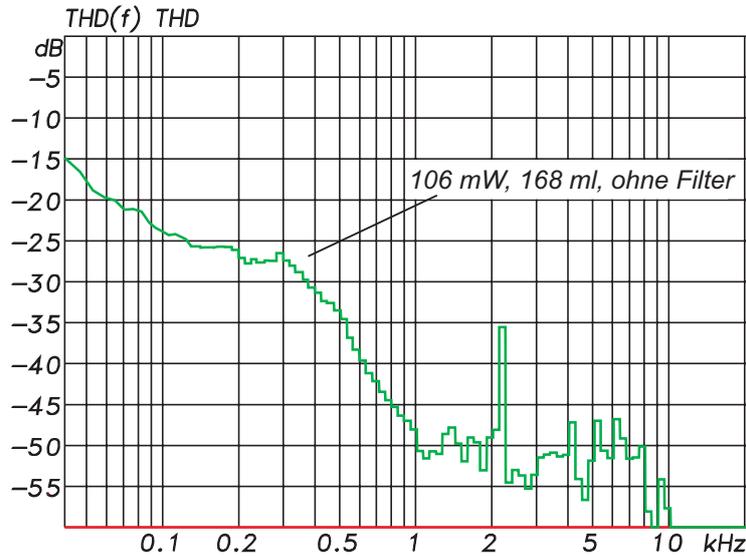


Abb. 7.10: Gesamtklirrfaktor des Miniaturwandlers im geschlossenen 168 ml Gehäuse bei 106 mW Leistung

(Gl. 5.4, S. 64). Mit Hilfe des Klippel-Messsystems wurden jeweils die elektrische Impedanz und die Membranauslenkung gemessen (Abb. 7.13a, b). Es ist ein deutlicher Einfluss der Volumenform auf die Resonanzfrequenz und die Amplitude der Resonanzspitze zu erkennen¹⁵. Je geringer die Gehäusetiefe ist, desto tiefer liegt die Resonanzfrequenz. Die Gehäusegüte steigt dagegen mit der Gehäusetiefe geringfügig an (Tab. 7.2). Die Veränderung der Resonanzfrequenz und der Resonanzamplitude ist bei der Verringerung von 42 mm auf 10 mm geringer als beim Wechseln von 10 mm auf 5 mm. Dies deutet auf ein zunehmend nichtlineares Verhalten des Gesamtsystems hin.

Eine Verringerung der Resonanzfrequenz kann sowohl durch die Abnahme der Steifigkeit als auch durch die Zunahme der bewegten Masse verursacht werden.

Parameter	Gehäuse 1	Gehäuse 2	Gehäuse 3	Einheit
Innenlänge	122	210	466	mm
Innenbreite	120	290	268	mm
Innentiefe	42	10	5	mm
Innenvolumen	0,6	0,6	0,6	l
Einbauresonanzfrequenz	279	255	216	Hz
Impedanzspitze	80	70	61	Ω
Gehäusegüte	0,676	0,689	0,735	–

Tab. 7.2: Abmessungen der untersuchten Gehäuseformen und die entsprechenden Resonanzfrequenzen bzw. Gesamtgüten

¹⁵ Oberhalb von ca. 500 Hz treten kleinere Impedanzspitzen auf. Diese wurden durch Stehwellen in den Gehäusen hervorgerufen

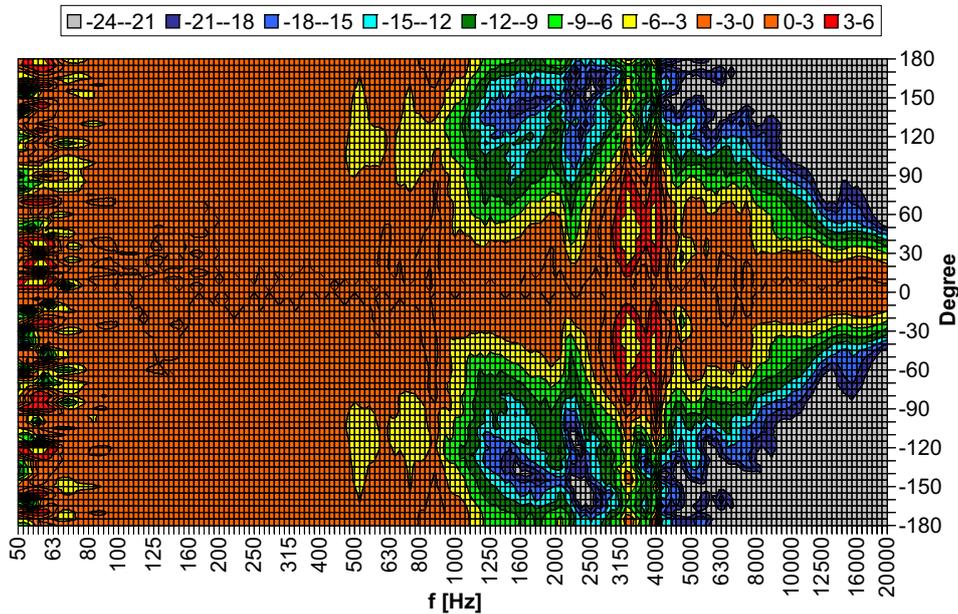


Abb. 7.11: Horizontales bzw. vertikales Abstrahlverhalten des Miniaturwandlers in einem 168 ml Gehäuse, Farbskala kennzeichnet von rechts nach links den Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0°-Achse

Die vom Klippel-Messsystem berechneten Werte für die Steifigkeit und die bewegte Masse des Arrays in dem jeweiligen Gehäuse zeigen, dass allein zwischen der bewegten Masse (hier M_{mct}) und den veränderten Gehäusetiefen ein Zusammenhang besteht. Mit abnehmender Gehäusetiefe steigt die bewegte Masse von 0,676 g bei 42 mm Tiefe auf 1,036 g bei 5 mm (Tab. A.3 bis Tab. A.5, S. 219ff.). Dies entspricht einem Faktor von etwa 1,5. Nach Gl. 5.4 (S. 64) führt dies – unter Vernachlässigung des geringen Dämpfungseinflusses – zu einer Verringerung der Resonanzfrequenz auf das $1/\sqrt{1,5}$ -fache. Die Gehäuseresonanz sinkt somit von 272 Hz bei 42 mm Tiefe auf 219 Hz bei 5 mm Tiefe (Abb. 7.13a). Die ansteigende Masse erklärt ebenso den Trend der geringer werdenden Membranauslenkung bei abnehmender Gehäusetiefe oberhalb der Resonanzfrequenz (Abb. 7.13b). Unterhalb der Resonanzfrequenz ist das Schwingersystem nicht masse-, sondern steifigkeitsbestimmt, weshalb hier die Auslenkung ein anderes Verhalten zeigt. Mit abnehmender Gehäusetiefe nimmt

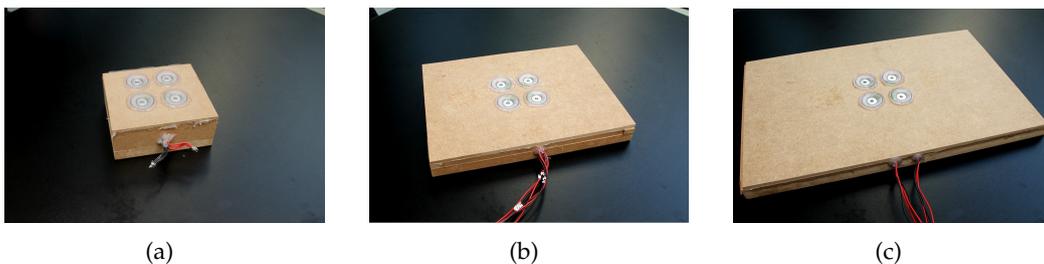


Abb. 7.12: Array aus vier Miniaturtreibern in geschlossenen Lautsprechergehäuse unterschiedlicher Form aber gleichen Volumens, Gehäuse 1 (a), Gehäuse 2 (b), Gehäuse 3 (c)

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

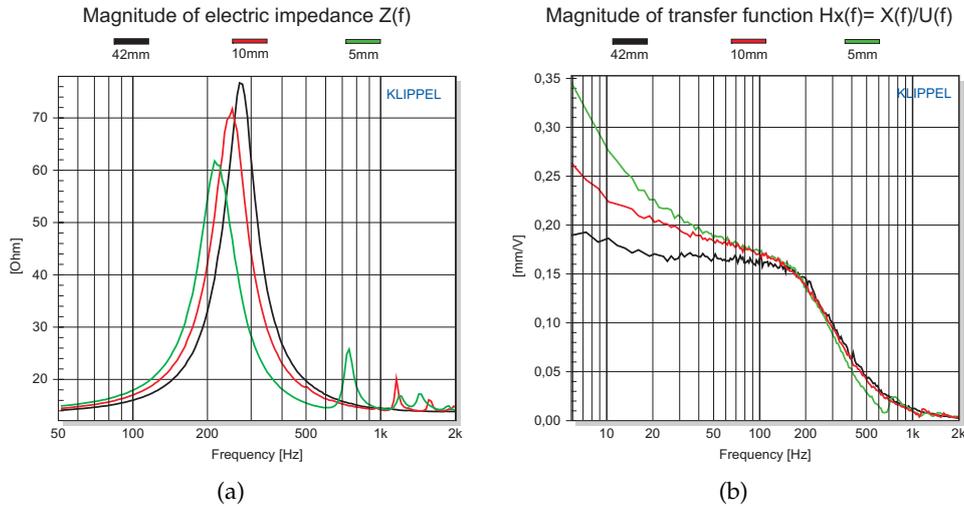


Abb. 7.13: Veränderung der Resonanzfrequenz (a) und der Membranauslenkung (b) eines Gehäuselautsprechers bei konstantem Gehäusevolumen, aber verschiedenen Gehäusetiefen

unterhalb der Resonanzfrequenz die Auslenkung zu. Dieses Verhalten auf eine geringere Steifigkeit zurückzuführen ist anhand der vom Klippel-Messsystem berechneten Steifigkeiten nicht möglich, da diese keinen Zusammenhang erkennen lassen (Tab. A.3 bis Tab. A.5, S. 219ff.).

Dennoch ist es vorstellbar, dass die veränderte Zähigkeitsgrenzschicht die Volumensteifigkeit beeinflusst (Abschnitt 6.1, S. 73ff.). Betrachtet für 100 Hz sind von 5 mm durchströmtem Gesamtquerschnitts des Gehäuses 3,6 mm von der Zähigkeitsgrenzschicht an der Gehäusefront und Gehäuserückwand eingenommen (Gl. 6.2, S. 74). Infolgedessen besitzen wesentlich mehr Luftmoleküle des 5 mm tiefen Gehäuses eine geringere Schnelle als beim 42 mm Gehäuse. Entsprechend Gl. 5.8 (S. 68) verringert sich damit die Impulsübertragung auf die Gehäusewände und damit auch die Volumensteifigkeit, was zu einer geringeren Resonanzfrequenz führt. Wie schon erwähnt wurde, kann diese Darstellung nicht durch die Messergebnisse und Berechnungen des Klippel-Messsystem bestätigt werden. Bereits die Änderung der bewegten Masse reicht aus, um die Verschiebung der Resonanzfrequenz zu erklären.

Entsprechend den Betrachtungen in Abschnitt 5.3.1 (S. 63ff.) nimmt der Schalldruckpegel unterhalb der Resonanzfrequenz stark ab (Abb. 5.6, S. 66). Eine Verschiebung der Resonanz zu tieferen Frequenzen kann somit eine Verschiebung der unteren Grenzfrequenz und damit eine Tieftonerweiterung bewirken. Abb. 7.13 zeigt, dass im Vergleich der drei unterschiedlich geformten Lautsprechergehäuse die Membranauslenkung unterhalb der Resonanzfrequenz mit abnehmender Gehäusetiefe steigt. Allerdings ist der Unterschied bei 100 Hz so gering, dass kein Unterschied im Schalldruckpegel zwischen den drei Gehäusen zu erwarten war. Oberhalb der Resonanzfrequenz nimmt die Membranauslenkung zwischen ca. 180 Hz und 1,5 kHz mit der Gehäusetiefe dagegen ab. Ein nennswertiger Unterschied ist aber auch nur

zwischen dem 42 mm und dem 5 mm tiefen Gehäuse zu erkennen. Die Membranauslenkung ist stellenweise nur halb so groß. Dies bedeutet, dass auch ein deutlicher Schalldruckpegelunterschied zu erwarten ist. Aufgrund der vorhandenen Gehäusestehwellen nimmt die Auslenkung nicht kontinuierlich ab. Da, wo die Impedanzkurve Überhöhungen und Einbrüche infolge der Stehwellen zeigt, sollte auch der Amplitudenfrequenzgang Änderungen aufweisen.

Zur Ermittlung des Schalldruckpegels wurden die Gehäuse in eine Normschallwand eingebaut. Ein Hochpassfilter bei 80 Hz und ein Tiefpassfilter bei 707 Hz mit je 48 dB/Okt.¹⁶ Flankensteilheit und Linkwitz-Riley-Charakteristik wurden zur Beschneidung des Anregungssignals von 204 mW verwendet. Gemessen wurde in 1 m Abstand (Abb. 7.14). Wie erwartet kommt es durch die unterschiedlichen Membranauslenkungen oberhalb der Resonanzfrequenz (242 Hz bzw. 219 Hz) zu verschiedenen Schalldruckpegelverläufen. Bei 600 Hz beträgt der Auslenkungsunterschied zwischen dem 42 mm und dem 5 mm tiefen Gehäuse Faktor 2. Dies führt zu einem gemessenen¹⁷ Schalldruckpegelunterschied von 5 dB. Erwartungsgemäß spiegelt sich die ungleichmäßige Abnahme der Membranauslenkung auch im Schalldruckpegelverlauf wider. Unterhalb der Resonanzfrequenz ist der Auslenkungsunterschied wesentlich geringer. Bei 100 Hz liegt er etwa bei einem Faktor von 1,06. Da der Schalldruckpegel hier bereits durch das Gehäuse und den Hochpassfilter abfällt, wird der Pegelgewinn überdeckt. Die geringfügig ansteigende Gehäusegüte bei kleiner werdender Gehäusetiefe und sinkender Resonanzfrequenz erscheint widersprüchlich. Der klassischen Lautsprechertheorie entsprechend, sollte mit steigender Güte (Q_{tc}) auch die Resonanzfrequenz (f_c) zunehmen (Gl. 7.4, S. 118).

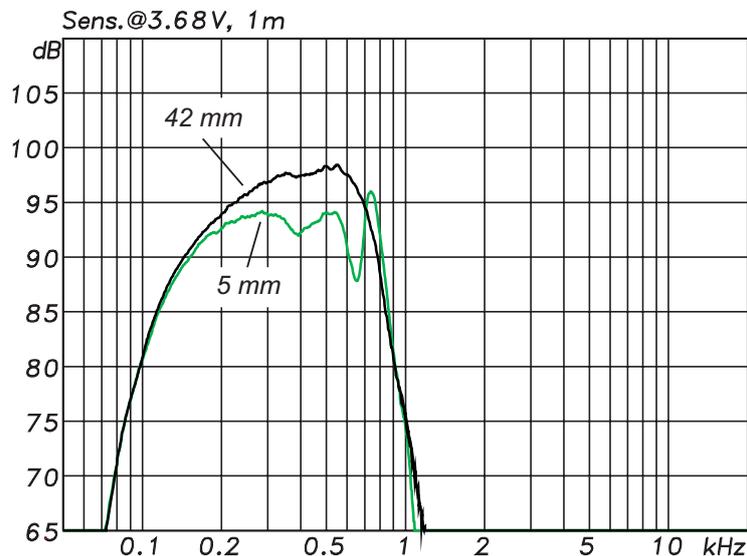


Abb. 7.14: Auf 1 W normierter Amplitudenfrequenzgang des 2×2 -Arrays bei 42 mm und bei 5 mm Gehäusetiefe.

¹⁶ Die Eigenschaften des Tiefpassfilters wurden aus den Untersuchungen zum Tiefton-Array (Abschnitt 7.2, S. 132ff.) abgeleitet.

¹⁷ Rein rechnerisch entsprechen 5 dB einem Faktor von lediglich 1,78.

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

Die Vermutung liegt nahe, dass die trotz konstantem Gehäusevolumen veränderte bewegte Masse hier als Ursache zu sehen ist.

Die Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen Volumenform und -steifigkeit zeigen, dass sehr flache Volumenformen zu niedrigeren Resonanzfrequenzen führen. Zwischen dem 42 mm Gehäuse und dem 5 mm Gehäuse beträgt der Unterschied etwa 63 Hz. Trotz dieser Resonanzverschiebung konnte bei den untersuchten Beispielgehäusen keine Tieftonerweiterung erreicht werden, da sich die Membranauslenkung nur geringfügig im Bereich der unteren Grenzfrequenz änderte. Oberhalb der Resonanzfrequenz kam es hingegen mit abnehmender Gehäusetiefe zu einer deutlichen Pegelverringern von bis zu 5 dB, da die Membranauslenkung nahezu um den Faktor 2 sank. Ein Grund dafür ist die mit abnehmender Gehäusetiefe zunehmende bewegte Masse. Es liegt die Vermutung nahe, dass der Massezuwachs bei abnehmender Gehäusetiefe aber gleichbleibendem Volumen mit dem zunehmenden Einfluss der Zähigkeitsgrenzschicht (Abschnitt 6.1, S. 73ff.) zusammenhängt. Außerdem treten bei flacheren Gehäuseformen wegen der größeren Gehäuselänge und -breite Stehwellen bereits bei tieferen Frequenzen auf. Maßnahmen wie das Einbringen von Dämmmaterial im Gehäuse am Ort des Schnelleximums, die Wahl unsymmetrischer Seitenverhältnisse und das nichtparallele Ausrichten gegenüberliegender Gehäusewände können diese Stehwellen verhindern bzw. verringern. Aus praktischer Sicht ist demnach eine Verringerung der Gehäusetiefe auf 5 mm für ein Array aus den vorgestellten vier Miniaturstrahlern ohne Tieftonverlust möglich. Der Pegelverlust oberhalb der Resonanzfrequenz stellt kein Problem dar. Zum einen ist in diesem Bereich mehr Schalldruckpegel als unterhalb der Resonanzfrequenz vorhanden und zum anderen ist die Membranauslenkung hier wesentlich kleiner als bei 100 Hz. Damit kann durch eine entsprechende Vorverzerrung des Signals der Verlust kompensiert werden. Einzig und allein der geringe Wirkungsgrad ist als Nachteil in Kauf zu nehmen.

7.1.4 Vergrößerung des akustisch wirksamen Volumens durch Füllmaterialien

Der Miniaturtreiber wurde für die angestrebte Butterworth-Abstimmung in ein geschlossenes Lautsprechergehäuse mit 168 ml Volumen eingebaut. Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 6.2 (S. 75ff.) kann unter Verwendung von Füllmaterialien das akustisch wirksame Volumen vergrößert werden. Aus diesem Grund wurde die Wirksamkeit des Lautsprecherdämmmaterials Sonofil¹⁸ und der Aktivkohle¹⁹ des Lautsprecherherstellers KEF zur Vergrößerung des akustisch wirksamen Volumens untersucht. Für diese Untersuchungen wurde der Miniaturwandler in ein Gehäuse mit variablem Volumen eingebaut. Die untersuchten Volumina wurden aus den 168 ml für eine Butterworth-Abstimmung abgeleitet zu 126 ml

¹⁸ Das verwendete Dämmmaterial wird von der Firma Intertechnik vertrieben und trägt die Bezeichnung Sonofil (www.intertechnik.de).

¹⁹ Die verwendete Aktivkohle wird von der Firma KEF in Subwoofern ebenso zur Verringerung des erforderlichen Gehäusevolumens eingesetzt (www2.kef.com).

(75 %), 84 ml (50 %) und 42 ml (25 %). Mittels Messung der elektrischen Impedanz, der Membranauslenkung und des Schalldruckpegels wurde als erstes der Einfluss der unterschiedlichen Gehäusegrößen bestimmt. Die Impedanzmessung zeigt die mit verringerter Gehäusegröße steigende Grundresonanzfrequenz (Abb. 7.15a). Die Gehäusegüten wurden mit Hilfe von Gl. A.1 bis Gl. A.6 (S. 216) aus den Impedanzkurven ermittelt. Die Güte ändert sich mit der Gehäusegröße von $Q_{tc} = 0,702$ (168 ml) zu $Q_{tc} = 0,750$ (126 ml) und $Q_{tc} = 0,800$ (84 ml). Mit abnehmender Gehäusegröße wird die Membranauslenkung unterhalb der Resonanzfrequenz kleiner (Abb. 7.15b). Dementsprechend verringert sich der Schalldruckpegel unterhalb der Resonanzfrequenz mit kleiner werdendem Gehäusevolumen (Abb. 7.16). Durch den Einsatz von Dämmwolle (Sonofil) und Aktivkohle wurde versucht, die Einflüsse eines kleineren Gehäusevolumens zu kompensieren. Jedes Gehäuse wurde mit 1,1 g, 2,2 g und 3,3 g Sonofil untersucht. Ebenso wurden Untersuchungen mit 15,8 g und mit 35,1 g Aktivkohle für die Gehäusevolumen 126 ml und 84 ml durchgeführt. Die Messkurven für jede Gehäusegröße befinden sich im Anhang A.3 (S. 222ff.). Die für den Vergleich wesentlichen Kurven sind in Abb. 7.17 bis Abb. 7.19 dargestellt. Abb. 7.17a zeigt die Impedanzkurven unterschiedlicher Gehäusegrößen mit verschiedenen Füllmengen von Aktivkohle. In Abb. 7.17b ist die Membranauslenkung für die verschiedenen Gehäusegrößen und Aktivkohlemengen dargestellt. Erkennbar ist hier die mit kleiner werdender Frequenz zunehmende steifigkeitsverringere Wirkung der Aktivkohle, wie es bereits in Abschnitt 6.2 (S. 75ff.) dargestellt ist. Ab etwa 70 Hz ist die Membranauslenkung trotz kleinerer Volumina bei allen befüllten Gehäusen größer. Im Bereich zwischen 100 Hz und der Resonanzfrequenz weist nur das 126 ml große Gehäuse bei Aktivkohlebefüllung die gleiche bzw. eine etwas größere Membranauslenkung als das 168 ml Gehäuse ohne Befüllung auf. Dies ist darin begründet, dass Aktivkohle oberhalb von etwa 100 Hz seine steifigkeitsverringere Wirkung mehr und mehr verliert und zunehmend als

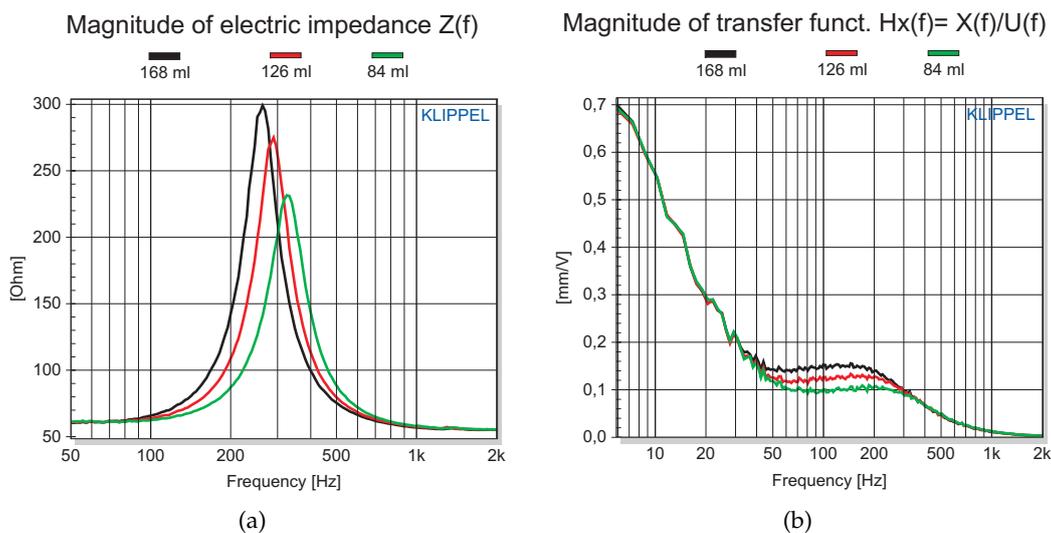


Abb. 7.15: Impedanzkurven (a) und Membranauslenkungen (b) bei einer Gehäusegröße von 168 ml, 126 ml und 84 ml

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

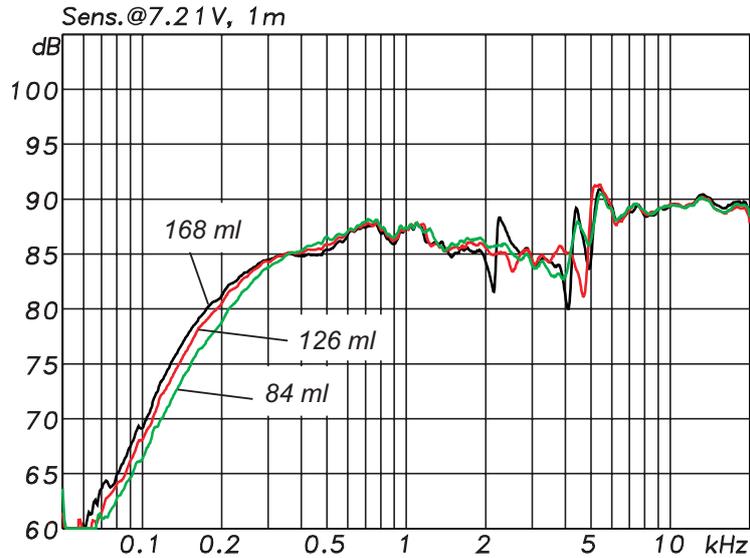


Abb. 7.16: Normierte Amplitudenfrequenzgänge für die unterschiedlichen Gehäusegrößen, 168 ml, 126 ml und 84 ml

volumenverdrängender Körper im Lautsprechergehäuse arbeitet. Abhängig vom Verhältnis aus Volumenverdrängung und Steifigkeitsverringering kommt es zu einer Vergrößerung bzw. Verkleinerung der Membranauslenkung, was sich entsprechend im Schalldruckpegelverlauf widerspiegelt (Abb. 7.18). Da das Verhalten des Miniaturwandlers nur unterhalb der Resonanzfrequenz steifigkeitsbestimmt ist, kann durch Aktivkohle eine Kompensation des Schalldruckpegelverlustes bei verkleinertem Gehäuse besonders dann erzielt werden, wenn die Resonanzfrequenz

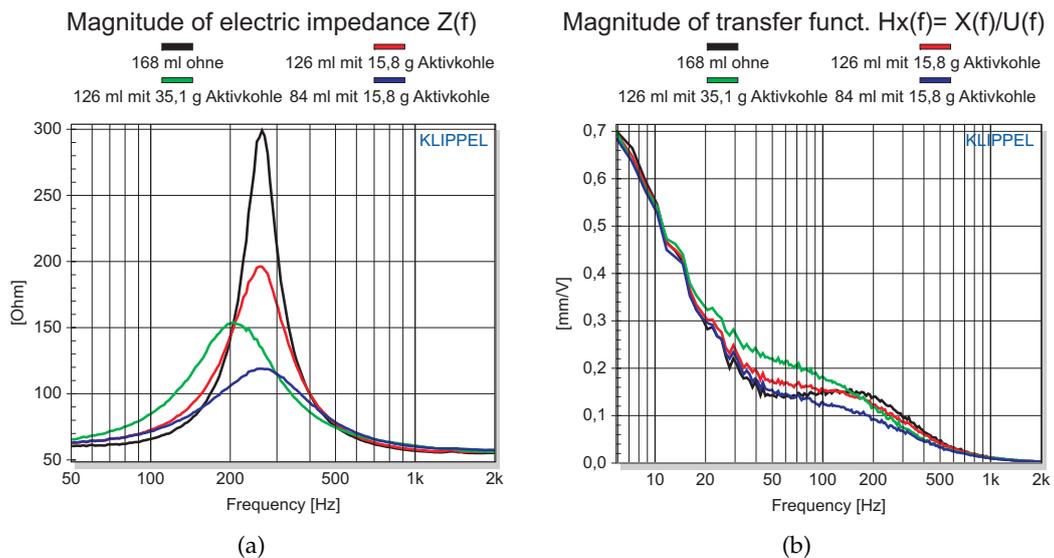


Abb. 7.17: Vergleich der Impedanzkurven (a) und der Membranauslenkungen (b) des leeren 168 ml Gehäuses mit den aktivkohlegefüllten 126 ml und 84 ml Gehäusen

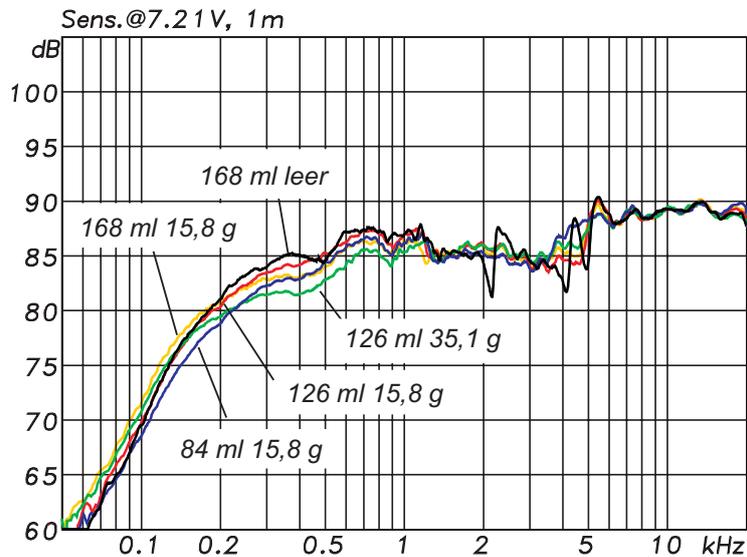


Abb. 7.18: Amplitudenfrequenzgang des 168 ml Gehäuses gegenüber dem 126 ml bzw. 84 ml Gehäuse bei Verwendung von Aktivkohle

möglichst tief liegt. Oberhalb der Resonanzfrequenz ist das Wandlerverhalten massebestimmt. Die Aktivkohle bewirkt zwischen der Resonanzfrequenz und etwa 1 kHz eine Verringerung der Membranauslenkung. Dementsprechend nimmt in diesem Frequenzbereich auch der Schalldruckpegel gegenüber dem 168 ml Gehäuse ohne Füllung ab. Der Vergleich des 126 ml Gehäuses mit 35,1 g und mit 15,8 g Aktivkohle deutet darauf hin, dass die Pegelabnahme mit der Füllmenge zunimmt.

Die Verwendung von Sonofil zeigt eine schlechtere Wirkung als Aktivkohle. So konnte der Anstieg der Resonanzfrequenz infolge eines kleineren Gehäuses nicht so kompensiert werden wie mit Aktivkohle (Abb. 7.19a). Die entsprechende Membranauslenkung bei unterschiedlicher Füllmenge ist in Abb. 7.19b zu sehen. Es zeigt sich, dass im 126 ml Gehäuse mit 3,3 g Sonofil nahezu die gleiche Resonanzfrequenz wie bei einem ungefüllten Gehäuse von 168 ml erreichbar ist. Gleichzeitig ist eine bedämpfende Wirkung anhand der kleiner werdenden Impedanzamplitude zu erkennen. Der Schalldruckpegel verringert sich minimal um 1 dB zwischen 100 Hz und 300 Hz (Abb. 7.20).

Die durch Stehwellen im Gehäuse hervorgerufenen Überhöhungen und Einbrüche im Amplitudenfrequenzgang bei ca. 2 kHz und 4 kHz konnte sowohl mit Aktivkohle als auch mit Sonofil verhindert werden.

7.1.5 Gehäuseverkleinerung durch Compound-Prinzip

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit des Compound-Prinzips (Abschnitt 6.6, S. 84ff.) wurden zwei Miniaturwandler entsprechend Abb. 7.21 in ein Gehäuse eingebaut. Das Volumen der Koppelkammer betrug ca. 14 ml. Gemäß der Theorie kann das Gehäusevolumen bei Anwendung des Compound-Prinzips halbiert werden [72,

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

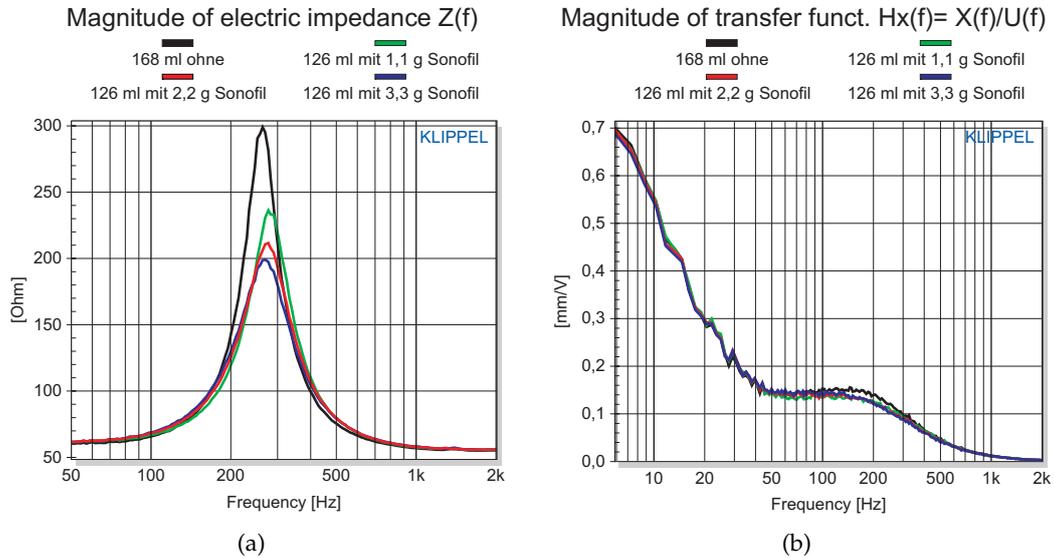


Abb. 7.19: Vergleich der Impedanzkurven und der Membranauslenkungen des leeren 168 ml und des mit SonoFil gefüllten 126 ml Gehäuses

S. 75]. Aus diesem Grund wurde für das Volumen der zweiten Kammer die Hälfte von 168 ml, also 84 ml, gewählt. Beim Compoundprinzip bewegen sich die Membrane in die gleiche Richtung. Um Nichtlinearitäten des Einzelwandlers ein Stück mehr zu kompensieren, wurden beide Wandler mit ihrer Rückseite zueinander angeordnet [226]. Die Wandler wurden parallel verschaltet, wodurch sich eine Gesamtimpedanz von 26Ω ergab. In gleicher Weise wie bei den Untersuchungen zum Füllmaterial wurden der Impedanzverlauf, die Übertragungsfunktion

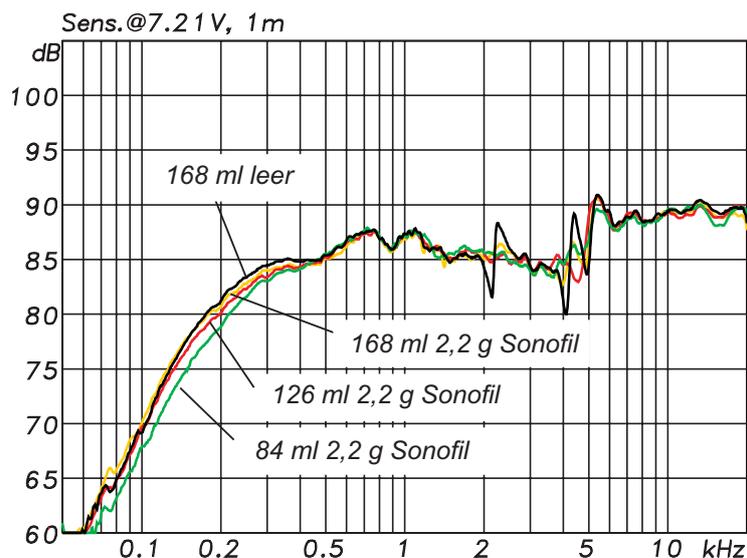


Abb. 7.20: Auf 1 W normierter Amplitudenfrequenzgang des 168 ml Gehäuses gegenüber dem 126 ml bzw. 84 ml Gehäuse mit SonoFil

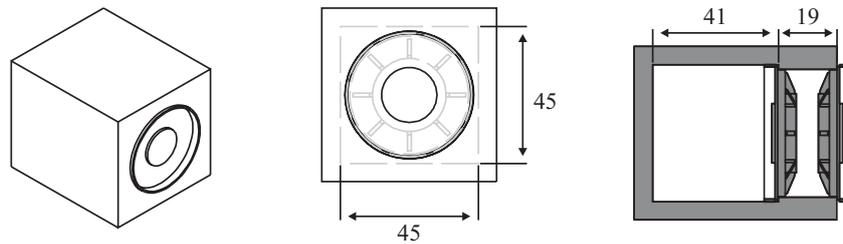


Abb. 7.21: Skizze des Compound-Gehäuses

der Membranauslenkung und der Amplitudenfrequenzgang gemessen. Der Impedanzverlauf in Abb. 7.22a zeigt, dass das Compound-Prinzip den Anstieg der Resonanzfrequenz infolge der Halbierung des Gehäusevolumens kompensiert. Ebenso ist unterhalb von etwa 300 Hz eine Steigerung der Membranauslenkung erkennbar (Abb. 7.22b). Trotz der erhöhten Rückstellkraft des kleineren Luftvolumens bringen beide Wandler vereint ausreichend Antriebskraft auf, um eine gleich große bzw. zwischen 30 Hz und 200 Hz sogar größere Membranauslenkung gegenüber dem 168 ml Gehäuse zu erzielen. Dies wirkt sich auf den Schalldruckpegelverlauf aus (Abb. 7.23). Trotz des halben Gehäusevolumens wird nahezu der gleiche Schalldruckpegelverlauf wie beim 168 ml Gehäuse erreicht.

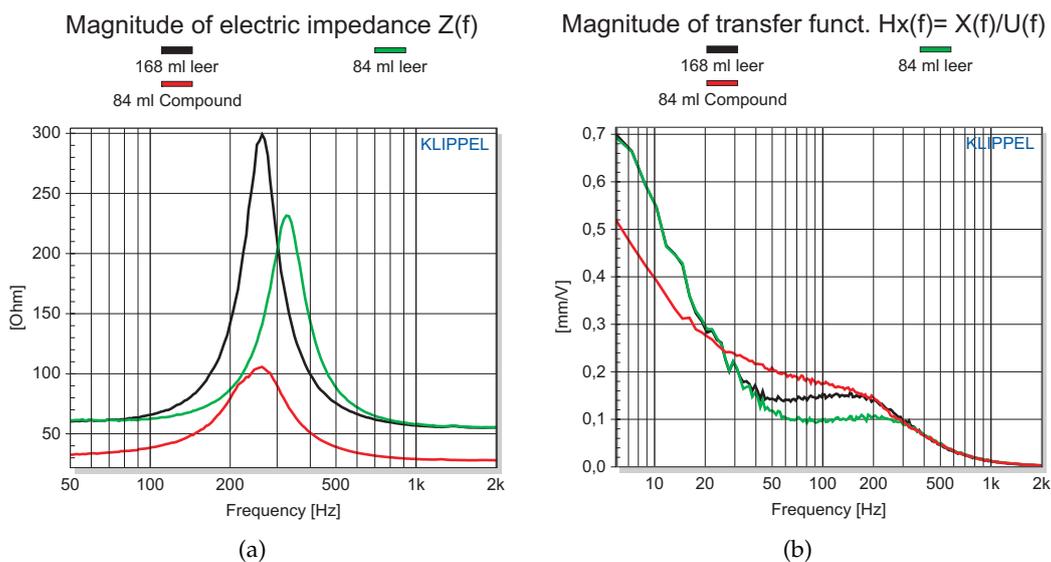


Abb. 7.22: Impedanzverlauf (a) und Membranauslenkung (b) des leeren 168 ml bzw. 84 ml Gehäuses und des 84 ml Compound-Gehäuses

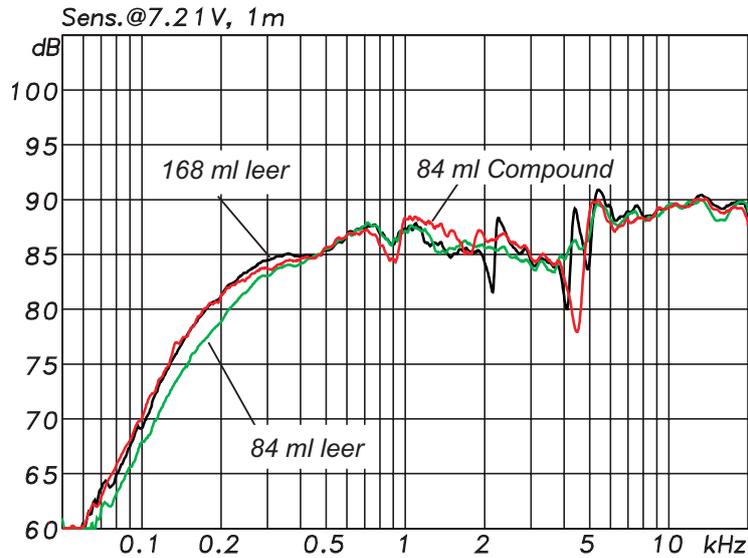


Abb. 7.23: Auf 1 W normierter Amplitudenfrequenzgang des leeren 168 ml, des leeren 84 ml und des 84 ml Compound-Gehäuses

7.1.6 Bassreflexgehäuse

Da der Miniaturwandler entsprechend seines Q_{ts} -Wertes auch für ein Bassreflexgehäuse geeignet ist, wurden Untersuchungen dazu durchgeführt²⁰. Anhand der ermittelten Thiele & Small-Parameter und einem Abstimmdiagramm aus [224] wurde eine Abstimmung mit minimalem Volumen – 332 ml – und eine Abstimmung mit optimalem Volumen von 468 ml gewählt (Abb. 7.24)²¹. Mit Hilfe des Abstimmdiagramms wurde auch die jeweilige Abstimmfrequenz f_B des Reflextunnels bestimmt. Für das kleinere Volumen beträgt sie 117 Hz und für das größere Gehäuse 106 Hz. Um Strömungsprobleme²² zu vermeiden, wurde der Durchmesser des Bassreflex-

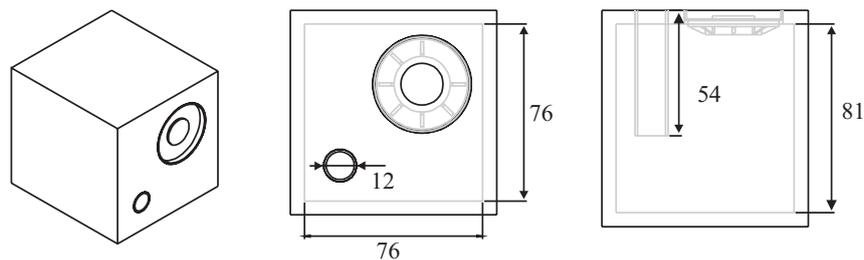


Abb. 7.24: Skizze des 468 ml großen Bassreflexgehäuses

²⁰ Nach [72, S. 92] bieten Wandler mit einem Q_{ts} -Werte zwischen 0,2 und 0,5 die besten Ergebnisse in Bassreflexkonstruktionen.

²¹ Die Abstimmtabellen in [72, S. 99ff.] ermöglichen sogar eine Abstimmung mit nur 296 ml. Allerdings ist dieses Volumen noch weiter von dem optimalen und damit praktisch relevanten Volumen von 468 ml entfernt, weshalb es nicht umgesetzt wurde.

²² Bei zu kleinen Querschnitten treten Turbulenzen im Kanal auf, die zu einem Effizienzverlust und Störgeräuschen führen. Weitere Ausführungen dazu sind beispielsweise in [199], [72, S.103ff.], [189],

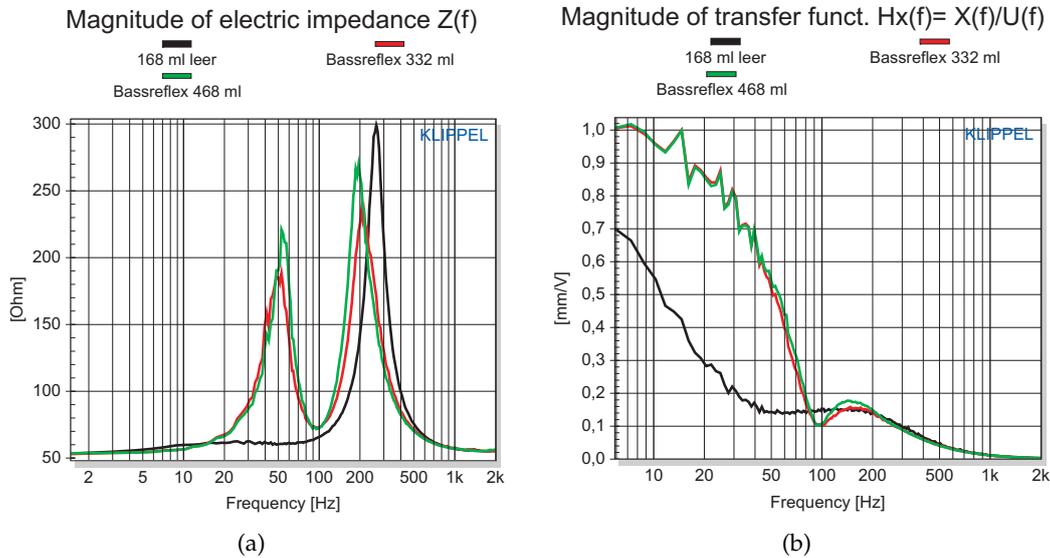


Abb. 7.25: Impedanzverlauf (a) und Membranauslenkung (b) des leeren 168 ml bzw. des 332 ml und des 468 ml Bassreflexgehäuses

tunnels d_T auf 40 % des Membrandurchmessers gesetzt. Die Tunnellänge l_T wurde mit Hilfe von Gl. 7.5 bestimmt [224].

$$l_T = \frac{234d_T^2}{f^2V_D} - 0,08d_T \quad (7.5)$$

Bei V_D handelt es sich um das von der Membran maximal verschobene Luftvolumen. Der Tunneldurchmesser ist in Millimetern, das Verschiebungsvolumen in Litern und die Tunnellänge in Zentimetern einzusetzen. Für das 332 ml Gehäuse ergibt sich eine Tunnellänge von 6,4 cm und für die 468 ml eine Länge von 5,4 cm. Die Impedanzkurven und Membranauslenkungen des geschlossenen leeren Gehäuses und der zwei Bassreflexgehäuse sind in Abb. 7.25a, b dargestellt. Die Impedanzkurven der Bassreflexkonstruktionen zeigen im Gegensatz zum geschlossenen Gehäuse zwei Impedanzmaxima. Das dazwischen liegende Minimum kennzeichnet den Ort der Abstimmfrequenz. Die angestrebten Abstimmfrequenzen von 106 Hz und 117 Hz wurden nahezu erreicht. Erwartungsgemäß verringert sich die Membranauslenkung im Bereich der Abstimmfrequenz des Resonators (Abb. 7.25b) Unterhalb dieser Frequenz steigt die Auslenkung stark an, da infolge der Bassreflexöffnung die Rückstellkraft des eingeschlossenen Luftvolumens geringer als bei einem geschlossenen Gehäuse ist²³.

Der Amplitudenfrequenzgang der Bassreflexgehäuse wurde im reflexionsarmen Raum gemessen. Zum Vergleich sind die Frequenzgänge des geschlossenen und der beiden ventilierten Gehäuse in Abb. 7.26 dargestellt. Die Bassreflexkonstruk-

[186] und [34] zu finden.

²³ Aufgrund der großen Membranauslenkungen kann eine Schutzschaltung in Form eines Hochpassfilters erforderlich sein.

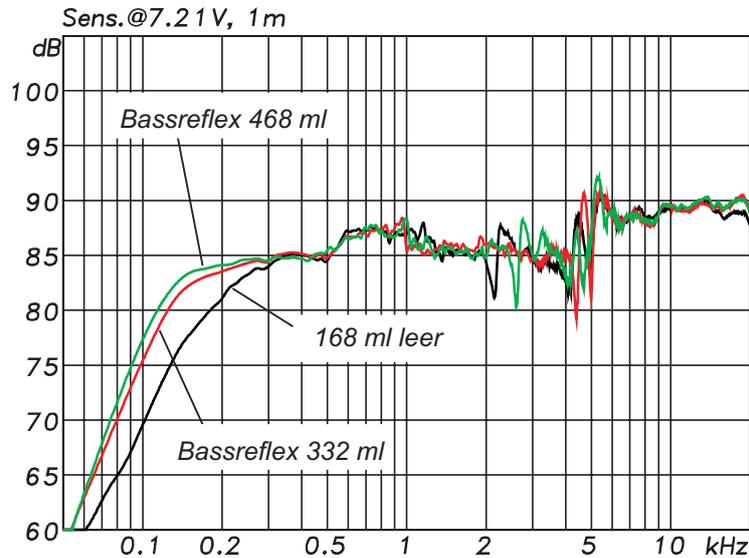


Abb. 7.26: Auf 1 W normierter Amplitudenfrequenzgang des geschlossenen 168 ml Gehäuses und der Bassreflexgehäuse mit 332 ml und 468 ml

tionen zeigen einen deutlich größeren Schalldruckpegel unterhalb von 300 Hz. Das 468 ml große Gehäuse liegt aufgrund der optimalen Größe um etwa 2 dB über dem 332 ml großen Gehäuse. Gegenüber dem geschlossenen Gehäuse verschiebt sich die untere -6 dB-Grenzfrequenz von ca. 190 Hz auf ca. 110 Hz bzw. 120 Hz. Da dieser Tieftongewinn nur mit einem doppelt so großen Volumen erzielbar ist, wurde versucht, dass 168 ml Gehäuse mit einem Bassreflexkanal auszustatten. Durch unterschiedliche lange Reflexkanäle wurden verschiedene Abstimmungen ausprobiert. Der Amplitudenfrequenzgang wurde für jede Abstimmung mit Normschallwand im RAR gemessen. Dabei konnte keine Abstimmung gefunden werden, die eine nennenswerte Verschiebung der unteren Grenzfrequenz bewirkt (Abb. 7.27).

Sowohl die Forderung eines doppelt so großen Gehäusevolumens als auch die Erkenntnisse aus [151] über die Schwierigkeiten der Ausbildung eines wirksamen Bassreflexkanales in einem sehr flachen Gehäuse führten zu der Entscheidung, für den Array-Flachlautsprecher kein Bassreflexgehäuse einzusetzen. Je nach betrachtetem Wandler und je nach Gehäuseabmessungen kann eine Bassreflexkonstruktion aber durchaus möglich sein.

7.2 Dimensionierung des Arrays

Damit der Flachlautsprecher die Anforderungen aus Kapitel 2 (S. 5ff.) erfüllt, musste auf Basis der Wandlereigenschaften die Größe des Arrays bestimmt werden. Die untere -6 dB-Grenzfrequenz sollte bei 100 Hz und die obere bei 20 kHz liegen. Schwankungen im Amplitudenfrequenzgang sollten kleiner ± 3 dB sein. Als mittlerer Schalldruckpegel wurden 85 dB in 1 m Abstand bei einem Gesamtklirrfaktor von maximal 3% angestrebt. Für eine mögliche Entzerrung des Amplitudenfre-

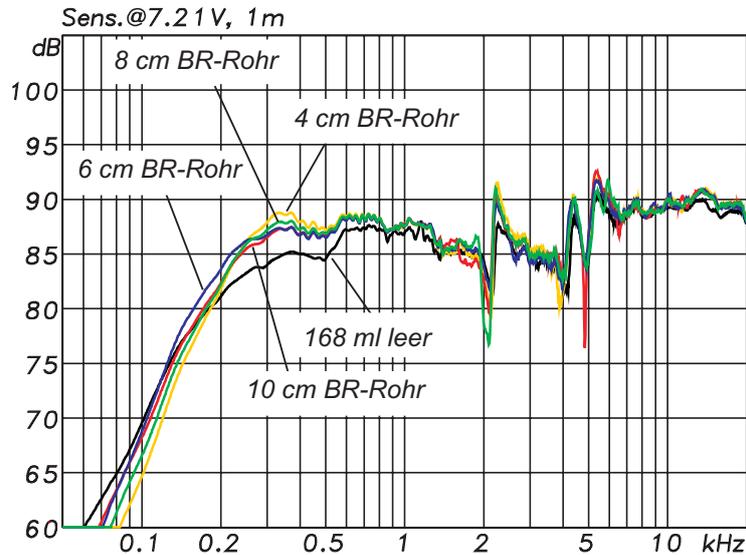


Abb. 7.27: Auf 1 W normierter Amplitudenfrequenzgang des 168 ml Gehäuses bei unterschiedlichen Bassreflexrohrängen

quanzanges sollte eine Pegelreserve von 20 dB zur Verfügung stehen. Es wurde entsprechend einem konventionellen Konuslautsprecher aus dem HiFi-Bereich ein Kessschalldruckpegel von mindestens 80 dB/1 W/1 m gefordert. Das räumliche Abstrahlverhalten sollte möglichst geringe Einschnürungen und Nebenkeulen aufweisen.

Aus den Betrachtungen zur Schallabstrahlung der Kolbenmembran und zur akustischen Kopplung zwischen zwei Schallstrahlern in Kapitel 3 (S. 11ff.) geht hervor, dass die Vergrößerung der schallabstrahlenden Fläche zu einem Pegelgewinn führt. Ebenso bewirkt die Flächenvergrößerung eine Verschiebung der einsetzenden Schallbündelung zu tieferen Frequenzen hin. Damit wird deutlich, dass ein Kompromiss zwischen dem gewünschten Schalldruckpegel und der gewünschten Abstrahlcharakteristik des Arrays erforderlich ist. Die schallabstrahlende Fläche sollte für eine ungerichteten Schallabstrahlung so klein wie möglich und bezüglich des Schalldruckpegels so groß wie nötig sein.

Die Betrachtungen zur Strahlungsimpedanz in Abschnitt 3.4 (S. 26ff.) zeigen, dass mit steigender Frequenz kleinere Membranflächen nötig sind, um den gleichen Schalldruckpegel zu erreichen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die einzelnen Wandler des Arrays nicht gleich anzusteuern, sondern das Array in frequenzabhängige Wiedergabezweige – ähnlich einem konventionellen Mehrwege-Lautsprecher – zu unterteilen. Es musste somit die Frage geklärt werden, in wie viele Wiedergabezweige das Array aufzuteilen ist und wie viele Wandler jeder Weg beinhaltet. Da die Richtwirkung einer abstrahlenden Fläche mit der Frequenz zunimmt, wurde zunächst die Anzahl der Wandler für die Hochtonwiedergabe bestimmt.

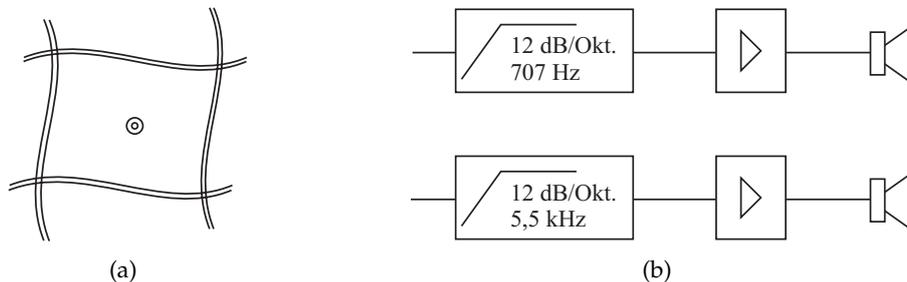


Abb. 7.28: Schematische Darstellung eines Wandlers in einer Schallwand unbestimmter Größe für die Hochtonwiedergabe (a), Hochpassfilterung mit 12 dB/Okt. ab 707 Hz bzw. 5,5 kHz (b)

7.2.1 Hochtonwiedergabe mit einem Wandler

Die kleinste Array-Fläche, die mit dem zur Verfügung stehenden Wandler realisierbar ist, stellt die Membran eines einzelnen Wandlers dar (Abb. 7.28a). Aufgrund des effektiven Membranradius des Wandlers von ca. 1,5 cm tritt eine gerichtete Schallabstrahlung – entsprechend $ka = 1$ – oberhalb von 3,65 kHz ein (Abschnitt 3.3.1, S. 19ff.). Jedoch zeigt die Untersuchung des Wandlers, dass bereits bei ca. 1 kHz die gerichtete Abstrahlung einsetzt (Abb. 7.11, S. 121). Da die Fläche nicht weiter verkleinert werden kann, ist das Optimum für eine ungerichtete Abstrahlung erreicht. Das zweite Entscheidungskriterium ist der maximal erzielbare Schalldruckpegel des Miniaturschallwandlers. Vor der Messung des Schalldruckpegels wurde die maximal mögliche Membranauslenkung des Miniaturwandlers bestimmt (Abschnitt 7.1, S. 110ff.). Die Ergebnisse zeigen, dass die Schwingspule bzw. deren Träger für Auslenkungen größer gleich 0,75 mm auf die hintere Polplatte aufschlägt (Abb. 7.4, S. 113). Da die Auslenkung bei tiefen Frequenzen am größten ist, wurde für die Schalldruckmessungen ein Hochpassfilter 2. Ordnung mit Bessel-Charakteristik bei 707 Hz als Schutzmaßnahme eingesetzt (Abb. 7.28). Der Wandler war für die Schalldruckpegelmessungen in eine Normschallwand nach [26] eingebaut. Die zugeführte elektrische Leistung wurde soweit erhöht, bis der Gesamtklirrfaktor bei einer Frequenz im Übertragungsbereich 5 % erreichte (Abb. 7.29). Bei der ermittelten elektrischen Leistung wurde ein Schalldruckpegel von etwa 86 dB bei einer Entfernung von 1 m gemessen (Abb. 7.30). Die gewünschten 105 dB Schalldruckpegel konnten so nicht erzielt werden. Da die Klirrfaktor-Kurve nur im Bereich um 5 kHz eine schmalbandige Überhöhung zeigt, wurde der Ansatz verfolgt, den einzelnen Wandler nur für die Schallwiedergabe oberhalb dieser Überhöhung einzusetzen. Zu diesem Zweck wurde die Grenzfrequenz des Hochpassfilters auf 5,5 kHz verschoben (Abb. 7.28). Der Schalldruckpegel konnte dadurch bei dem gleichen Gesamtklirrfaktor von 5 % auf etwa 93 dB in 1 m Abstand gesteigert werden (Abb. 7.29 und Abb. 7.30). Die zugeführte elektrische Leistung betrug 4 W. Um eine weitere Pegelsteigerung zu erreichen, musste entsprechend Gl. 3.22 (S. 29) die Membranauslenkung erhöht bzw. die Membranfläche vergrößert werden. Deshalb konnte nur durch die Hinzunahme weiterer Wandler der Schalldruckpegel für die Hochtonwiedergabe erhöht werden.

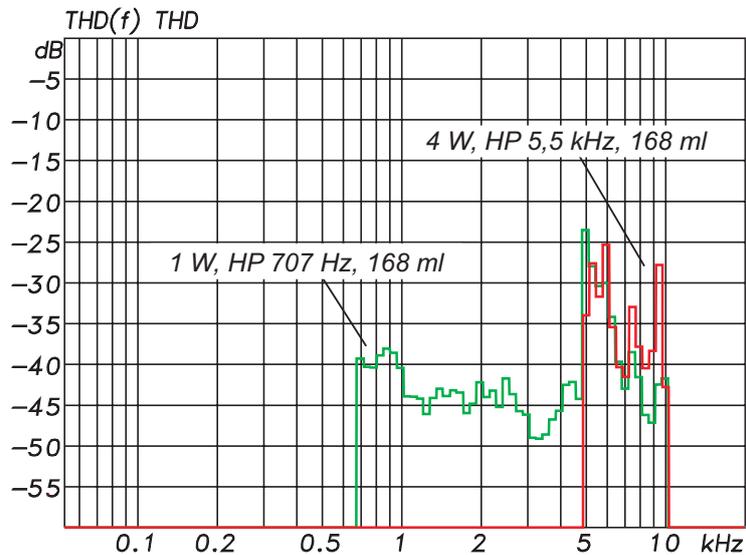


Abb. 7.29: Gesamtklirrfaktor des Miniaturschallwandlers mit Hochpassfilterung 2. Ordnung bei 707 Hz und 1 W und bei 5,5 kHz und 4 W

7.2.2 Hochtonwiedergabe mit Bessel-Array

Mit der Vergrößerung der abstrahlenden Fläche nimmt die Schallbündelung zu. Aus diesem Grund sollte die Anzahl der Wandler so klein wie möglich gewählt werden. Ebenso kann durch eine optimierte Ansteuerung der Wandler das Abstrahlverhalten beeinflusst werden. Idealerweise ist durch die Kombination beider Kriterien die Abstrahlcharakteristik eines einzelnen Wandlers und gleichzeitig ein größerer Schalldruckpegel erreichbar. In der einfachsten Version bedeutet dies, dass zwei Wandler zur Hochtonwiedergabe so dicht wie möglich angeordnet werden. Ist der Abstand kleiner gleich einem Achtel der Wellenlänge, koppeln die Strahler akustisch vollständig (Abschnitt 3.5, S. 31). Der Pegelgewinn beträgt dann für jeden Abstrahlwinkel 6 dB.

Keele vergleicht u.a. in [118] eine Anordnung aus zwei Kugelstrahlern mit einer Anordnung aus fünf Kugelstrahlern. Die fünf äquidistanten Wandler werden als Bessel-Array eingesetzt (Abb. 7.31). Nach Keele beträgt der Pegelgewinn eines solchen Bessel-Arrays wie bei zwei Wandlern 6 dB (Tab. A.6, S. 228). Gleichzeitig ist aber das Abstrahlverhalten wesentlich weniger von ausgeprägten Seitenkeulen gekennzeichnet (Abb. 7.32). Keele wählt in Abb. 7.32 die Array-Länge mit Eins fest. Der Abstand der Wandler beträgt immer ein Viertel der Array-Länge. Frequenzen, deren Wellenlänge größer gleich der dreifachen Array-Länge ist, werden sowohl von den zwei Kugelstrahlern als auch vom Bessel-Array kugelförmig abgestrahlt (Abb. 7.32, oben). Entspricht die Wellenlänge nur noch einem Drittel der Array-Länge, bilden sich bei der Anordnung aus zwei Kugelstrahlern vier Abstrahlkeulen aus (Abb. 7.32, mitte). Demgegenüber ist die vertikale Abstrahlcharakteristik des Bessel-Arrays nahezu ungerichtet. Auch bei noch höheren Frequenzen bildet sich beim Bessel-Array in der vertikalen Ebene kaum eine gerichtete Schallabstrahlung heraus. Statt der Kugel kann der verwendete Strahler auch eine andere Abstrahlcharakteristik besit-

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

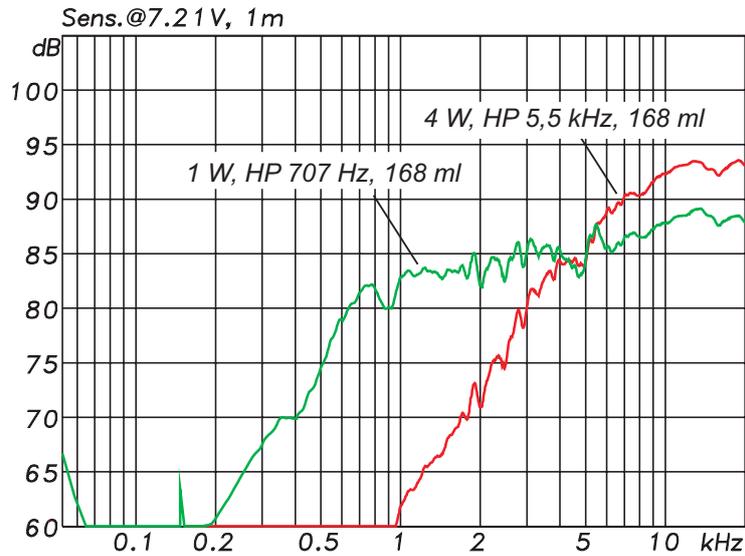


Abb. 7.30: Amplitudenfrequenzgang des Miniaturschallwandlers in einer Normschallwand mit Hochpassfilterung 2. Ordnung bei 707 Hz und 1 W und bei 5,5 kHz und 4 W

zen. In diesem Fall wird vom Bessel-Array diese Charakteristik nachgebildet. Aus diesem Grund wurden für den Flachlautsprecher nicht zwei Wandler, sondern das Bessel-Array aus fünf Wandlern für die Hochtonwiedergabe eingesetzt. Die Amplitudengewichtung und Phasenverteilung wurde entsprechend Abb. 6.25b (S. 96) vorgenommen. Realisiert wurde dies durch eine Verschaltung der Wandler, wie sie in Abb. 7.33a dargestellt ist. Wegen der Impedanz des einzelnen Wandlers von $52\ \Omega$ ergab sich für das Bessel-Array ein Gleichstromwiderstand von rechnerisch $13\ \Omega$. Die tatsächliche Impedanz lag bei $15,2\ \Omega$. Für die Messung des Klirrfaktors und des maximalen Schalldrucks wurde jeder Wandler in ein Gehäuse eingebaut. Auf diese Weise wurde die Beeinflussung der Wandler untereinander verringert. Das Bessel-Array wurde auf die gleiche Weise wie der einzelne Wandler für die Hochtonwiedergabe bei 707 Hz hochpassgefiltert. Der maximal erreichte Schalldruckpegel betrug etwa 97 dB in 1 m Abstand bei einem Gesamtklirrfaktor von 5% und einer Leistungsaufnahme von 8 W ($11\ V_{\text{rms}}/15,2\ \Omega$) (Abb. 7.34, Abb. 7.35). Anhand der Klirrfaktorkurve für die Messung ohne Hochpassfilter wird deut-

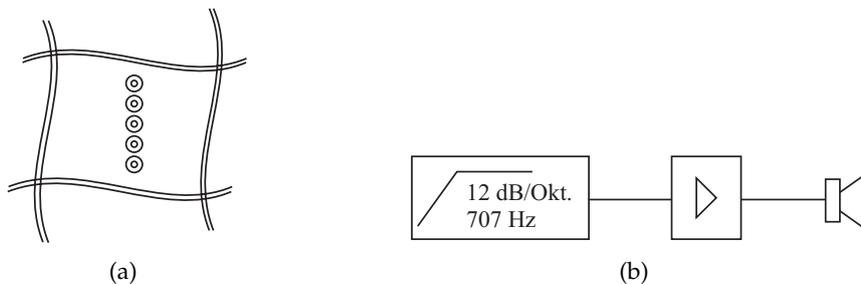


Abb. 7.31: Hochtonwiedergabe mit einem Bessel-Array aus fünf Wandlern, Hochpassfilterung mit 12 dB/Okt. ab 707 Hz

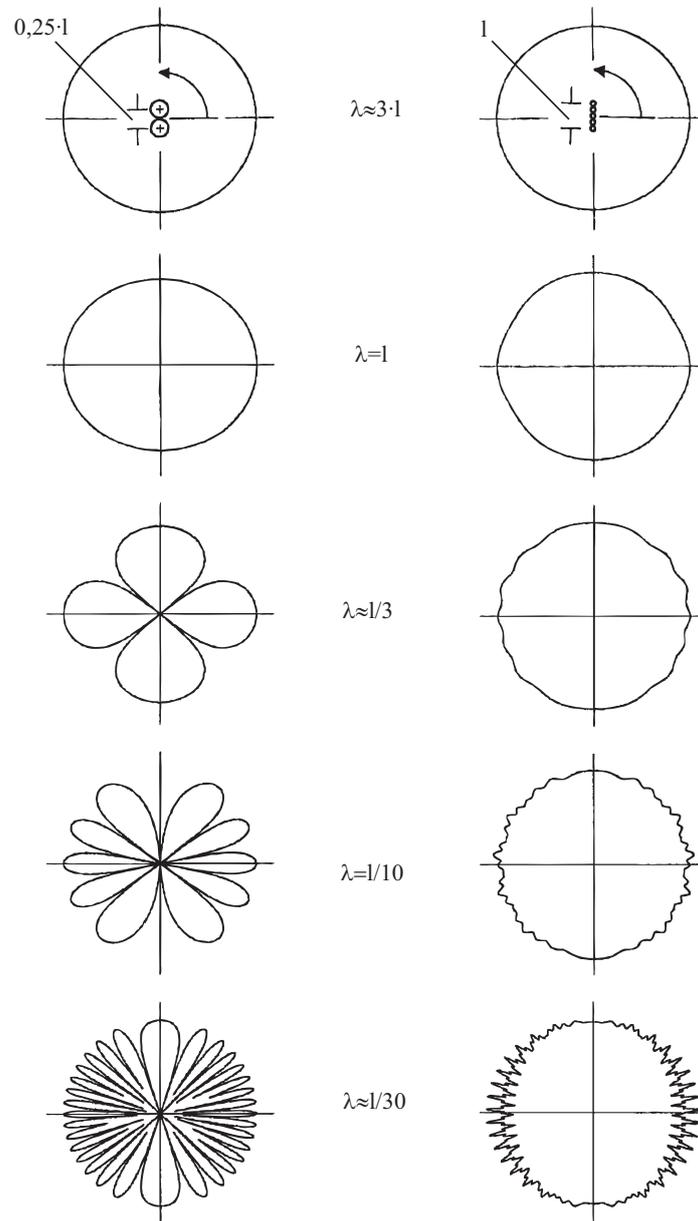


Abb. 7.32: Vergleich des vertikalen Abstrahlverhaltens von zwei Kugelstrahlern (links) und einem Bessel-Array aus fünf Kugelstrahlern (rechts) bei verschiedenen Verhältnissen zwischen der Wellenlänge und der Array-Länge. Die Strahlerabstände sind jeweils gleich groß [118].

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

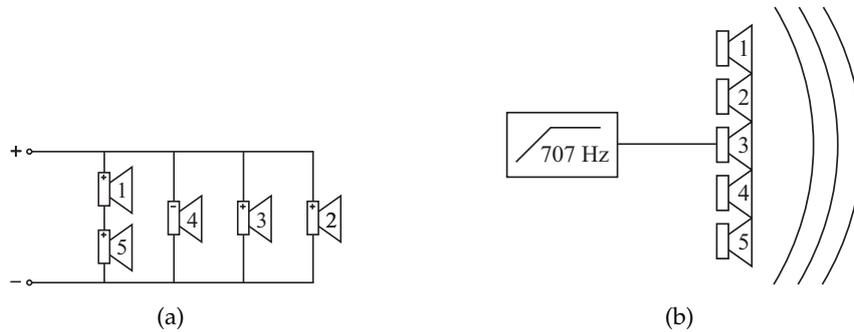


Abb. 7.33: Verschaltung (a) und Anordnung (b) des verwendeten Bessel-Arrays

lich, dass eine tiefere Einsatzfrequenz des Filters ungeeignet ist. Eine Vergrößerung des Bessel-Arrays auf sieben bzw. neun Wandler, um auf die angestrebten 105 dB Schalldruckpegel in 1 m Abstand zu kommen, wurde nicht durchgeführt. Laut Keele kann dadurch zwar der maximale Schalldruckpegel erhöht werden, gleichzeitig sind aber die Energieeffizienz und das räumliche Abstrahlverhalten dieser Arrays wesentlich schlechter (Tab. A.6, S. 228). Aus diesem Grund wurde das Zielkriterium von 105 dB auf die unterhalb von 3 kHz erreichten 95 dB Schalldruckpegel in 1 m Abstand geändert (Abb. 7.34). Die 95 dB dienen dann als Ausgangspunkt für die Dimensionierung des Tiefton-Arrays.

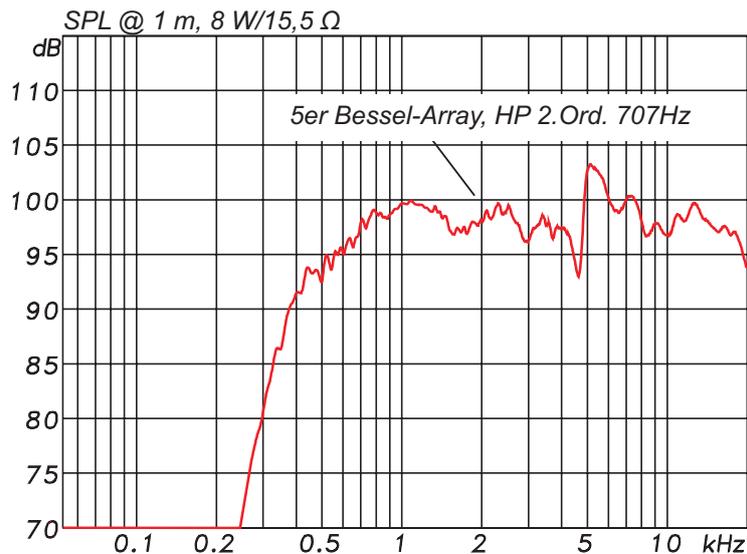


Abb. 7.34: Schalldruckpegel des Bessel-Arrays aus fünf Miniaturschallwandlern in einem Gehäuse bei 8 W elektrischer Leistung in 1 m Abstand, mit einem Hochpassfilter 2. Ordnung bei 707 Hz

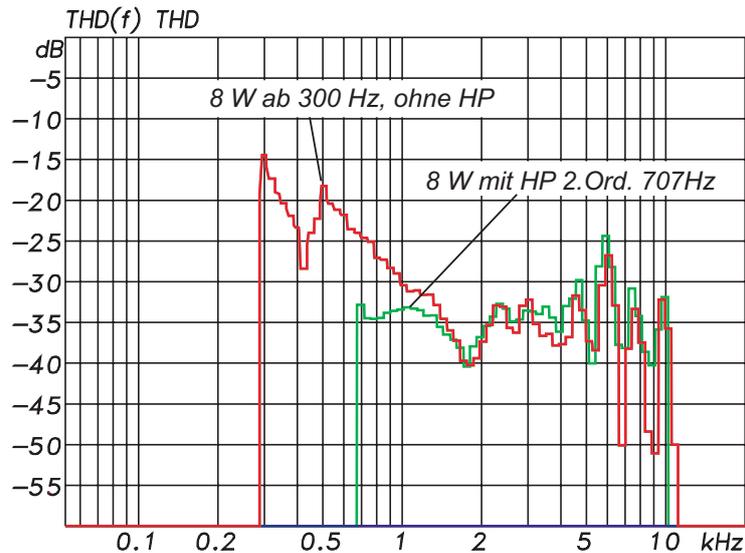


Abb. 7.35: Gesamtklirrfaktor des 5er-Bessel-Arrays bei 8 W elektrischer Leistung ($11 V_{\text{rms}}$ an $15,2 \Omega$) mit Hochpassfilterung 2. Ordnung bei 707 Hz und ohne Hochpassfilterung ab 300 Hz

7.2.3 Tieftonwiedergabe mit Flächen-Array

Entsprechend dem maximalen Schalldruckpegel des 5er-Bessel-Arrays sollte das Tiefton-Array idealerweise von 100 Hz bis 700 Hz einen Schalldruckpegel von 95 dB in 1 m Abstand erzielen. Auf diese Weise könnte mit einem Zwei-Wege-System der gewünschte Wiedergabefrequenzbereich abgedeckt werden. Die Anzahl der Wandler für die Tieftonwiedergabe sollte im Sinne einer ungerichteten Abstrahlung so klein wie möglich sein.

Bei einem maximalen Schalldruckpegel von 95 dB beträgt der Schalldruckpegel für die -6 dB-Grenzfrequenz von 100 Hz 89 dB. Nach Gl. 3.23 (S. 29) erreicht der einzelne Wandler in der unendlichen Schallwand (2π -Abstrahlung) bei einem effektiven Membranradius von 1,5 cm, einer Auslenkung von $\pm 0,5$ mm und einem Abstand von 1 m einen Schalldruckpegel von 60 dB für 100 Hz.

Zur Bestimmung des maximal möglichen Schalldruckpegels in Abhängigkeit vom Gesamtklirrfaktor wurden Messreihen bei unterschiedlichen Verstärkerleistungen durchgeführt. Um die Schwingspulenauslenkung unterhalb der 100 Hz-Grenzfrequenz vor einem Aufschlagen zu schützen, wurde ein Hochpassfilter 8. Ordnung mit Linkwitz-Riley-Charakteristik und einer Grenzfrequenz von 80 Hz eingesetzt. Die Pegelminderung bei 100 Hz betrug infolge der Filterung 1,7 dB (Abb. 7.36). Aufgrund des geringen Schalldruckpegels im Tieftonbereich wurde im Nahfeld (2 mm Mikrofonabstand) gemessen. In Abb. 7.37 ist der Verlauf des Gesamtklirrfaktors bei verschiedenen Eingangsleistungen dargestellt. Für 106 mW ($2,35 V_{\text{rms}}$) erreicht der Wandler bereits die 10 %-Grenze bei etwa 100 Hz²⁴. Die Ansteuerung mit

²⁴ Im Gegensatz zur Klirrfaktormessung ohne Filter (Abb. 7.29, S. 135) zeigte sich für 106 mW nun

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

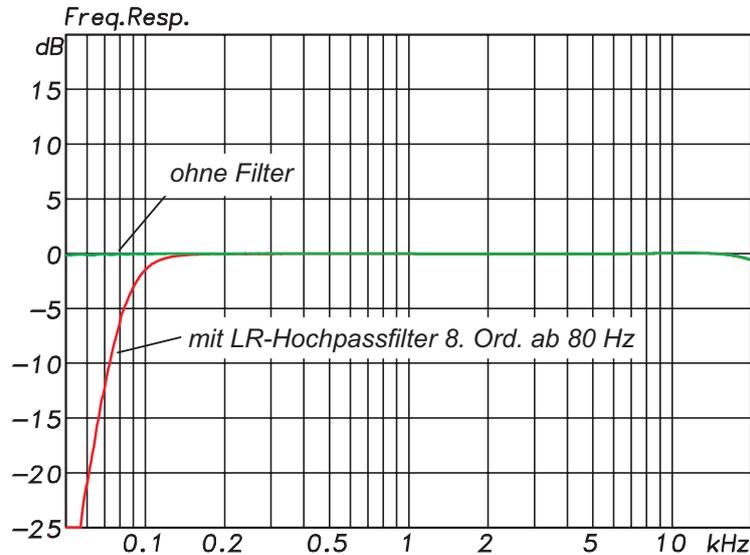


Abb. 7.36: Amplitudenfrequenzgang der Ansteuerungskette aus Lautsprecher-Controller und Endstufe, Pegeldifferenz bei 100 Hz 1,7 dB

noch größeren Eingangsleistungen würde zu nicht akzeptablen Klirrfaktoren führen. Die maximale Eingangsspannung für die Anregung mit einem Sinuston wurde somit auf 2,35 V festgelegt. Die zugehörigen Amplitudenfrequenzgänge wurden im reflexionsarmen Raum in einer Entfernung von 1 m gemessen (Abb. 7.38). Bei einer Eingangsleistung von 106 mW wird in 1 m Entfernung ein Schalldruckpegel bei Vollraumabstrahlung von ungefähr 53 dB bei 100 Hz erzielt. Im Vergleich zu dem nach Gl. 3.23 (S. 29) berechneten Schalldruckpegel von 60 dB für die Halbraumabstrahlung bleibt nach Rückrechnung der 6 dB-Beugungsverluste und 1,7 dB-Filterdämpfung eine Differenz von 0,7 dB. Die Messergebnisse der Membranauslenkung und des Schalldruckpegels stimmen demnach sehr gut mit dem berechneten Schalldruckpegel überein. Da die Hochpassfilterung auch in der Praxis notwendig ist, beträgt der maximale Schalldruckpegel des einzelnen Miniaturwandlers für die Halbraumabstrahlung ca. 58,3 dB bei einem Gesamtklirrfaktor von 10 %.

Um die gewünschten 89 dB Schalldruckpegel in 1 m Abstand bei 100 Hz zu erzielen, musste durch den Zusammenschluss mehrerer Wandler zu einem Array ein Pegelgewinn von 30,7 dB erreicht werden (Abb. 7.39). Um die Fläche des Tiefton-Arrays zu minimieren, wurden die Wandler zueinander versetzt angeordnet, wie es Doubt in [76] vorschlägt.

Wie in Abschnitt 3.4 (S. 26) aufgeführt ist, führt jede Verdopplung der abstrahlenden Fläche ortsunabhängig zu einem Schalldruckpegelgewinn von 6 dB, wenn die Abstände zwischen den Einzellautsprechern kleiner einem Achtel der Wellenlänge

ein leichte Klirrerhöhung. Dies war nicht zu erwarten, da der Filter keinerlei Verstärkung ausgeübt hat. Demzufolge erscheinen die Veränderung der Abstrahlungsumgebung (Lautsprechergehäuse mit und ohne DIN-Normschallwand) bzw. die Abnutzungserscheinungen des Wandlers infolge der vielen Messreihen naheliegendere Ursachen zu sein.)

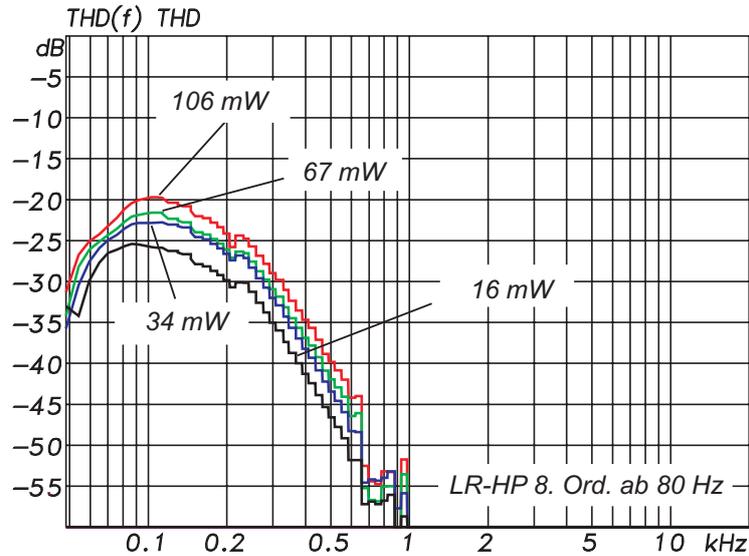


Abb. 7.37: Gesamtklirrfaktor des Miniaturwandlers in einem 168 ml großen Gehäuse bei unterschiedlichen elektrischen Eingangsleistungen mit Linkwitz-Riley-Hochpass 8. Ordnung ab 80 Hz

sind. Für 30,7 dB Pegelgewinn sind somit $10^{(30,7/20)} = 35$ Wandler für den Tieftonbereich erforderlich. Damit die Wandler möglichst dicht beieinander liegen, ist eine Anordnung in Form einer Kreisfläche bzw. eines Quadrates am besten geeignet. Das Bessel-Array für die Hochtonwiedergabe sollte sich dabei in der Mitte des Tiefton-Arrays befinden, um ein „Wandern“ der Hauptabstrahlkeule mit der Frequenz im Übernahmehereich zu verhindern [67]. Diese Anordnung wird nach ihrem Erfinder D’Appolito „D’Appolito-Anordnung“ genannt (Abb. 7.40). Der Abstand

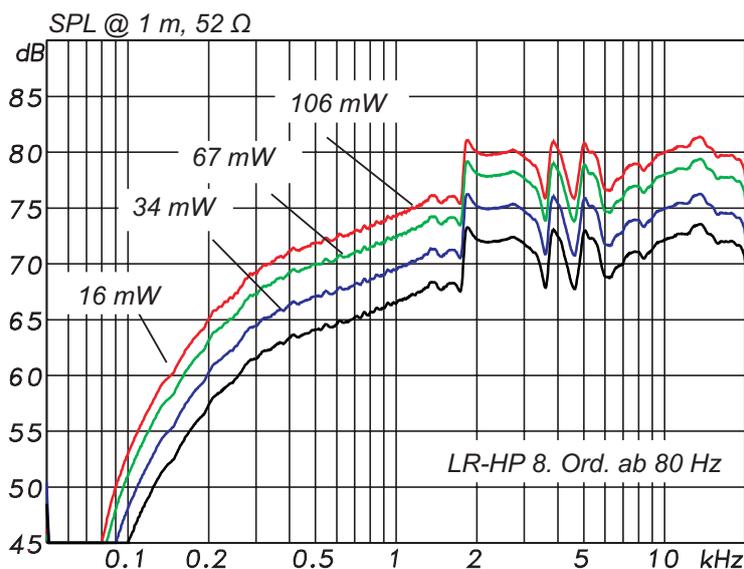


Abb. 7.38: Amplitudenfrequenzgang des Miniaturschallwandlers in einem 168 ml Gehäuse bei verschiedenen Eingangsleistungen bei Vollraumabstrahlung und Hochpassfilterung

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

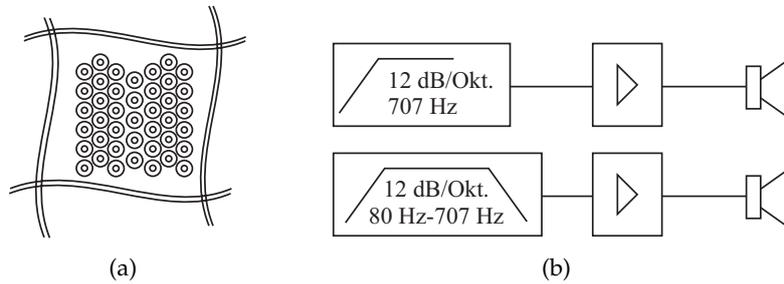


Abb. 7.39: Schematische Darstellung eines Array-Lautsprechers mit zwei 3×6 Arrays für die Tieftonwiedergabe und einem 5er-Bessel-Array für die Hochtonwiedergabe in D'Appolito-Anordnung

zwischen den Zentren des Hochton- und Tiefton-Arrays darf hierbei nicht größer als zwei Drittel der Wellenlänge λ_{f_x} der Trennfrequenz f_x der Arrays sein [67]. Bei einem Wandlerdurchmesser von ca. 4,2 cm beträgt die Array-Diagonale einer Array-Konfiguration entsprechend Abb. 7.40 wenigstens 39 cm. Dieser Abstand entspricht bei 111 Hz einem Achtel der Wellenlänge. Bis zur Übernahme der Schallwiedergabe durch das Bessel-Array bei 700 Hz ist mit einer deutliche Schallbündelung zu rechnen. Ausgehend von der Abschätzung $ka = 1$ wird die ungerichtete Abstrahlung bei ca. 300 Hz in eine gerichtete übergehen. Da aus Abb. 7.35 hervorgeht, dass der Gesamtklirrfaktor des Bessel-Arrays unterhalb von ca. 700 Hz inakzeptabel groß wird, konnte eine Übernahmefrequenz von 300 Hz statt 700 Hz nicht umgesetzt werden²⁵. Statt einer tieferen Übernahmefrequenz zum Hochtonzweig kann auch ein zusätzlicher Mitteltonzweig zum Einsatz kommen. Anhand von Messungen am Demonstrator wurde aber entschieden, dass ein dritter Wiedergabeweg für den Frequenzbereich 300 Hz bis 700 Hz nicht erforderlich ist (Abschnitt 7.4, S. 145ff.).

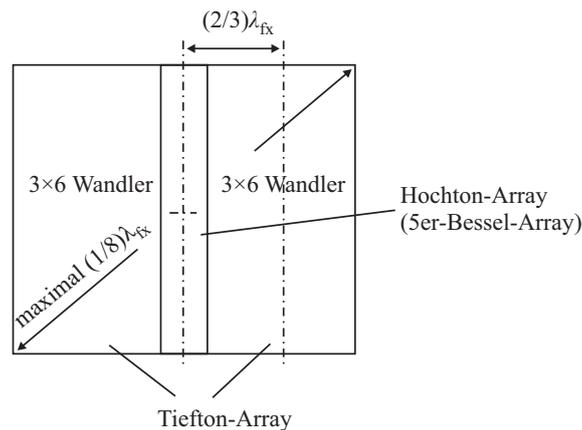


Abb. 7.40: Skizzierung der angestrebten Array-Dimensionen für eine optimale Abstrahlcharakteristik

²⁵ Die Forderung einer Übernahmefrequenz unterhalb von 1 kHz macht den Einsatz eines gewöhnlichen Hochtöners statt des Bessel-Arrays unmöglich.

7.3 Konstruktion des Array-Demonstrators

Entsprechend den Vorbetrachtungen wurde ein Demonstrator angefertigt (Abb. 7.41, Abb. 7.42)²⁶. Als Gehäusematerial wurde MDF („Medium Density Fiberboard“) verwendet. Die fünf Miniaturwandler des Hochton-Arrays wurden in je ein Gehäuse von 32 ml eingebaut. Gerade die stark unterschiedliche Ansteuerung der Wandler macht es notwendig, jegliche Beeinflussung durch andere Wandler zu verhindern. Jeder Wandler wurde in die Gehäusefront bündig eingelassen, um Kantenreflexionen zu minimieren. Für die 36 Miniaturwandler des Tiefton-Arrays wurde ein gemeinsames Volumen von 6l verwendet, was dem 36-fachen des Volumens pro Wandler bei einer Gehäusegüte von $Q_{tc} = 0,707$ entspricht (Abschnitt 7.1.2, S. 117ff.). Aufgrund der lichten Gehäusetiefe von 18 mm betrug die lichte Gehäusebreite 500 mm und die lichte Länge 700 mm. Dieses Seitenverhältnis wurde gewählt, um eine gute Verteilung von Stehwellen zu erzielen [72, S. 166]. Die Wandler des Tiefton-Arrays wurden zueinander versetzt angeordnet, um die abstrahlende Array-Fläche zu verkleinern und den Übergangsbereich zwischen ungerichteter und gerichteter Schallabstrahlung zu höheren Frequenzen zu verschieben. Das Hoch- und das Tiefton-Array wurden unsymmetrisch²⁷ auf der Schallwand positioniert, um Kammfilterartefakte infolge von Kantenreflexionen zu minimieren (Abschnitt 6.14, S. 105). Damit diese sehr flache Konstruktion gegen Schwingungen der Gehäusewände geschützt ist und gleichzeitig Veränderungen im Gehäuseinneren möglich sind, wurden schraubbare Verstrebungen – Abstandshalter – zwischen der Gehäusefront und der Gehäuserückwand eingesetzt.

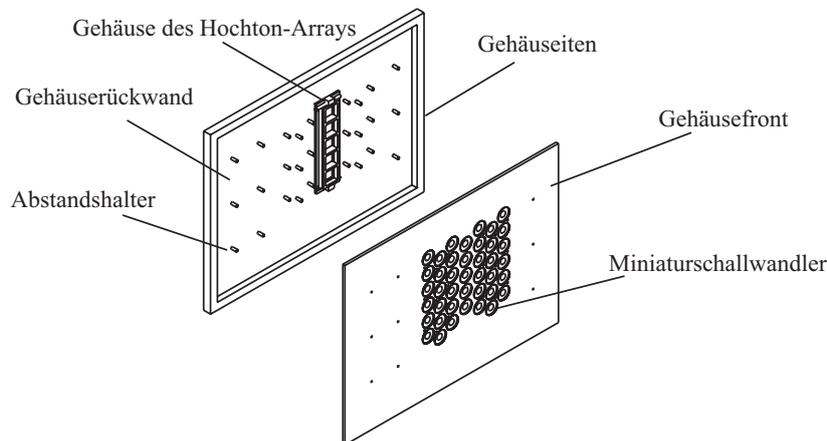


Abb. 7.41: Schematische Darstellung des Demonstrators

²⁶ Detaillierte Konstruktionszeichnungen des untersuchten Demonstrators sind in Abb. A.20 (S. 234) und Abb. A.21 (S. 235) zu finden.

²⁷ Besonders für das Hochton-Array ergibt sich die Problematik, dass – trotz unsymmetrischer Positionierung des gesamten Arrays – alle Wandler gleich weit von der linken bzw. rechten Gehäusekante entfernt sind. Abhilfe würde ein Gehäuse mit nicht rechteckiger Front schaffen. Fertigungstechnisch ist dies allerdings mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden.

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

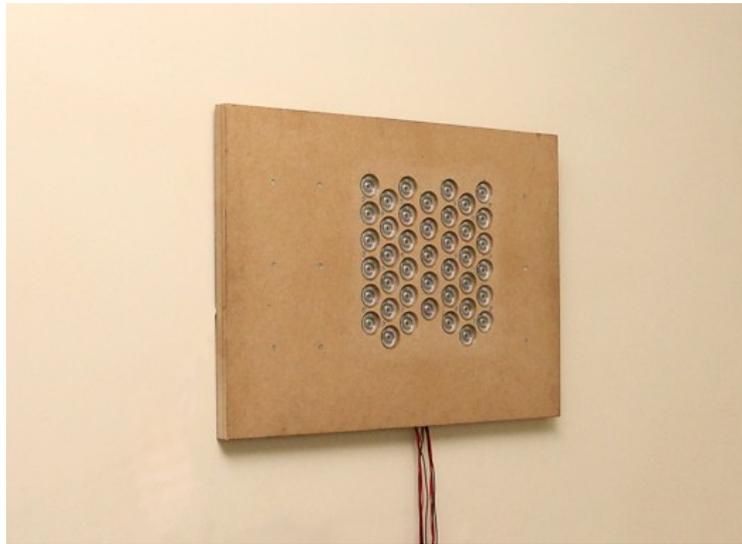


Abb. 7.42: Frontansicht des Demonstrators

Die Wandler wurden mit dauerelastischem Kleb- und Dichtstoff²⁸ in die 8 mm starke Gehäusefront eingelassen. Um die Gehäuse des Tiefton- und Hochton-Arrays trotz abnehmbarer Rückwände luftdicht abzuschließen, wurde selbstklebendes Abdichtungband²⁹ verwendet.

Die elektrische Verschaltung der Wandler des Hochton-Arrays erfolgte entsprechend Abb. 7.33a (S. 138). Bei $52\ \Omega$ pro Wandler ergibt sich rechnerisch eine Impedanz von ca. $15\ \Omega$. Beim Tiefton-Array wurden je 12 Wandler parallel geschaltet, damit die Wandler sich möglichst wenig durch ihr elektrisches Verhalten beeinflussen (Abb. 7.44). Die dabei entstandenen drei Gruppen wurden seriell miteinander verbunden, um eine Impedanz ähnlich der des Hochton-Arrays zu erreichen. Bei einer Verschaltung gemäß Abb. 7.44 beträgt die Impedanz rechnerisch $13\ \Omega$.

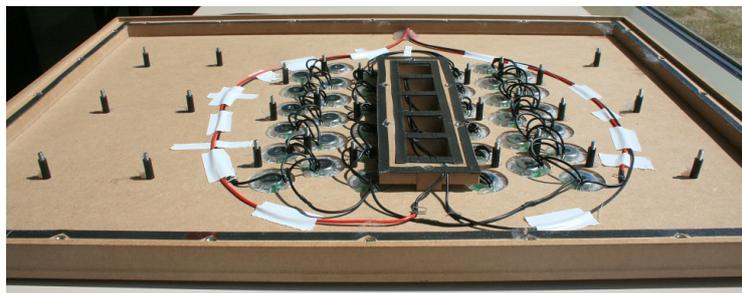


Abb. 7.43: Rückansicht des geöffneten Demonstrators

²⁸ Flex+bond vom Hersteller WEICON GmbH & Co. KG

²⁹ Würth GmbH & Co. KG

7.4 Untersuchung des Array-Demonstrators

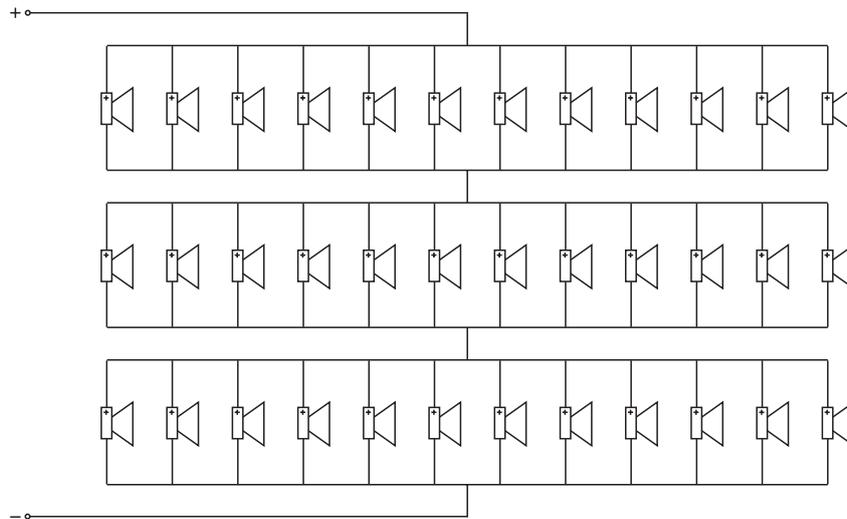


Abb. 7.44: Verschaltung des Tiefton-Arrays aus 36 Miniaturschallwandlern

7.4 Untersuchung des Array-Demonstrators

Die Untersuchung des gefertigten Demonstrators wurde anhand akustischer und elektrischer Messungen durchgeführt. Zunächst wurde der Amplitudenfrequenzgang jedes Arrays im reflexionsarmen Raum gemessen. Der Lautsprecher wurde, wie in Abb. 7.45 zu sehen ist, an einer Drehvorrichtung befestigt³⁰. Das jeweils nicht

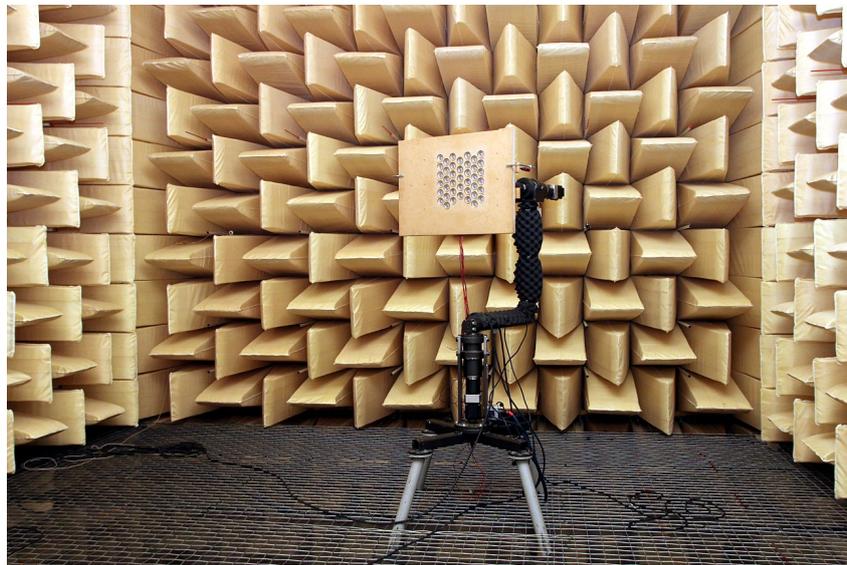


Abb. 7.45: Lautsprecherdrehvorrichtung mit installiertem Flachlautsprecher im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer IDMT

³⁰ Die verwendete Lautsprecherdrehvorrichtung stammt von der Firma Fouraudio (www.fouraudio.de).

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

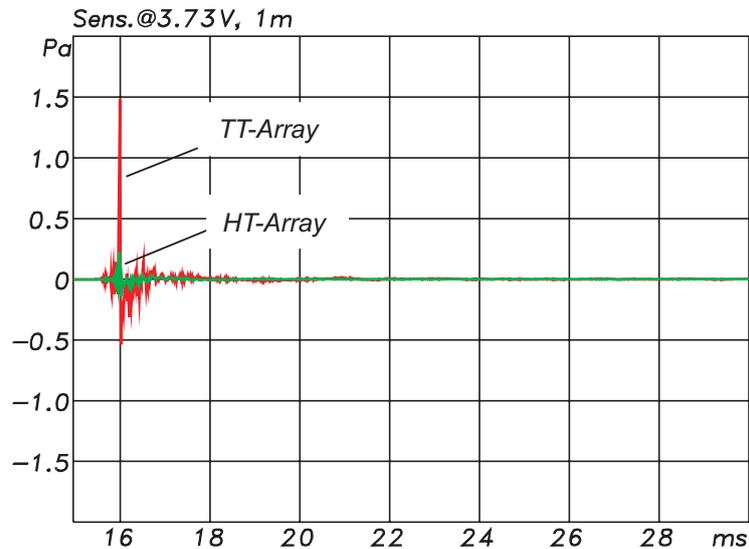


Abb. 7.46: Impulsantwort des Tiefton- und Hochton-Arrays bei Hochpassfilterung 8. Ordnung bei 80 Hz und 1 W

aktive Array wurde bei jeder Messung an den Lautsprecherklemmen kurzgeschlossen, um ein Mitschwingen durch Resonanz zu verhindern. Im Vergleich zum Betrieb direkt an der Wand ist zu beachten, dass Pegelverluste durch die Schallbeugung um das Gehäuse im Tieftonbereich auftreten (Abschnitt 3.6.2, S. 33). Infolgedessen ist gegenüber den Messungen im reflexionsarmen Vollraum beim Wandbetrieb ein bis zu 6 dB größerer Schalldruckpegel im Bereich der ungerichteten Schallabstrahlung zu erwarten.

In Abb. 7.46 und Abb. 7.47 sind die Impuls- und die Sprungantwort beider Arrays dargestellt. Anhand der erreichten Schalldruckamplituden wird deutlich, dass das Tiefton-Array lauter als das Hochton-Array ist. Die steile Flanke am Anfang des Impulses weist auf das gute Impulsverhalten des eingesetzten Wändlers hin, was auf die Kombination einer geringen Membranmasse mit einem kräftigen Antrieb zurückgeht. Wird statt eines großen Wändlers ein Array aus kleinen Wändlern verwendet, so besitzt das Array bei gleicher Abstrahlfläche in der Regel ein besseres Impulsverhalten. Der lang andauernde Auschwingvorgang und die Rippel der Sprungantwort des Tiefton-Arrays weisen auf Resonanzen der Membranen und des Gehäuses hin. Aus dem Amplitudenfrequenzgang beider Arrays geht hervor, dass der zu korrigierende Pegelunterschied etwa 12 dB beträgt (Abb. 7.48) Durch die Pegelkorrektur verschiebt sich allerdings auch die untere -6dB-Grenzfrequenz des Tiefton-Arrays. Statt der gemessenen 80 dB im Vollraum und berechneten 85 dB im Halbraum bei 1 m Abstand und 100 Hz verringerte sich der Schalldruckpegel auf 68 dB. Infolge des kleineren Gehäuses und der geringeren Wandleranzahl besitzt das Hochton-Array eine höheren untere Grenzfrequenz³¹. Auffallend sind die Ein-

³¹ Da jedem Wandler des Hochton-Arrays ein nur sehr kleines Gehäusevolumen zur Verfügung steht, verschiebt sich die Grundresonanzfrequenz und damit auch die untere Grenzfrequenz entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 5.3.1, S. 63ff. Im Vergleich zum Tiefton-Array ist die schallabstrahlen-

7.4 Untersuchung des Array-Demonstrators

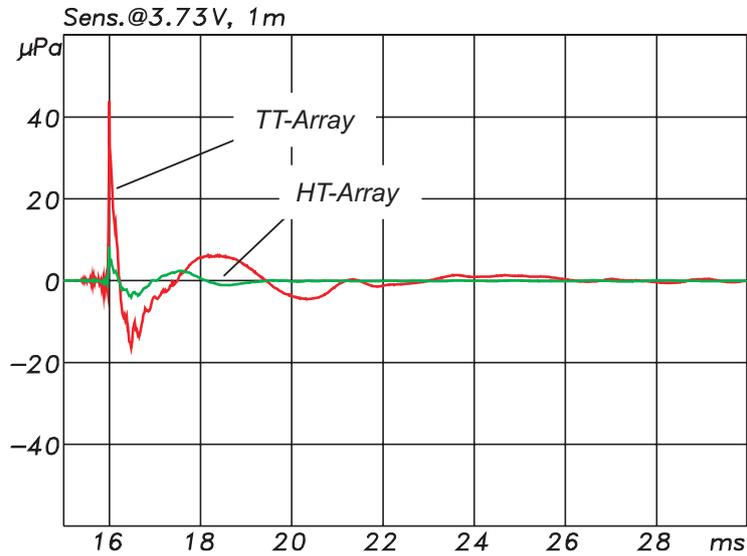


Abb. 7.47: Sprungantwort des Tiefton- und Hochton-Arrays bei Hochpassfilterung 8. Ordnung bei 80 Hz und 1 W

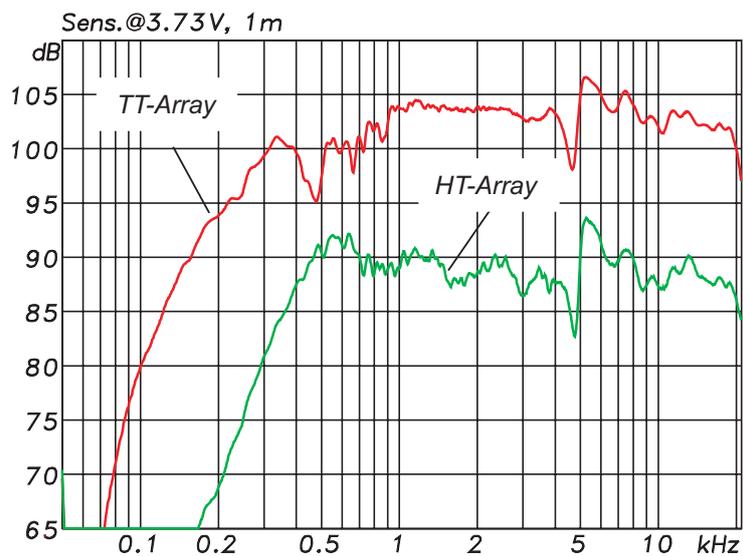


Abb. 7.48: Amplitudenfrequenzgang des Tiefton- und Hochton-Arrays bei Hochpassfilterung 8. Ordnung bei 80 Hz und 1 W

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

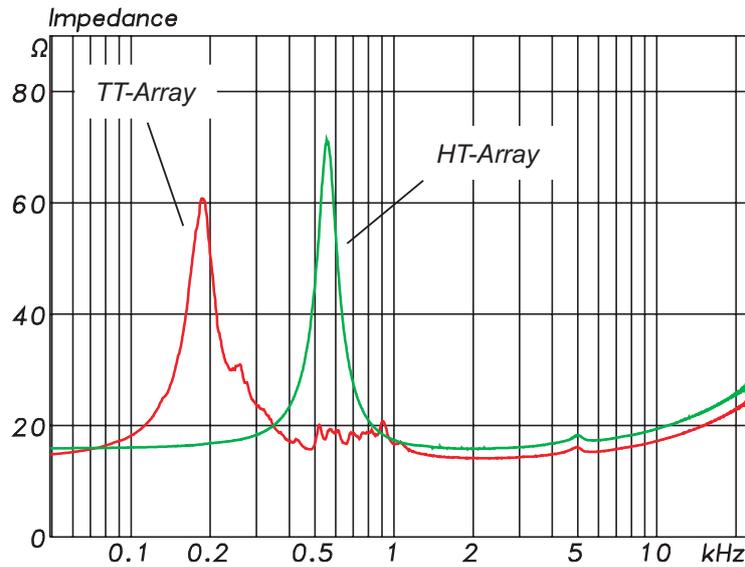


Abb. 7.49: Impedanzverlauf des Hochton- und Tiefton-Arrays bei leerem Lautsprechergehäuse, Impedanzspitzen bei ca. 250 Hz, zwischen 400 Hz und 1 kHz und bei 5 kHz deuten auf Resonanzen hin

brüche und Überhöhungen im Amplitudenfrequenzgang beider Arrays. Sowohl die Sprungantworten als auch die Impedanzkurven weisen darauf hin, dass es sich hier um Resonanzen handeln muss (Abb. 7.49). Diese können in Form von Stehwellen im Gehäuse, in den Gehäusewänden und in den Membranen auftreten. Bereits die Ergebnisse der Laservibrometrie des Einzelwandlers zeigen, dass Membranresonanzen vorhanden sind (Abb. 7.7, S. 116). Der Phasengang beider Arrays im Bereich von 500 Hz bis 700 Hz ist in Abb. 7.50 zu sehen. Dieser Frequenzbereich wurde ausgewählt, da für die optimale Überlagerung der Schallbeiträge beider Arrays im Übernahmebereich die Phasendifferenz zu berücksichtigen ist. Da die Messergebnisse ohne Laufzeitkorrektur dargestellt sind, dreht sich die Phase sehr schnell. Auf die Phasendifferenz zwischen den Arrays hat dies keinen Einfluss. Erwartungsgemäß ist diese sehr gering und beträgt bei 707 Hz annähernd 0° .

Zur Festlegung der Übernahmefrequenz wurde das Abstrahlverhalten beider Arrays in der horizontalen Ebene gemessen. Der Demonstrator wurde für diese Messung automatisch durch eine im reflexionsarmen Raum installierte Lautsprecherdrehvorrichtung in 5° -Schritten gedreht (Abb. 7.45). Zum Schutz der Wandler des Tiefton- und des Hochton-Arrays wurde ein Hochpassfilter 8. Ordnung bei 80 Hz eingesetzt. Die Isobarendarstellung des Tiefton-Arrays zeigt, dass oberhalb von etwa 160 Hz eine zunehmend gerichtete Schallabstrahlung stattfindet (Abb. 7.51). Damit liegt der Übergang zwischen gerichteter und ungerichteter Schallabstrahlung um ca. 150 Hz tiefer als erwartet (Abschnitt 7.2.3, S. 139ff.). Die Ursache können Schwingungen der Gehäusewände sein, da bei derart flachen Gehäusen eine ausrei-

de Fläche wesentlich kleiner. Bei gleicher Auslenkungsamplitude besitzt das Hochton-Array dadurch einen kleineren Strahlungswiderstand für die tiefen Frequenzen und damit eine höhere untere Grenzfrequenz (Abschnitt 3.4, S. 26ff.).

7.4 Untersuchung des Array-Demonstrators

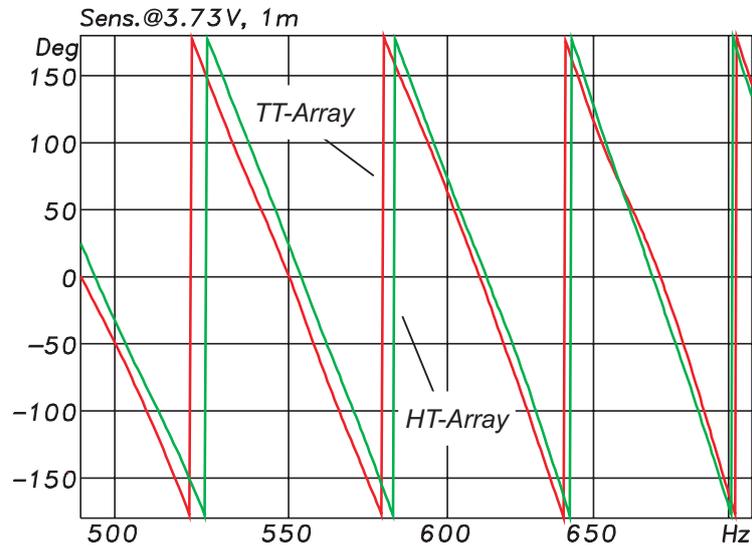


Abb. 7.50: Phasengang des Tiefton (TT) und Hochton-Arrays (HT) ohne Laufzeitkorrektur

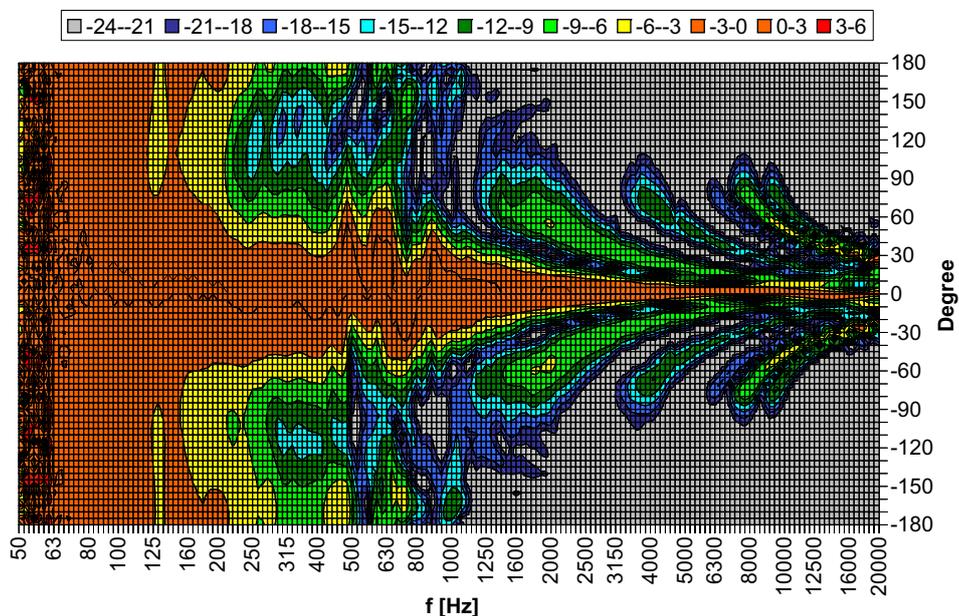


Abb. 7.51: Isobarendarstellung des horizontalen Abstrahlverhaltens des Tiefton-Arrays ohne Füllmaterial im Gehäuse, Farbskala kennzeichnet den Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0°-Achse

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

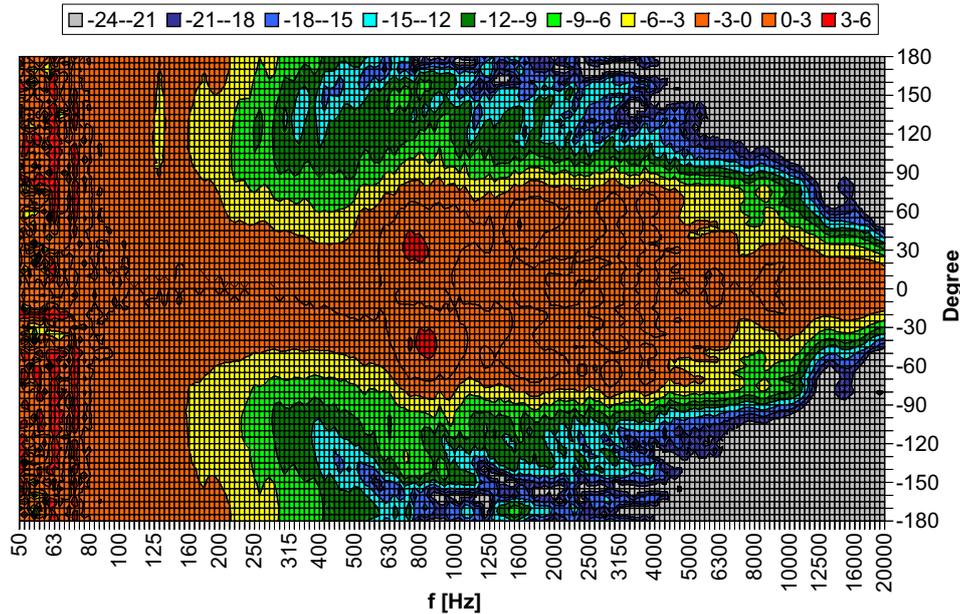


Abb. 7.52: Isobarendarstellung des horizontalen Abstrahlverhaltens des Hochton-Arrays ohne Füllmaterial im Gehäuse, Farbskala kennzeichnet den Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0°-Achse

chende Versteifung der Gehäusewände schwierig ist³². Zwischen 500 Hz und 1 kHz treten in der Hauptabstrahlkeule zusätzliche Störungen auf. Diese sind zu einem Großteil auf Stehwellen im Gehäuse zurückzuführen (Abschnitt 7.5.1, S. 156ff.). Mit steigender Frequenz bilden sich bei etwa 1,5 kHz die ersten Nebenskeulen auf ca. $\pm 70^\circ$ aus. Da die Pegeldifferenz zwischen den Nebenskeulen und der Hauptkeule auf 0° im Mittel nur 6 dB beträgt, sind erstere durch eine Übernahmefrequenz unter 1,5 kHz und eine steile Filterflanke zu verhindern.

Das horizontale Abstrahlverhalten des Hochton-Arrays ist oberhalb von 160 Hz ebenso durch eine ausgeprägte Richtwirkung gekennzeichnet (Abb. 7.52). Erwartungsgemäß sollte sich das Abstrahlverhalten in der horizontalen Ebene von dem des einzelnen Wandlers kaum³³ unterscheiden (Abb. 7.11, S. 121). Von ca. 500 Hz bis ca. 5 kHz ist die horizontale Abstrahlung wesentlich gleichförmiger als die des Einzelwandlers. Infolge der Bessel-Ansteuerung sind keine ausgeprägten Seitenkeulen vorhanden. Die Auswirkungen der bereits erwähnten Problematik, dass zwar das Hochton-Array unsymmetrisch auf der Gehäusefront platziert ist, dass aber jeder Wandler dieses Arrays den gleichen Abstand zur linken bzw. rechten Gehäusekante besitzt und damit Kammfilter verursacht werden, lässt sich schwach ausgebildete Muster im Isobarendiagramm an den Frequenzstellen 800 Hz, 1,6 kHz, 3,1 kHz und 4 kHz vermuten.

³² Aufgrund von Gehäuseerschwingungen wurden die Gehäuseversteifungen bei den für die Internationale Funkausstellung 2009 gefertigten Flachlautsprechern verdoppelt (Abb. A.22, Abb. A.23, S. 234ff.).

³³ Da der einzelne Wandler in ein Gehäuse mit kleiner Front eingebaut war, können veränderte Kantenreflexionen einen Unterschied bewirken. Dieser ist aber in erster Linie in Form eines verschobenen Kammfilters zu erwarten.

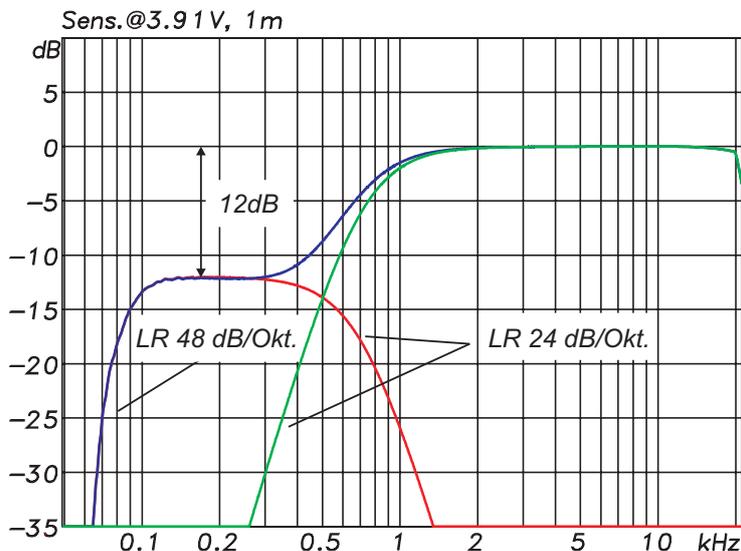


Abb. 7.53: Frequenzweicheneinstellung am verwendeten Controller mit Pegelkorrektur und extra Schutzfilter 8. Ordnung bei 80 Hz im Tieftonzweig

Anhand der Isobarendarstellung konnte der endgültige Übernahmereich zwischen Tiefton- und Hochton-Array bestimmt werden³⁴. Nach [72, S.166] ist für die Frequenzweiche die Frequenz als Trennfrequenz zu wählen, bei welcher der Schalldruckpegel des Tiefton-Arrays unter $\pm 45^\circ$ um -6 dB gegenüber dem Schalldruckpegel auf der 0° -Achse gesunken ist. Wie aus Abb. 7.63 (S. 157) hervorgeht, sinkt der Schalldruckpegel bei etwa 500 Hz und unter einem Abstrahlwinkel von -45° um -6 dB. Da das Einbringen von Dämmmaterial ins Gehäuse diese Einschnürung der Hauptabstrahlkeule verringerte, wurde die Trennfrequenz auf 707 Hz gelegt. Aufgrund der sehr starken Seitenkeulenausbildung wurde eine Filterflanke von 24 dB/Okt. gewählt (Abb. 7.53). Für ein möglichst symmetrisches Verhalten wurde auch für das Hochton-Array eine Flanke von 24 dB/Okt. verwendet. Die Addition der Amplitudenfrequenzgänge des Hochton- und des Tiefton-Arrays ist in Abb. 7.54 dargestellt. Durch den Einsatz von Linkwitz-Riley-Filtern 4. Ordnung wurde die geringen Phasendifferenz zwischen den Arrays nicht vergrößert; demzufolge überlagern sich die Schallbeiträge beider Arrays im Übernahmereich konstruktiv³⁵.

Da der Flachlautsprecher beim Betrieb an einer Wand nur in einen Halbraum Schall abstrahlt, verändert sich auch sein Abstrahlverhalten. Zur Überprüfung dieser Veränderung wurde der Flachlautsprecher auf einen schallharten Boden gelegt und der Amplitudenfrequenzgang gemessen (Abb. 7.55). Die Impulsantwort wurde zur Entfernung der etwa 15 ms nach dem Direktschallimpuls eintreffenden Reflexionen gefensterter. Der dazugehörige Amplitudenfrequenzgang ist in Abb. 7.56 dar-

³⁴ Bereits die Klirrfaktormessungen des Hochton-Arrays zeigen, dass die Trennfrequenz nicht unter 700 Hz liegen sollte (Abb. 7.35, S. 139).

³⁵ Ein Linkwitz-Riley-Filter 4. Ordnung bedingt eine Phasenverschiebung von 360° . Da bei beiden Arrays ein Linkwitz-Riley-Filter 4. Ordnung zum Einsatz kommt, wird die Phasenlage zwischen den Arrays nicht verändert.

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

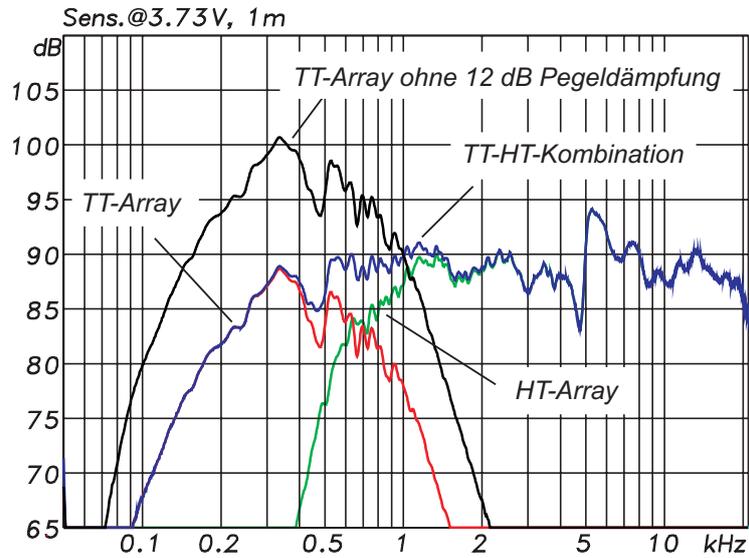


Abb. 7.54: Kombiniertes Amplitudenfrequenzgang des Hochton- und Tiefton-Arrays mit 12 dB Pegelminderung für das Tiefton-Array und ohne Phasenkompensation

gestellt. Entsprechend den theoretischen Betrachtungen in Abschnitt 3.6.2 (S. 33ff.) nimmt der Schalldruckpegel für Frequenzen, die ungerichtet abgestrahlt werden, bei Halbraumabstrahlung zu. Ausgehend vom Isobarendiagramm des Tiefton-Arrays (Abb. 7.51, S. 149) erfolgt unterhalb von etwa 160 Hz eine ungerichtete Schallabstrahlung. Demzufolge ist in diesem Frequenzbereich mit einer Pegelerhöhung bei einer Halbraumabstrahlung zu rechnen. Wider Erwarten vergrößert sich der Schalldruckpegel bei 100 Hz nur um ca. 2 dB statt der theoretischen 6 dB³⁶.



Abb. 7.55: Messaufbau zur Bestimmung des Amplitudenfrequenzganges bei Halbraumabstrahlung im Foyer des Fraunhofer IDMT

³⁶ Bei nahezu phasenkohärenter Schallüberlagerung beträgt der maximal erzielbare Pegelgewinn 6 dB.

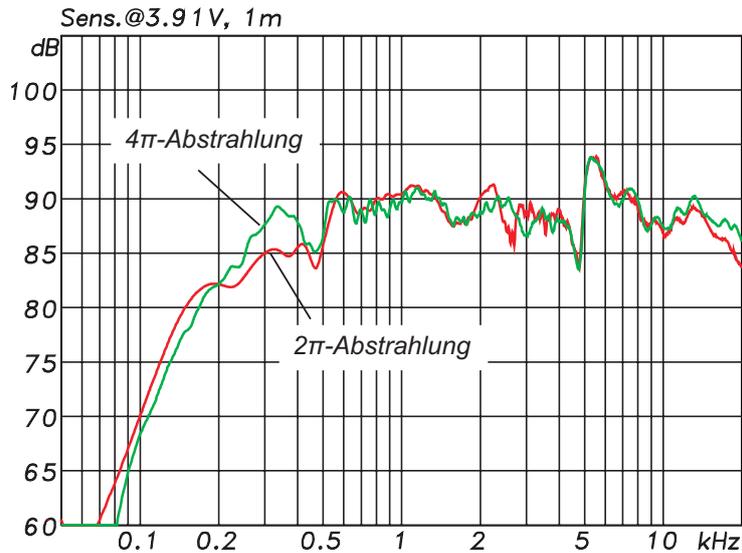


Abb. 7.56: Vergleich zwischen dem Amplitudenfrequenzgang des Array-Flachlautsprechers im reflexionsarmen Raum (4π -Abstrahlung) und beim Betrieb auf dem Fußboden (2π -Abstrahlung)

Zwischen 200 Hz und 400 Hz sank der Schalldruckpegel sogar um etwa 4 dB, was bestätigt, dass in diesem Bereich auch Schwingungen der Gehäusewände auftreten³⁷.

Die Isobarendiagramme in Abb. 7.57 und Abb. 7.58 zeigen das horizontale bzw. vertikale Abstrahlverhalten des gesamten Array-Flachlautsprechers im reflexionsarmen Raum. Erwartungsgemäß setzt es sich aus der Abstrahlcharakteristik beider Arrays im jeweiligen Frequenzbereich zusammen. Demnach konnte das Auftreten von Seitenkeulen für den gesamten Wiedergabefrequenzbereich unterdrückt werden, was insbesondere den Einsatz des Bessel-Arrays zur Hochtonwiedergabe bestätigt. Oberhalb von ca. 160 Hz kommt es zur gerichteten Schallabstrahlung in der horizontalen und vertikalen Ebene. Im Wiedergabebereich des Tiefton-Arrays unterscheidet sich das Abstrahlverhalten beider Ebenen kaum, da das Array nahezu quadratische Abmessungen hat. Entgegen einem optimalen Abstrahlverhalten weist die Abstrahlcharakteristik des Flachlautsprecher in beiden Ebenen eine Aufweitung im Übernahmefrequenzbereich und eine sprunghaften Verengung oberhalb von 5 kHz auf. Dies führt bei Abhörwinkeln größer ca. 30° zu Pegelabfällen größer 6 dB im Übernahmefrequenzbereich und zu einer bedämpften Hochtonwiedergabe. Beide Phänomene treten auch bei konventionellen Lautsprechern auf. Wenn die Lage des Übernahmefrequenzbereiches nicht weiter optimierbar ist, gibt es zur Verhinderung beider Probleme die Möglichkeit, statt eines Zwei-Wege-Systems ein Drei- bzw. Vier-Wege-System zu verwenden. Da mit jedem zusätzlichen Wiedergabewege

³⁷ Aus Abb. 7.51 (S. 149) geht hervor, dass im Bereich zwischen ca. 160 Hz und 400 Hz eine leichte Dipolcharakteristik vorhanden ist. Es liegt nahe, dass diese durch Gehäuseschwingungen verursacht wird. Bei der Halbraumabstrahlung kommt es zur Überlagerung der Dipolanteile, was die erwähnten Pegelabfälle zur Folge hat.

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

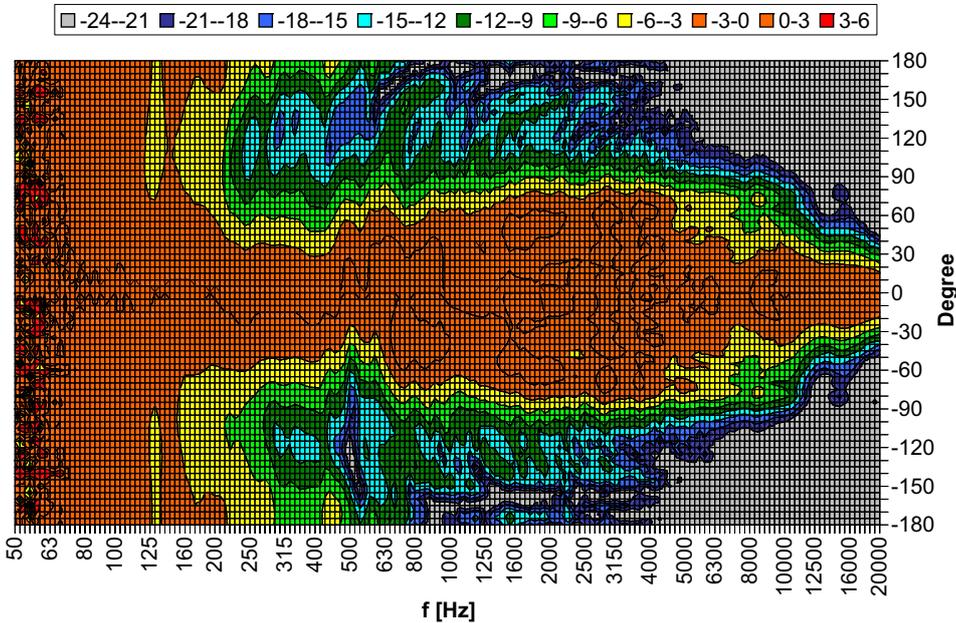


Abb. 7.57: Horizontale Schallabstrahlung des Array-Flachlautsprechers mit leerem Gehäuse im reflexionsarmen Raum, Farbskala kennzeichnet von rechts nach links den Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0° -Achse

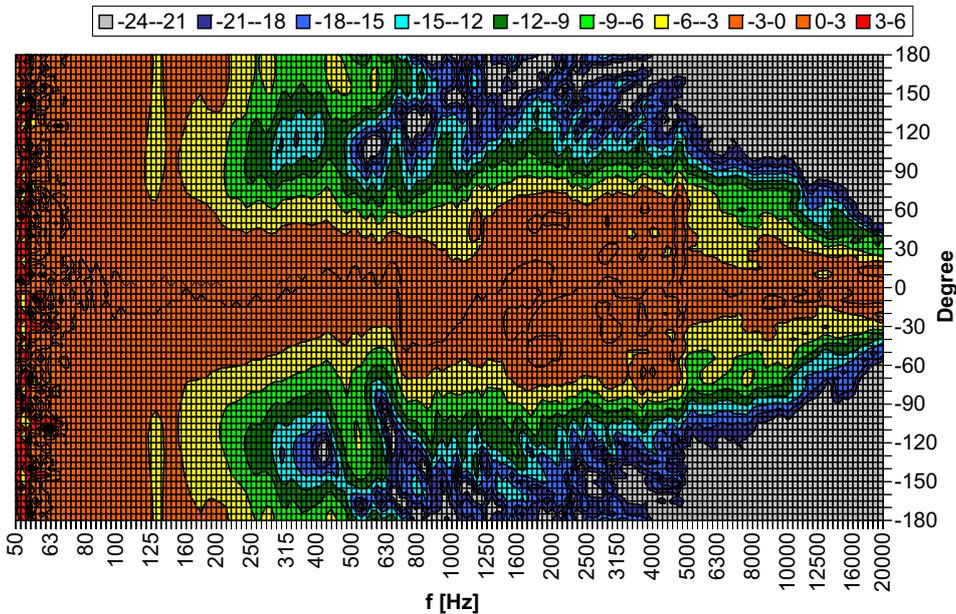


Abb. 7.58: Vertikale Schallabstrahlung des Array-Flachlautsprechers mit leerem Gehäuse im reflexionsarmen Raum, Farbskala kennzeichnet den Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0° -Achse

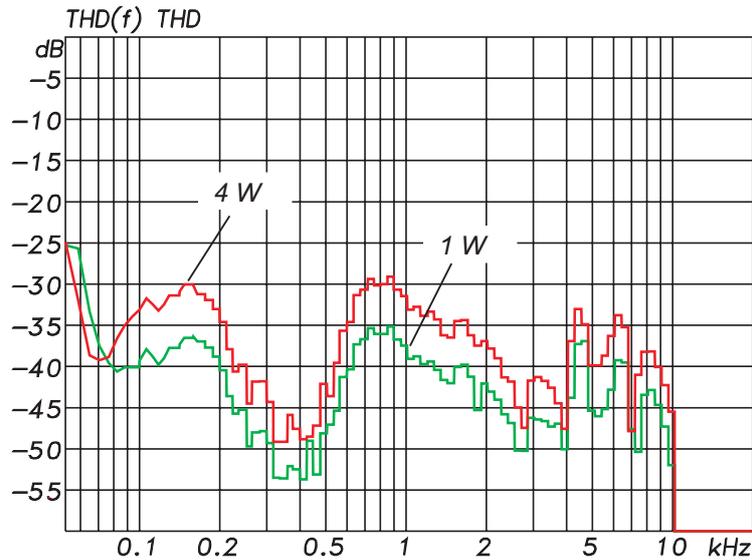


Abb. 7.59: Gesamtklirrfaktor des aus einem Hoch- und einem Tiefton-Array bestehenden Flachlautsprechers bei 1 W und 4 W Eingangsleistung

aber auch der Aufwand besonders bei der Verwendung aktiver Frequenzweichen steigt, wurde das Zwei-Wege-Konzept beibehalten. Eine Verschiebung des Einsatzes der Pegeleinbrüche im Übernahmefrequenzbereich zu Abhörwinkeln größer 40° konnte dennoch durch die Verwendung von Dämmmaterial im Gehäuse erzielt werden (Abb. 7.76, S. 167).

Um den maximal möglichen Schalldruckpegel bei 3% Gesamtverzerrungen zu ermitteln, wurden nacheinander Klirrfaktor- und Schalldruckpegelmessungen bei verschiedenen Verstärkerleistungen im reflexionsarmen Raum durchgeführt. Bei etwa 160 Hz und 800 Hz erreichte der Klirrfaktor bei 4 W 3% und etwa 95 dB in 1 m Abstand (Abb. 7.59, Abb. 7.60).

Um die untere -6 dB-Grenzfrequenz auf 100 Hz zu verschieben, die Schwankungen im Amplitudenfrequenzgang zu minimieren und die Gehäusegröße in der Tiefe zu verringern wurden Füllmaterialien im Gehäuse und elektronische Filter zur Frequenzgangzerrung eingesetzt. Die dazugehörigen Untersuchungen sind im Abschnitt 7.5 (S. 155ff.) beschrieben.

7.5 Optimierung des Array-Demonstrators

Ausgehend von dem im vorhergehenden Abschnitt 7.4 (S. 145ff.) beschriebenen Demonstrator werden nun Maßnahmen zur Linearisierung des Amplitudenfrequenzganges sowie zur Verkleinerung des erforderlichen Gehäusevolumens bei gleichbleibenden akustischen Eigenschaften aufgezeigt.

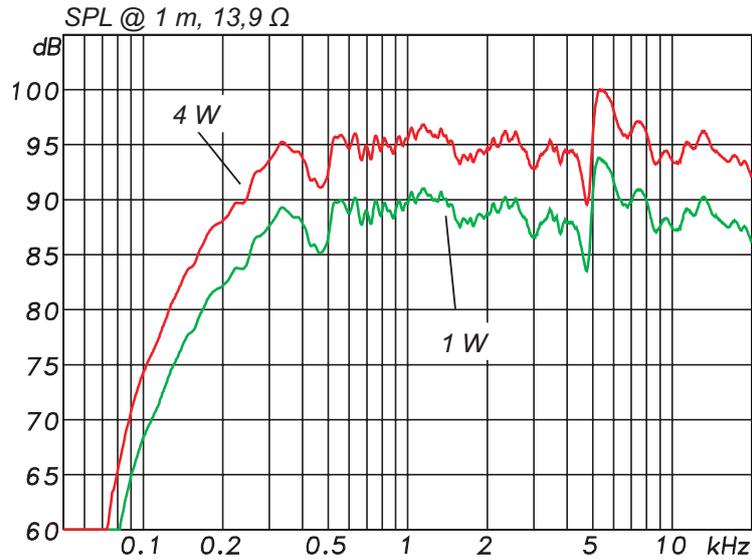


Abb. 7.60: Schalldruckpegelverlauf des aus einem Hoch- und einem Tiefton-Array bestehenden Flachlautsprechers bei 1 W und 4 W Eingangsleistung

7.5.1 Linearisierung des Frequenzganges

Bereits die Untersuchungen zum Einzelwandler zeigten die wirksame Unterdrückung von Stehwellen mittels Dämmmaterial im Gehäuse (Abb. 7.20, S. 128). Aus diesem Grund wurden auch im Gehäuse des Tiefton-Arrays 80 g des Dämmmaterials Sonofil verwendet. Dieses wurde gleichmäßig im Gehäuse verteilt, wobei der Platz direkt hinter den Wandlern frei blieb (Abb. 7.61). Der gemessene Amplitudenfrequenzgang zeigt eine deutliche Glättung im Bereich zwischen 300 Hz und 500 Hz (Abb. 7.62). Der geringe Pegelverlust zwischen 150 Hz und 400 Hz kann mit der elektronischen Entzerrungen korrigiert werden. Die Unterdrückung der Stehwelle zwischen 400 und 500 Hz verringerte auch die Einschnürung der Hauptabstrahlkeule bei 500 Hz (Abb. 7.63). Um den Amplitudenfrequenzgang über den Einsatz von

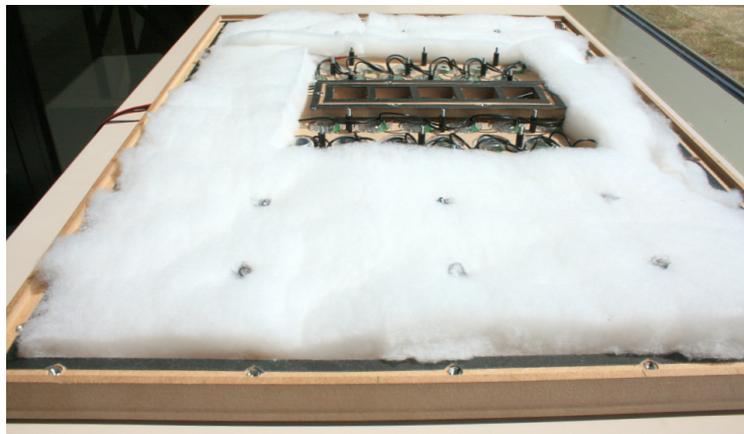


Abb. 7.61: Innenansicht des Gesamtlautsprechers mit 80 g Sonofil-Befüllung

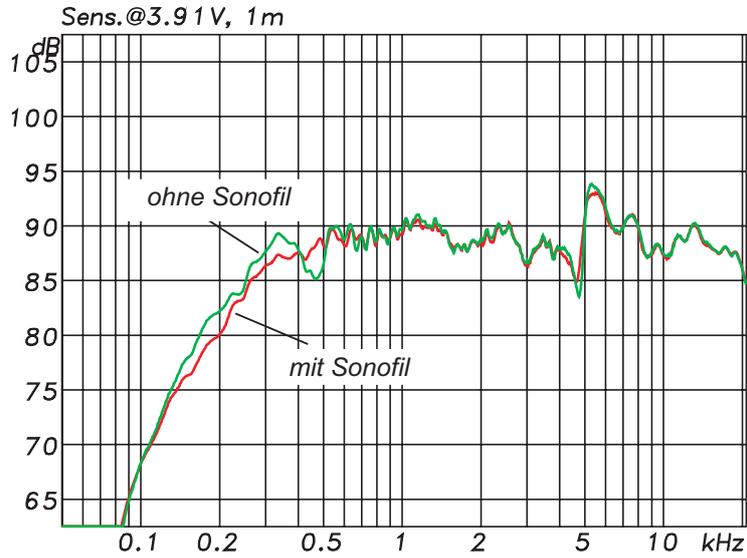


Abb. 7.62: Amplitudenfrequenzgang ohne und mit 80 g Sonofil im Lautsprechergehäuse im Freifeld

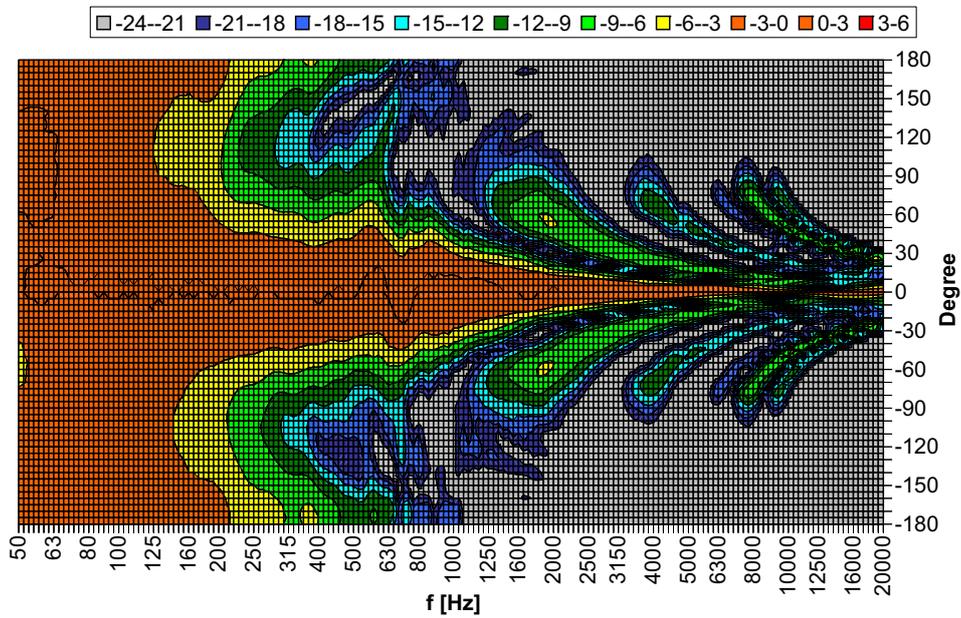


Abb. 7.63: Isobarendarstellung des horizontalen Abstrahlverhaltens des Tiefton-Arrays mit Füllmaterial im Gehäuse, Farbskala entspricht dem Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0°-Achse

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

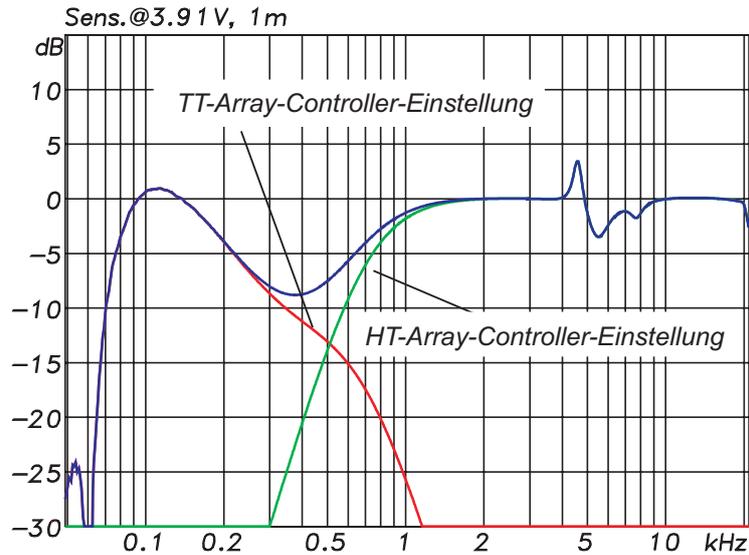


Abb. 7.64: Amplitudenfrequenzgang des Lautsprecher-Controllers zur Entzerrung des Lautsprechers

Dämmmaterial hinaus zu linearisieren, wurde der Lautsprecher-Controller Maxi-drive 3.4 Compact der Firma ALTO³⁸ für die elektronische Entzerrung verwendet. Im Tieftonbereich wurde eine Anhebung um 15 dB durch ein Shelf-Filter realisiert (Abb. 7.64). Die Einsatzfrequenz betrug 134 Hz. Unterhalb dieses Filters setzt bei 80 Hz das Hochpassfilter 8. Ordnung mit Linkwitz-Riley-Charakteristik ein. Im Hochtonbereich wurden Peak-Filter zur Unterdrückung der Resonanzüberhöhungen eingesetzt. Der Amplitudenfrequenzgang konnte auf diese Weise so erweitert werden, dass bei Vollraumabstrahlung die -6 dB-Grenzfrequenz bei ca. 100 Hz liegt und die Amplitudenschwankungen über dem gesamten Frequenzbereich kleiner gleich $\pm 2,5$ dB sind (Abb. 7.65). Zur Ermittlung des mit der Tieftonanhebung verbundenen Gesamtklirrfaktors wurden Messungen bei 1 W und bei 4 W elektrischer Leistung durchgeführt. Die Klirrfaktorkurven sind in Abb. 7.66 zu sehen. Der jeweilige Kurvenverlauf macht deutlich, dass die Arrays entsprechend dem Einzelwandler im unteren Übertragungsbereich als erstes an ihre Grenze gelangen, da dort die Membranauslenkung am größten ist. Bei 4 W Verstärkerleistung und der elektronischen Entzerrung wird bei 100 Hz ein Klirrfaktor von ca. 12 % erreicht. Der dabei erzielte Schalldruckpegel beträgt ungefähr 94 dB in 1 m Abstand (Abb. 7.67). Oberhalb von 200 Hz liegt der Klirrfaktor unter 3 %. Bei 1 W beträgt der Klirrfaktor für den gesamten Wiedergabebereich weniger als 4 %. Obwohl 94 dB/1 m für viele Anwendungen im Heimbereich ausreichend sind, ist für eine hochwertige Schallwiedergabe der Klirrfaktor mit etwa 12 % unangenehm groß. Da die Größe des Tiefton-Arrays bereits zu einer deutlich gerichteten Schallabstrahlung führt, kann lediglich durch den Einsatz eines anderen Miniaturwandlers der Klirrfaktor im unteren Übertragungsbereich verringert werden. Ein geeigneter alternativer Wandler stand im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Verfügung, weshalb

³⁸ www.altoproaudio.com

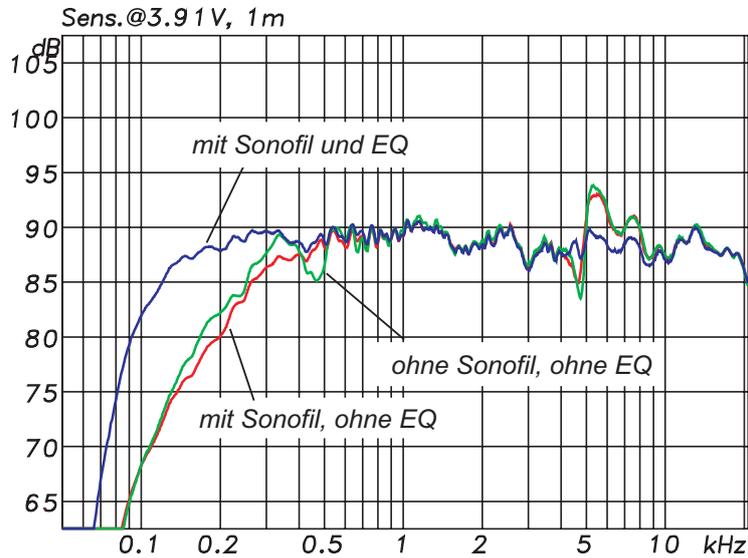


Abb. 7.65: Vergleich des Amplitudenfrequenzganges der Array-Flachlautspechters beim Einsatz von Dämmmaterial und elektronischer Entzerrung

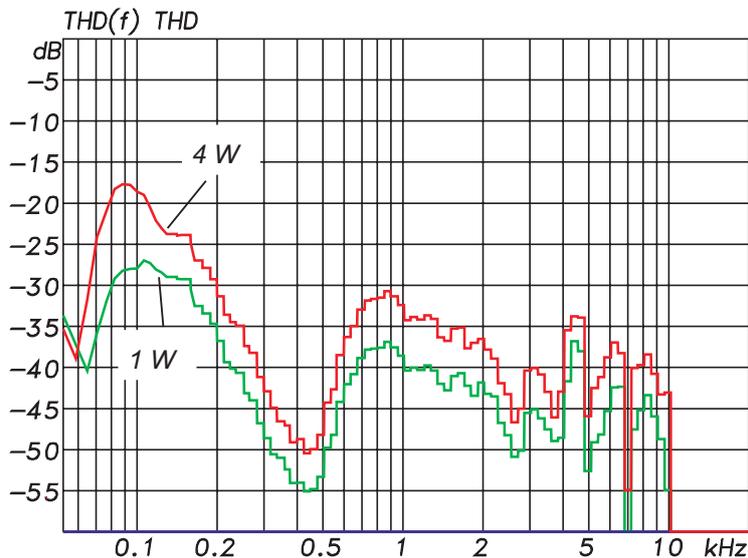


Abb. 7.66: Gesamtklirrfaktor des Array-Flachlautspechters nach der Linearisierung des Amplitudenfrequenzganges mit Dämmmaterial und elektronischer Entzerrung bei 1 W und 4 W

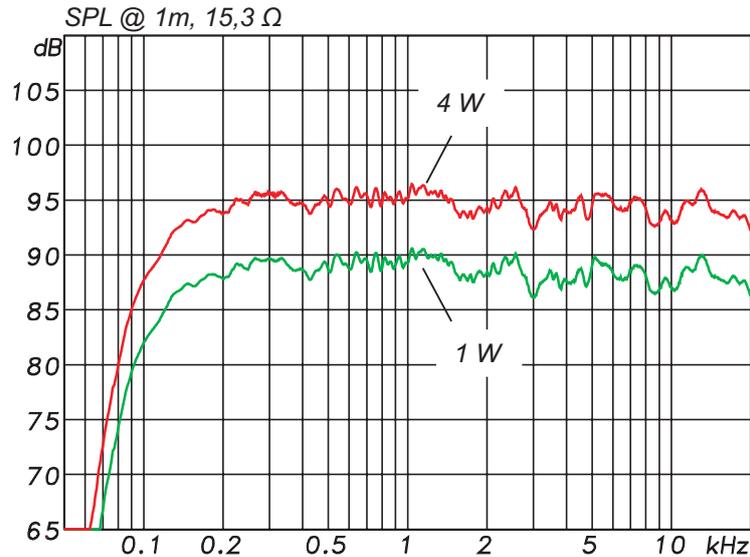


Abb. 7.67: Amplitudenfrequenzgang beim Einsatz von Dämmmaterial und elektronischer Entzerrung für 1 W und 4 W Verstärkerleistung im Vollraum

keine weitere Optimierung bezüglich des Klirrfaktorverhaltens stattfand. Neben der Linearisierung des Amplitudenfrequenzganges ging es im Optimierungsprozess auch darum, das Gehäusevolumen des Tiefton-Arrays zu verringern, ohne die Klangqualität zu beeinträchtigen. Diese Untersuchungen werden in Abschnitt 7.5.2 beschrieben.

7.5.2 Gehäuseverkleinerung durch Füllmaterial und elektronische Entzerrung

Anhand der Untersuchungen am Einzelwandler wurde deutlich, dass von den in Abschnitt 6.2 (S. 75ff.) dargestellten Ansätzen zur Gehäuseverkleinerung die Verwendung von Sonofil bzw. Aktivkohle geeignet ist. Die Wirkung der elektronischen Entzerrung bzw. Tieftonanhebung wurde bereits in Abschnitt 7.5.1 (S. 156) am Tiefton-Array erfolgreich getestet.

Der Einsatz des Compound-Prinzips ermöglicht zwar die Halbierung des Gehäusevolumens, es ist aber auch die doppelte Anzahl an Wandlern und ein komplizierterer Gehäuseaufbau erforderlich. Für eine wirksame Abstimmung einer Bassreflexkonstruktion muss das Gehäusevolumen pro Wandler mindestens verdoppelt werden. Außerdem zeigten bereits die Untersuchungen in [151], dass die Reflexrohrabstimmung für den verwendeten Wandler bei einem derart flachen Gehäuse nicht ausreichend möglich ist. Die Kombination aus Compound- und Bassreflexgehäuse würde eine Volumenhalbierung des erforderlichen Bassreflexgehäuses ermöglichen, es blieben aber der technische Mehraufwand der doppelten Wandleranzahl im Tiefton-Array, die größere Bautiefe und die Abstimmproblematik des Bassreflexkanals. Aus diesem Grund wurden beide Ansätze nicht weiter untersucht.

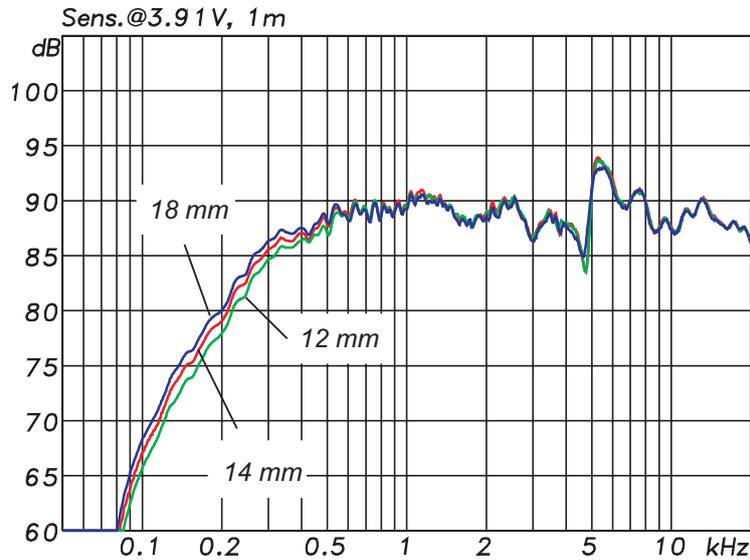


Abb. 7.68: Amplitudenfrequenzgang ohne elektronische Entzerrung bei unterschiedlichem Gehäusevolumen infolge variierender Gehäusetiefe und Sonofil-Füllung

Entsprechend den Untersuchungsergebnissen zum Einzelwandler wurde das Gehäuse des Tiefton-Arrays zur Vergrößerung des akustisch wirksamen Volumens mit 80 g Sonofil befüllt. Die Gehäuseverkleinerung wurde durch die Reduktion der inneren Gehäusetiefe mittels eingeklebter Holzplatte mit 4 mm und 6 mm Dicke realisiert³⁹. Die innere Gehäusetiefe variierte somit zwischen 18 mm, 14 mm und 12 mm. Die im reflexionsarmen Raum gemessenen Amplitudenfrequenzgänge sind in Abb. 7.68 dargestellt. Es ist ein Pegelverlust unterhalb von ca. 500 Hz mit abnehmender Gehäusetiefe zu erkennen. Bei 100 Hz beträgt er etwa 3 dB. Dass dieser Verlust mit Hilfe elektronischer Entzerrung ausgleichbar ist, zeigen die Amplitudenfrequenzgänge in Abb. 7.69. Es wurde jeweils die Entzerrung des 18 mm tiefe Gehäuse verwendet (Abb. 7.64).

Um den gleichen Schalldruckpegelverlauf für alle Gehäusetiefen zu erhalten, muss die Tieftonanhebung mit kleiner werdendem Gehäusevolumen zunehmen. Dabei ist zu beachten, dass keine beliebig große Tieftonanhebung möglich ist. Zum einen findet eine Begrenzung durch die maximale physikalische Auslenkung und zum anderen durch die thermische Belastbarkeit der Schwingspule statt⁴⁰. Neben der Tieftonanhebung erforderte auch die Resonanzüberhöhungen bei 5 kHz eine leichte Änderung der Controller-Einstellungen für das 14 mm bzw. 12 mm tiefe Gehäuse.

Für die unterschiedlichen Gehäusegrößen ist der Klirrfaktorverlauf in Abb. 7.70 zu sehen. Auffällig ist die Abnahme des Klirrfaktors mit kleiner werdendem Gehä-

³⁹ Eine Verkleinerung der Gehäusebreite wäre ebenso möglich gewesen. Für einen Flachlautsprecher ist die Reduktion der Tiefe aber besonders attraktiv.

⁴⁰ Beim verwendeten Miniaturwandler spielten bei der Tieftonanhebung immer die auslenkungsbedingten hohen Klirrfaktoren die entscheidende Rolle. Die thermische Belastungsgrenze wurde trotz Langzeitmessung dagegen nie erreicht.

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

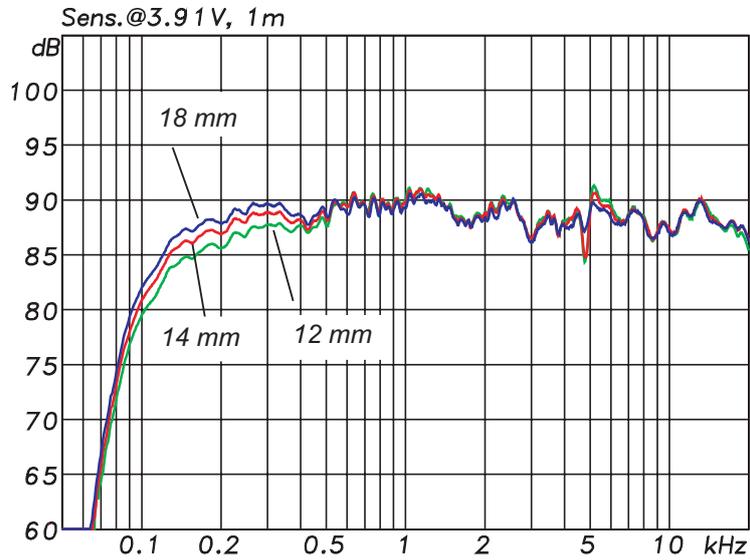


Abb. 7.69: Amplitudenfrequenzgang der drei Gehäusegrößen mit der Controller-Einstellung für das 18 mm Gehäuse und Sonofil-Füllung

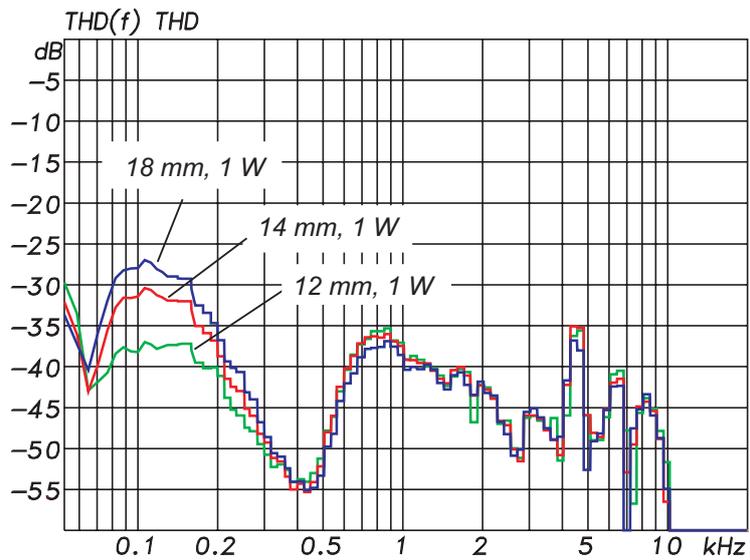


Abb. 7.70: Gesamtklirrfaktor bei verschiedenen Gehäusegrößen mit der elektronischen Entzerrung des Demonstrators mit 18 mm Gehäusetiefe

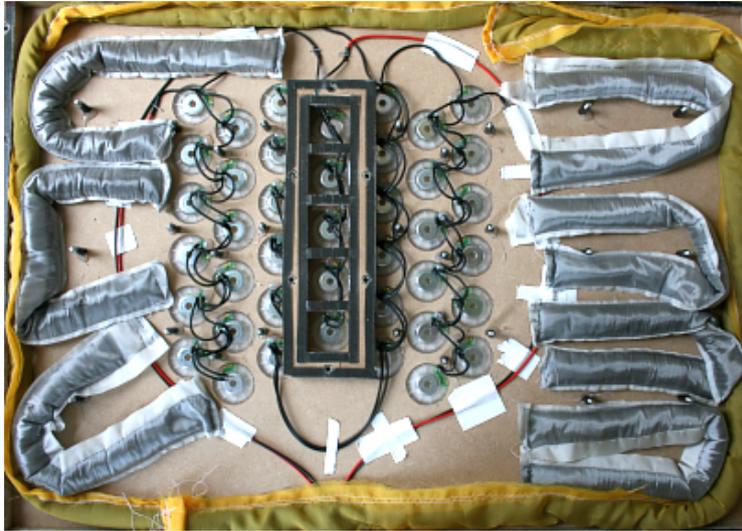


Abb. 7.71: Kammartige Verteilung der Aktivkohleschläuche im Flachlautsprechergehäuse

sevolumen. Einen Anteil daran trägt die geringere Membranauslenkung infolge der größeren Rückstellkraft des eingeschlossenen Luftvolumens im Gehäuse. Da allerdings bei einem Ausgleich der Pegelunterschiede zwischen den verschiedenen Gehäusetiefen die Membranauslenkung angeglichen wird, ist auch mit den gleichen Klirrfaktoren zu rechnen⁴¹.

In den Untersuchungen zur Gehäuseverkleinerung beim einzelnen Wandler wurde durch den Einsatz von Aktivkohle ein noch größerer Volumengewinn als mit Dämmmaterial erreicht (Abschnitt 7.1.4, S. 124). Aus diesem Grund wurden auch Untersuchungen gemacht, bei denen das Gehäuse des Tiefton-Arrays mit Aktivkohle gefüllt war (Abb. 7.71). Bereits beim Befüllen des Gehäuses zeigte sich, dass die als am wirkungsvollsten ermittelte Menge von 35,1 g pro Wandler in allen drei Gehäusen nicht geeignet unterzubringen war. Aufgrund der geringen Gehäusetiefe behinderten die Aktivkohleschläuche die Luftzirkulation im Gehäuse. Deshalb wurde mit einer kammartigen Positionierung der Kohleschläuche gearbeitet, wie sie in Abb. 7.71 zu sehen ist. Diese wurde nur für das 18 mm tiefe Gehäuses verwendet, da alle anderen Gehäusetiefe wesentlich weniger Aktivkohle als erforderlich aufnehmen konnten. Aus den gemessenen Amplitudenfrequenzgängen geht jedoch hervor, dass die Aktivkohle auch im 18 mm tiefen Gehäuse keine Vergrößerung des akustisch wirksamen Volumens und damit eine Tieftonerweiterung ermöglicht (Abb. 7.72). Entsprechend den Ergebnissen der Einzelwandleruntersuchungen (Abschnitt 7.1.4, S. 124ff.) war abzusehen, dass eine zu geringe Aktivkohlemenge keine Verbesserung bewirkt.

Entgegen den Untersuchungsergebnissen in [256] ist oberhalb von 100 Hz die verwendete Aktivkohle nicht ausreichend wirksam. Dass dies nicht allein auf die

⁴¹ Entgegen diesen Erwartungen zeigt sich, dass der Klirrfaktor des 12 mm tiefen Gehäuses trotz Pegelausgleich geringfügig niedriger ist (Abb. 7.75, S. 166).

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

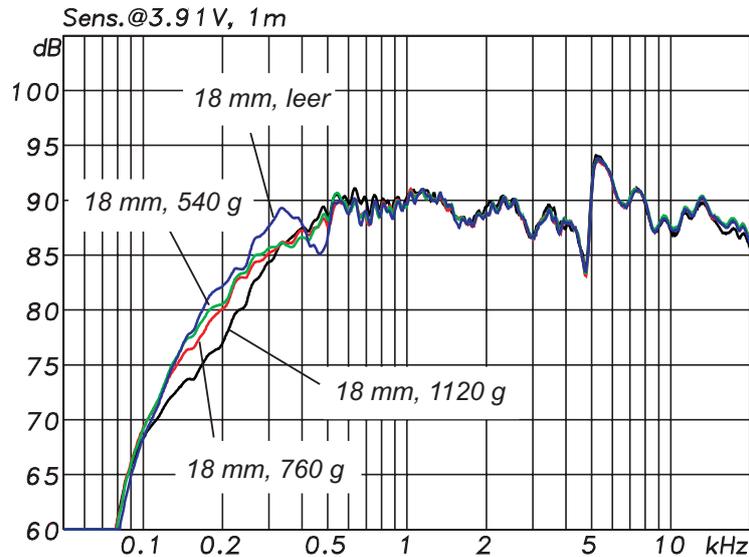


Abb. 7.72: Amplitudenfrequenzgang des 18 mm tiefen Gehäuses bei verschiedenem Befüllungsgrad an Aktivkohle

sehr flache Gehäuseform zurückzuführen ist, zeigen die Untersuchungen am Einzelwandler, der in Gehäuse eingebaut war, die keine flache Form besaßen (Abschnitt 7.1.4, S. 124ff.). Aus diesem Grund erschien der Einsatz von Aktivkohle in der verwendeten Form für die flachen Gehäuse als ungeeignet und wurde nicht weiter verfolgt.

Somit stellte das Gehäuse mit 12 mm Innentiefe und Sonofil-Füllung den besten Kompromiss zwischen guten Wiedergabeeigenschaften und einem möglichst kleinen bzw. flachen Gehäuse dar. Aus Abb. 7.69 geht hervor, dass bei diesem Gehäuse eine Pegelabsenkung unterhalb von ca. 400 Hz von etwa 3 dB gegenüber dem Gehäuse mit 18 mm Tiefe stattfindet. Zur Kompensation dieses Pegelunterschiedes wurde für das Tiefton-Array ein neues Controller-Setup erstellt (Abb. 7.73). Mit Hilfe eines zusätzlichen Shelving-Filters wurde ab 134 Hz eine Tieftonanhebung von ca. 3 dB realisiert. Dadurch konnte der Schalldruckpegelverlauf des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe an den des Gehäuses mit 18 mm Innentiefe angeglichen werden (Abb. 7.74). Da es aufgrund der Tieftonanhebung auch zu einer Vergrößerung des Gesamtklirrfaktors kommt, wurde das Klirrverhalten des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe mit dem neuen Controller-Setup gemessen und mit dem des 18 mm Gehäuses verglichen (Abb. 7.75). Wider Erwarten besitzt das Gehäuse mit 12 mm Innentiefe im Tieftonbereich trotz zusätzlicher Pegelanhebung einen geringeren Klirrfaktor als das 18 mm Gehäuse. Da durch den gleichen Schalldruckpegelverlauf die Membranauslenkung nicht geringer sein kann, entsteht die Vermutung, dass der Klirrfaktor des Arrays auch von Faktoren wie Gehäuseschwingungen beeinflusst wurde.

Das räumliche Abstrahlverhalten des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe wurde ebenfalls mittels akustischer Messungen im reflexionsarmen Raum überprüft. Die ent-

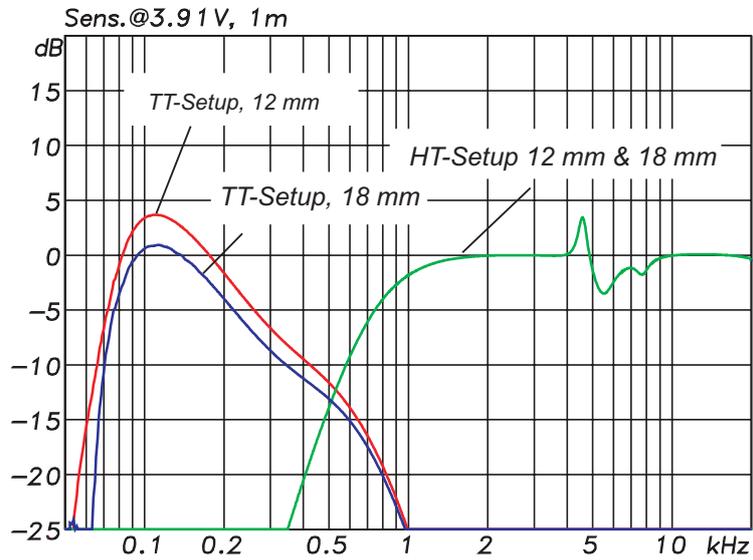


Abb. 7.73: Vergleich der Controller-Setups des Gehäuses mit 18 mm und des mit 12 mm Innentiefe

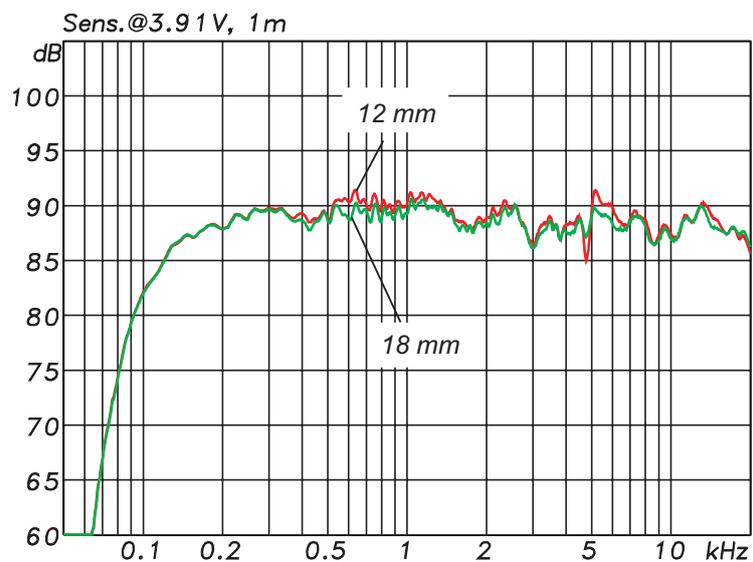


Abb. 7.74: Schalldruckpegelverlauf des 18 mm Gehäuses und des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe mit zusätzlicher Tieftonanhebung

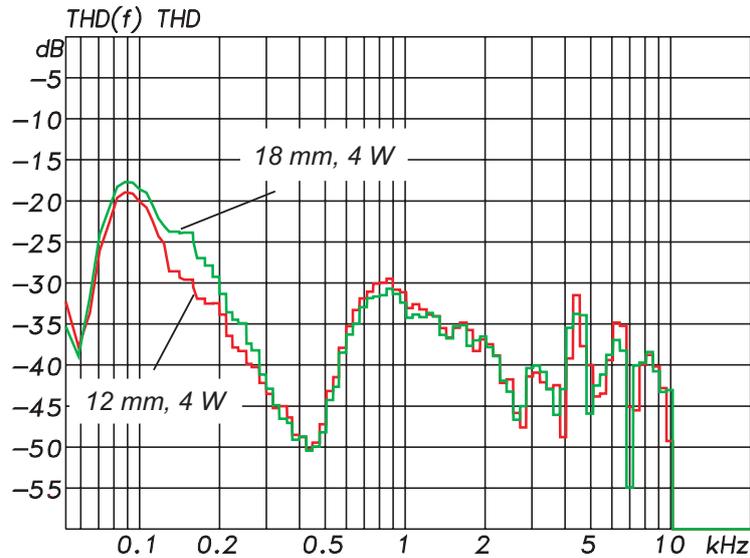


Abb. 7.75: Gesamtklirrfaktor des 18 mm und des 12 mm Gehäuses mit Tieftonanhebung bei 4 W

sprechenden Isobarendiagramme sind in Abb. 7.76 und Abb. 7.77 zu finden⁴². Im Vergleich zum horizontalen Abstrahlverhalten des nicht optimierten Flachlautsprechers mit 18 mm Gehäusetiefe (Abb. 7.57, S. 154) findet lediglich eine weniger starke Einschnürung im Übernahmehereich statt.

Da das erstellte Controller-Setup für die Abstrahlung in einen Vollraum optimiert war, wurde ein zweites Setup für die Halbraumabstrahlung erstellt (Abb. 7.78). Dazu wurde der Amplitudenfrequenzgang des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe auf schallhartem Fußboden gemessen. Es wurde der Messaufbau aus Abb. 7.55 (S. 152) verwendet und die Impulsantwort zur Unterdrückung von Reflexionen gefenstert. Der Amplitudenfrequenzgang mit dem auf Vollraum optimierten Controller-Setup zeigt bei ca. 170 Hz eine deutliche Pegelanhebung (Abb. 7.79). Der Grund dafür ist die Abstrahlung in einen Halbraum. Theoretisch hätte sich für alle ungerichtet abgestrahlten Frequenzen ein Pegelgewinn von 6 dB ergeben müssen. Auch im Übernahmefrequenzbereich zwischen Tiefton- und Hochton-Array zeigt sich eine Pegelanstiege. Da der Schall in diesem Frequenzbereich laut Abb. 7.76 nicht ungerichtet abgestrahlt wird, sind Einflussfaktoren wie Gehäuseschwingungen als Ursache anzusehen. Durch das auf die Halbraumabstrahlung angepasste Setup konnten die starken Einbrüche und Überhöhungen im Amplitudenfrequenzgang verringert werden. Da zu prüfen war, ob das finale Controller-Setup auch für andere Abstrahlwinkel als 0° geeignet ist, wurden Messungen unter 22,5° und 45° durchgeführt (Abb. 7.80). Im Vergleich zum Amplitudenfrequenzgang auf 0° zeigt sich,

⁴² Für den baugleichen Flachlautsprecher, der im Jahre 2009 auf der Internationalen Funkausstellung vom Fraunhofer IDMT präsentiert wurde (Abb. A.24, S. 238), sind in Abb. A.12 und Abb. A.13 (S. 229ff.) die gemessenen Balloon-Daten zu sehen. Diese ermöglichen – ergänzend zu den Isobarendiagrammen (Abb. 7.76, Abb. 7.77) – einen zusätzlichen Einblick in das räumliche Abstrahlverhalten des Flachlautsprechers.

7.5 Optimierung des Array-Demonstrators

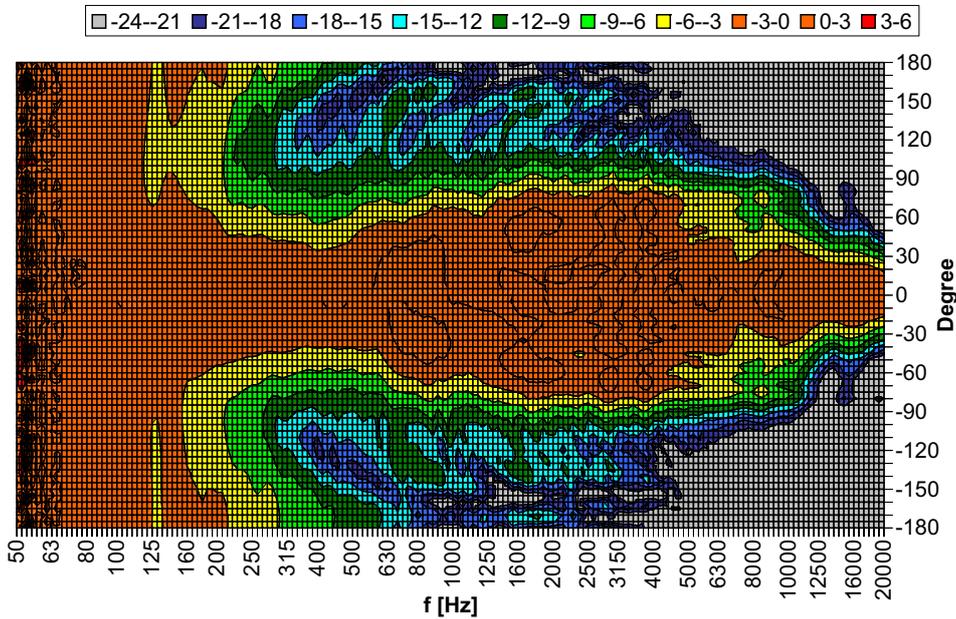


Abb. 7.76: Horizontales Abstrahlverhalten des Array-Flachlautsprechers mit 12 mm Innentiefe, Sonofil-Füllung und elektronischer Entzerrung, Farbskala entspricht dem Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0° -Achse

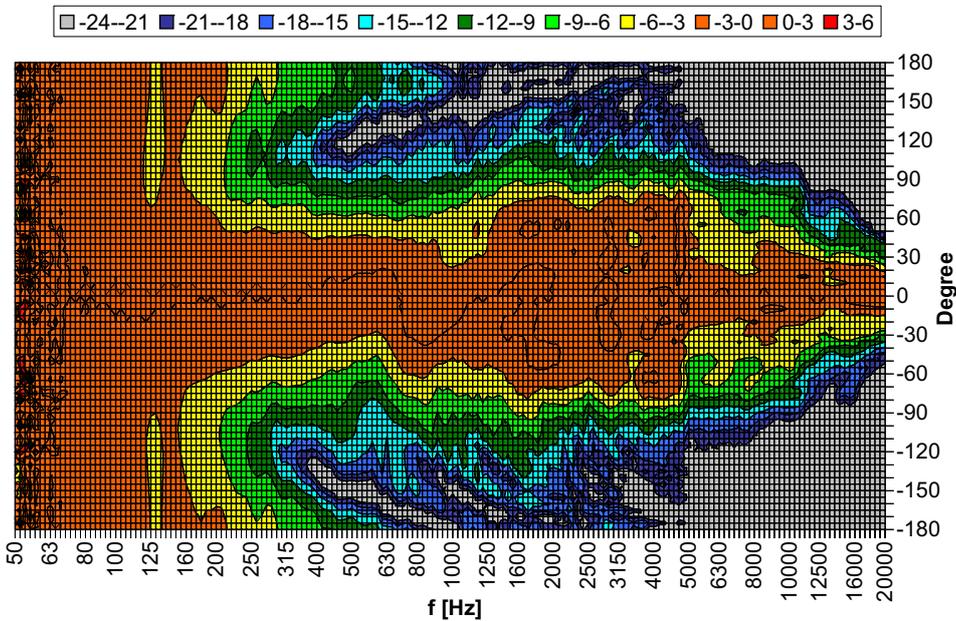


Abb. 7.77: Vertikales Abstrahlverhalten des Array-Flachlautsprechers mit 12 mm Innentiefe, Sonofil-Füllung und elektronischer Entzerrung, Farbskala entspricht dem Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0° -Achse

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

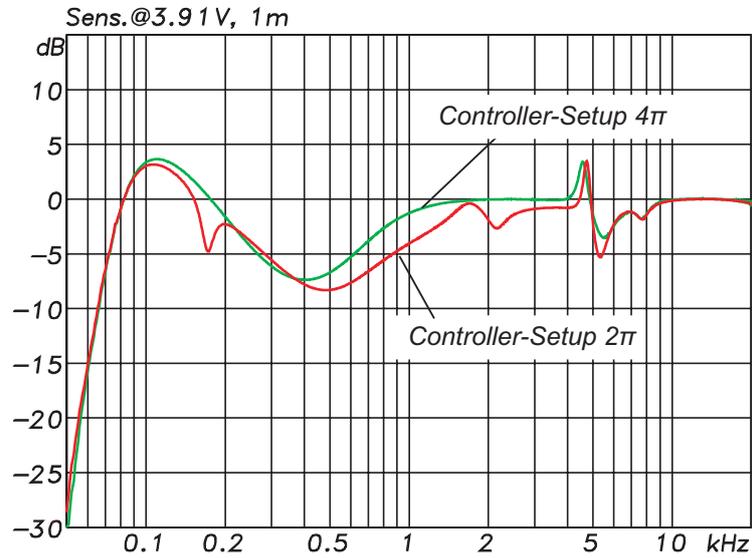


Abb. 7.78: Controller-Setup für den Vollraum (4π) und den Halbraum (2π)

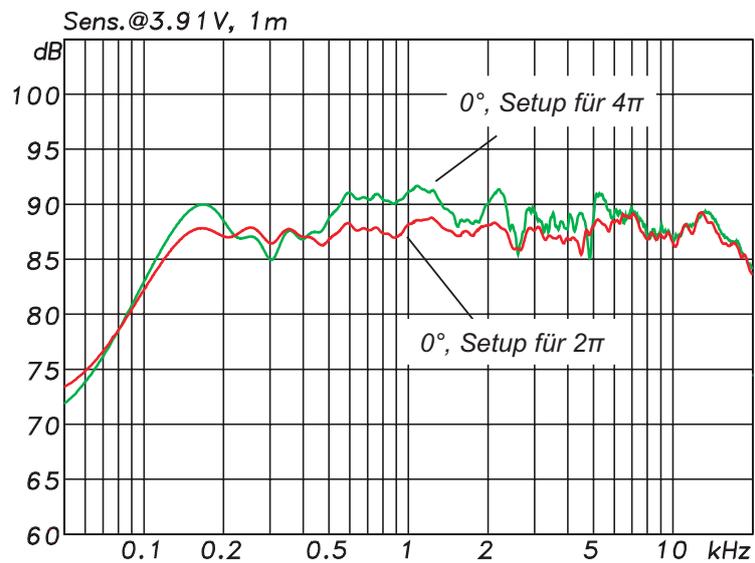


Abb. 7.79: Amplitudenfrequenzgang des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe auf dem Fußboden mit dem Controller-Setup für die Abstrahlung in einen Vollraum (4π) und dem neu erstellten Setup für einen Halbraum (2π).

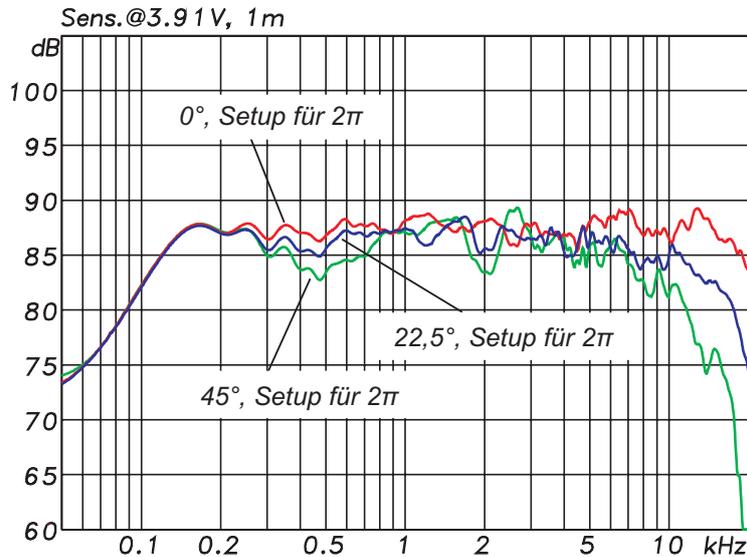


Abb. 7.80: Amplitudenfrequenzgang des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe mit dem finalen Controller-Setup auf dem Fussboden unter 0°, 22,5° und 45°

dass auch für die Abstrahlwinkel 22,5° und 45° das gewählte Setup die Überhöhung um 170 Hz kompensiert. Im Bereich um 500 Hz ist mit größer werdendem Abstrahlwinkel ein Einbruch zu erkennen, da das Tiefton-Array zunehmend gerichtet abstrahlt (Abb. 7.76). Eine Pegelanhebung in diesem Frequenzbereich würde zu keiner wirklichen „Verbreiterung“ des Abstrahlverhaltens führen⁴³. Die schmalbandige Pegelabsenkung im Bereich um 2 kHz erweist sich nur auf 0° als vorteilhaft. Sowohl bei 22,5° als auch bei 45° führt sie zu einem starken Einbruch. Aus diesem Grund ist diese Korrektur je nach Ausrichtung des Lautsprechers einzusetzen. Werden beispielsweise zwei Array-Flachlautsprecher als Stereo-Setup direkt an eine Wand montiert, so können diese nicht mit ihrer 0°-Abstrahlachse auf den Hörer ausgerichtet werden. Stattdessen trifft am Hörort der Schall der 30°-Abstrahlachsen ein, wenn die Lautsprecheranordnung der ITU-Empfehlung BS.1116 entspricht [110]. In diesem Fall ist der Amplitudenfrequenzgang unter 30° unbedingt zu berücksichtigen. Das Gleiche gilt für die Verringerung des Schalldruckpegels oberhalb von etwa 5 kHz bei 22,5° und 45°. Durch das stark gerichtete Abstrahlverhalten in diesem Frequenzbereich (Abb. 7.76) kann durch eine Pegelanhebung keine wirkliche „Verbreiterung“ des Abstrahlverhaltens erreicht werden.

Möglichkeiten zur Optimierung des Amplitudenfrequenzganges für bestimmte Abstrahlwinkel sind – neben der bereits vorgestellten elektronischen Frequenzgangentzerrung – die mechanische Ausrichtung des Hochtון-Arrays oder das elektronische Schwenken der Hauptabstrahlkeule [65, S. 66ff.].

Die Betrachtungen in Abschnitt 6.14 (S. 105ff.) zeigen, dass Überhöhungen und Einbrüchen im Amplitudenfrequenzgang auch durch Kantenreflexionen auftreten

⁴³ Wird der Pegel in diesem Frequenzbereich angehoben, so wird nur in Bezug auf die nicht angehobenen Frequenzbereiche eine Verbreiterung der Abstrahlung erzielt.

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

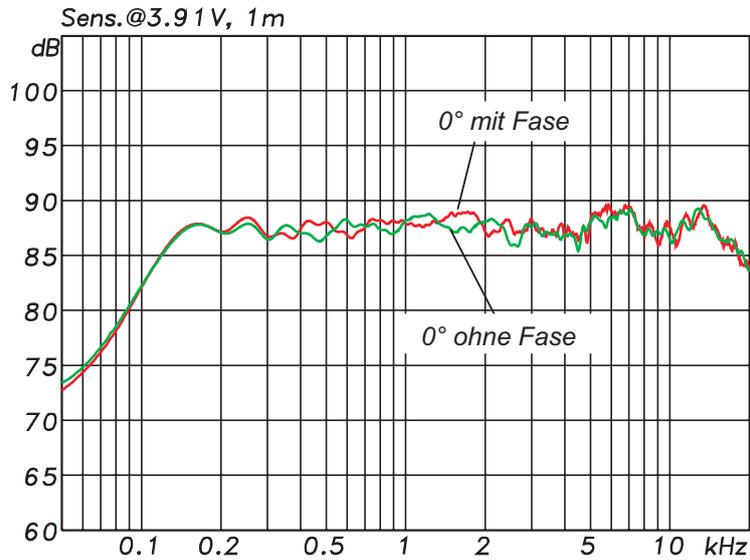


Abb. 7.81: Amplitudenfrequenzgang des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe ohne Fasung und mit Fasung der Gehäusekanten bei Halbraumabstrahlung auf 0°

können. Kennzeichnend ist dabei, dass sich die Ausprägung mit dem Abstrahlwinkel ändert. Da sich die schmalbandige Pegelabsenkung bei 2 kHz nur für die 0° -Achse als sinnvoll erwiesen hat, wurde durch das Anbringen einer 100 mm langen Fase an den Kanten des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe geprüft, ob es sich hierbei um Auswirkungen einer Kantenreflexion handelt⁴⁴.

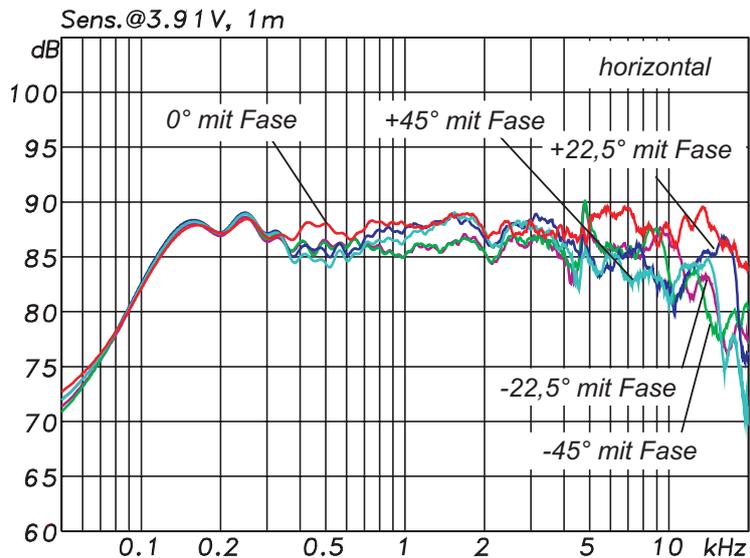


Abb. 7.82: Amplitudenfrequenzgang des Flachlautsprechers mit 12 mm Innentiefe und Kantenfasung für unterschiedliche horizontale Winkel bei Halbraumabstrahlung

⁴⁴ Es wurden dazu entsprechend breite Streifen aus steifer Pappe direkt mit dem Gehäuse und dem Fußboden verklebt.

7.5 Optimierung des Array-Demonstrators

Erneut wurden dazu die Amplitudenfrequenzgänge des Array-Flachlautsprechers auf dem Boden horizontal und vertikal unter 0° , $22,5^\circ$ und 45° gemessen. Im Vergleich mit dem Flachlautsprecher ohne Fase zeigt sich, dass dadurch keine Verbesserungen erzielt wurden und somit das Kantenfäsen bei dem Gehäuses mit 12 mm Innentiefe nicht erforderlich ist (Abb. 7.81, Abb. 7.82, Abb. 7.83).

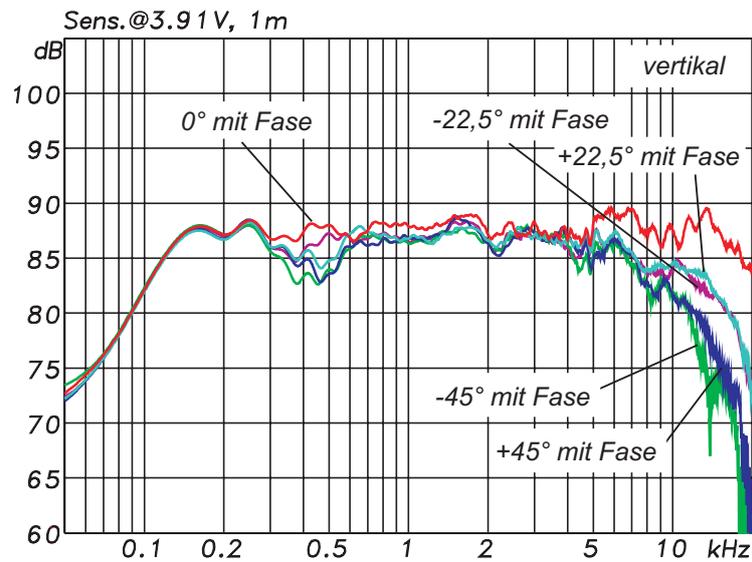


Abb. 7.83: Amplitudenfrequenzgang des Flachlautsprechers mit 12 mm Innentiefe und Kantenfäse für unterschiedliche vertikale Winkel bei Halbraumabstrahlung

7.6 Untersuchungen zur psychoakustischen Tieftonerweiterung

Die Untersuchungen in den vorhergehenden Abschnitten haben gezeigt, dass unter Verwendung geeigneter physikalischer Ansätze eine Erweiterung der Tieftonwiedergabe bei gleichzeitiger Verkleinerung der Flachlautsprechergröße möglich ist. Allerdings weisen alle diese Ansätze Grenzen auf. Wie in Abschnitt 6.13 (S. 101ff.) dargestellt wurde, ermöglicht die Verwendung psychoakustischer Effekte eine Tieftonerweiterung über diese physikalischen Grenzen hinaus. Aus diesem Grund wurden neben den vorgestellten physikalischen Lösungsansätzen auch verschiedene Ansätze der psychoakustischen Tieftonerweiterung mit Hilfe von Hörtests untersucht. Da diese Untersuchungen im Rahmen einer Praxiswerkstatt⁴⁵ und einer Diplomarbeit betreut wurden, sind nachfolgend nur die grundlegende Vorgehensweise und die wesentlichen Erkenntnisse dargestellt. Die ausführlichen Beschreibungen sind in [46], [141] und [43] zu finden.

7.6.1 1. Hörtest – Tieftonerweiterung allgemein

Ein erster Hörtest – der im Rahmen einer Praxiswerkstatt betreut wurde – sollte einen Eindruck über die Art und Intensität der mittels psychoakustischer Effekte erzielbaren Tieftonerweiterung verschaffen [46]. Dabei galt es zusätzliche Einflussfaktoren zu minimieren, weshalb der Hörtest nicht mit Flachlautsprechern, sondern mit den Vollbereichslautsprechern RL 901K der Firma ME Geithain GmbH und mit den Vollbereichskopfhörern STAX SR Lambda Pro der Firma Stax Ltd.⁴⁶ durchgeführt wurde. Um bei diesen Wiedergabesystemen die Übertragungsbandbreite künstlich zu begrenzen, wurden die Hörteststücke⁴⁷ hochpassgefiltert (Abb. 7.84). Dies erfolgte mit einem Hochpassfilter 16. Ordnung⁴⁸ nach der Modifikation der Teststücke mit den psychoakustischen Algorithmen. Zur Simulation zwei verschiedener Lautsprecherfrequenzen wurde als Filtergrenzfrequenz mal 100 Hz und mal 200 Hz gewählt. Das durch psychoakustische Algorithmen modifizierte und

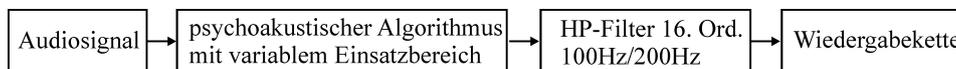


Abb. 7.84: Signalkette im Hörtest zur Beurteilung verschiedener kommerzieller Algorithmen mittels Lautsprecher und Kopfhörer

⁴⁵ Bei der Praxiswerkstatt handelt es sich um eine Lehrveranstaltung der TU Ilmenau. Für das Sommersemester 2008 wurde die psychoakustische Tieftonerweiterung als Thema vorgeschlagen und die Veranstaltung mitbetreut.

⁴⁶ www.stax.co.jp/index-E.html

⁴⁷ Die Teststücke sind in [46] beschrieben.

⁴⁸ Die Flankensteilheit des Hochpassfilters wurde deshalb mit 96 dB/Okt. sehr hoch gewählt, damit sichergestellt ist, dass die Anwendung des psychoakustischen Algorithmus die physikalische Bandbreite des Audiosignals nicht erweitert. Die Flankensteilheit von Lautsprechersystemen ist wesentlich geringer und liegt je nach Abstimmung zwischen 12 dB/Okt. und 48 dB/Okt.

7.6 Untersuchungen zur psychoakustischen Tieftonerweiterung

bandbegrenzte Signal wurde im ersten Testdurchlauf von den Vollbereichskopfhörern und im zweiten Testdurchlauf von den Vollbereichslautsprechern wiedergegeben. Die Probanden sollten dabei den empfundenen Tiefton der algorithmisch bearbeiteten Teststücke gegenüber dem hochpassgefilterten Original beurteilen. Als Testmethode wurde ein modifizierter MUSHRA verwendet [111], [204]⁴⁹. Eine ausführliche Beschreibung des Tests ist in [46] zu finden. Die Ergebnisse des ersten Tests zeigen, dass die psychoakustische Tieftonerweiterung signifikant möglich ist. Entscheidend für die Wirkung sind dabei der verwendete Algorithmus, das betrachtete Musiksinal und auch die Einsatzfrequenz der Signalmodifikation. Da die Tieftonerweiterung auf einer Veränderung der Harmonischen im unteren Frequenzspektrum beruht, geht die Tieftonerweiterung je nach Algorithmus und Einsatzfrequenz mit einer mehr oder minder stark ausgeprägten Klangfarbenänderung einher. Ebenso kam es je nach Einsatzfrequenz zu deutlichen Veränderungen im Stereo-Bild.

7.6.2 2. Hörtest – Intensität der Tieftonerweiterung und Klangfarbenänderung

Ein zweiter Hörtest fand im Rahmen einer betreuten Diplomarbeit statt [141]. Darin war zu klären, wie stark unterschiedliche psychoakustische Algorithmen eine Erweiterung der empfundenen Tieftonbandbreite bei einem Stereo-Setup aus Flachlautsprechern⁵⁰ ermöglichen und welche Klangfärbungen⁵¹ damit verbunden sind. Die vollständige Dokumentation ist in [141] und [43] zu finden. Untersucht wurden drei Algorithmen – zwei eigene und der kommerzielle Algorithmus, der im ersten Hörtest die beste Wirkung zeigte (Abschnitt 7.6.1, S. 172). Der kommerzielle Algorithmus und einer der eigenen Algorithmen basieren auf dem Residualton-Effekt; der dritte Algorithmus nutzt die Frequenzverdopplung (Abschnitt 6.13, S. 101ff.).

Zur Erzeugung der Harmonischen für den Residualtoneffekt wurde das Übertragungsverhalten eines Integrators und für die Frequenzverdopplung das Übertra-

⁴⁹ MUSHRA („Multi Stimulus test with Hidden Reference and Anchors“) bietet gegenüber anderen Methoden den Vorteil, dass mit einer kleinen Anzahl an Probanden signifikante Ergebnisse erzielt werden und viele Conditions (Variationen des Referenzsignals) in kurzer Zeit miteinander verglichen werden können. Eine Modifikation der Methodik war jedoch notwendig, da beim standardisierten MUSHRA die Referenz immer als beste Condition bewertet wird. Alle anderen Conditions können maximal gleichgut der Referenz bewertet werden. Da durch die psychoakustische Bearbeitung ein verbesserter Tieftoneindruck gegenüber der unbearbeiteten Referenz zu erwarten war, wurde eine abgeänderte Bewertungsskala verwendet, bei der die Referenz den Mittelpunkt markiert. Bewertungen gegenüber der Referenz mit besser, gleich und schlechter wurden somit ermöglicht.

⁵⁰ Bei den verwendeten Flachlautsprechern handelt es sich um eine Vorgängerversion des im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Demonstrators, dessen Eigenschaften in [151] und [44] beschrieben sind. Bei der Überprüfung der Messergebnisse aus [151] und [44] hat sich herausgestellt, dass die darin abgebildeten Schalldruckpegelverläufe um 10 dB zu hoch liegen. Auf die Ergebnisse des Hörtests hatte dies keine Auswirkungen.

⁵¹ Wie aus den Grundlagenbetrachtungen zum Residualton-Effekt hervorgeht, steigt die Intensität der Tieftonerweiterung mit der Anzahl und Intensität an zusätzlichen Harmonischen. Gleichzeitig bedingt eine zunehmende Veränderung der Harmonischen eine zunehmende Klangfarbenänderung gegenüber dem Originalsignal (Abschnitt 3.2.2, S. 15).

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

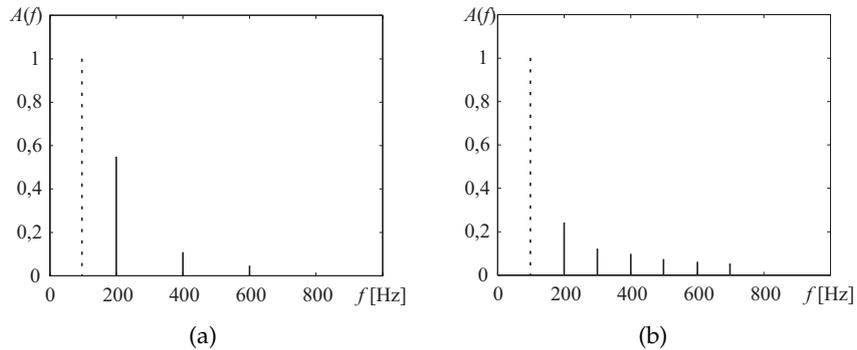


Abb. 7.85: Darstellung des für einen 100 Hz Sinuston generierten Spektrums von drei Oktaven mit dem Gleichrichter-Algorithmus (a) und dem Integrator-Algorithmus (b) in Matlab. Die 100 Hz Linie wird bei beiden Algorithmen nicht übertragen.

ungsverhalten eines Gleichrichters in Matlab implementiert [141]. Der Gleichrichter generiert nur geradzahlige Harmonische (Abb. 7.85a). Der Integrator generiert sowohl geradzahlige als auch ungeradzahlige Harmonische (Abb. 7.85b).

Das zu prüfende Audiosignal wurde entsprechend Abb. 7.86 in den Bereich oberhalb und den Bereich unterhalb der Lautsprecherfrequenz von 100 Hz unterteilt. Aus dem Audiosignal wurden mit einem Hochpassfilter der Frequenzanteil oberhalb von 100 Hz und mit einem Bandpassfilter der Frequenzanteil unterhalb 100 Hz herausgefiltert. Mithilfe des Gleichrichters, des Integrators oder des kommerziellen Algorithmus wurde das Spektrum der Harmonischen für den Anteil unter 100 Hz modifiziert. Beim Integrator und Gleichrichter wurde das Spektrum zwei und drei Oktaven oberhalb der Lautsprecherfrequenz verändert. So konnte die Intensität und Klangfarbenänderung beeinflusst werden. Ebenso wurde dadurch der nicht reproduzierbare Tieftonbereich ausgefiltert. Der kommerzielle Algorithmus ließ keine unterschiedlichen Einstellungen zu. Das gefilterte Mittel-

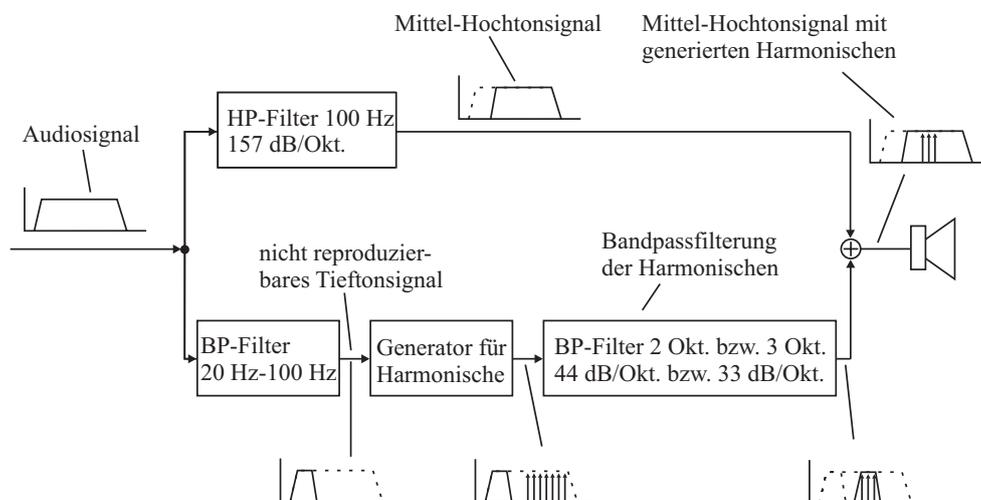


Abb. 7.86: Flussdiagramm der Signalbearbeitung im zweiten Hörtest

7.6 Untersuchungen zur psychoakustischen Tieftonerweiterung

Item	Titel	Quelle	Charakteristik
a	Night Time	Track 1, „Mind the Gap - Ultimate Breaks & Beats, Vol.2“, 1996 Groove Attack Productions	sehr tiefe Frequenzen, rhythmische Bassline
b	Bassdrum, einzelner Ton	Track 29, Sound Quality „Assessment Material (SQAM)“, 1988	Bassdrumschläge
c	Doppelbass arpeggio	Track 11, Sound Quality „Assessment Material (SQAM)“, 1988	Kontrabass
d	Rosa Rauschen	Eigenanfertigung	nimmt mit $1/f$ ab
e	Orchester, R. Strauss	Track 65, Sound Quality „Assessment Material (SQAM)“, 1988	Kesselpauke aus „Also sprach Zarathustra“

Tab. 7.3: Charakterisierung der verwendeten Test-Items

Hochtonsignal wurde schlussendlich mit den generierten Harmonischen zusammengefügt und von den Lautsprechern wiedergegeben.

Die verwendeten Teststücke (Items) besaßen deutliche Frequenzinhalte unterhalb von 100 Hz (Tab. 7.3). Sie wurden aus verschiedenen Generes ausgewählt, um die psychoakustische Tieftonerweiterung möglichst für eine große Menge von Audiomaterial prüfen zu können. Des Weiteren wurde Rosa Rauschen als Item verwendet, um auftretende Klangverfälschungen hörbar zu machen. Die verwendeten Test-Conditions sind in Tab. 7.4 dargestellt. Als Testmethode wurde wiederum ein modifizierter MUSHRA verwendet. Im ersten Testteil sollte die Intensität des Tieftoneindrucks bewertet werden. Im zweiten Teil ging es darum, die Stärke der Klangverfärbung infolge der zusätzlichen Harmonischen zu beurteilen. Entsprechend den Grundlagen (Abschnitt 3.2.2, S. 15ff.) war für den ersten Teilttest zu erwarten, dass der Algorithmus mit den meisten Harmonischen den stärksten Tieftoneindruck verursacht. In Abb. 7.87 sind die Bewertungen der einzelnen Conditions für die Testitems a-e bzw. gemittelt über alle Testitems (f) dargestellt. Ausgehend von der Bewertungen gemittelt über alle Teststücke (f) kann festgestellt werden, dass die Algorithmen mit Gleichrichter bzw. mit Integrator eine Verbesserung des Tiefton-

Name	Charakteristik
Referenz	Originalsignal, hochpassgefiltert, $f_g = 100$ Hz
Anker	Monoversion des hochpassgefilterten Originals
Kom.	Kommerzieller Algorithmus, nutzt Residualtoneffekt
Integrator 1	Obertonerweiterung 2 Okt. über 100 Hz, Residualtoneffekt
Integrator 2	Obertonerweiterung 3 Okt. über 100 Hz, Residualtoneffekt
Gleichrichter 1	Obertonerweiterung 2 Okt. über 100 Hz, Frequenzverdopplung
Gleichrichter 2	Obertonerweiterung 3 Okt. über 100 Hz, Frequenzverdopplung

Tab. 7.4: Charakterisierung der verwendeten Test-Conditions, nach [141]

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

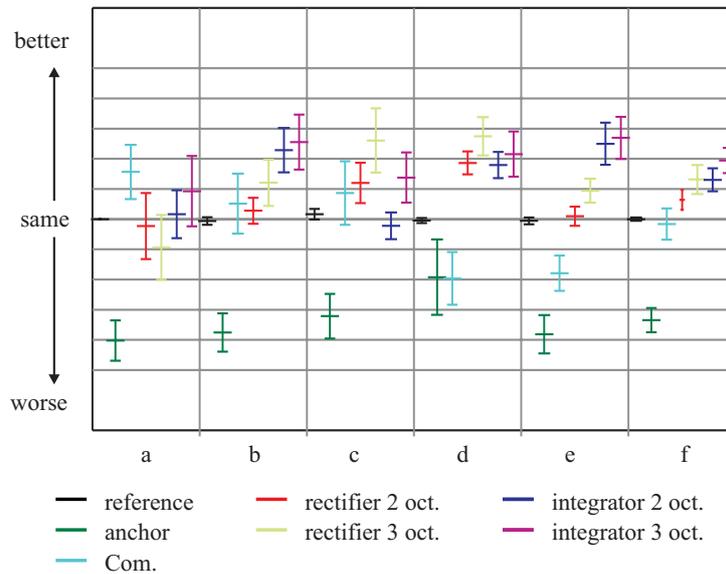


Abb. 7.87: Darstellung der Konfidenzintervalle für die Bewertung der Intensität des verursachten Tieftoneindrucks, nach [141], [43]

eindrucks gegenüber der Referenz⁵² bewirken. Der Algorithmus mit den meisten Harmonischen (Integrator - 3 Okt.) wurde bezüglich der Intensität des Tieftoneindrucks tendenziell am besten bewertet. Der Integrator mit nur 2 Oktaven und der Gleichrichter mit 3 Oktaven erzielen nahezu die gleiche Verbesserung beim Tieftoneindruck. Bei der Auswertung bezogen auf die einzelnen Test-Items wird eine starke Abhängigkeit der Ergebnisse vom Testmaterial deutlich. Überraschenderweise erzeugt die Verwendung des kommerziellen Algorithmus bei Test-Item a den signifikant größten Tieftoneindruck. Sonst bewegt er sich eher in Bereichen, die ähnlich der Referenz oder gar schlechter (Test-Item d und e) bewertet wurden. Auch bei Test-Item e wird eine interessante Verteilung der Ergebnisse ersichtlich. Beide Integrator-Algorithmen erzeugen einen signifikant besseren Tieftoneindruck. Ein wenig besser als die Referenz wird der Gleichrichter mit 3 Oktaven eingeschätzt. Der Gleichrichter mit 2 Oktaven wird jedoch in ähnlichen Bereichen wie die Referenz eingeordnet.

Der Algorithmus des Integrators mit Harmonischen über 3 Oktaven erzielte auch im Paarvergleich die besten Ergebnisse. In der Mehrheit wurden die nach psychoakustischen Kriterien bearbeiteten Signale besser bewertet als die Referenz.

Abb. 7.88 zeigt die Ergebnisse des Tests zur Beurteilung der Klangfarbenveränderung. Abgeleitet aus den Grundlagen war hier zu erwarten, dass Algorithmen mit mehr Harmonischen bzw. einer größeren Veränderung der Harmonischen eine größere Klangfarbenveränderung verursacht. Dies bedeutet, dass speziell die Verwendung des Integrators mit 3 Oktaven zu Qualitätseinbußen führen kann. Im

⁵² Da sich die Konfidenzintervalle überschneiden, wurde ein Signifikanztest mit ANOVA („Analysis Of Variance“) durchgeführt. Dieser bestätigte die Signifikanz der Ergebnisse (Tab. 7.5) [141].

7.6 Untersuchungen zur psychoakustischen Tieftonerweiterung

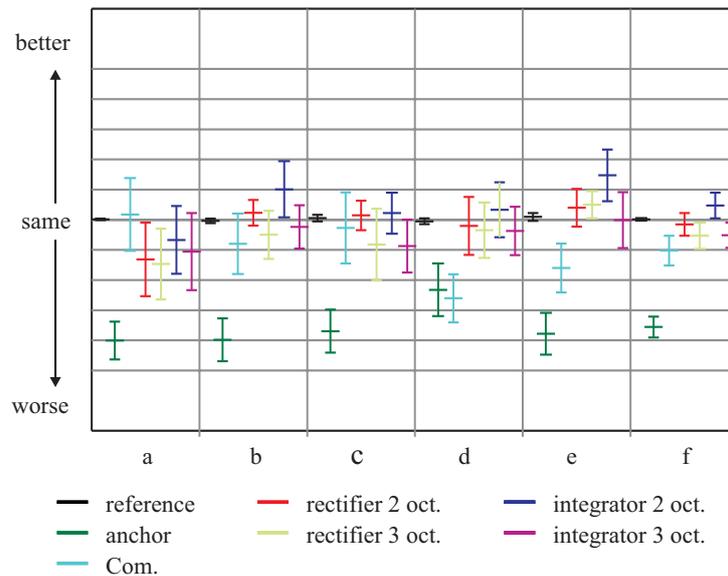


Abb. 7.88: Konfidenzintervalle zur Bewertung der Klangfarbenveränderung, nach [141], [43]

Umkehrschluss sollte der Gleichrichter mit nur 2 Oktaven wesentlich weniger Verfärbungen aufweisen. Die Ergebnisse gemittelt über alle Test-Items (f) zeigen eine starke Überlappung der Konfidenzintervalle. Daher kann aus Abb. 7.88 nur eine tendenzielle Aussage abgeleitet werden. Nur der Integrator mit 2 Oktaven kann eine signifikante Klangverbesserung gegenüber der Referenz erzeugen. Der Integrator mit 3 Oktaven und der Gleichrichter mit 2 Oktaven wurden tendenziell klanglich schlechter eingeschätzt als der Integrator mit 2 Oktaven. Wider Erwarten ist der Gleichrichter mit 2 Oktaven trotz geringerer Anzahl an Harmonischer gegenüber dem Integrator mit 2 Oktaven als klangfärbender beurteilt worden. Im Gespräch mit den Probanden stellte sich heraus, dass besonders geübten Hörern die Oktavierung der Tieftoninformation unangenehm war und diese deshalb eine schlechte Bewertung bekam. Trotz zusätzlicher Harmonischer wurden die Algorithmen nicht durchgehend als schlechter gegenüber der Referenz bewertet. Hier kann ebenfalls eine Abhängigkeit vom Testmaterial festgestellt werden. Bei einigen Items (b, c und e) erzielt auch der Gleichrichter mit 2 Oktaven eine bessere Klangqualität verglichen mit der Referenz (Tab. 7.6). Mit dem anschließenden Signifikanztest wurden

	MrSruff Bassline	bd	Kontrabass	Rauschen	Strauss Pauken
SRS	-	-	-	-	-
Gleichrichter 2	-	-	-	-	-
Gleichrichter 3	-	-	-	-	-
Integrator 2	-	x	-	-	x
Integrator 3	-	-	-	-	-

Tab. 7.5: Signifikanztest gegenüber der Referenz bei der Beurteilung der Intensität des Tieftoneindrucks, nach [141]

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

	MrSruff Bassline	bd	Kontrabass	Rauschen	Strauss Pauken
SRS	x	–	–	–	–
Gleichrichter 2	–	–	x	x	–
Gleichrichter 3	–	x	x	x	x
Integrator 2	–	x	–	x	x
Integrator 3	–	x	x	x	x

Tab. 7.6: Signifikanztest gegenüber der Referenz bei der Beurteilung der Klangfarbenänderung, nach [141]

die Tendenzen als signifikant bestätigt. Der Integrator mit 2 Oktaven ist auch im Paarvergleich besser als die andere Algorithmen.

Eine abschließende Beurteilung kann nur durchgeführt werden, wenn beide Teiltests in Relation zueinander gesetzt werden. Es ist festzuhalten, dass eine Verbesserung des Tieftoneindrucks auch zu einer Verbesserung der empfundenen Audio-Qualität führen kann. Allerdings ist dieser Effekt nicht generell nachweisbar. Der Test zeigte, dass eine Verschlechterung des Tieftoneindrucks immer zu einer Verschlechterung der Klangqualität führte. Dies kann aus den Ergebnissen des kommerziellen Algorithmus für die Items d und e abgelesen werden. Zu beachten ist auch, dass nur von erfahrenen Hörern die Oktavierung der Tieftoninformation als unangenehm empfunden wurde und deshalb eine schlechte Bewertung bekam. Normale Hörer haben dies als nicht störend bewertet.

Grundlegend geht aus den Tests somit hervor, dass eine Erweiterung des empfundenen Tieftonbereiches mit Hilfe psychoakustischer Effekte möglich ist. Da in den Tests nicht die Größe der Erweiterung untersucht wurde, kann hier nur auf Zahlen aus der Literatur von 1 Oktaven bis 1,5 Oktaven Tieftongewinn zurückgegriffen werden [50]. Weil der Tieftoneindruck umso größer ist, je mehr Harmonische im effektiven Bereich zusätzlich generiert werden, ist ein Kompromiss mit der dadurch zunehmenden Veränderung der Klangfarbe nötig. In Anwendungsfällen, wo generell eine Klangfarbenveränderung stattfindet, z. B. bei minderwertigen Wiedergabesystemen in mobilen Multimedia Geräten, kann der Tieftongewinn die Klangfarbenverschlechterung überwiegen, was auch in [89] zum Ausdruck kommt.

7.7 Ergebnisbetrachtung

Nachfolgend sind die in Kapitel 2 (S. 5ff.) definierten Anforderungen den erreichten Eigenschaften des entwickelten Flachlautsprechers gegenübergestellt. Grundlegend gefordert waren ein Wiedergabebereich von 100 Hz bis 20 kHz (-6 dB) und der Betrieb direkt an der Wand bzw. in einem flachen Gehäuse. Der Abstand zur Wand bzw. die Gehäusetiefe sollten geringer als 5 cm sein und nicht den geforderten Wiedergabefrequenzbereich einschränken.

Der entwickelte Flachlautsprecher besitzt ein nur 2,4 cm tiefes Gehäuse und erfüllt damit bereits die Forderung an die Gehäusetiefe (Abb. A.23, S. 237). Unter Verwendung von lediglich 1 mm starken Gehäusewänden kann die Tiefe auf ca. 1,2 cm verringert werden⁵³.

Weiterhin bestand die Forderung, dass der Flachlautsprecher eine untere -6 dB-Grenzfrequenz von 100 Hz – zur problemlosen Anbindung eines Subwoofers – und eine obere -6 dB-Grenzfrequenz von 20 kHz besitzen. Entsprechend den Messergebnissen wird diese Anforderung von dem entwickelten Lautsprecher erfüllt (Abb. 7.74, Abb. 7.80, S. 165ff.). Die Schwankungen des Amplitudenfrequenzganges bewegen sich in einem Toleranzschlauch von ca. $\pm 2,5$ dB. Als Kennschalldruckpegel sollte ein für HiFi-Lautsprecher typischer Wert von 85 dB/1 W/1 m erzielt werden. Auch dieser Anforderung wird der Flachlautsprecher mit 88 dB/1 W/1 m gerecht. Mit einem maximalen Schalldruckpegel von 94 dB/1 m wird bis zu einer Hörentfernung von 2,8 m der in [202] geforderte Schalldruckpegel von 85 dB(C) erreicht. Allerdings liegt dabei der Klirrfaktor unterhalb von 100 Hz bei über 10 %, was für eine hochwertige Schallwiedergabe ungeeignet ist (Abb. 7.75, S. 166). Oberhalb von 200 Hz beträgt der Klirrfaktor bei 94 dB/1 m weniger als 3 %. Dennoch bedingt der Klirrfaktor im unteren Übertragungsbereich, dass für kurzzeitige Spitzenpegel über 94 dB keine Reserven vorhanden sind.

Das räumliche Abstrahlverhalten des Flachlautsprechers ist nahezu frei von Seitenkeulen (Abb. 7.76, Abb. 7.77, S. 167ff. und Abb. A.12, Abb. A.13, S. 230ff.). Der nach [26] definierte Beschallungswinkel⁵⁴ liegt beim Array-Flachlautsprecher für die horizontale Ebene bei $\pm 45^\circ$.

Bezüglich der oberen Anforderungsgrenzen, die in Tab. 7.7 nochmals für den Bereich der Studio-Referenz-Lautsprecher aufgeführt sind, muss der Flachlautsprecher in Kombination mit einem Subwoofer betrachtet werden. Mit einem gleichermaßen linearen Subwoofer erfüllt der Flachlautsprecher nahezu⁵⁵ die Anforderungen an den Amplitudenverlauf auf der 0° - und auf den $\pm 10^\circ$ -Achsen. Auf den $\pm 30^\circ$ -Achsen sind die Amplitudenschwankungen 1 dB größer als der vorgegebene Grenzwert. Im Gegensatz zum Hochtöner eines konventionellen Lautsprechers besitzt der Einzelwandler aufgrund seiner Größe und seiner Membranform eine mit der Frequenz früher einsetzende Richtwirkung. Ein Wandler mit kleinerem Membrandurchmesser würde im gleichen Frequenzbereich weniger stark bündeln. Aufgrund der geringen Membranauslenkung des Wandlers müsste die Array-Fläche größer gewählt werden, um bei einem Schalldruckpegel von 96 dB/1 m einen Gesamtklirrfaktor von lediglich 3 % bzw. 1 % zu erreichen. Alternativ kann auch ein Wandler mit einer größeren Membranauslenkung eingesetzt werden. Durch die Kombination von Wandlern mit leichter Membran und starkem Antrieb kann ein besseres Impulsverhalten erzielt werden, als es mit einer großen Membran und

⁵³ Es ist zu beachten, dass bei abnehmender Wandstärke das Lautsprechergehäuse weniger steif ist und somit unerwünschte Körperschallschwingungen begünstigt werden.

⁵⁴ Der Winkel, bei dem der Schalldruckpegel gegenüber der 0° -Abstrahlung um -6 dB gesunken ist, wird als Beschallungswinkel bezeichnet.

⁵⁵ Statt der geforderten maximalen Amplitudenschwankung von ± 2 dB werden $\pm 2,5$ dB erreicht.

7 Umsetzung ausgewählter Lösungsansätze an Demonstratoren

Parameter	Einheit/ Bedingung	Studio	Flachlautsprecher
Amplitudenfrequenzgang 0°	40 Hz - 16 kHz	± 2 dB	$\pm 2,5$ dB (mit Sub)
Amplitudenfrequenzgang $\pm 10^\circ$	40 Hz - 16 kHz, Δ zu 0°	3 dB	2 dB (mit Sub)
Amplitudenfrequenzgang $\pm 30^\circ$	40 Hz - 16 kHz, Δ zu 0°	4 dB	5 dB (mit Sub)
Schallbündelungsmaß	250 Hz - 10 kHz	8 dB ± 2 dB	–
Klirrdämpfung	96 dB _{SPL} < 100 Hz	-30 dB (3 %)	> -20 dB
Klirrdämpfung	96 dB _{SPL} > 100 Hz	-40 dB (1 %)	\leq -20 dB
Dynamikbereich	max. L_{eff}	> 112 dB	94 dB
Zeit für das Abklingen auf das 1/e-fache	Output = 1/e-fache Input	< 5/f	< 5/f

Tab. 7.7: Gegenüberstellung der akustischen Anforderungen an Referenz-Monitor-Lautsprecher und der erzielten akustischen Eigenschaften des entwickelten Array-Flachlautsprechers [94, S. 8]

einem Antriebssystem möglich ist. Abgesehen von zusätzlichen Gehäuseschwingungen erreicht der Lautsprecher so ein sehr gutes Impulsverhalten und erfüllt die geforderten Abklingzeiten (Abb. A.14 bis Abb. A.19, S. 231ff.). Der für Studio-Lautsprecher geforderte Dynamikumfang kann aufgrund des maximalen Schalldruckpegels von 94 dB/1 m nicht erreicht werden [94, S. 8].

In der Kombination mit geeigneten Algorithmen zur psychoakustischen Tieftonerweiterung kann die wahrgenommene Wiedergabebandbreite eines Flachlautsprechers subjektiv vergrößert werden (Abschnitt 7.6.2, S. 173ff.). Dabei ist die Wirkung sowohl vom Nutzer als auch vom jeweiligen Audiosignal abhängig. Durch die erforderliche Beeinflussung des Spektrums im Bereich der Harmonischen ist mit der psychoakustischen Tieftonerweiterung immer eine Klangfarbenänderung verbunden, die eine hochqualitative Schallwiedergabe verhindert.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Nahezu alle bekannten Flachlautsprecher weisen deutliche Klangbeeinträchtigungen auf, wenn sie unmittelbar vor schallreflektierenden Grenzflächen, z. B. Wänden, betrieben werden. Ursache ist die dipolförmige Abstrahlcharakteristik der Membran, die in Wandnähe zu einer Verstärkung von destruktiven Interferenzen zwischen Schallanteilen beider Membranseiten führt.

Um diese Schallanteile voneinander zu trennen, ist der Einbau in ein Gehäuse zweckmäßig. Das im Gehäuse befindliche Luftvolumen wirkt jedoch ähnlich einer mechanischen Feder und verringert dadurch die Membranauslenkung. Deshalb muss das Antriebssystem eine ausreichend große Kraft bereitstellen, um die erforderliche Auslenkung für den gewünschte Schalldruckpegel zu erreichen. Zur Verhinderung einer ineffektiven Schallabstrahlung aufgrund von Partialschwingungen sollte die Antriebskraft gleichmäßig über der Membran verteilt sein. Durch eine Unterteilung der abstrahlenden Fläche in Teilflächen werden Partialschwingungen zusätzlich unterdrückt und die Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers optimiert.

Der im Rahmen dieser Promotion entwickelte Lautsprecher verwendet daher eine Vielzahl von elektrodynamischen Miniaturwandlern, die in einem flachen Gehäuse eingebaut sind. Zur Optimierung der Abstrahlcharakteristik sind diese in ein Hochton- und ein Tiefton-Array unterteilt. Zur Verringerung der Volumensteifigkeit wurde das Gehäuse mit Dämmmaterial befüllt. Zur Erweiterung und Linearisierung des Übertragungsbereiches wurde das Eingangssignal mit Hilfe eines Lautsprecher-Controllers vorverzerrt.

Der Flachlautsprecher besitzt eine Dicke von 24 mm, wobei die Wandstärke des Gehäuses 6 mm beträgt. Aus diesem Grund ist eine Dickenreduktion durch dünnere Gehäusewände möglich.

Der entwickelte Flachlautsprecher kann direkt an der Wand bzw. in Mediengeräten wie z. B. Flachbildschirmen betrieben werden. Der Wiedergabefrequenzbereich erstreckt sich dabei von 100 Hz bis 20 kHz (-6 dB-Grenzfrequenzen). Die Schwankungen im Amplitudenfrequenzgang sind kleiner gleich $\pm 2,5$ dB.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die erzielte untere Grenzfrequenz ermöglicht eine problemlose Kombination des Flachlautsprechers mit einem Subwoofer zur Ergänzung des Frequenzbereiches unter 100 Hz. Mit einem Kennschalldruckpegel von 88 dB/1 W/1 m und einem maximalen Schalldruckpegel von 94 dB/1 m können so im Heimbereich Satellitenlautsprecher von Surroundsound-Systemen durch Flachlautsprecher ersetzt werden.

Mit Hilfe von psychoakustischen Effekten, insbesondere dem Residualtoneffekt, kann die empfundene Wiedergabebandbreite eines Flachlautsprechers zu tiefen Frequenzen erweitert werden. Da dadurch Veränderungen im Spektrum der Harmonischen des Wiedergabesignals stattfinden, bewirkt dies gleichzeitig Klangfarbenänderungen. Aus diesem Grund ist die psychoakustische Bandbreitenerweiterung vorrangig für Anwendungen geeignet, wo Klangfarbenänderungen weniger stören.

Der limitierende Faktor bezüglich der erreichten unteren Grenzfrequenz von 100 Hz und des maximalen Schalldruckpegels ist die maximal mögliche Membranauslenkung des Miniaturwandlers von ca. 0,5 mm. Um für eine Schalldruckpegelsteigerung unnötig große Array-Flächen mit ungeeigneter starker Schallbündelung zu vermeiden, ist der Einsatz bzw. die Entwicklung von Wandlern mit größerem maximalen Membranhub nötig. Ebenso ließe sich die Schallbündelung im Hochtonbereich durch die Verwendung eines einzigen Miniaturwandlers statt des Hochton-Arrays verringern.

Prinzipbedingt ergibt sich für die Verwendung elektrodynamischer Wandler eine minimale Bautiefe, die vorrangig durch die Schwingspulenhöhe und die maximale Membranauslenkung bestimmt wird. Die Konstruktion von sehr dünnen Lautsprechern im Millimeterbereich erfordert den Einsatz anderer Technologien, z. B. piezoelektrischer Materialien. Die Untersuchungen piezoelektrischer Wandler haben jedoch gezeigt, dass nur geringe Schwingungsamplituden realisierbar sind. Aus diesem Grund sind diese Wandler derzeit nur für die Wiedergabe von Frequenzen oberhalb von 1 kHz geeignet (Abschnitt A.11, S. 241ff.).

Der im Rahmen dieser Promotion entwickelte Flachlautsprecher wurde für die Internationalen Funkausstellung 2009 vom Fraunhofer IDMT in ein Bild integriert. Denkbar ist auch die Integration in Türen, Möbel und Mediengeräten. Dabei wäre der Einbau einer batteriegespeisten Controller- und Verstärkertechnik in das Gehäuse sowie die Verwendung einer drahtlosen Signalübertragung von Vorteil.

Literaturverzeichnis

- [1] *5.1 Surround-Sound.* www.dolby.de/consumer/home/_entertainment/roomlayout_tb01.html. – Zugriffsdatum: 14.07.2008
- [2] *ACE Technologie.* <http://www2.kef.com/de/technology/ace>. – Zugriffsdatum: 25.05.2009
- [3] *Aphitryon-Spezifikationen.* <http://www.analysisaudiousa.com/amphitryon.php>. – Zugriff: 23.05.2009
- [4] *Audiostatic DCI.* http://www.geschka-hifi.de/image/cross_big.jpg. – Zugriffsdatum: 23.05.2009
- [5] *Audiostatic DCI Spezifikationen.* http://www.geschka-hifi.de/hifi/b_audi_de.htm. – Zugriff: 23.05.2009
- [6] *Canton Ergo 610 - Technische Daten.* <http://www.canton.de/de/hifi/ergo/produkt/ergo610.htm>. – Zugriffsdatum: 06.10.2009
- [7] *Datenblatt Mangerschallwandler.* [http://www.manger-msw.de/index.php?language=de&pid=y3Vb6E8QXD0MxJznznp3G7dDIvfD5rtD&country=.](http://www.manger-msw.de/index.php?language=de&pid=y3Vb6E8QXD0MxJznznp3G7dDIvfD5rtD&country=) – Zugriffsdatum: 25.05.2009
- [8] *Dynaudio Technology Unlimited - Variovent.* http://www.gattiweb.com/images/dynaudio/variovent_data.pdf. – Zugriffsdatum: 05.10.2009
- [9] *Elac-Imago.* <http://www.elac.de/de/products/oem/exciterb.html>. – Zugriffsdatum: 25.05.2009
- [10] *Elac-Imago.* www.elac.com/de/products/imago/show.php?c=material. – Zugriffsdatum: 25.06.2008
- [11] *Email - vom 07.11.2008 von E. Terhardt an M. Lubkowitz*
- [12] *ESL-63.* <http://www.attsaar.de/Rechts/Quad.html>. – Zugriffsdatum: 23.05.2009
- [13] *ESL-988 & ESL-989 Electrostatic Loudspeakers Instruction Manual.* <http://www.quad-hifi.co.uk/downloads/ESLmanual%20Feb02.pdf>. – Zugriffsdatum: 05.10.2009
- [14] *Flow Resistor.* <http://www.tymphany.com/files/images/scanspeak-acc/flow.jpg>. – Zugriffsdatum: 26.05.2009

Literaturverzeichnis

- [15] *KEF-Subwoofer 209*. <http://www2.kef.com/de/subwoofer>. – Zugriffsdatum: 25.05.2009
- [16] *MG 1.6*. http://www.magnepan.com/_mg16.php. – Zugriffsdatum: 22.05.2009
- [17] *Orthophase-Lautsprecher*. www.roger-russell.com/columns/columns.htm. – Zugriffsdatum: 21.07.2008
- [18] *Produktfoto Amphitryon*. <http://www.audiotweak.co.za/items/1217515221-0855.jpg?PHPSESSID=0ab97c0473b84574714f2a0c04215d4f>. – Zugriffsdatum: 23.05.2009
- [19] *Quad ESL-2805*. http://www.testberichte.de/test/produkt_tests_quad_esl_2805_p74202.html. – Zugriffsdatum: 23.05.2009
- [20] *Quad-History*. <http://www.quad-hifi.co.uk/history.php?page=1>. – Zugriffsdatum: 23.05.2009
- [21] *Sandwich-Platte mit Hartschaumkern*. www.alcancomposites.com/alcan/acsites.nsf/pages_acde_de/index.htm!Open&lang=de&p=services_download_kapa&m=5&f=index&type=.htm. – Zugriffsdatum: 18.07.2008
- [22] *Sandwich-Platte mit Wabenkern*. www.euro-composites.com/de/products/Seiten/honeycombs.html. – Zugriffsdatum: 18.07.2008
- [23] *Variovent*. <http://www.audiocraftworks.gr/gr/pages/Arthra/internet/Enclosure%20designs.files%5Cvariovent.jpg>. – Zugriffsdatum: 26.05.2009
- [24] *Wellenfeld-Synthese*. www.iosono-sound.com/technology.html. – Zugriffsdatum: 08.09.2008
- [25] *Handbuch des Verbands Deutscher Rundfunk- und Fernseh-Fachgroßhändler*. Verband Deutscher Rundfunk- und Fernseh-Fachgroßhändler, 1938
- [26] *DIN EN 60268-5, Elektroakustische Geräte*. 2003
- [27] *Fraunhofer IDMT PR-Foto*. 2008
- [28] AZIMA ; COLLOMS ; HARRIS: *Schutzrecht: WO 9709853*. Anmeldedatum: 1995
- [29] AZIMA ; COLLOMS ; HARRIS: *Schutzrecht: WO 9709854*. Anmeldedatum: 1995
- [30] AZIMA, H.: *Schutzrecht: US 20,020,044,668 A1*. Anmeldedatum: 02.08.2001
- [31] BACHMANN, W. ; KRUMP, G.: *Schutzrecht: DE 19,825,866*. Anmeldedatum: 10.06.1998. – Nokia (Deutschland) GmbH, Pforzheim
- [32] BACHMANN, W. ; KRUMP, G. ; REGL, H. ; ZIGANKI, A.: *Schutzrecht: WO 03,013,186 A1*. Anmeldedatum: 13.06.2001. – Harman Becker Automotive Systems GmbH, Straubingen
- [33] BACKMAN, J.: A model of diffraction from convex loudspeaker enclosure edges. In: *98th AES Convention, Paris* (1995)

- [34] BACKMAN, J.: The Nonlinear Behaviour of Reflex Ports. In: *98th AES Convention, Paris* (1995)
- [35] BACKMAN, J.: A Model of Open-Baffle Loudspeakers. In: *107th AES Convention, New York* (1999)
- [36] BAG END LOUDSPEAKERS: *S18E-I Manual*, <http://www.bagend.com/bagend/downloads/s18e-i.pdf>. – Zugriffsdatum: 05.10.2009
- [37] BAG END LOUDSPEAKERS: Guide to ELF Systems - A new era in bass reproduction. 1997. – Forschungsbericht
- [38] BAUCH, W.: *Schutzrecht: DE 465,189*. Anmeldedatum: 11.07.1927
- [39] BAUMAN, P. ; URBAN, M. ; HEIL, C.: Wavefront Sculpture Technology. In: *111th AES Convention, New York* (2001)
- [40] BAUMANN, L.: *Schutzrecht: US 1,741,274*. Anmeldedatum: 06.03.1929
- [41] BEER, D.: Flachlautsprecher - ein Überblick. In: *DAGA08, Dresden* (2008)
- [42] BEER, D. ; GENSICKE, H. ; BRIX, S. ; SPORER, T. ; KUSTER, M.: *Schutzrecht: DE 102004061314 A1*. Anmeldedatum: 20.12.2004. – Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e.V., München
- [43] BEER, D. ; LIEBETRAU, M. J. L. J. Lubkowitz: Psychoacoustical Bandwidth Extension of Lower Frequencies. In: *Presented at the 127th AES Convention, New York* (2009)
- [44] BEER, D. ; MAUER, S. ; BRIX, S. ; PEISSIG, J.: Flat Panel Loudspeaker Consisting of an Array of Miniature Transducers. In: *126th AES Convention, Munich* (2009)
- [45] BEER, D. ; SCHUSTER, M. ; JAHR, M. ; REICH, A.: The air spring effect of flat panel speakers. In: *124th AES Convention, Amsterdam* (2008)
- [46] BEER, D. ; SPORER, T. ; LIEBETRAU, J. ; GEHLHAAR, T. ; HAHLWEG, C. ; LUBKOWITZ, M. ; MICHEL, H. Schneider ; WASSERBERG, K. ; WÜLKNITZ, J.: Psychoakustische Bandbreitenerweiterung bei Schallwandlern im Tieftonbereich. In: *25. Tonmeistertagung, Leipzig* (2008), S. 320–335
- [47] BEER, D. ; STRAUSS, M.: Untersuchung zur Verwendung von Line-Array-Technologie für die Wellenfeld-Synthese. In: *DAGA07, Stuttgart* (2007)
- [48] BENECKE, H.: *Schutzrecht: DE 739326*. Anmeldedatum: 08.10.1936. – Telefunken GmbH, Berlin-Zehlendorf
- [49] BENSON, J.: An Introduction to the Design of Filtered Loudspeaker Systems. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 23 (1975), S. 536–545
- [50] BENZ-TZUR, D. ; COLLOMS, M.: The Effect of MaxxBass Psychoacoustic Bass Enhancement on Loudspeaker Design. In: *106th AES Convention, Munich* (1999)

Literaturverzeichnis

- [51] BERANEK, L.: *Acoustics*. Acoustic Society of America, 1996
- [52] BERGTOLD, F.: *Schall und Klang - Leitfaden der Elektroakustik für Architekten, Elektrotechniker und Studierende*. München und Berlin, 1939
- [53] BERKHOUT, J. A. ; DE VRIES, D.: Acoustic holography for sound control. In: *86th AES Convention, Hamburg* (1989)
- [54] BORWICK, J.: *Loudspeaker and Headphone Handbook*. Focal Press, imprint of Butterworth-Heinemann, 2001
- [55] BREWS, M. R. ; HAWKSFORD, J. M. Application of the geometric theory of diffraction (GTD) to diffraction at the edges of loudspeaker baffles. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 34 (1986), S. 771–779
- [56] BRINKMANN, U.: *Gebrauchsmuster: 20007958 U1*. Anmeldedatum: 2000
- [57] BRIX, S. ; SPORER, T. ; PLOGSTIES, J.: CARROUSO - An European Approach to 3D-Audio. In: *110th AES Convention, Amsterdam* (2001)
- [58] BROCKHAUS-REDAKTION: *Brockhaus - Die Enzyklopädie: in 30 Bänden*. 21. Brockhaus-Verlag Leipzig - Mannheim, 2005-2007
- [59] BROWNSCOBE, P.: *Schutzrecht: US 2,810,021*. Anmeldedatum: 05.01.1955. – Chatham, USA
- [60] BROWNSCOBE, P.: *Schutzrecht: US 2,846,520*. Anmeldedatum: 22.11.1955. – Chatham, USA
- [61] BSCHORR, O.: *Schutzrecht: DE 10,046,059 A1*. Anmeldedatum: 18.09.2000
- [62] COLICH, D.: *White Paper - Planar Magnetic Surface Arrays Explained*. http://www.getmad.com/index_tech.html. – Zugriffsdatum: 26.04.2006
- [63] COLICH, D.: MAD-Planar Magnetic Surface Array Explained / HPV Technologies LLC. 17.08.2006. – Forschungsbericht
- [64] CREMER, L. ; HECKL, M.: *Körperschall - Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. 2. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1996
- [65] CREMER, L. ; MÖSER, M.: *Technische Akustik*. Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg, 2003
- [66] DANIEL, H.: *Physik 2 - Elektrodynamik, Relativistische Physik*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 1997
- [67] D'APPOLITO, J.: A geometric approach to eliminating lobing error in multiway loudspeakers. In: *74th AES Convention, New York* (1983)
- [68] D'APPOLITO, J.: *Lautsprecher Messtechnik*. Elektor-Verlag, Aachen, 1999
- [69] DE BOER, A. ; VEGT, J.: *Schutzrecht: NL 7703836*. Anmeldedatum: 07.04.1977. – Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven

- [70] DE POORTERE, G. ; POLISSET, M. ; AARTS, R.: *Schutzrecht: US 6134330*. Anmeldung 1999. – U.S. Philips Corporation
- [71] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR AKUSTIK: DEGA-Empfehlung 101 - Akustische Wellen und Felder. (2006)
- [72] DICKASON, V.: *Lautsprecherbau*. 6. Elektor-Verlag Aachen, 2000
- [73] DIETRICH, D.: Neue Waffen: Infraschall? - Die merkwürdigen Experimente des Professors Gavreau. In: *Die Zeit* 5 (02.02.1968). www.zeit.de/1968/Neue-Waffe-Infraschall
- [74] DIETZ ; BOTHE ; BAUCH: *Schutzrecht: DE 484,872*. Anmeldedatum: 27.02.1929
- [75] DIJKSTRA, K. ; VIDEK, P. B. ; HUIZINGA, J.: *Schutzrecht: EP 0,123,359 A1*. Anmeldedatum: 31.10.1984. – Philips NV, Niederlande
- [76] DOUBT, S.: *Schutzrecht: US 2,602,860*. Anmeldedatum: 18.11.1947
- [77] EBERLE, G ; SCHMIDT, H. ; EISENMENGER, W.: Piezoelectric Polymer Electrets. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* (1996), Nr. 5, S. 624–646
- [78] EHRIG, L.: Untersuchung flacher, elektromechanischer Schallwiedergabestrukturen. In: *Diplomarbeit am Fraunhofer IDMT in Kooperation mit der TU Dresden* (2009)
- [79] EVEREST, F. A.: *Master Handbook of Acoustics*. 4. McGraw-Hill, New York, 2001
- [80] FASOLD, W. ; VERES, E.: *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. 1. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1998
- [81] FASOLD, W. ET AL: *Taschenbuch Akustik*. VEB Verlag Technik Berlin, 1984
- [82] FASTL, H. ; ZWICKER, E.: *Psychoacoustics - Facts and Models*. 3. Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg, 2007
- [83] FISCHER, F. ; LICHTER, H.: *Tonfilm - Aufnahme und Wiedergabe nach dem Klangfilm-Verfahren (System Klangfilm-Tobis)*. Hirzel-Verlag Leipzig, 1931. – Herausgegeben für die Klangfilm GmbH Berlin
- [84] FRANSSEN, N.: *Schutzrecht: EP 0034844 A1*. Anmeldedatum: 02.02.1981. – N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Niederlande
- [85] FRANSSEN, N.: *Schutzrecht: DE 1,091,771*. Anmeldedatum: 27.10.1960. – N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Niederlande
- [86] FRANZ, D.: *Elektroakustik*. Franzis-Verlag GmbH, München, 1990
- [87] FREDERICK, H.: *Schutzrecht: US 1,955,800*. Anmeldedatum: 05.05.1923
- [88] GAMZO, R. ; FREI, E.: *Schutzrecht: DE 1,094,802*. Anmeldedatum: 07.03.1958
- [89] GAN, W. ; KUO, S. ; THO, C.: Virtual Bass for Home Entertainment, Multimedia PC, Game Station and Portable Audio Systems. In: *IEEE* 47 (2001), S. 787–794

Literaturverzeichnis

- [90] GAUTSCHI, G.: *Piezoelectric Sensorics*. 1. Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg, 2002
- [91] GAVREAU, V.: *Schutzrecht: FR 1,111,527*. Anmeldedatum: 02.03.1954
- [92] GÄDTKE, M.: *Laborfoto Bändchenlautsprecher*. http://www.michaelgaedtke.de/SubMenu_Lautsprecher/Ribbon_1.htm. – Zugriffsdatum: 23.05.2009
- [93] GEHARD-MULTHAUPT, R.: Less can be More - Holes in Polymers lead to a New Paradigm of Piezoelectric Materials for Electret Transducers. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* (2002), Nr. 5, S. 850–859
- [94] GEMEINSCHAFTSINITIATIVE VON VDT, IRT, SRT (Hrsg.): *Hörbedingungen und Wiedergabeanordnungen für Mehrkanal-Stereofonie*. 01. Gemeinschaftsinitiative von VDT, IRT, SRT, 01 2002
- [95] GERLACH, E.: *Schutzrecht: DE 421,038*. Anmeldedatum: 13.01.1923. – Siemens & Halske AG, Berlin-Siemensstadt
- [96] GOBRECHT, H. ; GROBRECHT, H. ; GROBRECHT, K.: *Lehrbuch der Experimentalphysik*. Bd. 1. 10. Walter de Gruyter & Co. Berlin, 1990
- [97] GORDON, T.: *Schutzrecht: US 4,330,691*. Anmeldedatum: 31.01.1980
- [98] GÖRNE, T.: *Tontechnik*. 2. Hanser - Verlag, 2006
- [99] GSF - FORSCHUNGSZENTRUM FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT: *Gesundheitsrisiko Lärm: Krach, der uns krank macht*. www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-1/2952.pdf. – Zugriffsdatum: 05.10.2009
- [100] GUSKI, R.: *Wahrnehmen, ein Lehrbuch*. Kohlhammer, 1996
- [101] HAAS, H.: Über den Einfluss eines Einfach-Echos auf die Hörsamkeit von Sprache. In: *Acustica 1* (1951), S. 49
- [102] HAGMAN, P.: *Schutzrecht: US 7,292,702 B2*. Anmeldedatum: 06.11.2007
- [103] HAYDEN, A.: Acoustic Research and the Acoustic Suspension Loudspeaker. In: *Antique Radio Classified* Oct.06 (2006). – Web Edition
- [104] HELLBRÜCK, J. ; ELLERMEIER, W.: *Hören - Physiologie, Psychologie und Pathologie*. 2. Hogrefe - Verlag, Göttingen, Bern, Toronto, Seattle, 2004
- [105] HELLON, J.: *Schutzrecht: US 2744584*. Anmeldedatum: 19.06.1952
- [106] HERING, E. ; MARTIN, R. ; STOHRER, M.: *Physik für Ingenieure*. 8. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2002
- [107] HEWLETT, W.: *Schutzrecht: US 1,537,671*. Anmeldedatum: 09.09.1920
- [108] HOUTSMA, A.: Perception of musical pitch. In: *Journal of the Acoustic Society of America* 48 (1970), S. 88

- [109] HPV TECHNOLOGIES LLC (Hrsg.): *MAD-LT PMS96 Long Throw Planar Magnetic Speaker*. HPV Technologies LLC, 2007
- [110] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU) (Hrsg.): *Recommendation ITU-R BS.1116: Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems*. International Telecommunication Union (ITU), 1997
- [111] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU) (Hrsg.): *Recommendation ITU-R BS.1534-1: Method for the subjective assessment of intermediate level coding systems*. International Telecommunication Union (ITU), 2003
- [112] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU) (Hrsg.): *Recommendation ITU-R BS.775-2: Multichannel stereophonic sound system with and without accompanying picture*. International Telecommunication Union (ITU), 2006
- [113] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU) (Hrsg.): *Recommendation ITU-T P.800: Methods for subjective determination of transmission quality*. International Telecommunication Union (ITU), 2006
- [114] KALUSCHE, H.: *Schutzrecht: DE 883,299*. Anmeldedatum: 18.12.1949. – Siemens & Halske AG, Berlin, Deutschland
- [115] KATSUMASA, S. ; MITSUHIKO, S. ; HOROYUKI, T. ; KAZUhide, S. ; SHUJI, S. ; TSUNEO, T. ; SEIICHI, I. ; SAWAKO, U. ; YOICHI, K. ; SHUICHI, O.: *Schutzrecht: JP 63077299 A*. Anmeldedatum: 19.09.1986. – Matsushita Electric Ind. Co. Ltd., Japan
- [116] KAWAI, H.: The Piezoelectricity of Poly(vinylidene Fluoride). In: *Japanese Journal of Applied Physics* 8 (1969), S. 975–976
- [117] KEELE, D.: Low Frequency Loudspeaker Assessment by Nearfield Sound Pressure Measurement. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 22 (1974), S. 154–162
- [118] KEELE, D.: Effective Performance of Bessel Arrays. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 10 (1990), S. 723–748
- [119] KEELE, D.: Comparison of Direct-Radiator Loudspeaker System Nominal Power Efficiency vs. True Efficiency with High-BI Drivers. In: *115th AES Convention, New York, USA* (2003)
- [120] KINSLER, L. ; FREY, A. ; COPPENS, A. ; SANDERS, J.: *Fundamentals of Acoustics*. 4. John Wiley & Sons, 2000
- [121] KIRJAVAINEN, K.: *Schutzrecht: US 4654546*. Anmeldedatum: 31.05.1984
- [122] KLAYMAN, A.: *Schutzrecht: US 6285767 B1*. Anmeldung: 04.09.1998. – SRS Labs, Inc.
- [123] KLEBER, W. ; BAUTSCH, H.-J. ; BOHM, J. ; KLEBER, I.: *Einführung in die Kristallographie*. Verlag Technik, Berlin, 1990

Literaturverzeichnis

- [124] KLEIN, S.: *Schutzrecht: US2,768,246*. Anmeldedatum: 24.01.1952
- [125] KLINGER, H.: *Lautsprecher Baubuch*. Frazis-Verlag GmbH München, 1989
- [126] KLIPPEL, W.: *Displacement Limits due to Driver Nonlinearities - Application Note to the Klippel R&D System*. Klippel GmbH, 2008
- [127] KRYLOV, V. V. ; TILMAN, F.: Acoustic 'black holes' for flexural waves as effective vibration dampers. In: *Journal of Sound and Vibration* 274 (2003), S. 605–619
- [128] KÜSTER, J.: MAD-Paradigmenwechsel im Beschallungssektor? In: *Production Partner* 12 (2003), S. 32–40
- [129] LANDER, D.: A Glorious Time: AR's Edgar Villchur and Roy Allison, Interviews. In: *Stereophile* January, 2005 (2005)
- [130] LANDER, D.: Technology Makes Music - A short, distortionfree history of high fidelity. In: *Invention & Technology Magazine* 6 (Spring/Summer 1990)
- [131] LARSEN, E. ; AARTS, R.: *Audio Bandwidth Extension*. John Wiley & Sons, 2004
- [132] LEACH, M.: Active Equalization of Closed-Box Loudspeaker Systems. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 29 (1981), S. 405–407
- [133] LEACH, M.: A Generalized Active Equalizer for Closed-Box Loudspeaker Systems. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 38 (1990), S. 142–146
- [134] LEE, F.: *Schutzrecht: US 1,622,039*. Anmeldedatum: 02.05.1925
- [135] LEKKALA, J. ; PAAJANEN, M.: EMFi - New Electret Material for Sensors and Actuators. In: *10th International Symposium on Electrets, IEEE* (1999), S. 743–746
- [136] LENK, A. ; PFEIFER, G. ; WERTHSCHÜTZKY, R.: *Elektromechanische Systeme*. 1. Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg, 2001
- [137] LILIENFELD, J.: *Schutzrecht: US 1,723,244*. Anmeldedatum: 19.03.1925
- [138] LINDENBLAD, N.: *Schutzrecht: US 1,685,075*. Anmeldedatum: 17.08.1927
- [139] LINEARX: *Reference Manual - Enclosure Shop, LEAP*. Release 5, Feb. 2003
- [140] LONG, E. ; WICKERSHAM, R.: *Schutzrecht: US 4,481,662*. Anmeldedatum: 07.01.1982
- [141] LUBKOWITZ, M.: Untersuchungen psychoakustischer Effekte zur Erweiterung der Tieftonwiedergabe bei Lautsprechern. In: *Diplomarbeit am Fraunhofer IDMT in Kooperation mit der TU Ilmenau* (2009)
- [142] MAGNEPLANAR PRODUCTS (Hrsg.): *Magneplanar MG1.6/QR - Instruction Manual*. White Bear Lake, Minnesota 55110: Magneplanar Products, http://www.magnepan.com/content/binary/pdf_manuals/manual_MG16.pdf
- [143] MANGER, D.: *Email*. 04.06.2009

- [144] MANGER, J.: *Schutzrecht: DE 2,236,374*. Anmelde datum: 25.07.1972
- [145] MANGER PRODUCTS: *Manger Schallwandler Broschüre*. Manger Products, Industriestrasse 17, D97638 Mellrichstadt
- [146] MARQUISS, S.: *Schutzrecht: US 4856071*. Anmelde datum: 19.09.1988. – Electro-magnetic Research and Development
- [147] MARRS, R.: Super Compliance Update. In: *89th AES Convention, Los Angeles* (1990)
- [148] MASON, P.: *Piezoelectric crystals and their application to ultrasonics (Bell laboratories series)*. D. Van Nostrand, 1950
- [149] MASSOLLE, J.: *Schutzrecht: DE 350,437*. Anmelde datum: 09.04.1919
- [150] MASSOLLE, J. ; VOGT, H. ; ENGL, J.: *Schutzrecht: US 1,585,333*. Anmelde datum: 26.03.1925
- [151] MAUER, S.: Array aus Miniatur-schallwandlern als Flachlautsprecher. In: *Diplomarbeit am Fraunhofer IDMT in Kooperation mit der TU Ilmenau* (2009)
- [152] MÜCKLICH, F.: Versuch: Inverser Piezoeffekt. In: *natworking - advanced materials* www.natworking-advanced-materials.de
- [153] MEYER, E.: *Physikalische und Technische Akustik*. Friedrich Vieweg & Sohn GmbH Verlag, 1967
- [154] MEYER, E.: *Schutzrecht: DE*. Anmelde datum: 09.01.1967. – Isophon-Werke GmbH, Berlin, Deutschland
- [155] MORSE, P. ; INGARD, K.: *Theoretical Acoustics*. Princeton University Press, Princeton, 1986
- [156] MUSIC-ELECTRONIC GEITHAIN: *High-End-Dreiwege-Koaxiallautsprecher der Referenzklasse mit nierenförmiger Bass-Richtcharakteristik ME 901KA*. <http://www.me-geithain.de/download/me901ka.pdf>. – Zugriffsdatum: 05.10.2009
- [157] NEWELL, P. ; HOLLAND, K.: *Loudspeakers*. Elsevier, 2007
- [158] NITZSCHE, K. ; ULLRICH, H.-J.: *Funktionswerkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik*. 2. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993
- [159] NORRIS, E.: *Schutzrecht: US 5,889,870*. Anmelde datum: 17.06.1996
- [160] NUBERT, G.: Technik "satt" - Von Frequenzlöchern und anderen Bösewichten. (2008), S. 3–5
- [161] NUSKE, A. ; SCHIESSLE, E.: *Schutzrecht: DE 10,058,698 B4*. Anmelde datum: 26.11.2000
- [162] OHGA, J. ; MATSUSHITA, K. ; TAKEI, T. ; MORIYAMA, N.: Rectangular Loudspeaker by Tuck Shape PVDF Bimorph. IEEE 2002 (2002), S. 231–234. – presented at the 11th International Symposium on Electrets

Literaturverzeichnis

- [163] OLNEY, B.: *Schutzrecht: US 2,031,500*. Anmeldedatum: 17.09.1934. – The Stromberg-Carlson Telephone Manufacturing Company, Rochester, USA
- [164] OLSON, H.: Direct Radiator Loudspeaker Enclosures. In: *2nd Annual Convention of the AES, Oct.1950* (1950)
- [165] OLSON, H.: *Schutzrecht: US 2,688,373*. Anmeldedatum: 01.05.1951. – Radio Corporation of America,
- [166] OLSON, H. ; PRESTON, J.: *Schutzrecht: US 2,490,466*. Anmeldedatum: 19.07.1944. – Radio Corporation of America, Delaware, USA
- [167] OUCHI, T. ; OHGA, J. ; TAKEI, T. ; MORIYAMA, N.: Wideband piezoelectric rectangular loudspeaker using a tuck shape PVDF bimorph. (2005). – 119th AES Convention, New York
- [168] PANPHONICS: *Panphonics S60 Audioelement Bedienungsanleitung*
- [169] PAPULA, L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler - Band 2*. 10. Vieweg & Sohn Verlags-GmbH, Braunschweig, Wiesbaden, 2001
- [170] PARKER, J.: *Schutzrecht: US 2,632,055*. Anmeldedatum: 18.04.1949
- [171] PAULUN, P.: Durch Ton ausgeschaltet. In: *Die Zeit Online* (05.06.2007), 5-6. <http://www.zeit.de/online/2007/23/bg-militaer-musik?1>
- [172] PI-CERAMIC: Tutorium: Nanopositionieren mit Piezos / Pi Ceramic GmbH. – Forschungsbericht
- [173] POLISSET, C. ; TEO, H. ; TANGHE, L. ; ODETTE SANINT MOULIN DE, R.: *Schutzrecht: US 0036278 A1*. Anmeldung: 10.04.2001. – U.S. Philips Corporation
- [174] POMPEI, F.: *Schutzrecht: US 6,775,388 B1*. Anmeldedatum: 27.04.1999
- [175] PROKOFIEVA, E. ; HOROSHENKOV, V. K. ; HARRIS, N.: Intensity measurements of acoustic emission from a DML panel. In: *112th AES Convention, Munich* (2002)
- [176] QUAD ELECTROACOUSTICS LTD. (Hrsg.): *ESL Series - User Manual, ELS 2805, ELS 2905*. Quad Electroacoustics Ltd.
- [177] QUINBY, E.: *Schutzrecht: US 1,887,185*. Anmeldedatum: 20.02.1929
- [178] RAMSEY, G.: *Schutzrecht: US 1,680,694*. Anmeldedatum: 21.04.1924
- [179] RAUER, M.: *Email*. – 06.05.2008
- [180] RICE, C.: *Schutzrecht: US 1631646*. Anmeldedatum: 27.03.1924
- [181] RICHIE, R.: *Schutzrecht: US 4,296,280*. Anmeldedatum: 17.05.1980
- [182] RIEGGER, H.: *Schutzrecht: DE 410,114*. Anmeldedatum: 08.06.1923. – Siemens & Halske AG, Siemensstadt bei Berlin

- [183] RITSMA, R.: Frequencies dominant in the perception of the pitch of complex sounds. In: *Journal of the Acoustic Society of America* 42 (1967), S. 191
- [184] ROBERTS, M.: Exciter Design for Distributed Mode Loudspeakers. In: *104th AES Convention, Amsterdam* (1998), May
- [185] ROEDERER, J.: *Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik*. Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg, 2000
- [186] ROOZEN, N. ; VAEL, J. ; NIEUWENDIJK, J.: Reduction of Bass-Reflex Port Nonlinearities by Optimizing the Port Geometry. In: *104th AES Convention, Amsterdam* (1998)
- [187] RUBEN, S.: *Schutzrecht: US1,752,811*. Anmeldedatum: 08.04.1922. – Ruben Patents Company
- [188] SAHM, H.: *Arbeitsbuch für Lautsprecher-Systeme*. Franzis-Verlag GmbH, München, 1987
- [189] SALVATTI, A. ; BUTTON, D.: Maximizing Performance from Loudspeaker Ports. In: *105th AES Convention, San Francisco* (1998)
- [190] SANDERS, R. R.: *The Electrostatic Loudspeaker Design Cookbook*. first preprint edition. Audio Amateurs Press, Peterborough, New Hampshire, 2004
- [191] SCHAUMBERGER, A.: Impulse Measurement Techniques for Quality Determination in Hi-Fi Equipment, with Special Emphasis on Loudspeakers. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 19 (1971), S. 101–107
- [192] SCHLENKER, B. ; SPORER, T. ; BRANDENBURG, K.: *Schutzrecht: DE 10314506 B3*. Anmeldedatum: 31.03.2004. – Fraunhofer-Gesellschaft e.V.
- [193] SCHOTTKY, Walter: Vorführung eines neuen Lautsprechers, 1. In: *Physikalische Zeitschrift* 25 (1924), S. 672–675
- [194] SEABERT, J.: *Schutzrecht: US 1,877,992*. Anmeldedatum: 06.09.1930
- [195] SHASHOUA, M. ; GLOTTER, D.: *Schutzrecht: US5930373*. Anmeldedatum: 04.04.1997
- [196] SHELTON, J. ; GEORGE, R.: *Schutzrecht: UK 2,122,051*. Anmeldedatum: 01.06.1982
- [197] SIETZ, H. ; LUBBADEH, J.: Die wirkungslosen Hightech-Waffen der Reeder. In: *Spiegel Online* (19.12.2008)
- [198] SMALL, R.: Closed-Box Loudspeaker Systems - Part 1: Analysis. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 20 (1972), S. 798–808
- [199] SMALL, R.: Vented-Box Loudspeaker Systems Part II: Large-Signal Analysis. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 21 (1973), S. 438–444
- [200] SMALL, R. ; MARGOLIS, G.: Personal Calculator Programs for Approximate Ventres-Box and Closed-Box Loudspeaker System Design. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 29 (1981), S. 421–441

Literaturverzeichnis

- [201] SMOORENBURG: Pitch perception of two-frequency stimuli. In: *Journal of the Acoustic Society of America* 48 (1970), S. 924
- [202] SOCIETY OF MOTION PICTURE AND TELEVISION ENGINEERS (SMPTE): Proposed SMPTE Recommended Practice (RP 200) - Relative and Absolute Sound Pressure Levels for Motion-Picture Multichannel Sound Systems. (1999)
- [203] SOTOME, H. ; HAMAMATSU, S.: *Schutzrecht: DE 1,912,059*. Anmelde datum: 10.03.1969
- [204] SPORER, T. ; WALTHER, A. ; LIEBETRAU, J. ; BUBE, S. ; FABRIS, C. ; HOHBERGER, T. ; KÖHLER, A.: Perceptual Evaluation of Algorithms for Blind Upmix. In: *121th AES Convention, San Francisco* (2006)
- [205] SPORS, S. ; RABENSTEIN, R. ; AHRENS, J.: The Theory of Wave Field Synthesis Revisited. In: *124th AES Convention, Amsterdam* (2008)
- [206] STAGGS, V.: Transient-Response Equalization of Sealed-Box Loudspeakers. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 30 (1982), S. 906–910
- [207] START, E. ; VASTAR, V. ; DE VRIES, D.: Application of Spatial Bandwidth Reduction in Wave Field Synthesis. In: *98th AES Convention, Amsterdam* (1995)
- [208] STENZEL, H. ; BRONSZE, O.: *Leitfaden zur Berechnung von Schallvorgängen*. 2. Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg, 1958
- [209] SUGIMOTO, T. ; ONO, K. ; KURONZUMI, K. ; ANDO, A. ; HARA, A. ; MORITA, Y. ; MIURA, A.: Loudspeaker for Flexible Displays. In: *123rd AES Convention, New York* (2007)
- [210] TAKESHI, N. ; KENJI, I. ; MASAYUKI, I. ; SHIGEO, Y. ; TSUTOMU, Y. ; MASAAKI, A. ; HIDEHARU, Y. ; HIROSHI, I. ; SADA AKI, S.: *Schutzrecht: EP 1,489,881 A1*. Anmelde datum: 28.02.2003. – The Furukawa EL., Co., Ltd
- [211] TAKEWA, H. ; SERIKAWA, M. ; ISHIKAWA, S. ; USUKI, S. ; KIMURA, Y. ; OBATA, S.: *Schutzrecht: US 4,899,390*. Anmelde datum: 15.09.1987. – Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Japan
- [212] TAN, S. ; GAN, W. ; THO, C. ; YANG, J.: Application of virtual bass in audio crosstalk cancellation. In: *IEEE* 36 (2000), S. 1500–1501
- [213] TANAKA, S.: *Schutzrecht: US 6,574,346*. Anmelde datum: 24.04.2000. – Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Kadoma, Japan
- [214] TANAKA, T. ; TAKEWA, W. ; TAKAYAMA, S. ; SERIKAWA, M.: A loudspeaker system with large area diaphragm and ultra thin enclosure (audio flat panel). In: *2nd Regional AES Convention, Tokyo* (1987)
- [215] TAYLOR, P.: *Schutzrecht: GB 817,899*. Anmelde datum: 12.03.1957
- [216] TELEFUNKEN GMBH: Eine neue Lautsprecherart: die Flachlautsprecher. In: *Nachrichten aus der Elektroakustik* (1938)

- [217] TERHARDT, E.: *Akustische Kommunikation*. Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg, 1998
- [218] THIELE, A.: Loudspeakers in Vented Boxes: Part 1. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 19 (1971), S. 382–392
- [219] THIELE, A.: Loudspeakers in Vented Boxes: Part 2. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 19 (1971), S. 471–483
- [220] THURAS, A.: *Schutzrecht: US 1,869,178*. Anmeldedatum: 15.08.1930. – Bell Telephone Laboratories, Inc., New York
- [221] TIBBETTS, G.: *Schutzrecht: US 3,164,686*. Anmeldedatum: 21.09.1959
- [222] TIMMERMANN, B.: Hochpassgefilterte Tieftonlautsprecher. In: *Hobby HiFi* 5 (2000), S. 24
- [223] TIMMERMANN, B.: Die Kante geben? - Optimale Kantenformen an Lautsprechergehäusen. In: *Hobby HiFi* 5 (2001), S. 70–73
- [224] TIMMERMANN, B.: Bassreflex-Gehäuse in Sekunden. In: *Hobby HiFi* 5 (2003), S. 50–51
- [225] TIMMERMANN, B.: Morion mit geschlossenem Gehäuse und Hochpassfilterung. In: *Hobby HiFi* 4 (2003), S. 31
- [226] TIMMERMANN, B.: Doppeltes Spiel - Neue Erkenntnisse über Compound-Lautsprechersysteme und deren Berechnung. In: *Hobby HiFi* 3 (2004), S. 51–52
- [227] TIMMERMANN, B.: Der Kondensator macht's. In: *Hobby HiFi* 3 (2004), S. 38
- [228] TIMMERMANN, B.: Undichtetes Gehäuse - mit Recht! In: *Hobby HiFi spezial* 1 (2004), S. 11
- [229] TIMMERMANN, B.: Bandpass mit Hochpass. In: *Hobby HiFi* 6 (2006), S. 46
- [230] TIMMERMANN, B.: Der Kondensator bringt's erst recht bei Bassreflex. In: *Hobby HiFi* 1 (2008), S. 44
- [231] TIPLER, A. P. ; MOSCA, G.: *Physik - Für Wissenschaftler und Ingenieure*. Spektrum Akademischer Verlag, Imprint vom Springer Verlag, 2007
- [232] TOOLE, E. F. ; DEVANTIER, A.: MRS Whitepaper - Looks at the benefits of CMMD technology in greater detail. / Infinity - Harman International Company. Version: 2005. <http://www.infinityloudspeakers.com.au/mrs.html>. 2005. – Whitepaper. – Zugriffsdatum: 22.05.2009
- [233] TOOLE, Floyd E.: *Sound Reproduction - Loudspeakers and Rooms*. Focal Press, imprint of Elsevier, 2008
- [234] TRENDELENBURG, F.: Über Schallfeldprobleme. In: *Die Wissenschaften* 13 (1927), S. 297–304

Literaturverzeichnis

- [235] TRENDELENBURG, F.: *Akustik*. 3. Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg, 1961
- [236] VANDERKOOY, J.: A Simple Theory of Cabinet Edge Diffraction. In: *88th AES Convention, Montreux* (1990)
- [237] VANDERKOOY, J. ; BOERS, M.: High-Efficiency Direct-Radiator Loudspeaker Systems. In: *113th AES Convention, Los Angeles, USA* (2002)
- [238] VANDERKOOY, J. ; BOERS, P. ; AARTS, R.: Direct-Radiator Loudspeaker Systems with High BL. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 51 (2003), S. 625–634
- [239] VEIT, I.: *Technische Akustik*. 5. Vogel Buchverlag Würzburg, 1996
- [240] VERHAGEN, J.: *Ribbon Loudspeakers*. Audio Amateurs Press, Peterborough, New Hampshire, 2003
- [241] VILLCHUR, E.: Problems of Bass Reproduction in Loudspeakers. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 5 (1957), S. 122–126
- [242] VILLCHUR, E.: *Reproduction of Sound*. Dover Publications, Inc., New York, 1965
- [243] VILLCHUR, E.: *Schutzrecht: US 27,755,309*. Anmelddatum: 15.03.1954
- [244] VON RECKLINGHAUSEN, D.: Low Frequency Range Extension of Loudspeakers. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 33 (1985), S. 440–446
- [245] VON RECKLINGHAUSEN, D.: *Schutzrecht: US 4,383,134*. Anmelddatum: 10.03.1980. – Electro Audio Dynamics, Inc. Great Neck, USA
- [246] VREELAND, F.: *Schutzrecht: US 1,239,852*. Anmelddatum: 02.01.1907. – Vreeland Apparatus Company, Inc., New York
- [247] WAGNER, R.: *Electrostatic Loudspeaker - Design and Construction*. Audio Amateurs Press, Peterborough, New Hampshire, 1993
- [248] WALKER, P.: New Developments In Electrostatic Loudspeakers. In: *63rd AES Convention, Los Angeles, USA* (1979)
- [249] WARD, B.: *Schutzrecht: US 4,657,108*. Anmelddatum: 02..03.1984
- [250] WATTERS, B. ; KURZE, G.: *Schutzrecht: US 3,347,335*. Anmelddatum: 24.03.1959
- [251] WHITAKER, S.: *Schutzrecht: US 7,353,907*. Anmelddatum: 08.04.2008
- [252] WÖLFL, P. ; SCHINDLER, A.: Der Lautsprecher als Dickenschwinger. In: *Studienarbeit am Fraunhofer IDMT* (2008)
- [253] WÜLKNITZ, J. ; ZENKERT, S.: Untersuchung verschiedener Dickenschwingeransätze. In: *Studienarbeit am Fraunhofer IDMT* (2009)
- [254] WOLFF, I.: *Schutzrecht: US 1,758,993*. Anmelddatum: 17.11.1928

- [255] WRIGHT, J.: Fundamentals of Diffraction. In: *100th AES Convention, Copenhagen* (1996)
- [256] WRIGHT, J.: The Virtual Loudspeaker Cabinet. In: *111th AES Convention, New York* (2001)
- [257] WRIGHT, J.: *Schutzrecht: GB 2,378,082 A*. Anmeldedatum: 26.07.2001
- [258] XIAO, L. ; CHEN, Z. ; FENG, C. ; LIU, L. ; BEAI, Z. ; WANG, Y. ; QIAN, L. ; ZHAN, Y. ; LI, Q. ; JIANG, K. ; FAN, S.: Flexible, Stretchable, transparent Carbon Nanotube Thin Film Loudspeakers. In: *Nano Letters* 8 (2008), S. 4538–4545
- [259] YOSHIO, K: *Schutzrecht: EP 1,420,609 A1*. Anmeldedatum: 20.06.2002. – Foster Electric Co., Ltd., Tokyo
- [260] ZHANG, S. ; SHEN, Y. ; SHEN, X.: Positions Effect of Multi Exciters and the Optimization on Sound Pressure Responses of Distributed Mode Loudspeaker. In: *120th AES Convention, Paris* (2006)
- [261] ZOLLNER, M. ; ZWICKER, E.: *Elektroakustik*. 3. Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1998
- [262] ZWICKER, E.: *Psychoakustik*. Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg, 1982

Abbildungsverzeichnis

1.1	Lautsprecheranordnung für Fünfkanal-Surround entsprechend der ITU-Empfehlung BS.775 mit Videoleinwand nach [112]	2
1.2	WFS-System des Fraunhofer IDMT im IOSONO-Demoraum [27]	2
1.3	Schematische Darstellung einer Wandlautsprecher- (a) und einer Deckenlautsprecherkonstruktion (b) [97], [251]	3
1.4	Flachlautsprecher Ela L 605 des Herstellers Telefunken aus dem Jahr 1938 mit nur 5 cm Bautiefe, installiert an einer Hauswand (a) [52], vergrößerte Ansicht (b) [25]	3
2.1	Lautsprecher-Hörer-Konfiguration mit Schallreflexionen von der Rück- und Seitenwand	7
3.1	Schnittansicht des Ohres, nach [104, S. 92]	14
3.2	Schematische Darstellung der Wanderwellenausbreitung in der Basilarmembran (a) und Entstehung der maximalen Membranauslenkung durch Hüllkurvenbildung (b) gemäß der Ortstheorie, nach [100]	15
3.3	Schematische Darstellung der neuronalen Antwort (b) auf ein Schallsignal (a) entsprechend der Salventheorie, nach [104, S. 119]	16
3.4	100 Hz Differenzton durch Ausbildung einer Einhüllenden aus zwei dargebotenen Sinussignalen mit den Frequenzen 1,2 kHz und 1,3 kHz	17
3.5	Trotz des fehlenden Grundtones findet beim Phänomen der virtuellen Tonhöhe eine Grundtonwahrnehmung mit Hilfe des Obertonspektrums statt [104, S. 123].	17
3.6	Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem reproduzierten Frequenzbereich (Abszisse) und den wahrgenommenen Residualtönen (Ordinate). Die Darbietung Harmonischer innerhalb des schraffierten Bereiches führt zur Wahrnehmung eines Residualtones [82, S. 121].	18
3.7	Kolbenschwinger (a), Biegeschwinger (b), Dicken- bzw. Längenschwinger (c)	19
3.8	Approximation der Kolbenmembran durch Kugelstrahler 1. Ordnung (a) zur Herleitung der Schallabstrahlung einer Kolbenmembran (b)	19

3.9	Schematische Darstellung der Biegewellenausbreitung mit abnehmenden Schwingungsbäuchen infolge innerer Dämpfung (a) und mit gleichbleibenden Schwingungsbäuchen infolge fehlender Dämpfung (b), die Additionszeichen kennzeichnen Überdruck- und die Subtraktionszeichen Unterdruckgebiete. Modell zur Herleitung der Abstrahlcharakteristik angelehnt an [64, S. 487] (c)	22
3.10	Schematische Darstellung der Schallabstrahlung für $\lambda_B < \lambda_0$ (a), für $\lambda_B = \lambda_0$ (b) und für $\lambda_B > \lambda_0$ (c), Schallabstrahlung ist nur für eine Membranseite dargestellt, sie gilt für beide, Additionszeichen kennzeichnen Überdruck- und Subtraktionszeichen Unterdruckgebiete . .	23
3.11	Schematische Darstellung des Dicken- bzw. Längenschwingers (a) und Modell zur Herleitung der Schallabstrahlung für den Fall, dass Dicken- und Längenänderung gekoppelt sind (b, c)	25
3.12	Besselfunktion 1. Ordnung (a) und Struvefunktion 1. Ordnung (b) approximiert durch Reihenentwicklung nach [261, S. 358ff.]	28
3.13	Strahlungsimpedanz der Kolbenmembran in unendlicher Schallwand. Numerisch ermittelt (liniert), angenähert durch einfache Funktionen (gepunktet), vgl. [261, S. 100]	29
3.14	Berechneter Schalldruckpegel einer $0,11 \text{ m}^2$ großen Kolbenmembran in einer unendlichen Schallwand für $ka < \sqrt{2}$ (Kurven unter 500 Hz) und $ka > \sqrt{2}$ (Kurven über 900 Hz) in 3 m Entfernung	30
3.15	Abstrahlcharakteristik von zwei gleich angesteuerten Kugelstrahlern, deren Abstand $(1/8)\lambda_0$ (a) und $3\lambda_0$ (b) beträgt, nach [54, S. 18] .	31
3.16	Schematische Darstellung der Schallbeugung und -reflexion in Abhängigkeit von der Größe des Hindernisses	32
3.17	Schematische Darstellung der Schallabstrahlung in einen Halbraum (a) und in einen Vollraum (b) und die damit verbundenen Pegelunterschiede (c)	34
3.18	Modell zur Erklärung der Beugungsvorgänge an den Kanten eines Lautsprechergehäuses (a) nach [139] und Gedankenmodell zur Abschätzung des Kammfiltereffektes (b) nach [255]	34
4.1	Flachlautsprecher mit konischer Membranform (a) [203], (b) [48] . . .	38
4.2	Schematische Darstellung des elektrodynamischen Prinzips (a) und kreisförmige Ausführung (b), wie sie bei konventionellen Konuslautsprechern vorhanden sind.	39
4.3	Riesenblatthaller der Siemens & Halske AG (a) [83], Blatthaller EMC 5300 von Electro Magnetic Corporation (b) und ein MRS-Chassis der Firma Infinity nach dem Blatthallerprinzip (c) [232]	39
4.4	Schematische Darstellung des Blatthaller-Prinzips in der Draufsicht (a) und im Schnitt (b) nach [182], [41]	40
4.5	Schematische Darstellung des magnetostatischen Prinzips in der Frontansicht (a) und in der Schnittansicht (b)	41
4.6	Vollbereichsmagnetostat MG1.6 von Magnepan für den Heimbereich (a) [16] und Vollbereichsmagnetostaten-Array MAD LT-PMS-96 der Firma HPV Technologies LLC (b) aus MAD-Element (c) für den Beschallungsbereich [62]	42

4.7	Schematische Darstellung des Bändchenprinzips (a) nach [239, S. 92], Selbstbau-Bändchenlautsprecher (b) [92], Hochmittelton-Bändchenlautsprecher mit magnetostatischem Tieftöner ab 600 Hz (c) [18]	43
4.8	Schematische Darstellung des Elektrostaten-Prinzips in der Frontansicht (a) und in der Schnittansicht (b)	44
4.9	Unterschiedliche Vollbereichselektrostaten: ESL-63 (a) [12], Audiostatic DCI von Audiostatic (b) [4] und Quad ESL-2805 (c) [19]	45
4.10	Schematische Darstellung des BiegeWellenwandlers entsprechend der Patentanmeldung von Bauch im Jahre 1927 (a) [38]; moderne Ausführung mit Gehäuse (b)	47
4.11	Unterschiedliche BiegeWellenwandler: DML mit Wabenkernmembran (a), DML - Imago von Fa. Elac mit Hartschaumkern [9] (b), Mangerschallwandler mit reflexionsarmer BiegeWellenmembran [7] (c)	48
4.12	Schematische Darstellung des piezoelektrischen Effektes anhand einer vereinfachten Kristallstruktur nach [123]	50
4.13	Nutzung zweier gegenpolig betriebener Längenschwinger als Lautsprecherantrieb für einen Biegeschwinger (a) und einen Kolbenschwinger (b)	51
4.14	Kolbenschwinger mit piezoelektrischen Hohlkörpern (a), realisiert durch kombinierte Biegeschwinger (b) als Antrieb	52
4.15	Lautsprechermembran aus gewellter PVDF-Folie mit 16 mm und mit 24,5 mm Faltentiefe [162]	53
4.16	Schematischer Aufbau einer EMFi Folie zur Verdeutlichung des piezoelektrischen Verhaltens im unbelasteten (a) und im belasteten Zustand (b), nach [93].	54
5.1	Schallabstrahlung eines Dipolstrahlers mit Kurzschluss-, Reflexions- und Beugungserscheinungen (a), skizzierter Amplitudenfrequenzgang eines solchen Dipols (b)	59
5.2	Gestörte Schallabstrahlung eines Dipolstrahlers in Wandnähe mit verstärkten Kurzschluss-, und Reflexions- bzw. Beugungserscheinungen (a), skizzierter Amplitudenfrequenzgang eines solchen Dipols (b).	60
5.3	Schematische Darstellung der unterschiedlichen Einflussfaktoren . .	61
5.4	Feder-Masse-Schwingermodell eines Kolbenschwingers mit Gehäuse	63
5.5	Amplitudenfrequenzgang der Auslenkung des Feder-Masse-Dämpfersystems bei verschiedenen Dämpfungsfaktoren	64
5.6	Herleitung des zu erwartenden Amplitudenfrequenzganges der abgestrahlten Wirkleistung einer Kolbenmembran in einer unendlichen Schallwand nach [261, S. 201] und [131, S. 17], ($\omega \equiv 6 \text{ dB/Okt.}$, $\omega^2 \equiv 12 \text{ dB/Okt.}$, $\omega^4 \equiv 24 \text{ dB/Okt.}$)	66
5.7	Zusammenhang zwischen der normalisierten Membranauslenkung (hier $X(j\omega)$) eines elektrodynamischen Lautsprechers in verschiedenen geschlossenen Gehäusen mit unterschiedlicher Gehäusegüte Q_{tc} und dem daraus resultierenden Amplitudenfrequenzgang (hier $G(j\omega)$), ω_c steht für die Resonanzfrequenz [198].	67

5.8	Zusammenhang zwischen Druck und Volumen in einem geschlossenen Gehäuse	70
5.9	Schematische Darstellung der Schallabstrahlung eines Gehäuselautsprechers in unmittelbarer Wandnähe	71
6.1	Zwei Gehäuseformen mit gleichem Volumen aber unterschiedlicher Gehäusetiefe, 20 cm (a), 5 cm (b)	74
6.2	Schnelleverteilung bei Viskositätsunterschieden zwischen zwei Begrenzungsflächen, z. B. Gehäusewänden, nach [51, S. 134]	75
6.3	Überführung der Flüssigkeit im Baumwollpaket in den gasförmigen Zustand bei Unterdruck (a) und Verflüssigung des Gases bei Überdruck im Lautsprechergehäuse (b), Baumwollpaket (c) [147]	76
6.4	Verwendung von Aktivkohle (a) in luftdurchlässiger Ummantelung (b) in verschiedenen Produkten von KEF Audio wie z. B. dem Subwoofer 209 (c) [2], [15]	77
6.5	Vergrößerung der Nachgiebigkeit durch Verwendung von Aktivkohle unter optimalen Bedingungen [256]	78
6.6	Lautsprecher mit Vakuumgehäuse zur Eliminierung der Luftfedersteifigkeit [161]	79
6.7	Darstellung einer gewöhnlichen (a) und einer inversen (b) Federkennlinie mit F_s als inverse Rückstellkraft und ξ als Auslenkung [75]	79
6.8	Membranaufhängungsformen mit inverser Federkennlinie (a) [154], (b) [75]	80
6.9	Realisierung einer inversen Rückstellkraft über eine Magnetvorrichtung mit Regelkreis [213]	80
6.10	Vereinfachtes Ersatzschaltbild der von der Aufhängungssteifigkeit bestimmten mechanischen Aufhängung (a) und der durch das Luftvolumen dominierten akustischen Aufhängung (b). Die Gesamtsteifigkeit des Systems bleibt dabei unverändert. Lediglich das Verhältnis von Aufhängungssteifigkeit (s_s) zu Luftsteifigkeit (s_v) kehrt sich um [241]. r_{str} steht für den Strahlungswiderstand und m für die bewegte Masse. (FU-Analogie)	82
6.11	Prinzip der kontrollierten Undichtigkeit (a) und verschiedene Einbausätze der Industrie zur Realisierung: Variovent von Dynaudio (b) [23] und Flow Resistor von Scan-Speak (c) [14]	83
6.12	Schematische Treiberanordnung beim Compound-Prinzip [165]	85
6.13	Amplitudenfrequenzgang mit Compound-Bauweise (A) und ohne Compound (B) bei gleichem Gehäusevolumen [165]	85
6.14	Ersatzschaltbild des geschlossenen Lautsprechers mit vorgeschaltetem Hochpassfilter 1. Ordnung (a) bzw. 2. Ordnung (b) zur Tieftonerweiterung [245]. C_e kennzeichnet den Kondensator und L_e kennzeichnet die Spule des Hochpassfilters. R_e steht für den Schwingspulenwiderstand. Zur Verdeutlichung wurde für die Steifigkeit das Symbol s statt L und für die bewegte Masse das Symbol m statt C verwendet (FI-Analogie).	87

6.15	Simulierter Amplitudenfrequenzgang (a) und Impedanzverlauf (b) eines Lautsprechers in verschiedenen Gehäusegrößen ohne und mit Hochpasskondensator	88
6.16	Frequenzganglinearisierung und -erweiterung mittels aktiver Entzerrung, a - ungefilterte Übertragungskurve des Lautsprechers, b - Filterkurve, c - gefiltert Übertragungskurve des Lautsprechers [133] .	89
6.17	Subwoofer S18E-I von Bag End (a), der mittels aktiver Filtertechnik „ELF“ einen ± 3 dB Übertragungsbereich im Halbraum von 8 Hz bis 95 Hz hat (b) [36, 37]	91
6.18	Schematische Darstellung einer Plattenmembran mit konzentriertem Kraftangriff. Aufgrund der ungleichmäßigen Kraftverteilung und der ungenügenden Biegesteifigkeit kommt es zur Entstehung von Partialerschwingungen.	92
6.19	Die gleichmäßige Verteilung der Antriebskraft über der Membran ermöglicht bei gleicher Steifigkeit eine Verringerung von Partialerschwingungen.	92
6.20	Die Bildung eines Arrays aus Miniaturkolbenschwingern ermöglicht einen verteilten Kraftangriff und eine unterteilte Membranfläche. . .	93
6.21	Lautsprecher-Array in einer Schallwand in der Front- (a) und Seitenansicht (b) [194]	94
6.22	Lautsprecher-Array in einer gekrümmten Schallwand (a, b). Eine versetzte Anordnung der Wandler ermöglicht eine Verkleinerung der Strahlerfläche bei gleicher aktiver Strahlerfläche (c) [76].	94
6.23	Lautsprechersystem bestehend aus einem Lautsprecher-Array zur Tieftonwiedergabe und je einem Lautsprecher für den Hoch- und Mittelton [170]	95
6.24	Schematische Darstellung eines linearen Arrays mit gleicher (a) und mit unterschiedlicher Amplitudengewichtung (b) zur Unterdrückung von Seitenkeulen. Die x-Achse dient zur Beschreibung der Lautsprecherposition im Array.	95
6.25	Bessel-Funktion erster Art für verschiedene Ordnungen (a), Amplitudengewichtung eines 5er-Bessel-Arrays (b)	96
6.26	Gewichtung der Einzellautsprecher eines 5er-Bessel-Arrays (a), Realisierung der Besselgewichtung durch Seriell-, Parallelschaltung und Verpolung (b)	97
6.27	Maßnahmen, um die Phase der rückwärtigen Schallabstrahlung im Tieftonbereich zu drehen; Transmission-Line-Gehäuse (a), Gehäuse mit Bassreflexkanal (b) bzw. Passivmembran (c), Gehäuse mit Fließwiderstand (d)	98
6.28	Flachlautsprecher mit rückwärtig ausgebildetem Transmission-Line-Kanal in der Frontansicht (a) und in der Schnittansicht (b) [211] . . .	98
6.29	Luftfedereliminierung durch Verwendung von Dickenschwingern, die direkt auf der Wand befestigt sind	100
6.30	Unterschied zwischen physikalischer und empfundener Wiedergabebandbreite	102
6.31	Schematische Darstellung zur Prinzipverdeutlichung der Frequenzverdopplung (a), des Residualtones (b) und des Differenztones (c) . .	102

6.32	Darstellung der Kurven gleicher Lautheit, von denen die unterste die Hörschwelle darstellt. Frequenzen, deren Schalldruckpegel entlang der selben Kurve verlaufen, werden gleich laut wahrgenommen [262, S. 74].	103
6.33	Grundlegendes Blockschaltbild zur psychoakustischen Tieftonerweiterung [131, S. 60]	104
6.34	Amplitudenfrequenzgang bei zentraler (a) und dezentraler Lautsprecheranordnung auf der Gehäusefront [164]	106
6.35	Amplitudenfrequenzgang eines angefasten quaderförmigen Lautsprechergehäuses mit dezentraler Lautsprecheranordnung auf der Gehäusefront (a) und eines Kugelgehäuses (b) [164]	107
7.1	Der verwendete elektrodynamische Miniaturwandler in der Vorder- und Rückansicht (a) im Klippel-Messstand (b)	110
7.2	Skizzierter Messaufbau bei Verwendung des Klippel-Systems	111
7.3	Abhängigkeit des Kraftfaktors (a) und der Nachgiebigkeit der Membranaufhängung (b) des Wandlers im nicht eingebauten Zustand	112
7.4	Auslenkung der Schwingspule bei unterschiedlichen elektrischen Klemmspannungen $[V_{rms}]$ im nicht eingebauten Zustand (a) und Messaufbau für die Messung des Amplitudenfrequenzganges des Miniaturschallwandlers in der Normschallwand im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer IMDT (b)	113
7.5	Skizzierter Messaufbau für die akustischen Messungen mit Monkey Forest	114
7.6	Auf 1 W normierter Vollraum-Amplitudenfrequenzgang des verwendeten Miniaturschallwandlers beim Betrieb in einer Norm-Schallwand ohne und mit einem 168 ml Gehäuse	115
7.7	Schwingungsbilder der Membran des nicht eingebauten Miniaturwandlers für ausgewählte Frequenzen	116
7.8	Zerlegung der Schallbeiträge entsprechend ihrer Phase gegenüber dem Hörort, z.B. 0° -Grad Abstrahlrichtung und 1 m Abstand, in In-Phase- und Anti-Phase-Komponenten	116
7.9	Membranauslenkung des Miniaturwandlers im 168 ml Gehäuse bei unterschiedlichen Klemmspannungen	119
7.10	Gesamtklirrfaktor des Miniaturwandlers im geschlossenen 168 ml Gehäuse bei 106 mW Leistung	120
7.11	Horizontales bzw. vertikales Abstrahlverhalten des Miniaturwandlers in einem 168 ml Gehäuse, Farbskala kennzeichnet von rechts nach links den Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0° -Achse	121
7.12	Array aus vier Miniaturtreibern in geschlossenen Lautsprechergehäuse unterschiedlicher Form aber gleichen Volumens, Gehäuse 1 (a), Gehäuse 2 (b), Gehäuse 3 (c)	121
7.13	Veränderung der Resonanzfrequenz (a) und der Membranauslenkung (b) eines Gehäuselautsprechers bei konstantem Gehäusevolumen, aber verschiedenen Gehäusetiefen	122
7.14	Auf 1 W normierter Amplitudenfrequenzgang des 2×2 -Arrays bei 42 mm und bei 5 mm Gehäusetiefe.	123

7.15	Impedanzkurven (a) und Membranauslenkungen (b) bei einer Gehäusegröße von 168 ml, 126 ml und 84 ml	125
7.16	Normierte Amplitudenfrequenzgänge für die unterschiedlichen Gehäusegrößen, 168 ml, 126 ml und 84 ml	126
7.17	Vergleich der Impedanzkurven (a) und der Membranauslenkungen (b) des leeren 168 ml Gehäuses mit den aktivkohlegefüllten 126 ml und 84 ml Gehäusen	126
7.18	Amplitudenfrequenzgang des 168 ml Gehäuses gegenüber dem 126 ml bzw. 84 ml Gehäuse bei Verwendung von Aktivkohle	127
7.19	Vergleich der Impedanzkurven und der Membranauslenkungen des leeren 168 ml und des mit Sonofil gefüllten 126 ml Gehäuses	128
7.20	Auf 1 W normierter Amplitudenfrequenzgang des 168 ml Gehäuses gegenüber dem 126 ml bzw. 84 ml Gehäuse mit Sonofil	128
7.21	Skizze des Compound-Gehäuses	129
7.22	Impedanzverlauf (a) und Membranauslenkung (b) des leeren 168 ml bzw. 84 ml Gehäuses und des 84 ml Compound-Gehäuses	129
7.23	Auf 1 W normierter Amplitudenfrequenzgang des leeren 168 ml, des leeren 84 ml und des 84 ml Compound-Gehäuses	130
7.24	Skizze des 468 ml großen Bassreflexgehäuses	130
7.25	Impedanzverlauf (a) und Membranauslenkung (b) des leeren 168 ml bzw. des 332 ml und des 468 ml Bassreflexgehäuses	131
7.26	Auf 1 W normierter Amplitudenfrequenzgang des geschlossenen 168 ml Gehäuses und der Bassreflexgehäuse mit 332 ml und 468 ml	132
7.27	Auf 1 W normierter Amplitudenfrequenzgang des 168 ml Gehäuses bei unterschiedlichen Bassreflexrohrängen	133
7.28	Schematische Darstellung eines Wandlers in einer Schallwand unbestimmter Größe für die Hochtonwiedergabe (a), Hochpassfilterung mit 12 dB/Okt. ab 707 Hz bzw. 5,5 kHz (b)	134
7.29	Gesamtklirrfaktor des Miniaturschallwandlers mit Hochpassfilterung 2. Ordnung bei 707 Hz und 1 W und bei 5,5 kHz und 4 W	135
7.30	Amplitudenfrequenzgang des Miniaturschallwandlers in einer Normschallwand mit Hochpassfilterung 2. Ordnung bei 707 Hz und 1 W und bei 5,5 kHz und 4 W	136
7.31	Hochtonwiedergabe mit einem Bessel-Array aus fünf Wandlern, Hochpassfilterung mit 12 dB/Okt. ab 707 Hz	136
7.32	Vergleich des vertikalen Abstrahlverhaltens von zwei Kugelstrahlern (links) und einem Bessel-Array aus fünf Kugelstrahlern (rechts) bei verschiedenen Verhältnissen zwischen der Wellenlänge und der Array-Länge. Die Strahlerabstände sind jeweils gleich groß [118]. . .	137
7.33	Verschaltung (a) und Anordnung (b) des verwendeten Bessel-Arrays	138
7.34	Schalldruckpegel des Bessel-Arrays aus fünf Miniaturschallwandlern in einem Gehäuse bei 8 W elektrischer Leistung in 1 m Abstand, mit einem Hochpassfilter 2. Ordnung bei 707 Hz	138
7.35	Gesamtklirrfaktor des 5er-Bessel-Arrays bei 8 W elektrischer Leistung ($11 V_{\text{rms}}$ an $15,2 \Omega$) mit Hochpassfilterung 2. Ordnung bei 707 Hz und ohne Hochpassfilterung ab 300 Hz	139

7.36	Amplitudenfrequenzgang der Ansteuerungskette aus Lautsprecher-Controller und Endstufe, Pegeldifferenz bei 100 Hz 1,7 dB	140
7.37	Gesamtklirrfaktor des Miniaturwandlers in einem 168 ml großen Gehäuse bei unterschiedlichen elektrischen Eingangsleistungen mit Linkwitz-Riley-Hochpass 8. Ordnung ab 80 Hz	141
7.38	Amplitudenfrequenzgang des Miniaturschallwandlers in einem 168 ml Gehäuse bei verschiedenen Eingangsleistungen bei Vollraumabstrahlung und Hochpassfilterung	141
7.39	Schematische Darstellung eines Array-Lautsprechers mit zwei 3×6 Arrays für die Tieftonwiedergabe und einem 5er-Bessel-Array für die Hochtonwiedergabe in D'Appolito-Anordnung	142
7.40	Skizzierung der angestrebten Array-Dimensionen für eine optimale Abstrahlcharakteristik	142
7.41	Schematische Darstellung des Demonstrators	143
7.42	Frontansicht des Demonstrators	144
7.43	Rückansicht des geöffneten Demonstrators	144
7.44	Verschaltung des Tiefton-Arrays aus 36 Miniaturschallwandlern	145
7.45	Lautsprecherdrehvorrichtung mit installiertem Flachlautsprecher im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer IDMT	145
7.46	Impulsantwort des Tiefton- und Hochton-Arrays bei Hochpassfilterung 8. Ordnung bei 80 Hz und 1 W	146
7.47	Sprungantwort des Tiefton- und Hochton-Arrays bei Hochpassfilterung 8. Ordnung bei 80 Hz und 1 W	147
7.48	Amplitudenfrequenzgang des Tiefton- und Hochton-Arrays bei Hochpassfilterung 8. Ordnung bei 80 Hz und 1 W	147
7.49	Impedanzverlauf des Hochton- und Tiefton-Arrays bei leerem Lautsprechergehäuse, Impedanzspitzen bei ca. 250 Hz, zwischen 400 Hz und 1 kHz und bei 5 kHz deuten auf Resonanzen hin	148
7.50	Phasengang des Tiefton (TT) und Hochton-Arrays (HT) ohne Laufzeitkorrektur	149
7.51	Isobarendarstellung des horizontalen Abstrahlverhaltens des Tiefton-Arrays ohne Füllmaterial im Gehäuse, Farbskala kennzeichnet den Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0° -Achse	149
7.52	Isobarendarstellung des horizontalen Abstrahlverhaltens des Hochton-Arrays ohne Füllmaterial im Gehäuse, Farbskala kennzeichnet den Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0° -Achse	150
7.53	Frequenzweicheneinstellung am verwendeten Controller mit Pegelkorrektur und extra Schutzfilter 8. Ordnung bei 80 Hz im Tieftonzweig	151
7.54	Kombinierter Amplitudenfrequenzgang des Hochton- und Tiefton-Arrays mit 12 dB Pegelminderung für das Tiefton-Array und ohne Phasenkompensation	152
7.55	Messaufbau zur Bestimmung des Amplitudenfrequenzganges bei Halbraumabstrahlung im Foyer des Fraunhofer IDMT	152
7.56	Vergleich zwischen dem Amplitudenfrequenzgang des Array-Flachlautsprechers im reflexionsarmen Raum (4π -Abstrahlung) und beim Betrieb auf dem Fußboden (2π -Abstrahlung)	153

7.57	Horizontale Schallabstrahlung des Array-Flachlautsprechers mit leerem Gehäuse im reflexionsarmen Raum, Farbskala kennzeichnet von rechts nach links den Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0°-Achse	154
7.58	Vertikale Schallabstrahlung des Array-Flachlautsprechers mit leerem Gehäuse im reflexionsarmen Raum, Farbskala kennzeichnet den Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0°-Achse	154
7.59	Gesamtklirrfaktor des aus einem Hoch- und einem Tiefton-Array bestehenden Flachlautsprechers bei 1 W und 4 W Eingangsleistung	155
7.60	Schalldruckpegelverlauf des aus einem Hoch- und einem Tiefton-Array bestehenden Flachlautsprechers bei 1 W und 4 W Eingangsleistung	156
7.61	Innenansicht des Gesamtlautsprechers mit 80 g Sonofil-Befüllung	156
7.62	Amplitudenfrequenzgang ohne und mit 80 g Sonofil im Lautsprechergehäuse im Freifeld	157
7.63	Isobarendarstellung des horizontalen Abstrahlverhaltens des Tiefton-Arrays mit Füllmaterial im Gehäuse, Farbskala entspricht dem Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0°-Achse	157
7.64	Amplitudenfrequenzgang des Lautsprecher-Controllers zur Entzerrung des Lautsprechers	158
7.65	Vergleich des Amplitudenfrequenzganges der Array-Flachlautsprechers beim Einsatz von Dämmmaterial und elektronischer Entzerrung	159
7.66	Gesamtklirrfaktor des Array-Flachlautsprechers nach der Linearisierung des Amplitudenfrequenzganges mit Dämmmaterial und elektronischer Entzerrung bei 1 W und 4 W	159
7.67	Amplitudenfrequenzgang beim Einsatz von Dämmmaterial und elektronischer Entzerrung für 1 W und 4 W Verstärkerleistung im Vollraum	160
7.68	Amplitudenfrequenzgang ohne elektronische Entzerrung bei unterschiedlichem Gehäusevolumen infolge variierender Gehäusetiefe und Sonofil-Füllung	161
7.69	Amplitudenfrequenzgang der drei Gehäusegrößen mit der Controller-Einstellung für das 18 mm Gehäuse und Sonofil-Füllung	162
7.70	Gesamtklirrfaktor bei verschiedenen Gehäusegrößen mit der elektronischen Entzerrung des Demonstrators mit 18 mm Gehäusetiefe	162
7.71	Kammartige Verteilung der Aktivkohleschläuche im Flachlautsprechergehäuse	163
7.72	Amplitudenfrequenzgang des 18 mm tiefen Gehäuses bei verschiedenem Befüllungsgrad an Aktivkohle	164
7.73	Vergleich der Controller-Setups des Gehäuses mit 18 mm und des mit 12 mm Innentiefe	165
7.74	Schalldruckpegelverlauf des 18 mm Gehäuses und des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe mit zusätzlicher Tieftonanhebung	165
7.75	Gesamtklirrfaktor des 18 mm und des 12 mm Gehäuses mit Tieftonanhebung bei 4 W	166
7.76	Horizontales Abstrahlverhalten des Array-Flachlautsprechers mit 12 mm Innentiefe, Sonofil-Füllung und elektronischer Entzerrung, Farbskala entspricht dem Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0°-Achse	167

7.77	Vertikales Abstrahlverhalten des Array-Flachlautsprechers mit 12 mm Innentiefe, Sonofil-Füllung und elektronischer Entzerrung, Farbskala entspricht dem Schalldruckpegelabfall gegenüber der 0° -Achse . . .	167
7.78	Controller-Setup für den Vollraum (4π) und den Halbraum (2π) . . .	168
7.79	Amplitudenfrequenzgang des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe auf dem Fußboden mit dem Controller-Setup für die Abstrahlung in einen Vollraum (4π) und dem neu erstellten Setup für einen Halbraum (2π).	168
7.80	Amplitudenfrequenzgang des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe mit dem finalen Controller-Setup auf dem Fussboden unter 0° , $22,5^\circ$ und 45°	169
7.81	Amplitudenfrequenzgang des Gehäuses mit 12 mm Innentiefe ohne Fasung und mit Fasung der Gehäusekanten bei Halbraumabstrahlung auf 0°	170
7.82	Amplitudenfrequenzgang des Flachlautsprechers mit 12 mm Innentiefe und Kantenfasung für unterschiedliche horizontale Winkel bei Halbraumabstrahlung	170
7.83	Amplitudenfrequenzgang des Flachlautsprechers mit 12 mm Innentiefe und Kantenfasung für unterschiedliche vertikale Winkel bei Halbraumabstrahlung	171
7.84	Signalkette im Hörtest zur Beurteilung verschiedener kommerzieller Algorithmen mittels Lautsprecher und Kopfhörer	172
7.85	Darstellung des für einen 100 Hz Sinuston generierten Spektrums von drei Oktaven mit dem Gleichrichter-Algorithmus (a) und dem Integrator-Algorithmus (b) in Matlab. Die 100 Hz Linie wird bei beiden Algorithmen nicht übertragen.	174
7.86	Flussdiagramm der Signalbearbeitung im zweiten Hörtest	174
7.87	Darstellung der Konfidenzintervalle für die Bewertung der Intensität des verursachten Tieftoneindrucks, nach [141], [43]	176
7.88	Konfidenzintervalle zur Bewertung der Klangfarbenveränderung, nach [141], [43]	177
A.1	Kennzeichnung der abzulesenden Größen für die Berechnung der Thiele & Small-Parameter nach [68, S. 48ff].	216
A.2	Impedanzverlauf des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 126 ml Gehäuse mit Sonofil	222
A.3	Impedanzverlauf des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 84 ml Gehäuse mit Sonofil	222
A.4	Impedanzverlauf des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 42 ml Gehäuse mit Sonofil	223
A.5	Übertragungsfunktion der Schwingspulenauslenkung des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 126 ml Gehäuse mit Sonofil	223
A.6	Übertragungsfunktion der Schwingspulenauslenkung des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 84 ml Gehäuse mit Sonofil	224
A.7	Übertragungsfunktion der Schwingspulenauslenkung des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 42 ml Gehäuse mit Sonofil	224

A.8	Impedanzverlauf des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 126 ml Gehäuse mit Aktivkohle	225
A.9	Impedanzverlauf des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 84 ml Gehäuse mit Aktivkohle	225
A.10	Übertragungsfunktion der Schwingspulenauslenkung des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 126 ml Gehäuse mit Aktivkohle . .	226
A.11	Übertragungsfunktion der Schwingspulenauslenkung des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 84 ml Gehäuse mit Aktivkohle . . .	226
A.12	Balloon-Daten des 24 mm dicken Flachlautsprechers (IFA 2009) für 100 Hz bis 1,25 kHz, Farblegende siehe Abb. A.13	229
A.13	Balloon-Daten des 24 mm dicken Flachlautsprechers (IFA 2009) für 1,6 kHz bis 10 kHz	230
A.14	Abklingzeit des Flachlautsprechers bei 125 Hz	231
A.15	Abklingzeit bei des Flachlautsprechers 250 Hz	231
A.16	Abklingzeit des Flachlautsprechers bei 500 Hz	232
A.17	Abklingzeit des Flachlautsprechers bei 1000 Hz	232
A.18	Abklingzeit des Flachlautsprechers bei 2000 Hz	233
A.19	Abklingzeit des Flachlautsprechers bei 4000 Hz	233
A.20	Konstruktionsskizze des gefertigten Flachlautsprechers in der Draufsicht	234
A.21	Konstruktionsskizze des gefertigten Flachlautsprechers in der Innenansicht	235
A.22	Konstruktionszeichnungen des für die IFA 2009 gefertigten Flachlautsprechers in der Außenansicht	236
A.23	Konstruktionszeichnungen des für die IFA 2009 gefertigten Flachlautsprechers in der Innenansicht	237
A.24	Stereo-Setup am Fraunhofer IDMT bestehend aus zwei Flachlautsprechern (IFA 2009)	238
A.25	WFS-Signalkette mit üblichen Angaben zum Leistungsbedarf und zur Energieeffizienz	239
A.26	Fotos der untersuchten piezoelektrischen Demonstratoren, Array aus aufgeklebten piezokeramischen Platten (a) [252], doppelagige, einlaminierete EMFi-Folie [253] (b) und mehrfach geklemmte PVDF-Folie [78] (c)	241
A.27	Schwingungsuntersuchung einer piezokeramischen Platte mittels Chladnischer Klangfiguren bei verschiedenen Frequenzen [252] (a), Folienschnelle der EMFi-Folie [253] (b) und Folienschnelle eines PVDF-Bogens [78] (c)	242
A.28	Schalldruckpegelfrequenzgang der Demonstratoren nach [252],[253],[78]	242
A.29	PVDF-Datenblatt	244
A.30	Emfi-Datenblatt	245

Tabellenverzeichnis

2.1	Anforderungen für Referenz-Monitor-Lautsprecher und Hinweise für Heim-Lautsprecher [94, S. 8]	6
4.1	Herstellerangaben zu zwei verschiedenen EMFi-Folien [135]	55
4.2	Ausgewählte Eigenschaften von Quarz, Piezokeramik und Polymer (PVDF) [136, S. 237ff.]	55
4.3	Gegenüberstellung verschiedener Flachlautsprechertechnologien bezüglich entscheidender Parameter [4], [176], [16], [62], [3], [6], [10], [78]	58
7.1	Ausgewählte Daten des nicht eingebauten Miniaturwandlers	111
7.2	Abmessungen der untersuchten Gehäuseformen und die entsprechenden Resonanzfrequenzen bzw. Gesamtgüten	120
7.3	Charakterisierung der verwendeten Test-Items	175
7.4	Charakterisierung der verwendeten Test-Conditions, nach [141]	175
7.5	Signifikanztest gegenüber der Referenz bei der Beurteilung der Intensität des Tieftoneindrucks, nach [141]	177
7.6	Signifikanztest gegenüber der Referenz bei der Beurteilung der Klangfarbenänderung, nach [141]	178
7.7	Gegenüberstellung der akustischen Anforderungen an Referenz-Monitor-Lautsprecher und der erzielten akustischen Eigenschaften des entwickelten Array-Flachlautsprechers [94, S. 8]	180
A.1	Linearparameter des Miniaturschallwandlers im nichteingebauten Zustand	217
A.2	Großsignalparameter des Miniaturschallwandlers im nicht eingebauten Zustand	218
A.3	Linearparameter des 2×2 -Arrays im 600 ml großen Gehäuse mit 5 mm lichter Bautiefe	219
A.4	Linearparameter des 2×2 -Arrays im 600 ml großen Gehäuse mit 10 mm lichter Bautiefe	220
A.5	Linearparameter des 2×2 -Arrays im 600 ml großen Gehäuse mit 42 mm lichter Bautiefe	221
A.6	Parametervergleich zwischen einem einzelnen Schallstrahler und verschiedenen Strahler-Arrays nach [118]	228
A.7	Bezeichnung und Abmessungen der verwendeten piezoelektrischen Produkte	241

Anhang A

Anhang

A.1 Hinweise und Empfehlungen für den Flachlautsprecherentwurf

A.1.1 Wandlerprinzip

Aufgrund der Forderung eines kräftigen Antriebs, kombiniert mit einem großen Membranhub, erweist sich das elektrodynamische Prinzip gegenüber dem elektrostatischen und piezoelektrischen als vorteilhafter.

Zur Verhinderung von Partialschwingungen sollte eine gleichmäßige Verteilung des Antriebssystems bzw. mehrere kleiner einem zentralen System vorgezogen werden.

A.1.2 Membran

Für eine möglichst effektive Umwandlung der Membranbewegung in Schall sollte die Membran kolbenförmig schwingen. Membranversteifende Formgebungen und Verstreibungen sind wegen der geringen Bautiefe von Flachlautsprechern nicht ausreichend ausführbar, um Partialschwingungen zu verhindern. Aus diesem Grund ist die Verwendung eines flächig verteilten Antriebssystems und die Unterteilung der Membran in kleinere Einzelmembrane zu empfehlen. Die Stärke der Unterteilung richtet sich nach dem wiederzugebenden Frequenzbereich und dem Auftreten erster Membranmoden.

Ein weiterer Vorteil der Membranunterteilung ist die Möglichkeit, die Membranfläche mit zunehmender Frequenz zu verkleinern und somit eine unerwünscht starke Schallbündelung zu verhindern.

Speziell für die WFS-Anwendung bietet die Membranunterteilung die Möglichkeit, die Abstände zwischen den Hoch- und Tieftonkanälen unabhängig voneinander zu wählen.

A.1.3 Schallwand

Soll der Flachlautsprecher in einer Schallwand betrieben werden, so ist mittels Absorptionsmaterialien auf der Rückseite für einer Verringerung des rückwärtig reflektierten Schalls zu sorgen. Andernfalls treten durch die Interferenz zwischen

Front- und Rückschall starke kammfilterartige Klangverfärbungen auf. Zur Verringerung der unteren Grenzfrequenz muss der Schallwanddurchmesser vergrößert werden. Der Schallwandradius sollte dafür mindestens einem Viertel der Wellenlänge entsprechen.

A.1.4 Gehäuse und Gehäusefüllung

Die im Rahmen dieser Arbeit gemachten Untersuchungen haben gezeigt, dass für den Einsatz eines Flachlautsprechers unmittelbar vor der Wand die Verwendung eines Lautsprechergehäuses von Vorteil ist. Wegen des akustischen Kurzschlusses wird bei gleicher Größe eine tiefere untere Grenzfrequenz als beim Einbau in eine Schallwand erreicht. Ebenso werden die stark klangverfärbenden Interferenzen zwischen rückwärtig reflektiertem Schall und dem Frontschall verhindert.

Da die untere Grenzfrequenz abhängig von Rückstellkraft des Gehäusevolumens ist, sollte das Volumen nie kleiner als nötig gewählt werden. Bei geringen Gehäusetiefen kann das Volumen beispielsweise durch eine entsprechende Vergrößerung der Breite und Höhe realisiert werden. In der Arbeit sind auch verschiedenen Gehäusekonzepte aufgeführt, die je nach verwendetem Treiber eine Volumenverkleinerung bei gleicher unterer Grenzfrequenz ermöglichen.

Durch den Einsatz verschiedener Füllmaterialien kann das akustisch wirksame Volumen vergrößert und die Tieftonwiedergabe erweitert werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Befüllungsdichte nicht zu hoch gewählt wird. Zum einen kann es passieren, dass sonst die Eigenverdrängung des Füllmaterials größer als der Volumengewinn ist, und zum anderen entstehen bei zu hoher Packdichte Strömungswiderstände, wodurch nicht mehr das ganze Gehäusevolumen genutzt wird.

Verschiedene Ansätze zu Füllmaterialien sind in dieser Arbeit vorgestellt worden. Neben der Vergrößerung des akustisch wirksamen Gehäusevolumens sollten Materialien wie Mineralwolle zur Verhinderung von Gehäusestehwellen verwendet werden. Sie sollten im Gehäuse dort positioniert werden, wo die Schallschnelle am größten ist.

Aufgrund des hohen Drucks im Läutsprechergehäuse und der flachen aber breiten Gehäuseformen sind ausreichend Verstrebungen im Lautsprechergehäuse zwischen Front- und Rückwand vorzusehen. Die Gehäuseschwingungen können andernfalls so stark werden, dass die Abstrahlcharakteristik erheblich beeinflusst wird. In den Untersuchungen zeigte sich beispielsweise für ein geschlossenes Gehäuse ohne Versteifung eine Dipolcharakteristik, die erst mit zusätzlicher Versteifung in die gewünschte Monopolcharakteristik überging.

Wenn in einem Gehäuse Membrane unterschiedliche Frequenzbereiche wiedergeben, sollte die einzelnen Wege ihr eigenes Gehäusevolumen bekommen. Die starken tieffrequenten Druckschwankungen im Tieftongehäuse werden somit nicht auf die Hochtonmembrane übertragen, welche somit sauberer arbeiten.

A.1.5 Signalverzerrung

Je nach zulässigem Membranhub und vorhandener Verstärkerleistung kann der Schalldruckpegel unterhalb der Resonanzfrequenz angehoben und so die untere Grenzfrequenz verringert werden. Bei der Wahl der Filter und der Gehäuseabstim-

A.1 Hinweise und Empfehlungen für den Flachlautsprecherentwurf

mung sollte darauf geachtet werden, dass die Filterordnung des Gesamtsystems nicht unnötig groß gewählt und damit das Zeitverhalten des Lautsprechers unnötig verschlechtert wird.

Wenn phasenlineare FIR-Filter zur Verfügung stehen, besteht diese Problem nicht mehr, da Phasen- und Amplitudenfrequenzgang unabhängig voneinander sind.

A.1.6 Psychoakustik

Aufgrund der Grenzen aller physikalischer Ansätze ist in manchen Anwendungsfällen nur mit dem Einsatz von Psychoakustik eine Tieftonerweiterung möglich. Die beste Wirksamkeit entfalten die dazu erforderlichen psychoakustischen Algorithmen im Frequenzbereich zwischen ca. 50 Hz und 500 Hz. Da die Wirksamkeit der Algorithmen mit zunehmender Signaländerung in diesem Frequenzbereich steigt, nimmt auch die Signalverfälschung gegenüber dem Original zu. Aus diesem Grund ist der Einsatz der psychoakustischen Tieftonerweiterung nur dort zu empfehlen, wo die Wiedergabe nicht Vordergrund steht, z. B. bei Mobiltelefonen und Laptops.

A.2 Miniaturschallwandler

A.2.1 Bestimmung der Thiele & Small-Parameter anhand der Impedanzkurve

Die nachfolgenden Gleichungen (Gl. A.1 bis Gl. A.6) sind aus [68, S. 48ff] entnommen. Es ist eine Impedanzkurve für den nicht eingebauten und eine für den in ein Gehäuse eingebauten Wandler zu messen. Für die Berechnung des äquivalenten Luftvolumens V_{as} werden die gleichen Berechnungen auf Basis der Impedanzkurve des Gehäuselautsprechers durchgeführt. Das Volumen V_B des geschlossenen Gehäuses sollte so gewählt werden, dass es zu einem Anstieg der Resonanzfrequenz von wenigstens 50 % kommt [68, S. 75ff]. In Gl. A.6 handelt es sich bei f_{ct} um die Resonanzfrequenz und bei Q_{etc} um den elektrischen Gütefaktor des Gehäuselautsprechers.

$$r_0 = \frac{R_{max}}{R_e} \quad (A.1)$$

$$R_x = R_e \cdot \sqrt{r_0} \quad (A.2)$$

$$Q_{ms} = \frac{f_r \cdot \sqrt{r_0}}{f_2 - f_1} \quad (A.3)$$

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{r_0 - 1} \quad (A.4)$$

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}} \quad (A.5)$$

$$V_{as} = \left[\left(\frac{f_{ct} \cdot Q_{etc}}{f_r \cdot Q_{es}} \right) - 1 \right] \cdot V_B \approx \left[\left(\frac{f_{ct}}{f_r} \right)^2 - 1 \right] \cdot V_B \quad (A.6)$$

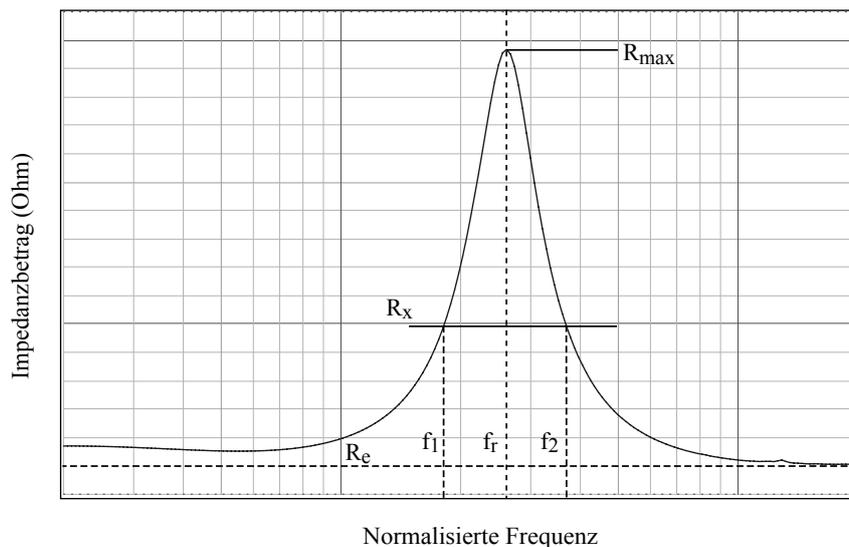


Abb. A.1: Kennzeichnung der abzulesenden Größen für die Berechnung der Thiele & Small-Parameter nach [68, S. 48ff].

A.2.2 Linearparameter des Miniaturwandlers

Name	Value	Unit	Comment
Electrical Parameters (calculation)			
R_e	51,97	Ω	el. voice resistance at DC
L_e	0,662	mH	frequency independent part of voice coil inductance
L_2	0,000	mH	para-inductance of voice coil
R_2	0,000	Ω	el. resistance due to eddy current losses
C_{mes}	9,09	μF	el. capacitance representing moving mass
L_{ces}	198,89	mH	el. inductance representing driver compliance
R_{es}	289,23	Ω	resistance due to mech. losses
f_s	118,4	Hz	driver resonance frequency
Mechanical Parameters (using laser)			
M_{ms}	0,173	g	mech. mass of driver diaphragm assembly air load and voice coil
$M_{md}(Sd)$	0,162	g	mech. mass of voice coil and diaphragm without air load
R_{ms}	0,066	kg/s	mech. resistance of total-driver losses
C_{ms}	10,479	mm/N	mech. compliance of driver suspension
K_{ms}	0,10	N/mm	mech. stiffness of driver suspension
Bl	4,357	N/A	force factor (Bl product)
Λs	0,105	-	suspension creep factor
Loss factors			
Q_{tp}	0,298	-	total Q-factor considering all losses
Q_{ms}	1,955	-	mech. Q-factor of driver in free air considering R_{ms} only
Q_{es}	0,351	-	el. Q-factor of driver in free air considering R_e only
Q_{ts}	0,298	-	total Q-factor considering R_e and R_{ms} only
Additional Parameters			
V_{as}	0,7413	l	equivalent air volume of suspension
n_0	0,336	%	reference efficiency (2 pi-radiation using R_e)
L_m	87,47	dB	characteristic sound pressure level (SPL at 1 m for 1 W @ R_e)
L_{nom}	87,30	dB	nominal sensitivity (SPL at 1 m for 1 W @ Z_n)
S_d	7,07	cm ²	diaphragm area
Measurement Parameters			
$rmseZ$	3,77	%	root-mean-square fitting error of driver impedance $Z(f)$
$rmseHx$	3,50	%	root-mean-square fitting error of transfer function $Hx(f)$
<i>Series resistor</i>	0,00	Ω	resistance of series resistor

Tab. A.1: Linearparameter des Miniaturschallwandlers im nichteingebauten Zustand

A Anhang

A.2.3 Großsignalparameter des Miniaturwandlers

Name	Value	Unit	Comment
Displacement Limits (thresholds can be changed in Processing property page)			
$X_{Bl} @ Bl_{min} = 82\%$	> 0,6	mm	Displacement limit due to force factor variation
$X_C @ C_{min} = 75\%$	> 0,5	mm	Displacement limit due to compliance variation
$X_L @ Z_{max} = 10\%$	> 0,6	mm	Displacement limit due to inductance variation
$X_d @ d2 = 10\%$	> 7,7	mm	Displacement limit due to IM distortion (Doppler)
f_1	0,500	A ⁻¹	coefficient (1) of inductance over current (flux modulation)
f_2	-121,646	A ⁻²	coefficient (2) of inductance over current (flux modulation)
Bl_0	4,5422	N/A	constant part in force factor
Bl_1	-0,16570	N/Amm	1st order coefficient in force factor expansion
Bl_2	-1,2101	N/Amm ²	2nd order coefficient in force factor expansion
Bl_3	0,35344	N/Amm ³	3rd order coefficient in force factor expansion
Bl_4	0,28807	N/Amm ⁴	4th order coefficient in force factor expansion

Tab. A.2: Großsignalparameter des Miniaturschallwandlers im nicht eingebauten Zustand

A.2.4 Linearparameter des 2×2 -Arrays in verschiedenen Gehäusen

Name	Value	Unit	Comment
Electrical Parameters (calculation)			
R_e	13,52	Ω	el. voice resistance at DC
L_e	0,000	mH	frequency independent part of voice coil inductance
L_2	0,136	mH	para-inductance of voice coil
R_2	4,20	Ω	el. resistance due to eddy current losses
C_{mect}	49,00	μF	el. capacitance representing moving mass
L_{cect}	10,94	mH	el. inductance representing driver compliance
R_{ect}	48,36	Ω	resistance due to mech. losses
f_{ct}	217,8	Hz	driver resonance frequency in enclosure
Mechanical Parameters (using laser)			
M_{mct}	1,036	g	mech. mass of driver diaphragm assembly air load and voice coil
R_{mct}	0,439	kg/s	mech. resistance of total-driver losses
C_{mct}	0,515	mm/N	mech. compliance of driver suspension
K_{mct}	1,94	N/mm	mech. stiffness of driver suspension
Bl	4,609	N/A	force factor (Bl product)
$\text{Lambda } ct$	0,400	–	suspension creep factor
Loss factors			
Q_{tp}	0,706	–	total Q-factor considering all losses
Q_{mct}	3,229	–	mech. Q-factor of driver in free air considering R_{mct} only
Q_{ect}	0,902	–	el. Q-factor of driver in free air considering R_e only
Q_{tct}	0,705	–	total Q-factor considering R_e and R_{mct} only
Additional Parameters			
V_{act}	0,6147	l	equivalent air volume of suspension for driver in enclosure
n_0	0,677	%	reference efficiency (2 pi-radiation using R_e)
L_m	90,51	dB	characteristic sound pressure level (SPL at 1 m for 1 W @ R_e)
L_{nom}	90,34	dB	nominal sensitivity (SPL at 1 m for 1 W @ Z_n)
S_d	29,04	cm ²	diaphragm area
Measurement Parameters			
$rmseZ$	9,21	%	root-mean-square fitting error of driver impedance $Z(f)$
$rmseHx$	9,36	%	root-mean-square fitting error of transfer function $Hx(f)$
<i>Series resistor</i>	0,00	Ω	resistance of series resistor
V_{box}	0,60	l	volume of enclosure

Tab. A.3: Linearparameter des 2×2 -Arrays im 600 ml großen Gehäuse mit 5 mm lichter Bautiefe

A Anhang

Name	Value	Unit	Comment
Electrical Parameters (calculation)			
R_e	13,44	Ω	el. voice resistance at DC
L_e	0,062	mH	frequency independent part of voice coil inductance
L_2	0,144	mH	para-inductance of voice coil
R_2	3,79	Ω	el. resistance due to eddy current losses
C_{mect}	38,00	μF	el. capacitance representing moving mass
L_{cect}	10,99	mH	el. inductance representing driver compliance
R_{ect}	58,10	Ω	resistance due to mech. losses
f_{ct}	247,7	Hz	driver resonance frequency in enclosure
Mechanical Parameters (using laser)			
M_{mct}	0,778	g	mech. mass of driver diaphragm assembly air load and voice coil
R_{mct}	0,356	kg/s	mech. resistance of total-driver losses
C_{mct}	0,531	mm/N	mech. compliance of driver suspension
K_{mct}	1,88	N/mm	mech. stiffness of driver suspension
Bl	4,550	N/A	force factor (Bl product)
$\text{Lambda } ct$	0,179	–	suspension creep factor
Loss factors			
Q_{tp}	0,639	–	total Q-factor considering all losses
Q_{mct}	3,398	–	mech. Q-factor of driver in free air considering R_{mct} only
Q_{ect}	0,786	–	el. Q-factor of driver in free air considering R_e only
Q_{tct}	0,638	–	total Q-factor considering R_e and R_{mct} only
Additional Parameters			
V_{act}	0,6333	l	equivalent air volume of suspension for driver in enclosure
n_0	1,178	%	reference efficiency (2 pi-radiation using R_e)
L_m	92,91	dB	characteristic sound pressure level (SPL at 1 m for 1 W @ R_e)
L_{nom}	92,76	dB	nominal sensitivity (SPL at 1 m for 1 W @ Z_n)
S_d	29,04	cm ²	diaphragm area
Measurement Parameters			
$rmseZ$	3,56	%	root-mean-square fitting error of driver impedance $Z(f)$
$rmseHx$	4,79	%	root-mean-square fitting error of transfer function $Hx(f)$
<i>Series resistor</i>	0,00	Ω	resistance of series resistor
V_{box}	0,60	l	volume of enclosure

Tab. A.4: Linearparameter des 2×2 -Arrays im 600 ml großen Gehäuse mit 10 mm lichter Bautiefe

A.2 Miniaturschallwandler

Name	Value	Unit	Comment
Electrical Parameters (calculation)			
R_e	13,40	Ω	el. voice resistance at DC
L_e	0,148	mH	frequency independent part of voice coil inductance
L_2	0,052	mH	para-inductance of voice coil
R_2	0,57	Ω	el. resistance due to eddy current losses
C_{mect}	35,00	μF	el. capacitance representing moving mass
L_{cect}	9,76	mH	el. inductance representing driver compliance
R_{ect}	63,27	Ω	resistance due to mech. losses
f_{ct}	272,1	Hz	driver resonance frequency in enclosure
Mechanical Parameters (using laser)			
M_{mct}	0,676	g	mech. mass of driver diaphragm assembly air load and voice coil
R_{mct}	0,305	kg/s	mech. resistance of total-driver losses
C_{mct}	0,507	mm/N	mech. compliance of driver suspension
K_{mct}	1,97	N/mm	mech. stiffness of driver suspension
Bl	4,390	N/A	force factor (Bl product)
$\text{Lambda } ct$	0,053	–	suspension creep factor
Loss factors			
Q_{tp}	0,663	–	total Q-factor considering all losses
Q_{mct}	3,792	–	mech. Q-factor of driver in free air considering R_{mct} only
Q_{ect}	0,803	–	el. Q-factor of driver in free air considering R_e only
Q_{tct}	0,663	–	total Q-factor considering R_e and R_{mct} only
Additional Parameters			
V_{act}	0,6045	l	equivalent air volume of suspension for driver in enclosure
n_0	1,458	%	reference efficiency (2 pi-radiation using R_e)
L_m	93,84	dB	characteristic sound pressure level (SPL at 1 m for 1 W @ R_e)
L_{nom}	93,70	dB	nominal sensitivity (SPL at 1 m for 1 W @ Z_n)
S_d	29,04	cm ²	diaphragm area
Measurement Parameters			
$rmseZ$	1,88	%	root-mean-square fitting error of driver impedance $Z(f)$
$rmseHx$	2,65	%	root-mean-square fitting error of transfer function $Hx(f)$
<i>Series resistor</i>	0,00	Ω	resistance of series resistor
V_{box}	0,60	l	volume of enclosure

Tab. A.5: Linearparameter des 2×2 -Arrays im 600 ml großen Gehäuse mit 42 mm lichter Bautiefe

A.3 Verhalten des Miniaturwandlers bei unterschiedlichem Füllmaterial

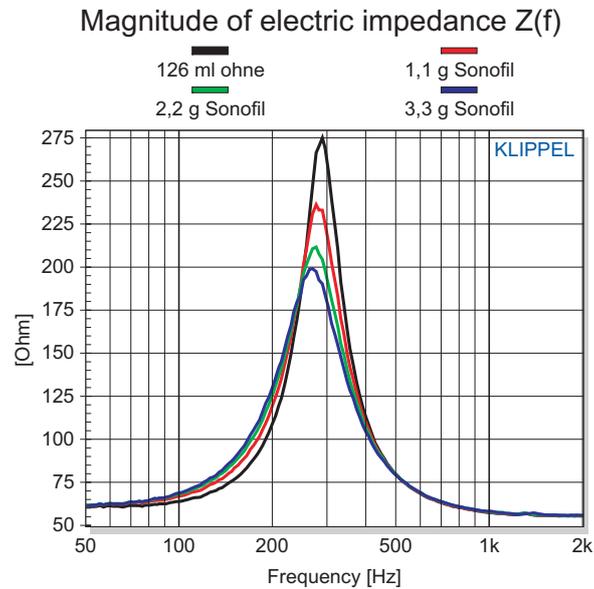


Abb. A.2: Impedanzverlauf des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 126 ml Gehäuse mit Sonofil

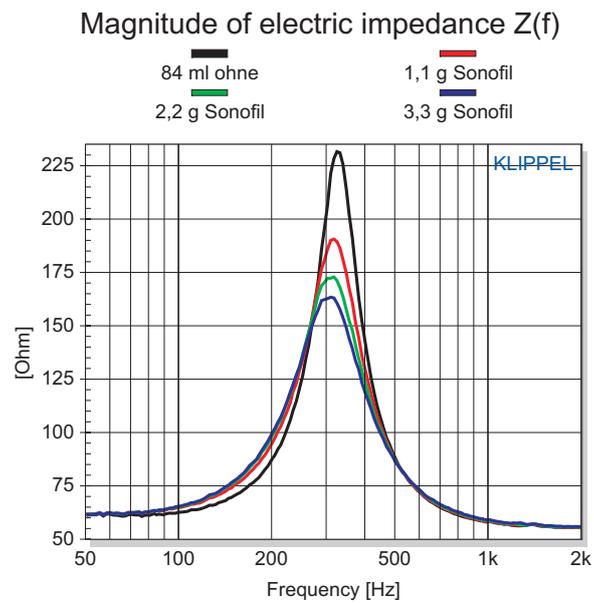


Abb. A.3: Impedanzverlauf des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 84 ml Gehäuse mit Sonofil

A.3 Verhalten des Miniaturwandlers bei unterschiedlichem Füllmaterial

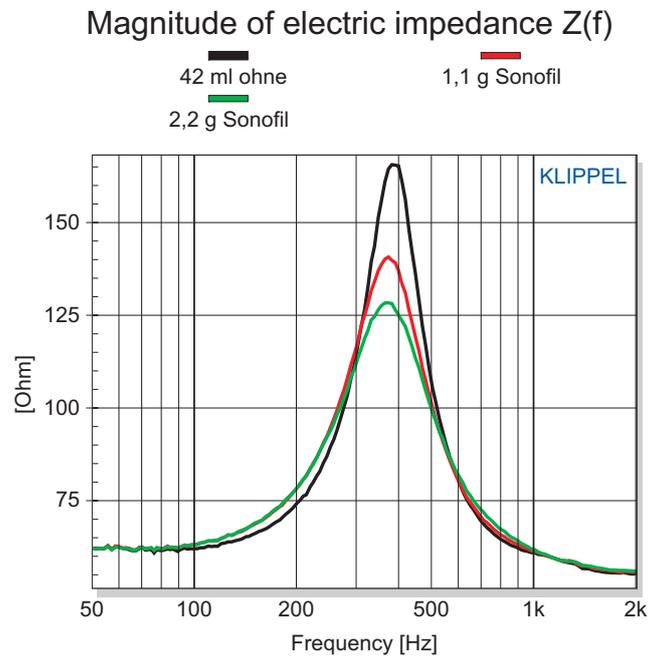


Abb. A.4: Impedanzverlauf des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 42 ml Gehäuse mit Sonofil

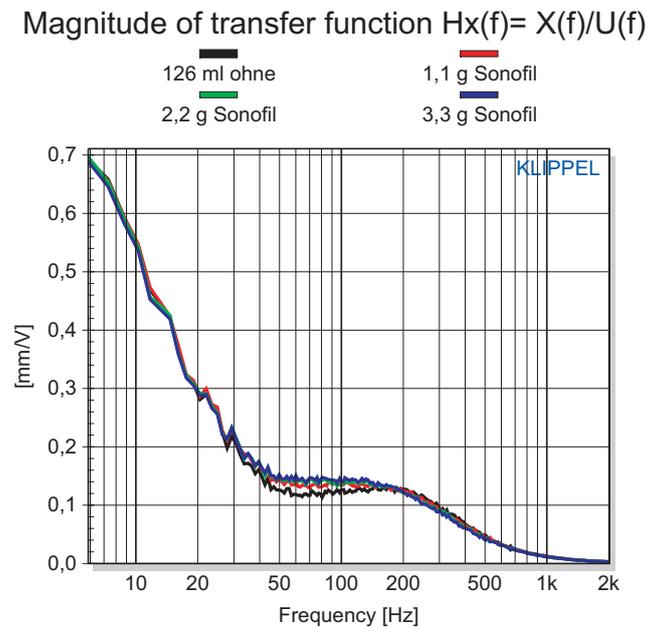


Abb. A.5: Übertragungsfunktion der Schwingspulenaußenlenkung des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 126 ml Gehäuse mit Sonofil

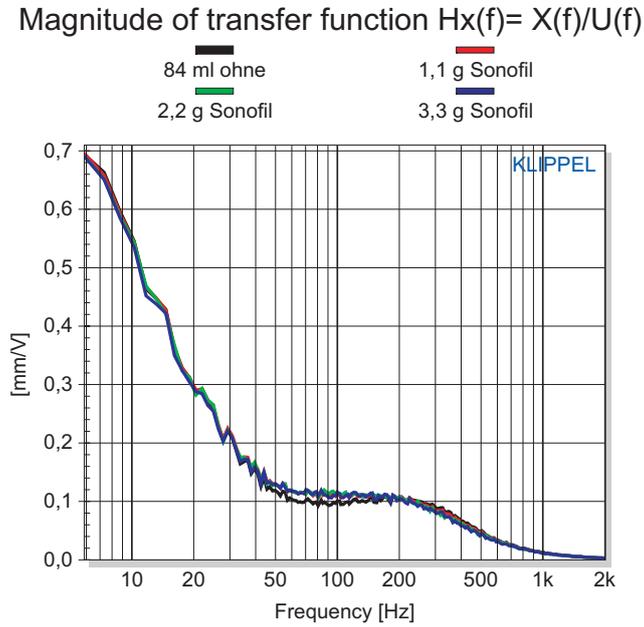


Abb. A.6: Übertragungsfunktion der Schwingspulenaußenlenkung des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 84 ml Gehäuse mit Sonofil

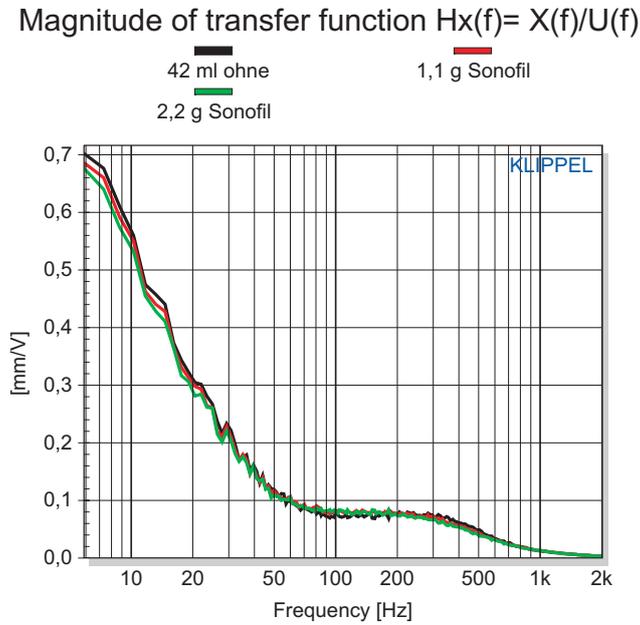


Abb. A.7: Übertragungsfunktion der Schwingspulenaußenlenkung des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 42 ml Gehäuse mit Sonofil

A.3 Verhalten des Miniaturwandlers bei unterschiedlichem Füllmaterial

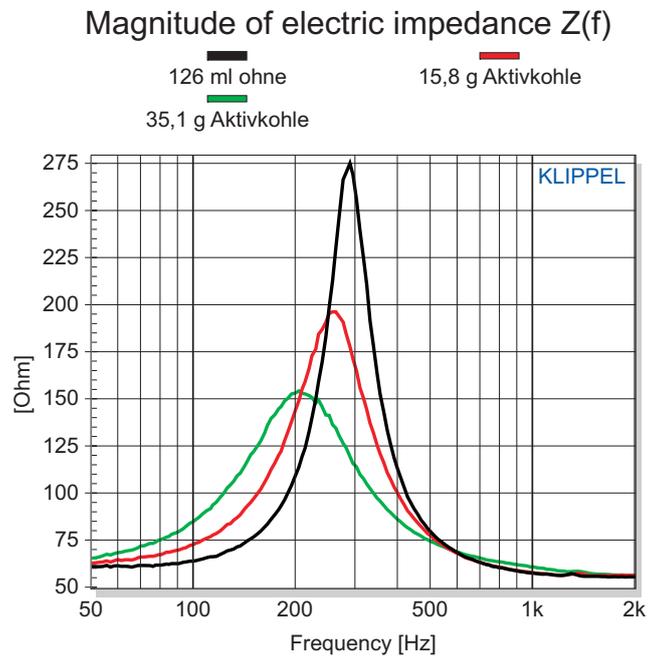


Abb. A.8: Impedanzverlauf des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 126 ml Gehäuse mit Aktivkohle

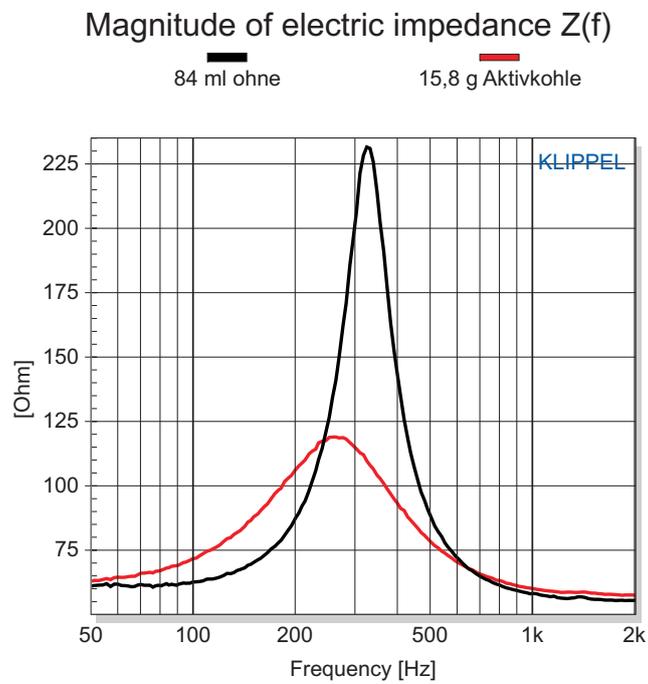


Abb. A.9: Impedanzverlauf des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 84 ml Gehäuse mit Aktivkohle

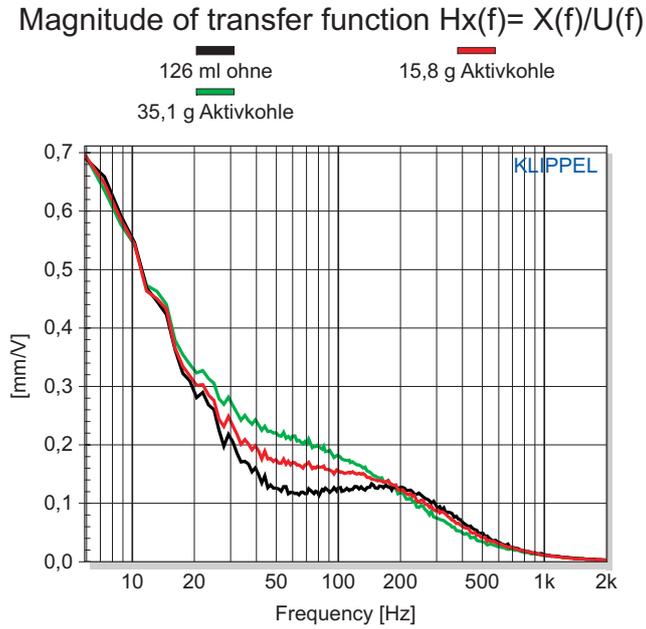


Abb. A.10: Übertragungsfunktion der Schwingspulenauslenkung des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 126 ml Gehäuse mit Aktivkohle

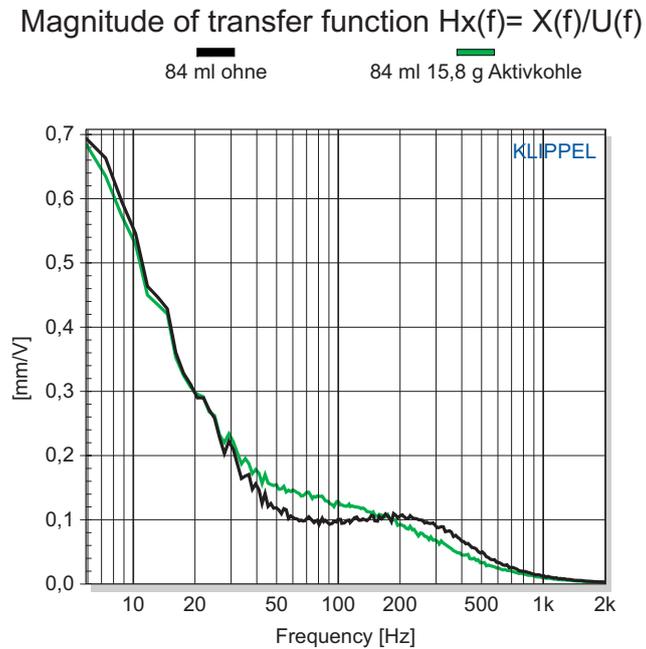


Abb. A.11: Übertragungsfunktion der Schwingspulenauslenkung des Miniaturwandlers in einem geschlossenen 84 ml Gehäuse mit Aktivkohle

A.3 Verhalten des Miniaturwandlers bei unterschiedlichem Füllmaterial

A.4 Vergleich unterschiedlicher Strahler-Arrays

Konfiguration	1 Wandler	2 Wandler	5 Wandler	5 Wandler	7 (6) Wandler	9 (7) Wandler
Ansteuerung	-	alle gleich	alle gleich	5er-Bessel	7er-Bessel	9er-Bessel
benötigte Wandleranzahl	1	2	5	5	6	7
Wandleranordnung (O ≡ ein Wandler)	O	OO	OOOOO	OOOOO	OOO OOO	OOOO OOO
normierte Array-Länge (c-c)	0	0,25	1,0	1,0	1,5	2,0
normierte elektrische Impedanz	1,000	0,500	0,200	0,286	0,222	0,182
Spannungsempfindlichkeit	1	2	5	2	2	2
normierte Effizienz	1,000	2,000	5,000	1,143	0,889	0,727
normierte max. Eingangsleistung	1,0	2,0	5,0	3,5	4,5	5,5
normierte max. Ausgangsleistung	1,0	4,0	25,0	4,0	4,0	4,0
Schalldruckgewinn	1,0	2,0	5,0	2,0	2,0	2,0
Pegelgewinn	(0 dB)	(+6 dB)	(+14 dB)	(+6 dB)	(+6 dB)	(+6 dB)
obere Grenzfrequenz bei 4 dB p-p-Welligkeit (Entfernung = 20 Einheitslängen)	∞	1,10	0,40	11,00	5,55	1,30

Tab. A.6: Parametervergleich zwischen einem einzelnen Schallstrahler und verschiedenen Strahler-Arrays nach [118]

A.5 Balloon-Daten des 24 mm Flachlautsprechers (IFA 2009)

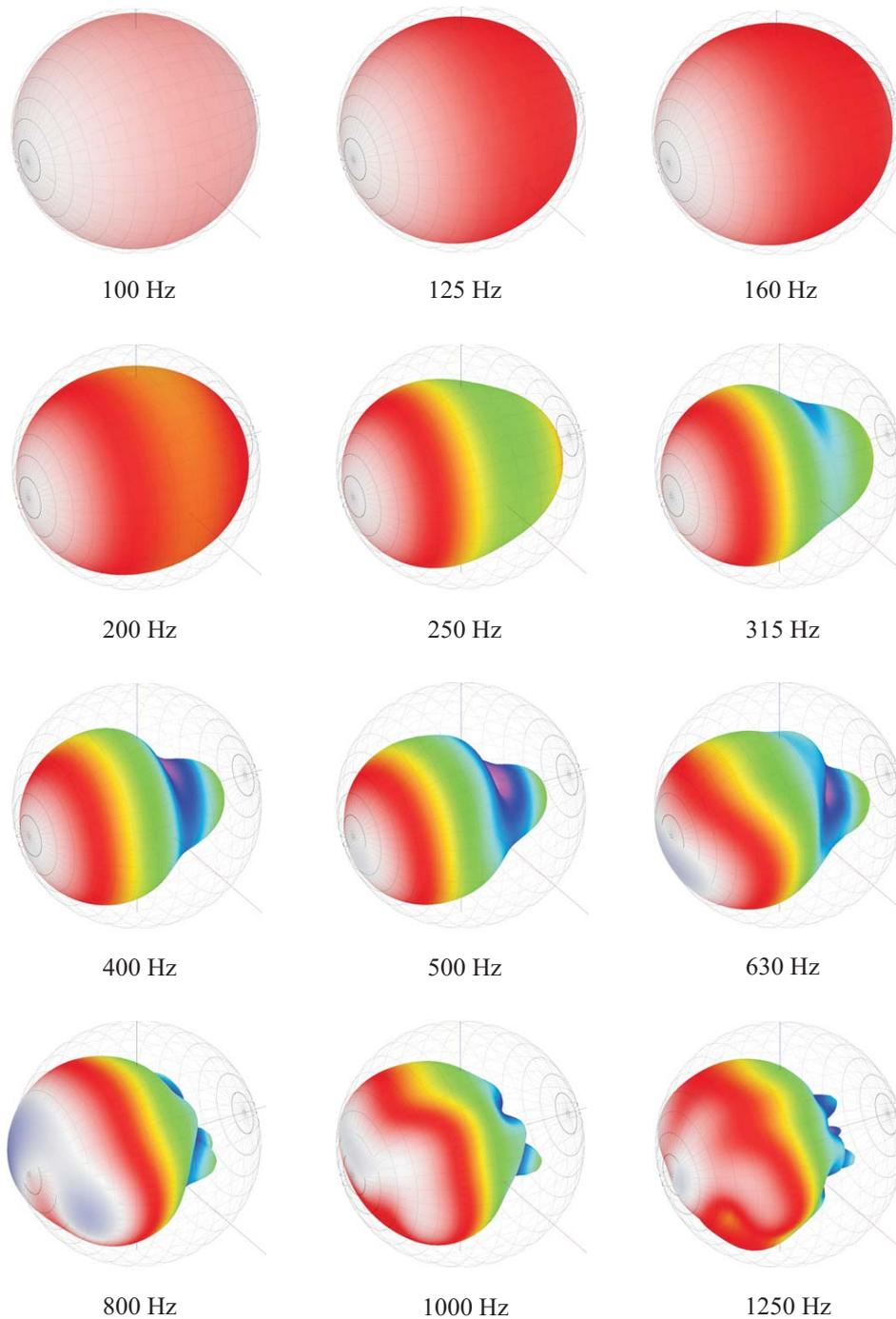


Abb. A.12: Balloon-Daten des 24 mm dicken Flachlautsprechers (IFA 2009) für 100 Hz bis 1,25 kHz, Farblegende siehe Abb. A.13

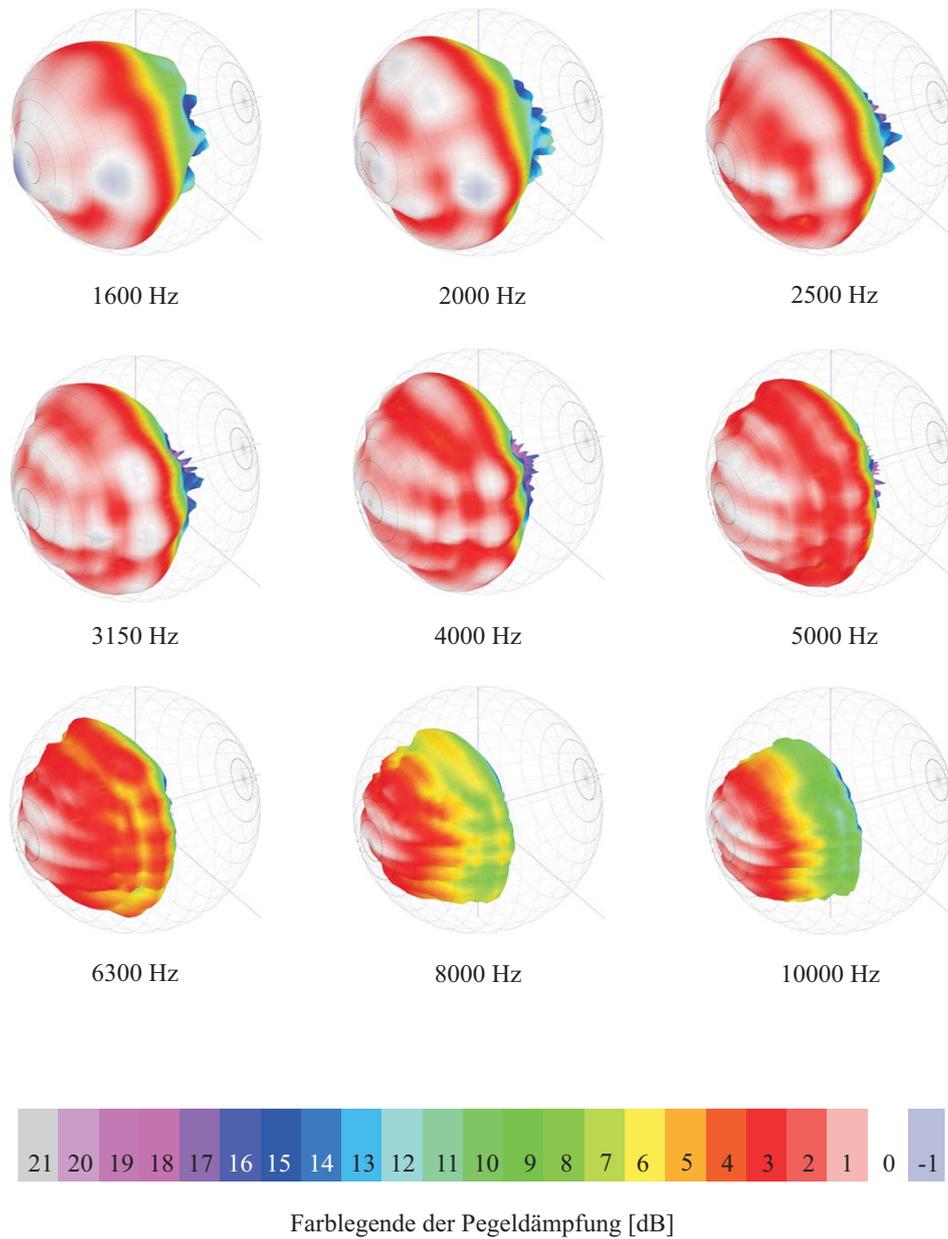


Abb. A.13: Balloon-Daten des 24 mm dicken Flachlautsprechers (IFA 2009) für 1,6 kHz bis 10 kHz

A.6 Abklingzeiten des untersuchten Flachlautsprechers

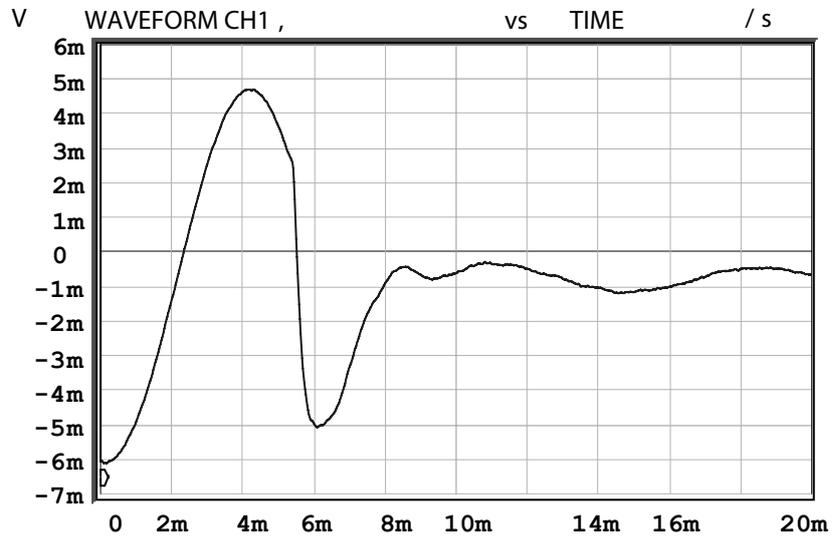


Abb. A.14: Abklingzeit des Flachlautsprechers bei 125 Hz

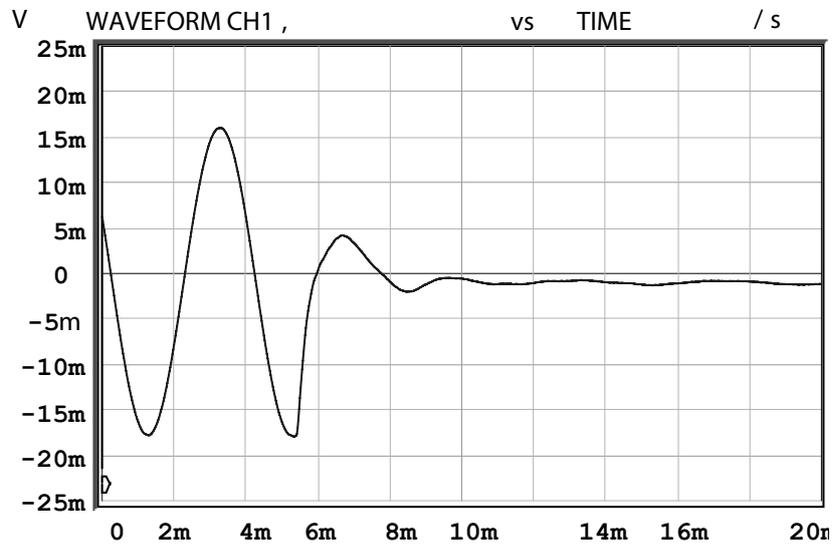


Abb. A.15: Abklingzeit bei des Flachlautsprechers 250 Hz

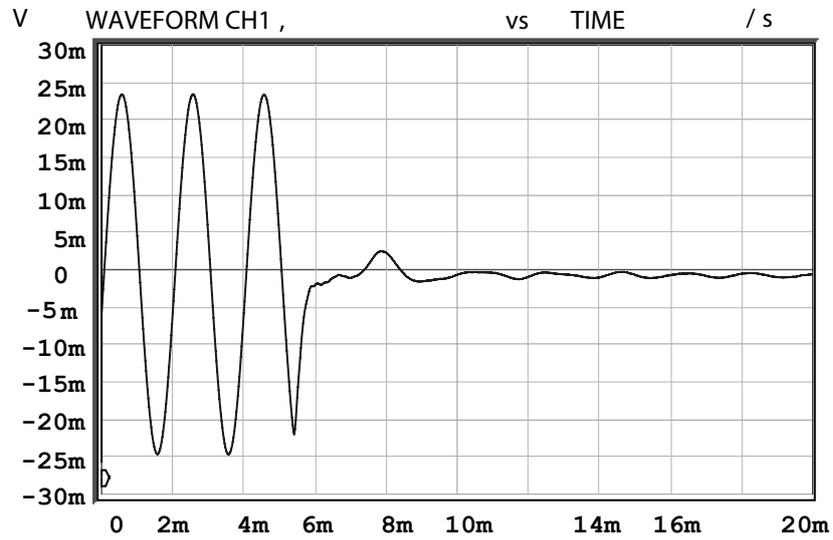


Abb. A.16: Abklingzeit des Flachlautsprechers bei 500 Hz

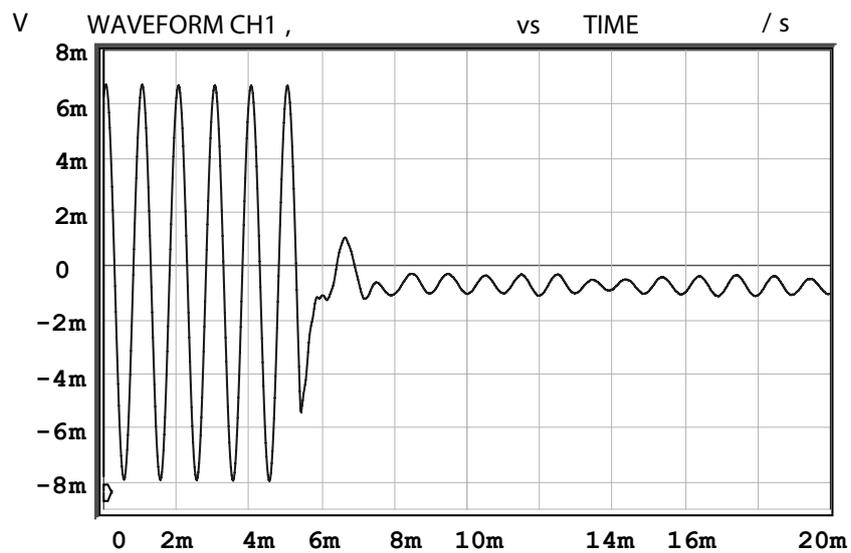


Abb. A.17: Abklingzeit des Flachlautsprechers bei 1000 Hz

A.6 Abklingzeiten des untersuchten Flachlautsprechers

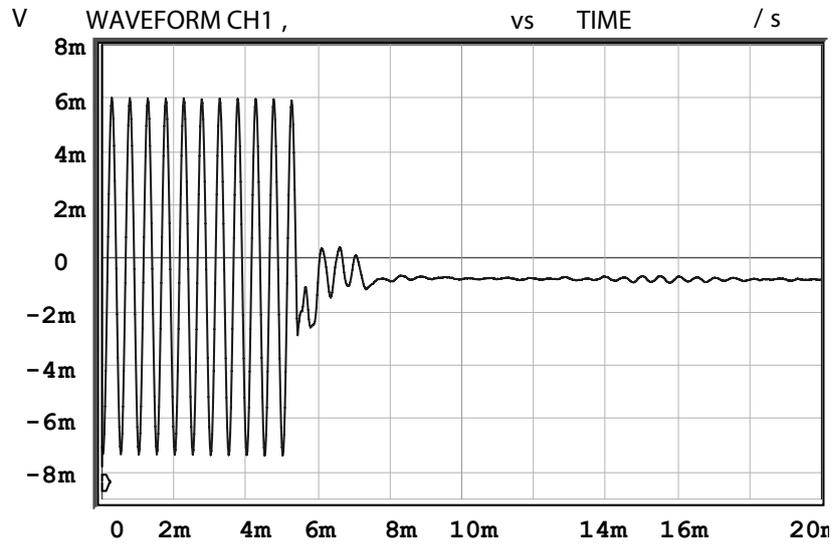


Abb. A.18: Abklingzeit des Flachlautsprechers bei 2000 Hz

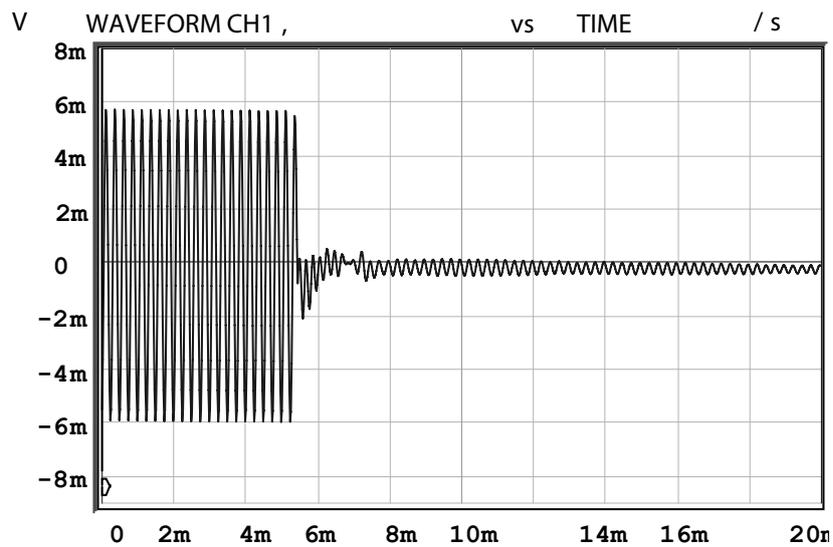


Abb. A.19: Abklingzeit des Flachlautsprechers bei 4000 Hz

A.7 Konstruktionszeichnungen des untersuchten Flachlautsprechers

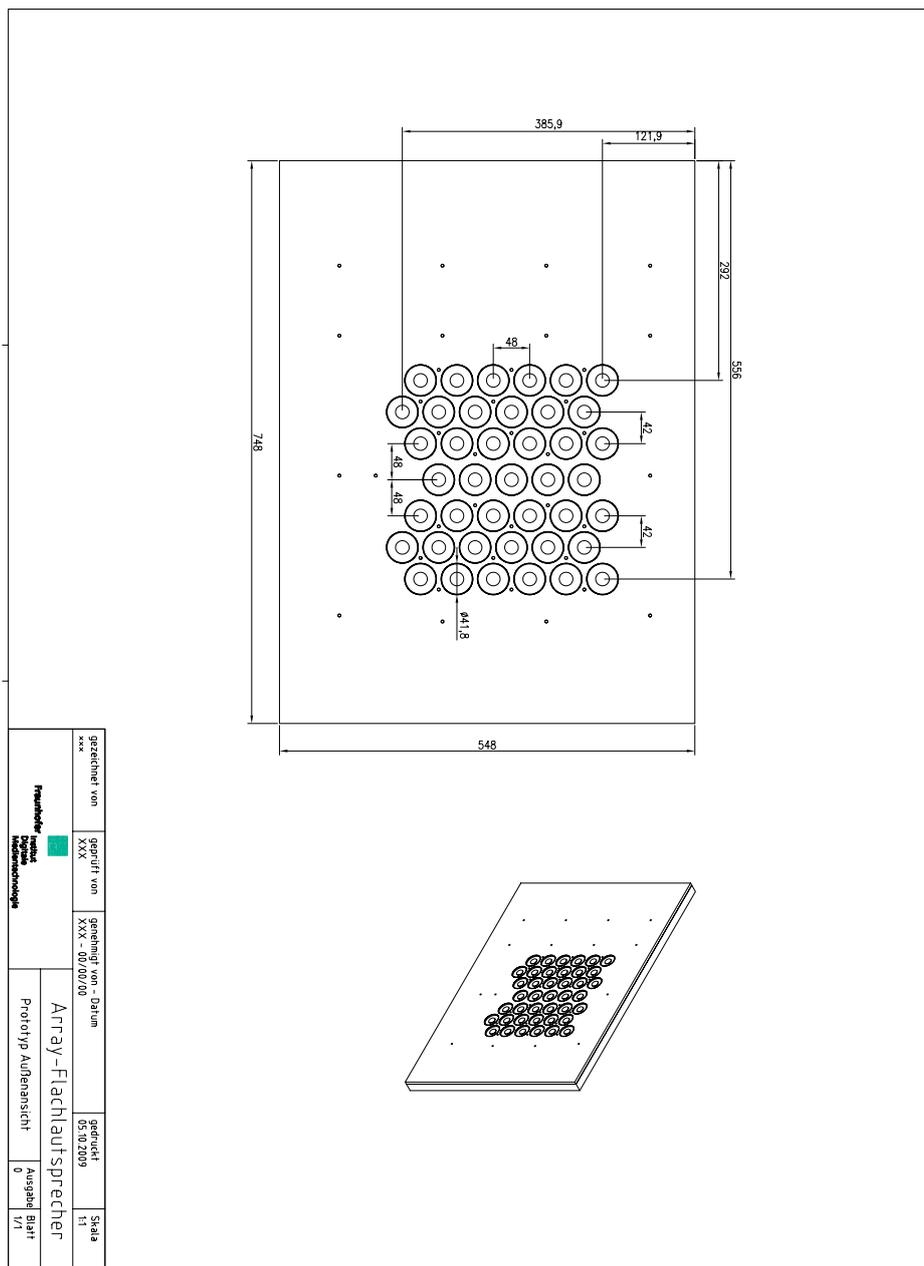


Abb. A.20: Konstruktionszeichnung des gefertigten Flachlautsprechers in der Draufsicht

A.7 Konstruktionszeichnungen des untersuchten Flachlautsprechers

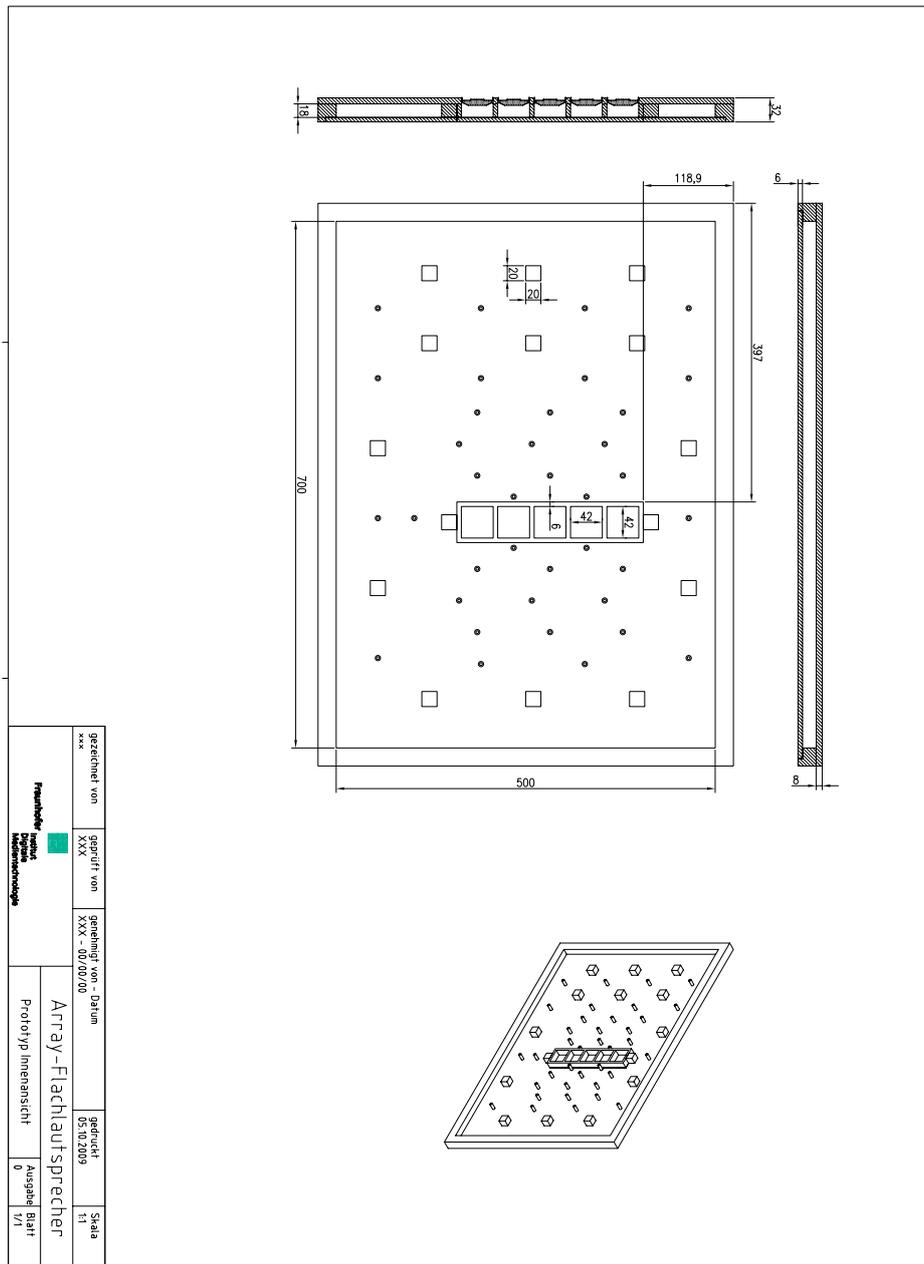


Abb. A.21: Konstruktionsskizze des gefertigten Flachlautsprechers in der Innenansicht

A.8 Konstruktionszeichnungen des Flachlautsprechers (IFA 2009)

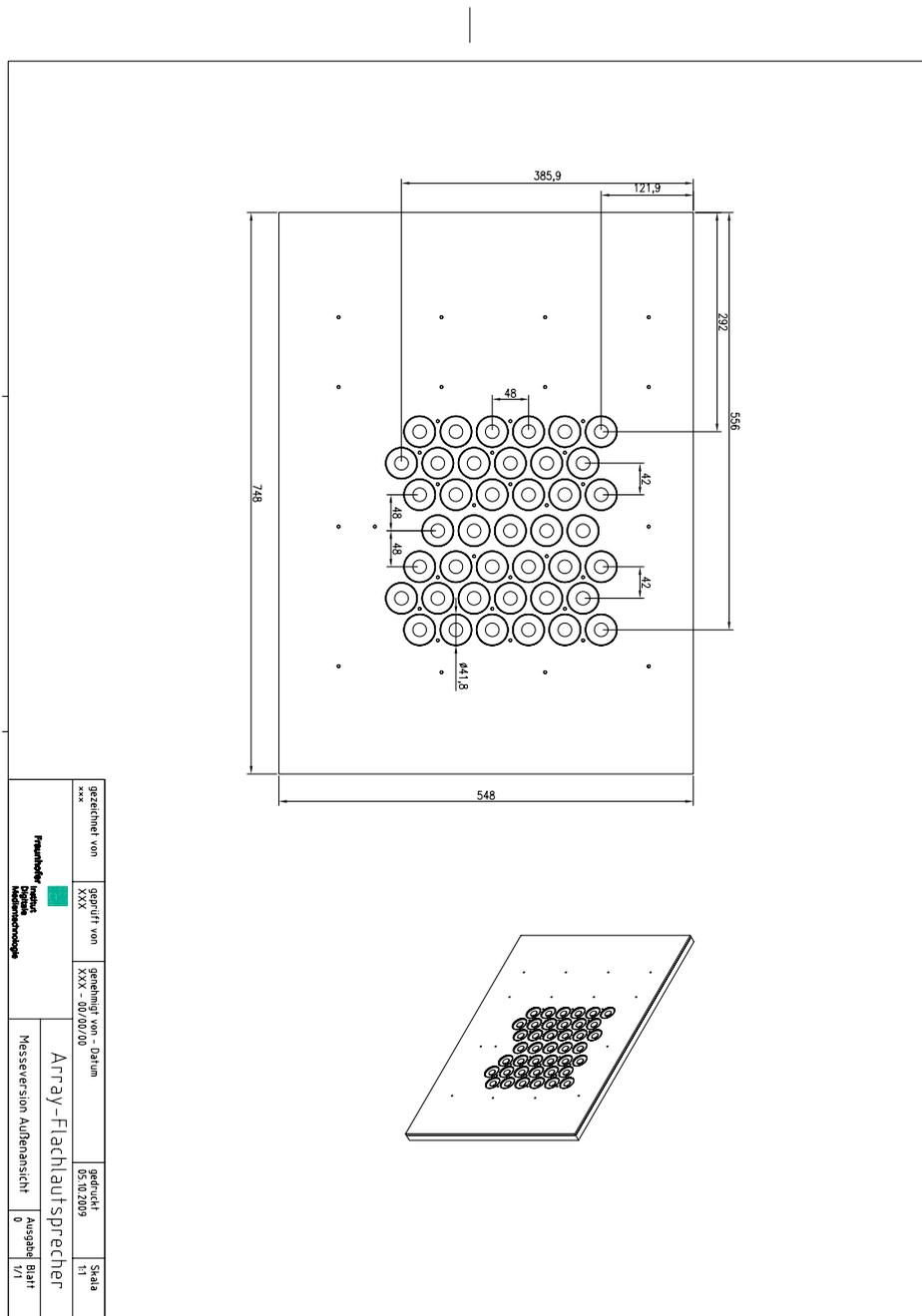


Abb. A.22: Konstruktionszeichnungen des für die IFA 2009 gefertigten Flachlautsprechers in der Außenansicht

A.8 Konstruktionszeichnungen des Flachlautsprechers (IFA 2009)

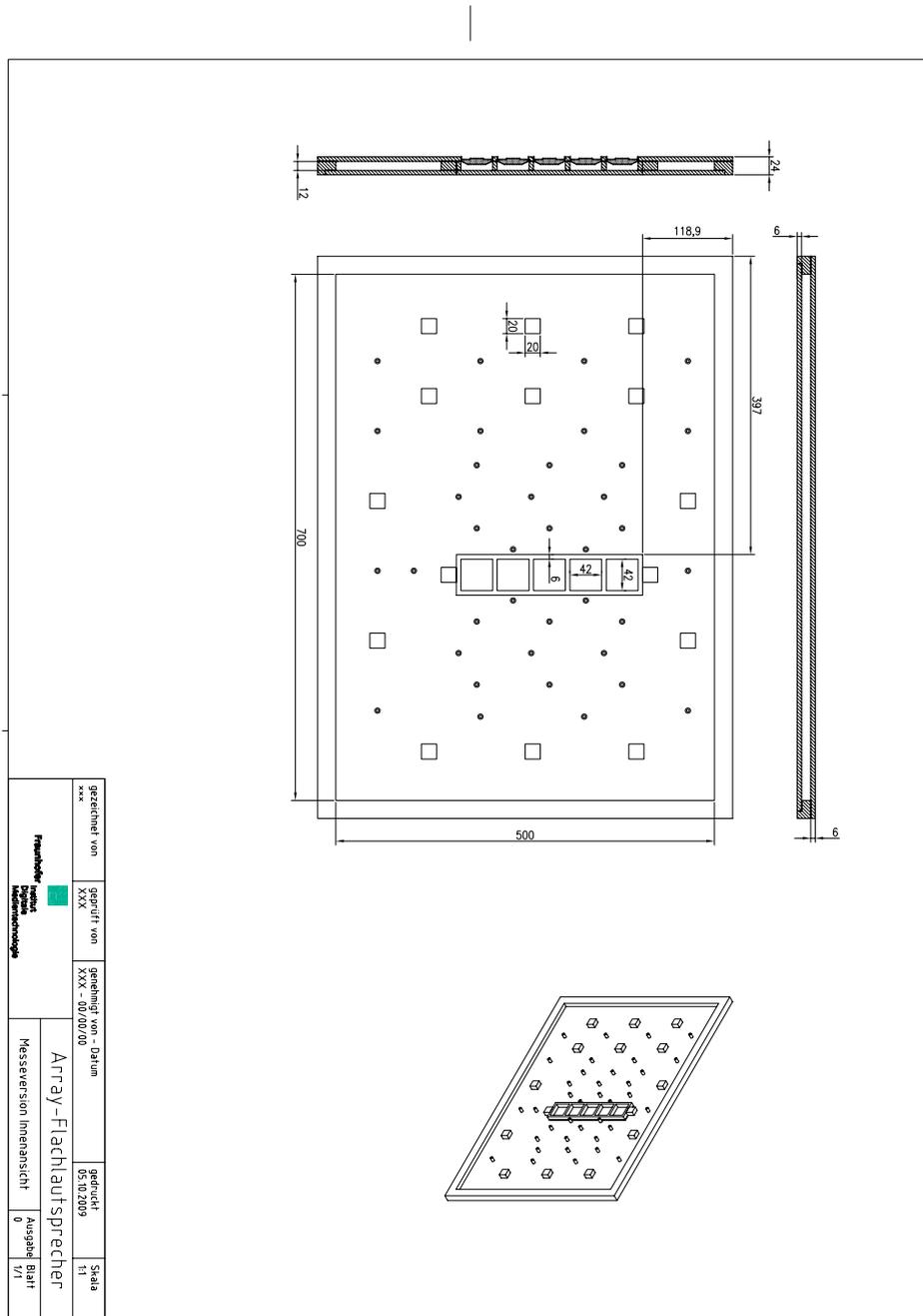


Abb. A.23: Konstruktionszeichnungen des für die IFA 2009 gefertigten Flachlautsprechers in der Innensicht

A.9 Flachlautsprecher-Stereo-Setup im Foyer des Fraunhofer IDMT



Abb. A.24: Stereo-Setup am Fraunhofer IDMT bestehend aus zwei Flachlautsprechern (IFA 2009)

A.10 Energiebedarf WFS-System

Bei Audiowiedergabeverfahren wie Stereo oder 5.1-Surround spielt der Bedarf an elektrischer Energie eine untergeordnete Rolle. Bei einem WFS-System ist die erheblich größere Anzahl an Lautsprecherkanälen für einen wesentlich größeren Energiebedarf verantwortlich. Aus diesem Grund spielt der Wirkungsgrad der eingesetzten Lautsprecher eine entscheidende Rolle.

Für den speziellen Fall eines WFS-Systems im Heimbereich ist nachfolgend eine Beispielrechnung aufgeführt.

Bei einer gewöhnlichen Elektroinstallation werden die 30 kW des Hausanschlusses so verteilt, dass abgesehen von der Küche in jedem Raum ein Steckdosenring mit 16 A abgesichert sind. Dieser Steckdosenring stellt bei 230 V effektiv 3,68 kW elektrische Leistung zur Verfügung. Der Energiebedarf des WFS-Systems sollte entsprechend kleiner 3,68 kW sein; andernfalls müssen weitere Stromkreise installiert werden.

Ausgehend von 3,68 kW wird anhand eines Beispiels die Energiebilanz eines WFS-Systems für den Heimbereich betrachtet. Die Lautsprecheranzahl variiert mit der Größe des WFS-Systems. In dieser Berechnung wird von einem 36 m² großen Raum ausgegangen. Das WFS-System für diesen Raum soll aus 140 Lautsprecherkanäle bestehen. Jeder einzelne Lautsprecherkanal ist passiv ausgeführt und besitzt einen Verstärker.

Neben den Verstärkern sind für die WFS-Berechnung derzeit zwei Rechner notwendig. Diese können 128 virtuelle Quellen gleichzeitig berechnen. Die Rechner geben über drei MADi-Karten die Signale für die einzelnen Lautsprecher aus. Die MADi-Signale werden in ADAT-Signale gewandelt und über 18 ADAT-Leitungen an D/A-Wandler weitergegeben. Die D/A-Wandler geben dann die 140 Signale an die Lautsprecherverstärker weiter (Abb. A.25).

Ausgehend vom Leistungsbedarf und der Energieeffizienz der einzelnen Geräte eines WFS-Systems stehen beim Anschluss an einen Steckdosenring mit 3,6 kW elektrischer Leistung 8 W Ausgangsleistung pro Verstärkerkanal zur Verfügung. Bei einer angenommenen Lautsprecherempfindlichkeit von 85 dB/1 W/1 m werden je nach Verlusten in den Lautsprecherkabeln und der evtl. vorhandenen Frequenzweiche bis zu 94 dB/1 m Schalldruckpegel bei Vollaussteuerung erzielt.

Zu beachten ist, dass evtl. Frequenzgangverzerrungen die Empfindlichkeit des Lautsprechers deutlich verändern können.

Abhängig von der zu synthetisierenden Wellenfront sind immer mindestens zwei Lautsprecherkanäle aktiv. Je nach Lautsprecherabstand kommt es dabei zur akustischen Kopplung. Der Pegelgewinn beträgt maximal 6 dB, wenn der Lautsprecher-

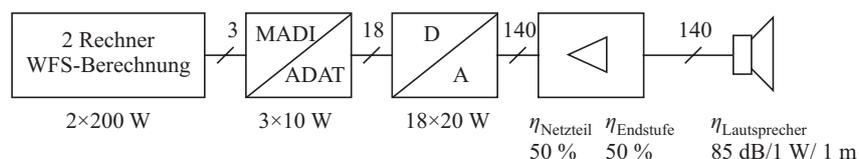


Abb. A.25: WFS-Signalkette mit üblichen Angaben zum Leistungsbedarf und zur Energieeffizienz

A Anhang

abstand kleiner gleich einem Achtel der Wellenlänge ist (Abschnitt 3.5, S. 31ff.). In dem Berechnungsbeispiel wird davon ausgegangen, dass alle Verstärker zu jeder Zeit die gleiche elektrische Leistung benötigen. Aus energetischer Sicht muss geklärt werden, wie viele Lautsprecher gleichzeitig mit welchem Pegel spielen. Für den Fall dass alle Kanäle gleichzeitig spielen, etwa bei der Synthese ebener Wellenfronten von allen Seiten, wird der Schalldruckpegel des Einzelkanals wegen der Pegeladdition zwischen den Kanälen wesentlich geringer als im Zweikanalbetrieb sein.

A.11 Piezoelektrische Demonstratoren

Typ	Produkt	Länge [cm]	Breite [cm]	Dicke [μm]	Radius [cm]
Piezokeramik	Scheibe PIC255	–	–	150	5,6
	Platte PIC251	6	5	500	–
Piezopolymer	EMFI-Folie	23	21	70	–
	PVDF-Folie	28	20,5	28	–

Tab. A.7: Bezeichnung und Abmessungen der verwendeten piezoelektrischen Produkte

A.11 Piezoelektrische Demonstratoren

In dieser Arbeit wurden auch Untersuchungen an piezoelektrischen Materialien durchgeführt. Diese Untersuchungen fanden im Rahmen betreuter studentischer Arbeiten statt und sind in [252], [253] und [78] ausführlich dokumentiert. Betrachtet wurden piezokeramische Scheiben bzw. Platten des Herstellers PI Ceramic¹ und piezoelektrische Polymere in Form von PVDF-Folien bzw. Emfi-Folien der Hersteller Measurement Specialties² bzw. EMFIT³. Die genauen Produktbezeichnungen und geometrischen Abmessungen sind in Tab. A.7 sowie in den Datenblättern (Anhang A.12, A.13, S. 244ff.) zu finden. Es wurden drei Demonstratoren angefertigt (Abb. A.28). Für den ersten Demonstrator wurde ein 2×3 Array aus piezokeramischen Platten auf eine 19 mm MDF-Platte geklebt (Abb. A.28a). Der zweite Demonstrator bestand aus einer mehrfachgeschichteten EMFi-Folie, die einlamiert und ebenso auf eine 19 mm MDF-Platte geklebt wurde (Abb. A.28b). Der dritte Demonstrator bestand aus einer mehrfach gewölbten PVDF-Folie (Abb. A.28c). Entsprechend der Herstellerdaten bestand bei der Piezokeramik und der PVDF-Folie eine starke Verkopplung zwischen der Dicken- und Längenänderung. Infolgedessen war eine reine Dickenschwingung zur Schallanregung nicht möglich.

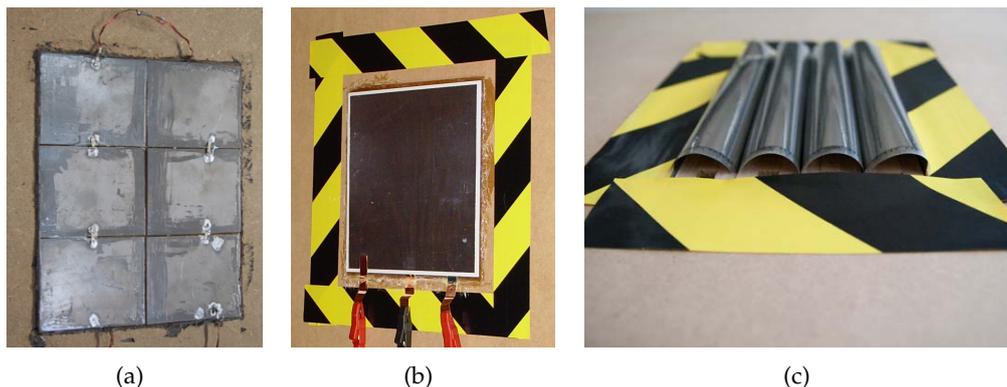


Abb. A.26: Fotos der untersuchten piezoelektrischen Demonstratoren, Array aus aufgeklebten piezokeramischen Platten (a) [252], doppellagige, einlamierte EMFi-Folie [253] (b) und mehrfach geklemmte PVDF-Folie [78] (c)

¹ www.piceramic.de

² www.meas-spec.com

³ www.emfit.com

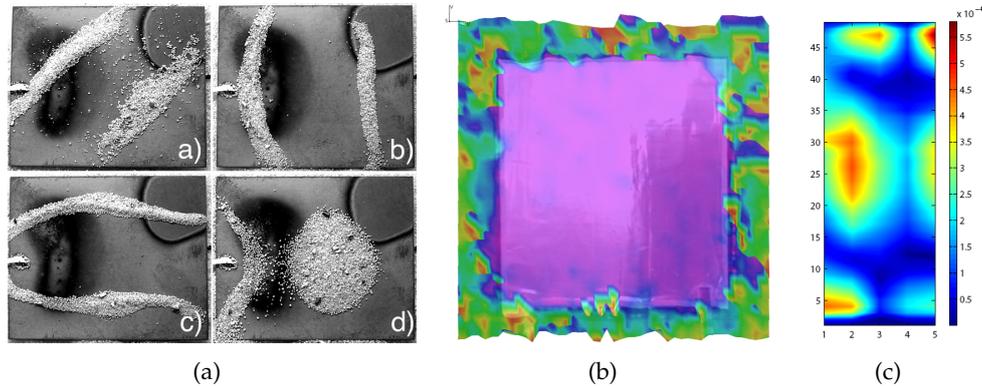


Abb. A.27: Schwingungsuntersuchung einer piezokeramischen Platte mittels Chladnischer Klangfiguren bei verschiedenen Frequenzen [252] (a), Folienschnelle der EMFi-Folie [253] (b) und Folienschnelle eines PVDF-Bogens [78] (c)

Schwingungsuntersuchung mittels Laservibrometrie bzw. Chladnischer Klangfiguren zeigten deutlich das Auftreten von Partialschwingungen (Abb. A.27a, c). Die EMFi-Folie wies entsprechend der geringen Verkopplung zwischen Dicken- und Längenschwingung vorrangig eine Dickenänderung auf (Abb. A.27b). Das akustische Verhalten der Demonstratoren wurde im reflexionsarmen Raum bestimmt. Die Amplitudenfrequenzgänge sind in Abb. A.28 dargestellt. Die EMFi-Folie und die PVDF-Folie zeigen einen bereits ab 20 kHz bzw. 10 kHz mit etwa 12 dB/Okt. sinkenden Schalldruckpegel. Der Amplitudenfrequenzgang des Arrays aus piezokeramischen Platten nimmt erst unterhalb von ca. 500 Hz mit 20 dB/Okt. ab. Der Amplitudenfrequenzgang ist gegenüber den beiden Folien von bis zu 20 dB großen Einbrüchen und Überhöhungen geprägt, die vor allem durch Biegewellenresonanzen in den Piezo-Platten und der Trägerplatte verursacht werden. Der Schalldruck-

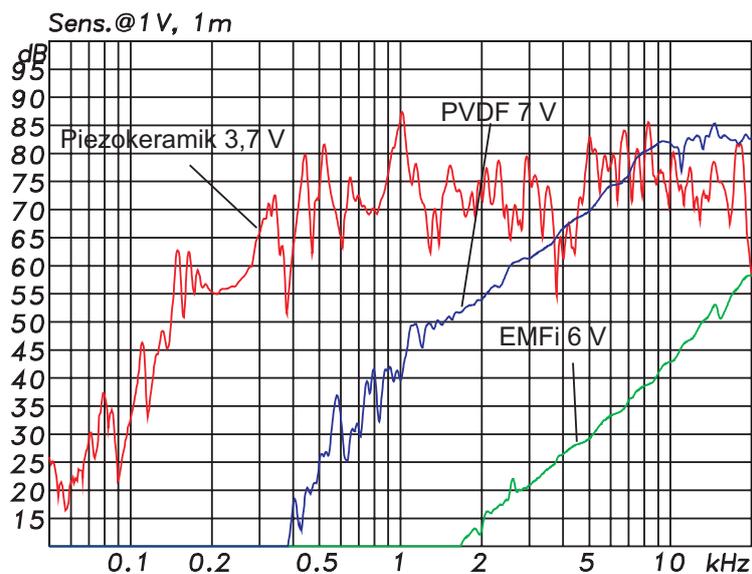


Abb. A.28: Schalldruckpegelfrequenzgang der Demonstratoren nach [252],[253], [78]

A.11 Piezoelektrische Demonstratoren

pegel ist jeweils automatisch vom Messsystem auf 1 V/1 m normiert. Auf diese Weise konnten die Empfindlichkeiten der Demonstratoren verglichen werden⁴. Die EMFi-Folie weist den geringsten Kennschalldruckpegel auf.

Im Vergleich mit dem optimierten Flachlautsprecher aus Miniaturwandlern zeigt sich, dass die piezoelektrischen Demonstratoren wesentlich schlechtere Wiedergabeeigenschaften besitzen. Aus diesem Grund stellt die Array-Technologie in Kombination mit elektrodynamischen Miniaturwandlern zur Zeit den besten Kompromiss zwischen einer geringen Lautsprecherdicke und guten Wiedergabeeigenschaften dar. Piezoelektrische Technologien sollten demnach nur dort eingesetzt werden, wo Bautiefen von wenigen Millimetern erforderlich sind.

Im Zusammenhang mit dem Betrieb piezoelektrischer Wandler ist außerdem festzuhalten, dass wegen des kapazitiven Lastverhaltens und der hohen erforderlichen Spannungen konventionelle Verstärker nur bedingt zur Ansteuerung geeignet sind. Daraus resultiert auch die Notwendigkeit, die leitenden Oberflächen piezoelektrischer Lautsprecher so zu isolieren, dass für den Nutzer keine Gefahr bezüglich eines elektrischen Schlages besteht.

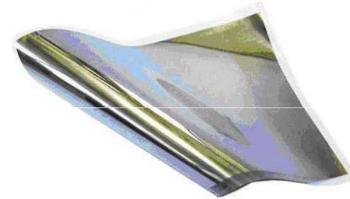
⁴ Die Spannungsangaben in Abb. A.28 geben Auskunft über die tatsächliche Klemmspannung während der Messung.

A.12 PVDF-Datenblatt



Metallized Piezo Film Sheets

- Thin, flexible film sheets
- Multi-purpose ... design your own Sensor
- Different Electrode Options – Sputtered metallization or Silver ink
- Various Film Thickness Options



Piezo Film Sheets are available in a different film sizes and thicknesses. These can be fabricated into simple transducers, or for use as full size sheets for applications such as speakers.

Metallization options include a compliant silver ink as well as sputtered metallization. The silver ink is best for applications where mechanical stress is being applied. Silver ink also lends itself to custom metallization patterns for easy lead attachment.

The thin, sputtered metallization is more brittle and used where signal to noise requirements dictate very low mass loading by the electrodes. Our standard sputtered metallization is 700 Å of copper covered with 100Å of nickel, which has good conductivity and is resistant to oxidation. Other metallizations such as gold are available on a custom basis with a set up fee. For the sputtered Metallized film, there is no border.

FEATURES

- Film Thickness Options: 28µm, 52µm, 110µm PVDF
- Electrode Type Options: Silver Ink & NiCu Metallization
- Sheet Size Options: 8" x 5.5" and 8" x 11"

APPLICATIONS

- Film Transducer
- Speaker Element

typical specifications

Electro-Mechanical Conversion	(1 direction) $23 \times 10^{-12} \text{m/V}$, $700 \times 10^{-6} \text{N/V}$ (3 direction) $-33 \times 10^{-12} \text{m/V}$
Mechano-Electrical Conversion	(1 direction) $12 \times 10^{-3} \text{V}$ per microstrain, $400 \times 10^{-3} \text{V}/\mu\text{m}$, 14.4V/N
Pyro-Electrical Conversion	(3 direction) $13 \times 10^{-3} \text{V/N}$ $8 \text{V}/^\circ\text{K}$ (@ 25°C)
Capacitance	$1.36 \times 10^{-9} \text{F}$; Dissipation Factor of 0.018 @ 10 KHz; Impedance of 12 KΩ @ 10 KHz
Maximum Operating Voltage	DC: 280 V (yields 7 µm displacement in 1 direction) AC: 840 V (yields 21 µm displacement in 1 direction)
Maximum Applied Force (at break, 1 direction)	6-9 kgF (yields voltage output of 830 to 1275 V)

Abb. A.29: PVDF-Datenblatt

A.13 EMFi-Datenblatt

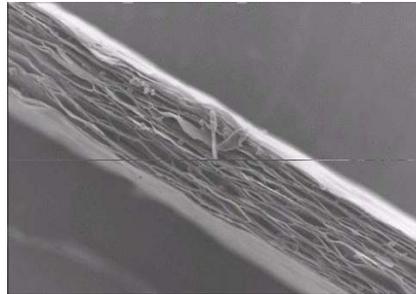
EMFIT EMFIT FILM SPECIFICATIONS

Rev C, 17.3.2003

INTRODUCTION

The core competence of the Emfit sensor products is the innovative, patented Emfit film, which has a unique, strong electromechanical response. The film is based on a polyolefin material manufactured in a continuous biaxial orientation process that stretches the film in two perpendicular directions (machine direction and the transverse direction). The structure of Emfit film consists of flat voids separated by thin polyolefin layers. Typically Emfit film is about 65-70 µm thick. The voids are made by compounding small particles, which functions as rupture nuclei and form closed lens-like cavities to the film during the biaxial orientation.

The bi-axially oriented film is further swelled with patented high-pressure gas injection technology. The swelling process more than doubles the thickness and elasticity of the film by increasing the size of air-voids inside it. Electromechanical response with properly swelled cellular film is over 10-fold compared to the situation where the film is charged before swelling.



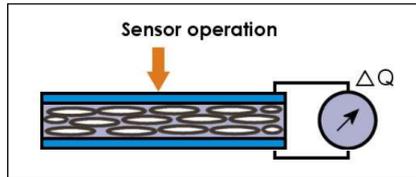
SEM picture of swelled Emfit film.

USES

Emfit film sheets are useable for both research and production.

SENSOR OPERATION

Operating in a reciprocal fashion, changes in the thickness of the Emfit sensor generate a corresponding charge and hence, voltage to appear on the electrodes. The transducer behaves like an "active" capacitor, consequently, the loading of the signal by the input impedance of the measuring device must be considered.



Due to the thinness of the films, the associated capacitance can be sufficient to give adequate low frequency response to a standard 1 MΩ load but the use of an X10 probe will extend the low frequency range by a decade. For extremely low force change levels, some buffering may be desirable. For the majority of analysis work, this is unnecessary and the film can feed directly to the instrument. Again, the low mass contributed by the transducer is of major importance, as well as its non-resonate behaviour. Frequency response is inherently flat to over 20 KHz with only the R-C roll off at low frequencies distorting the profile.

Though it responds to thickness change rather than strain, low signal levels may be generated by low frequency flexing, so a distinction must be made between the frequency response of the film for changes in its primary parameter (i.e. thickness) and its relative behaviour compared with, say piezoelectric sensors. The sensor has a flat response over a very wide frequency range, with resonant frequency points well above 20 KHz.

OTHER SPECIFICATIONS

Property	Symbol	Value	Unit	Tolerance	Conditions
Storage temperature	T _s	from -40 to +50	°C		
Operating temperature ¹	T _r	from -20 to +50	°C		
Thickness	D	70	µm	±5 %	
Sensitivity ²	S _q	25-250	pC/N	±20 %	normal force
Youngs modulus, TD		0,5	Mpa	±50 %	
Operating force range	P	N/cm2	>100		

¹ All rights reserved. All specifications are subject to change without prior notice. Copyright © 2000-2004 Emfit Ltd. EMFI, EMFIT and EMFIT logo are either registered trademarks or trademarks of Emfit Ltd in U.S., EU and/or other countries.

Abb. A.30: Emfi-Datenblatt

Thesen:

- Bisherige Flachlautsprechertechnologien sind aufgrund ihrer Dipolcharakteristik für den Betrieb direkt an schallreflektierenden Grenzflächen ungeeignet.
- Aufgrund der in Wandnähe entstehenden Klangbeeinträchtigungen ist eine vorteilhafte Installation von Schallwiedergabesystemen mit diesen Technologien nicht möglich.
- Zur Verhinderung der Klangbeeinträchtigungen ist eine akustische Trennung zwischen den Schallanteilen beider Membranseiten erforderlich.
- Der Einbau in ein Gehäuse bietet zum einen eine vollständige akustische Trennung der Schallanteile, zum anderen beeinflusst es das Schwingungsverhalten der Membran.
- Flachlautsprecher erfahren durch den Einbau in ein Gehäuse in der Regel eine Erhöhung der Resonanzfrequenz, was zu einer verringerten Abstrahlung im Tieftonbereich führt.
- Der Tieftonverlust bei Flachlautsprechern mit plattenartiger Membran wird durch die Steifigkeit des eingeschlossenen Luftvolumens verursacht.
- Durch ein Membrantriebssystem, welches eine ausreichend große Kraft und Auslenkung bietet, kann der Volumensteifigkeit entgegengewirkt werden.
- Die Antriebskraft muss für eine kolbenförmige Auslenkung gleichmäßig über der Membran verteilt sein.
- Eine Verhinderung von Partialschwingungen gelingt nur, wenn neben dem verteilten Antriebssystem die Membranfläche unterteilt wird.
- Die Verwendung von elektrodynamischen Miniaturwandlern, angeordnet zu einem Array, stellt derzeit die bestmögliche Realisierung der in dieser Arbeit gestellten Anforderungen dar.