

Grenzflächen - Trennkörper - Stereomikrophon

Diplomarbeit

durchgeführt von

Boris Müller



Institut für Breitbandkommunikation
Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Kubin Gernot

Begutachter / Betreuer: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Graber Gerhard

Graz, im Juni 2010

Vorbemerkung

Zur geschlechtsneutralen Formulierung:

Diese Arbeit ist gleichermaßen für weibliche und männliche LeserInnen geschrieben. Da es bei den Themen einer wissenschaftlichen Arbeit aber nicht immer leicht ist, einen durchgängigen Lesefluss zu bewahren, möchte ich diesen nicht weiter durch umständliche Formulierungen blockieren. Ich habe mich bemüht eine geschlechtsneutrale Schreibweise zu verwenden, möchte aber auf Doppelnennungen (z.B. Studentinnen und Studenten) oder Großbuchstaben innerhalb von Wörtern im Sinne einer besseren Lesbarkeit verzichten. Dies bedeutet keine Unterscheidung zwischen den Geschlechtern. Im Gegenteil hoffe ich, sowohl Leserinnen als auch Leser mit meiner Arbeit gleichermaßen anzusprechen.

Trotz sorgfältiger Recherche und Korrektur ist es nicht ausgeschlossen, dass sich Fehler eingeschlichen haben. Sollte ein Fehler auftauchen, oder der Verdacht bestehen, eine Warenzeichen- oder Copyright Bestimmung könnte nicht beachtet worden sein, bitte ich um ein kurze Mail an diplomarbeit@borismueller.de, um die Fehler korrigieren zu können.

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

Boris Müller

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich durch mein ganzes Studium hindurch unterstützt hat und stets daran geglaubt hat, dass ich diese Arbeit und mein Studium beenden werde. Außerdem möchte ich meiner Freundin und meinen Freunden und Studienkollegen danken, für ihre Hinweise, für fachliche Diskussionen, aber auch für Motivation und gelegentliches Antreiben. Meiner Freundin Tina muss ich auch dafür danken, dass sie mich auch ausgehalten hat, wenn ich durch die Arbeit gestresst war oder keine Zeit hatte.

Ein besonderer Dank gilt natürlich auch meinem Betreuer Prof. Graber und den Mitarbeitern des IEM, die mich häufig mit Rat, Tat und ausgeliehenem Equipment unterstützt haben.

Speziell möchte ich mich bei Franz Zotter, Matthias Frank, Thomas Musil und Christian Kuke bedanken, für die Unterstützung bei der Programmierung in PD, Matlab und auch LaTeX, sowie für viele fachliche Gespräche und Hinweise.

Ein großer Dank gilt auch den beteiligten Musikern der Testaufnahmen und der Vorversuche. Hier möchte ich speziell den 'Graz - Gospel - Chor' und Zeljka Hrestak erwähnen, die sich beim Test der Prototypen besonders engagiert haben. Aber auch einige andere Grazer und Freiburger Musiker haben ihren Beitrag geleistet. Danke auch an Ola für die Fotos.

Für die Unterstützung bei Aufnahmen und Hinweise bei der Prototypenfertigung danke ich Christoph, Henning sowie allen anderen "Helfern".

Fürs Korrekturlesen danke ich David, Gesa und ganz besonders meiner Mutter.

Zusätzliche Literatur wurde mir von Mitarbeitern der Firma Neumann zu Verfügung gestellt, dafür danke ich besonders Martin Schneider und Jürgen Breitlow. Von Ralf Albert von Knowles wurden mir freundlicherweise Samples von Electret Kapseln überlassen. Die Firma Tecstage hat mich bei der Beschaffung von Hardware mit besonders günstigen Konditionen unterstützt.

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung und Realisierung eines Stereomikrophons, welches die Vorteile von Trennkörpermikrophonen und Grenzflächenmikrophonen vereint und hochwertige Aufnahmen für die Reproduktion über Lautsprecher in möglichst einfacher und optisch unauffälliger Weise ermöglicht. Im Rahmen von exemplarischen Messungen wird geklärt, ob sich bisherige Trennkörper auf den Grenzflächenbetrieb übertragen lassen. Anhand der Ergebnisse von Testmessungen, psychoakustischen Grundlagen und eines Vorversuchs sowie aufgrund von Berechnungen, basierend auf Laufzeit- und Intensitätsstereophonie werden mögliche Prototypen für ein Trennkörper-Grenzflächen-Stereomikrophon konstruiert und bewertet. Es wird gezeigt, dass sich Frequenzgänge und Abbildung der Trennkörpermikrophone durch aktive Entzerrung verbessern lassen, sowie typische Artefakte, die durch die Größe der Trennkörper entstehen, verringern lassen.

Es wird überprüft, ob sich herkömmliche Kleinmembranmikrophone, wie sie in der Aufnahmetechnik verwendet werden, als Schallaufnehmer für Trennkörper - Grenzflächen - Stereomikrophone eignen, welche Eigenschaften die Mikrophonkapseln für das Mikrophon benötigen und wie sich diese realisieren lassen. Hierfür werden auch Arrays aus Elektretmikrophonkapseln getestet.

Der Einsatzbereich und die praktischen Problembereiche eines solchen Mikrophonsystems werden untersucht. Hierzu werden Testaufnahmen und Messungen verwendet, für welche eine Messumgebung und ein Entzerrer realisiert werden.

Abstract

This work deals with the feasibility of a stereophonic microphone, combining the advantages of acoustic baffles and boundary layer microphones, and allowing high-quality recordings for the reproduction over loudspeakers in an easy and optically unobtrusive way. In the context of exemplary measurements it is clarified if it is possible to transfer existing acoustic baffles to boundary layer operation. Based on the results of test measurements, psychoacoustic principles and a preliminary test as well as on the basis of calculations for time-of-arrival stereophony and intensity stereophony possible prototypes are constructed and evaluated. The work also shows that frequency responses and the localization function of acoustic-baffle-microphones can be improved by active equalization as well as typical artifacts originating in the size of the acoustic baffles can be reduced.

It is checked whether conventional small-diaphragm microphones, as used in recording studios, are suitable as transducers for acoustic-baffle-boundary-layer-stereo-microphones, which qualities the microphone capsules need, and how these can be realized. For this purpose arrays made of electret condenser capsules are also tested.

The area of application and the practical issues of such Microphone Systems are examined. To this end test recordings and measurements are used, for which a measurement environment and an equalization-tool are realized.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik	1
1.2	Zentrale Forschungsfrage	2
1.3	Engineers Specsheet	2
2	Mikrophone	3
2.1	Druckempfänger und Druckgradientenempfänger	3
2.2	Membrangröße	3
2.3	Richtcharakteristik	4
2.4	Elektretmikrophone	4
2.5	Problembereiche der Mikrophonierung in der Praxis	5
2.6	Grenzflächenmikrophone	6
2.6.1	Grenzflächenmikrophone aus Standard - Studiomikrofonen	7
2.6.2	Unterschiede der Oberfläche von Grenzflächen	10
2.6.3	Grenzflächen mit Druckgradientenempfängern	12
2.6.4	PZM	13
2.6.5	Vor- und Nachteile von Grenzflächenmikrofonen	14
3	Trennkörperstereophonie	15
3.1	klassische Trennkörpermikrophone	15
3.1.1	OSS - Jecklinscheibe	15
3.1.2	Grenzflächenkeil	16
3.1.3	CLARA	17
3.1.4	weitere Typen bzw. Varianten	18
3.2	spezielle Trennkörpermikrophone	18
3.2.1	Crown - SASS	18
3.2.2	SOURCE - „Scheibenkunstkopf“ nach Graf	19
3.2.3	Das Kugelflächenmikrophon	20
3.3	Trennkörperverfahren Zusammenfassung	23
4	Vorversuch Halbkugelflächenmikrophon	24
4.1	Aufnahmesituation	25
4.2	Handhabung:	26
4.3	Vergleich der Aufnahmen:	26
4.3.1	Klangeindruck:	26
4.3.2	Vergleich KFM mit HKFM	27
4.3.3	Schlagzeug	28
4.3.4	Chor	28
4.4	Frequenzgänge:	28

4.5	Vergleich der ermittelten Frequenzgänge mit einer Messung	31
4.6	Ergebnisse und Einschränkungen	31
5	Anwendungsbereich	33
5.1	Virtuelle Raumvergrößerung	33
5.2	Kleines Ensemble ohne Dirigent	33
5.3	Einzelinstrumente und Stützmikrofon für Instrumentengruppen	33
5.4	Einschränkungen der Verwendbarkeit	34
6	Trennkörper-Grenzflächen-Stereomikrofon	35
6.1	Vorüberlegungen	35
6.1.1	Summenlokalisierung und Äquivalenzstereophonie	35
6.1.1.1	Intensitätsstereophonie	35
6.1.1.2	Laufzeitstereophonie	36
6.1.1.3	Äquivalenzverfahren	38
6.1.1.4	Kopfbezogene Stereophonie	38
6.1.2	Assoziationsmodell nach Theile	39
6.1.2.1	Simulation der räumlichen Tiefe	39
6.1.2.2	Klangfarbe	41
6.1.3	Shuffling	41
6.1.3.1	Stereo Shuffling	42
6.1.3.2	Stereo Shuffling bei Trennkörpermikrofonen	43
6.1.3.3	Abbildungsfunktion	43
6.2	Messtechnische Untersuchung verschiedener Mikrophone und Trennkörper	44
6.2.1	Einzelmikrophone unter Grenzflächenbedingungen und im un- begrenzten Schallfeld	44
6.2.2	Vergleich von Trennkörper und Grenzflächentrennkörper	46
6.2.2.1	OSS und Halb-OSS	46
6.2.2.2	KFM und Halbkugelflächenmikrofon	50
6.3	Optimierungskriterien	50
6.3.1	Frequenzgang	50
6.3.2	Laufzeitdifferenzen	53
6.3.3	Richtcharakteristik des Gesamtsystems	55
6.3.4	Aufnahmewinkel / Aufnahmebereich	56
6.3.5	Durchschnittliche Hörumgebung	58
6.3.6	Reproduktion der Räumlichkeit	59
6.3.7	Überlegungen zur Form	60
6.4	Entwurf von Trennkörpern	61
6.4.1	Aufnahmewinkel Laufzeit	62
6.4.2	Berechnung der Breite	63
6.4.3	Aufnahmewinkel Pegelstereophonie	64

6.4.4	Berechnung des Winkels der Tangentialfläche	67
6.4.5	Berechnung des vertikalen Winkels der Tangentialfläche	69
6.4.6	Berechnung des Überstands	69
6.4.7	Rückseite	70
6.4.8	Grundform des Trennkörpers	70
6.4.9	Berechnung der Höhe	72
6.5	Entzerrung als Erweiterung	74
6.5.1	Entzerrung der Spektraldifferenzen	74
6.5.2	Zusätzliche Möglichkeiten des Tools zur Bearbeitung des Stereobildes	75
7	Prototypen und Ergebnisse	77
7.1	Grundsätzlicher Aufbau der Trennkörper	77
7.2	GF-OSS - Halbierte OSS-Scheibe auf der Grenzfläche	78
7.3	Halbkugelmikrophon - HKFM - Kugelflächenmikrophon in der Grenzfläche	79
7.4	Eiförmiger Trennkörper	80
7.5	Grenzflächen - Source	82
7.6	X1A - Ein Trennkörper nach dem Äquivalenzmodell	83
7.7	X1P - Vereinfachte Version des Trennkörpers nach dem Äquivalenzmodell	85
7.8	Zusätzliche Messreihen & Messfehler	86
7.8.1	Verschiedene Membrangrößen	87
7.8.2	Montagearten	87
7.8.3	Randbereiche	88
7.8.4	Begrenzte Genauigkeit im tieffrequenten Bereich	88
7.9	Testaufnahmen	89
7.10	Ergebnisse	90
7.10.1	Anteil der Intensitätsstereophonie	91
7.10.2	Anteil der Laufzeitstereophonie	92
7.10.3	Hörereignisrichtung durch Laufzeit- und Pegelstereophonie	92
7.10.4	weitere Abbildungseigenschaften	93
7.10.5	Entzerrbarkeit und subjektiver Klang	94
7.10.6	Zusammenfassung	95
8	Zusammenfassung und Ausblick	96
8.1	Weiterführende Arbeiten	98
A	Literaturverzeichnis	100
B	Messsystem	103
B.1	Messaufbau	104
B.2	Messung und Ablaufsteuerung mit PD	106

B.3	Equipment	106
B.3.1	Messreihe im Hochspannungslabor	108
B.4	Datenblätter	108
C	Messungen - exemplarische Datenblätter	109
C.1	X1A + OSS	109
C.2	Ei hinten	113
C.3	Source	117
D	CD - Rom	121
E	Photos	121
E.1	Trennkörpermikrophone	122

Abbildungsverzeichnis

1	Zusammenhang der Mikrofon-Richtcharakteristika	4
2	Aufbau Electretmikrophon	5
3	Schaltung Electretmikrophon	5
4	Grenzflächenmikrophon GFM 132 von Neumann	7
5	Verbesserte Montage von herkömmlichen Mikrofonen als Bodenmikrophon	8
6	Diffusfeldfrequenzgang eines leicht angewinkelten KM 184	9
7	Polardiagramm (vertikal) KM184 gewinkelt. links: 30° rechts: 45°	9
8	Frequenzgänge von Styropor bei verschiedenen Schalleinfallswinkeln	10
9	Frequenzgänge von Styropor mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung bei Schalleinfall von vorn	11
10	Frequenzgangsänderung durch absorbierendes Material auf der Grenzfläche unter der Kapsel (oben: Schalleinfall unter 10°, unten: senkrechter Schalleinfall)	11
11	Richtcharakteristik eines Grenzflächen-Richtmikrophons mit Nierenkapsel nach Beckmann	13
12	OSS-Mikrophanordnung	16
13	Defossez - Geometrie von 2 gut funktionierenden Anordnungen des Grenzflächenkeils	17
14	Crown SASS-P MK II	19
15	SASS-P Entwicklung	19
16	Diskretisiertes Modell eines Trennkörper Prototypen	20
17	Prinzipielle Wirkung des Kugelflächenmikrophons nach Theile	21
18	Kapselbauform GFM	21
19	links: KFM6-Mikrophon, rechts: Frequenzgänge des KFM für 30° seitlichen Schalleinfall	22
20	HKFM - offen und geschlossen	24
21	Aufstellung Konzert Heilandskirche	25
22	Details zur Aufstellung	25
23	HKFM - Probleme mit dem Dirigentenpodest	27
24	HKFM für Schlagzeug	28
25	HKFM für Chor	28
26	Frequenzgangsdifferenzen der Mikrophone in der Heilandskirche bei Applaus	30
27	Frequenzgangsdifferenzen und Geschmacksentzerrung St. Lambrecht	30
28	Gemessener Frequenzgang eines 20cm HKFM mit Schöps MK5 Kapseln, kalibriert mit einem 1/2 Zoll Messmikrophon auf der Grenzfläche liegend.	31
29	Hörereignisrichtung b1 in Abhängigkeit von der Interchannel-Pegeldifferenz	36

30	Fiktive Tiefe durch Darstellung räumlicher Phänomene	40
31	Schematische Darstellung eines Shufflers	42
32	Kontrolle der Basisbreite bei Amplitudenstereophonie	42
33	Pegeldifferenz in Abhängigkeit von der Frequenz bei schmalbandigen Interchannel-Signalen.	43
34	Abbildungsfunktion eines Kugelflächenmikrophons. Links: mit Berücksichtigung des Stereo-Shufflings. Rechts: Ohne Berücksichtigung des Shufflings bei Lautsprecherwiedergabe	44
35	OSS und Halb OSS im Messraum	46
36	Schallumweg in Abhängigkeit der Höhe des Trennkörpers und der Entfernung bzw. Position der Quelle	49
37	Kugelflächenmikrophon und Halbkugelflächenmikrophon im Messraum .	50
38	Pegeldifferenzen als Funktion der Position der Schallquelle nach Hugonnet	51
39	Richtungsbestimmende Bänder nach Blauert	53
40	Gemessene Laufzeitdifferenz und die daraus resultierende Hörereignisrichtung für einen Mikrophonabstand von 19 cm unter 30° auf der Grenzfläche, links: AB - rechts: zusätzlich mit OSS-Scheibe	54
41	links: Polardiagramme des linken Kanals eines HKFM aus dem Vorversuch , rechts: 3-dimensionale Darstellung der Gesamtrichtcharakteristik des HKFM bei 3 kHz	55
42	links: Polardiagramme des linken Kanals eines ORTFs aus zwei Grenzflächennierenmikrophonen, rechts: 3-dimensionale Darstellung der Gesamtrichtcharakteristik bei 1 kHz	56
43	Winkel, Bereiche und Hörereignisrichtung bei Aufnahme und Wiedergabe	57
44	Gesamtergebnis über alle Hörbeispiele (bei Lautsprecher (blau) und Kopfhörerwiedergabe (rot))	61
45	Image Assistent unter www.hauptmikrofon.de	62
46	Berechnung der Breite	64
47	Spektrale Differenzen des KFM für seitlichen Schalleinfall (gemittelt von 0 - 180° horizontal, -20 - 30° vertikal) zwischen den Kanälen . . .	66
48	Berechnung des Winkels der Tangentialfläche	67
49	Grundfläche des neuen Trennkörpers	70
50	Seitenriss des neuen Trennkörpers (gestrichelt: modifizierte OSS-Scheibe)	72
51	Draufsicht und Seitenansicht eines berechneten Trennkörpers	73
52	Beispiel von einem Satz berechneter Korrekturkurven zur Erstellung von Impulsantworten zur Entzerrung eines Trennkörpers (hier: Halbkugelmikrophon 15cm). Zur besseren Übersicht sind die Kurven der Frequenzgangsentzerrung um 10dB von der 0dB-Linie verschoben. . . .	74
53	Tool zur Entzerrung von (Trennkörper-) Aufnahmen. Bedienoberfläche	76
54	Mikrophongrundplatte mit 2 Messmikrophonen (Beyerdynamic MM1) .	77

55	Messsituation in der Hochspannungshalle	77
56	Grenzflächen - OSS	78
57	Diffusfeldfrequenzgang (aus Mittelung) OSS 19cm	79
58	Polardiagramm - GF OSS - linker Kanal	79
59	3 Dimensionales Polardiagramm des gesamten Stereomikrophons bei 3 kHz	79
60	HKFM - 15cm aus Styropor, rechts: mit zusätzlicher Trennscheibe	80
61	Ei als Trennkörper mit 4 eingebauten Mikrofonen	80
62	Diffusfeldfrequenzgang (aus Mittelung) der hinteren Mikrofonposition des eiförmigen Trennkörpers	81
63	Richtplot 1kHz, Ei + OSS Position hinten	81
64	Abbildungsfunktion des Grenzflächeneis mit OSS-Scheibe	81
65	Grenzflächen - Source	82
66	GF - Source + OSS	82
67	Diffusfeldfrequenzgang (aus Mittelung) - Grenzflächen Source	82
68	X1A - Ein Trennkörper nach dem Äquivalenzmodell	83
69	Diffusfeldfrequenzgang (aus Mittelung) des neuen Trennkörpers	83
70	links: 3D-Polardiagramm für 3kHz - X1A - Gesamtsystem, rechts: Selbes Diagramm für den Trennkörper mit OSS-Scheibe	84
71	Laufzeitdifferenz in ms (rot) und daraus resultierende Hörereignisrichtung nach Sengpiel in Prozent(blau) - X1A links: ohne Trennscheibe, rechts: mit Trennscheibe	84
72	Abbildungsfunktion - X1A mit Trennscheibe	85
73	Abbildungsfunktion - Quasi-ORTF auf der Grenzfläche	85
74	Diffusfeldfrequenzgang (aus Mittelung) der großen Variante mit Trennscheibe	85
75	Vereinfachte Version des neuen Trennkörpers: Große Variante mit Trennscheibe	86
76	Pegeldifferenz zwischen den Kanälen für die kleine Variante bei seitlichem Schalleinfall	86
77	vorderer Frequenzgang des MM1 auf einer Styroporgrundplatte, verglichen mit dem 1/4 Zoll Mikrofon in der Grenzfläche	87
78	Frequenzgang des 1/2 Zoll Messmikrophons für Schalleinfall von oben, kalibriert mit dem 1/4 Zoll Messmikrofon in der Grenzfläche	87
79	Frequenzgangsabweichung des 1/4 Zoll Messmikrophons bei frontalem Schalleinfall liegend auf dem Drehteller, verglichen mit demselben Mikrofon plan im Mitteloch des Tellers integriert	88
80	Ensemble und Aufnahmeraum der Testaufnahmen	89
81	Messraum mit Kugelflächenmikrofon „Fred“	103
82	Grenzflächenmessung eines Halbkugelmikrophons am IEM	105

83	Messoberfläche in PD - start msm.pdf	107
84	Reale Winkel der Lautsprecher (am IEM)	107
85	Messaufbau der zweiten Messreihe im Hochspannungslabor	107
86	Datenblatt: berechneter Trennkörper X1A mit OSS-Scheibe - Seite1 . .	109
87	Datenblatt: berechneter Trennkörper X1A mit OSS-Scheibe - Seite2 . .	110
88	Datenblatt: berechneter Trennkörper X1A mit OSS-Scheibe - Seite3 . .	111
89	Datenblatt: berechneter Trennkörper X1A mit OSS-Scheibe - Seite4 . .	112
90	Datenblatt: Ei als Trennkörper, hintere Mikrofonposition - Seite1 . .	113
91	Datenblatt: Ei als Trennkörper, hintere Mikrofonposition - Seite2 . .	114
92	Datenblatt: Ei als Trennkörper, hintere Mikrofonposition - Seite3 . .	115
93	Datenblatt: Ei als Trennkörper, hintere Mikrofonposition - Seite4 . .	116
94	Datenblatt: Grenzflächen-SOURCE - Seite1	117
95	Datenblatt: Grenzflächen-SOURCE - Seite2	118
96	Datenblatt: Grenzflächen-SOURCE - Seite3	119
97	Datenblatt: Grenzflächen-SOURCE - Seite4	120
98	Ein Photo	121
99	Verschiedene Trennkörpersysteme	122

Tabellenverzeichnis

1	Bündelungsmaß von Grenzflächenmikrofonen mit Druckgradientenempfangern im Vergleich zum reinen Druckempfänger	12
2	Mögliche und ungeeignete Anwendungen von Trennkörper-Grenzflächen-Stereomikrofonen	34
3	Laufzeitdifferenz (in ms) in Abhängigkeit von Mikrofonabstand und Einfallswinkel	37
4	Aufnahmewinkel AB	38
5	Einige Äquivalenzverfahren	38
6	OSS und Grenzflächen OSS bei verschiedenem Scheibendurchmesser und unterschiedlichen Mikrofonabständen	47
7	Laufzeitdifferenz und Schallweg nach Wittek und Sengpiel	63
8	Komponenten der Richtcharakteristik und Bündelungsmaß	65
9	Benötigte Achswinkel ϵ für Nieren und Breite Nieren (WC) für vorgegebenen Aufnahmewinkel α nach Wittek und Sengpiel	66
10	Beispielhafte Daten einiger Trennkörper mit 120 Grad Aufnahmewinkel	71
11	Vergleich einiger Testaufnahmen vor der Entzerrung	90
12	Einstellungen des Entzerrtools für die Testaufnahmen	90
13	Vergleich einiger Testaufnahmen nach der Entzerrung	91

14	Berechnete Hörereignisrichtung aufgrund der Pegeldifferenzen durch den abgelesenen Öffnungswinkel und die angenäherte Richtcharakteristik unter 30° Vertikalwinkel	91
15	Berechnete Hörereignisrichtung aufgrund der Laufzeitdifferenz zwischen den Kanälen unter 30° Vertikalwinkel	92
16	Berechnete Gesamthörereignisrichtung der Trennkörper - Grenzflächen - Stereomikrophone unter 30° Vertikalwinkel	93
17	Berechnete Aufnahmewinkel unter 30° Vertikalwinkel und vertikaler Aufnahmebereich der Trennkörper	94
18	Entzerrbarkeit der Grenzflächentrennkörpermikrophone und verwendete Entzerrung bei den Testaufnahmen	95
19	Mikrophondurchmesser und Frequenzen der passenden Wellenlängen .	104
20	Gemessene Einbrüche im Frequenzgang bei Mikrofonen auf der Grenzfläche und Schalleinfall parallel zur Membran	105

1 Einleitung

Trotz der Vielzahl von existierenden Mikrophonierungsverfahren ist die Entwicklung in der Mikrophonierungstechnik noch nicht abgeschlossen. Verschiedene Personen zeigen individuelle Präferenzen, selbst ein und derselbe Toningenieur bevorzugt in verschiedenen Räumen oder bei verschiedenen musikalischen Darbietungen unterschiedliche Mikrophonierungstechniken. Des Weiteren ist auch die Abhörsituation von entscheidendem Einfluss, z. B. macht es einen großen Unterschied, ob eine Aufnahme über Kopfhörer oder über Lautsprecher wiedergegeben wird. Auch die Position der Lautsprecher und der Abhörraum selbst beeinflussen das akustische Ergebnis.

Sowohl die Trennkörperstereophonie als auch die Technik der Grenzflächenmikrophone hat in bestimmten Situationen bewiesen, dass sie spezifische Vorteile bietet, jedoch hat sich bisher keine der beiden Technologien auf dem breiten Markt durchsetzen können. Dies liegt zum Teil an der neuen, teilweise ungewohnten Handhabung, zum Teil an den speziellen Mikrofonen, die dafür benötigt werden. Auch die ungewöhnliche Optik der Systeme hat nicht unbedingt zum Erfolg derselben beigetragen. Die Ausgangssituation dieser Diplomarbeit ist somit der Bedarf nach einem günstigen, leicht handhabbaren Mikrofon, das unauffällig für Dokumentationsmitschnitte von kleinen Ensembles – bzw. als Haupt- oder Raummikrofon innerhalb größerer Aufnahmesetups verwendet werden kann. Es soll die Vorteile eines Grenzflächenmikrophons und eines Trennkörpermikrophons vereinen. Um den Anschaffungspreis gering zu halten, soll versucht werden, herkömmliche Studiomikrophone als Wandlerelement zu verwenden. Des Weiteren soll eine Aussage getroffen werden, ob und wo das entwickelte Mikrofon eingesetzt werden kann.

1.1 Stand der Technik

Bisher verwendete Hauptmikrophonierungsverfahren sind fast alle mit gängigen Studiomikrofonen zu verwirklichen. Lediglich die Trennkörperverfahren wie z.B. der Kunstkopf benötigen zum Teil teure Spezialmikrophone. Auch Grenzflächenmikrophone sind in aller Regel Spezialmikrophone, obwohl in der Fachliteratur teilweise Möglichkeiten beschrieben werden, Standardmikrophone für den Grenzflächeneinsatz zu verwenden (vergleiche z. B. [27]).

Die meisten Hauptmikrophonierungsverfahren, die sich aus mehreren Studiomikrofonen aufbauen lassen, bieten viele Freiheitsgrade im Aufbau. Dies kann bei gezielter Ausnutzung ein Vorteil sein, kann durch Ungenauigkeiten beim Ausrichten der Mikrophone oder ungünstige Einschätzung des optimalen Abstands und Winkels aber auch zu schlechteren Aufnahmen führen.

Als akustischer Nachteil ist bei vielen Verfahren der starke Einfluss der Bodenreflexion zu nennen, der zu kammfilterartigen Frequenzgangveränderungen führen kann. Gerade mit der weiten Verbreitung von DVD und Filmen über das Internet nimmt auch

der Filmtone einen größeren Stellenwert ein. Konzerte werden oft in Bild und Ton aufgezeichnet, was eine neue Herausforderung für die Mikrofonierung darstellt. Unsichtbarkeit bei der Bildaufzeichnung ist ein wichtiges Kriterium. Oft wird dies bei klassischen Konzerten auch generell gefordert. Gängige Lösungen wie das „Angeln“ beim Filmtone oder das „Fliegen“ von Mikrofonen mittels Seilen von der Decke sind relativ umständlich.

Gesucht wird nach einem kompakten Mikrofon mit einfacher Handhabung, das möglichst unsichtbar aufzustellen ist. Dennoch sollen keine klanglichen Kompromisse eingegangen werden. Ein Stereomikrofon, das mit Hilfe der Trennkörpertechnik arbeitet und auf eine Grenzfläche angebracht wird, kann hier einige Vorteile bieten: Neben guten Abbildungseigenschaften ist es unempfindlich für die ersten Bodenreflexionen. Bei entsprechendem Design ist eine hochwertige Wiedergabe über Lautsprecher und Kopfhörer zu erwarten. Dennoch ist der Aufbau einfach - es entfällt das Mikrofonstativ und das Mikrofon ist außerhalb des Blickwinkels von Publikum oder Kamera.

1.2 Zentrale Forschungsfrage

Wie muss der Trennkörper geformt sein und wo ist er einsetzbar?

1.3 Engineers Specs sheet

Es soll ein Mikrofon entwickelt werden, das sowohl die Grenzflächentechnik als auch die Trennkörpertechnik ausnutzt. Es sollen gewöhnliche Studiomikrofone oder Kapseln mit Kugelcharakteristik (Druckempfänger) eingesetzt werden. Die Form des Trennkörpers soll optimiert werden. Es sollen Anwendungsmöglichkeiten und ihre Grenzen beschrieben werden. Es soll eine hochwertige Wiedergabe vorwiegend über Lautsprecher doch auch über Kopfhörer ermöglicht werden. Das Mikrofon soll sich möglichst unsichtbar in seine Umgebung einfügen.

Der Stand der Technik soll durch eine Literaturrecherche ermittelt werden und wenn möglich, durch neue Erkenntnisse erweitert werden. Hierbei sollen insbesondere die Bereiche Grenzflächenmikrofone, Trennkörperstereophonie, Stereophonieverfahren und deren Hörvergleiche, die Diplomarbeit „Entwicklung eines Aufnahmesystems für psychoakustische Analysen“ von Franz Graf, Messverfahren und Hörversuche betrachtet werden.

Die Anwendbarkeit des neuen Mikrofons soll untersucht werden.

Es sollen Prototypen gebaut, getestet und evaluiert werden.

2 Mikrophone

In diesem Kapitel sollen einige Merkmale von Mikrofonen angesprochen werden, die im weiteren Verlauf benötigt werden. Auf die verschiedenen Bauformen und elektrischen Prinzipien der Mikrophone kann nicht eingegangen werden. Details hierzu finden sich z.B. in [12], [6], [35].

2.1 Druckempfänger und Druckgradientenempfänger

Über die Arbeitsweise als Druck- oder Druckgradientenempfänger wird entschieden, welche Richtcharakteristik ein Mikrofon erhält. Eine Mikrofonkapsel, die als Druckempfänger arbeitet, hat ohne „akustische Umbauung“ zwangsweise Kugelcharakteristik, solange die Membran klein gegenüber der Wellenlänge des Schalls ist. Im Grunde genommen wird die Membran über ein geschlossenes Volumen gespannt, der Schall kann die Rückseite der Membran nicht erreichen. Das Mikrofon reagiert nur auf Druckschwankungen. Druckempfänger sind fertigungstechnisch weniger aufwändig, deshalb sind die Unterschiede zwischen den Mikrofonen verschiedener Hersteller eher geringer als bei anderen Richtcharakteristika. Ein weiterer Vorteil ist die Wiedergabe im Bereich tiefer Frequenzen. Prinzipbedingt muss es hier keinen Abfall im Frequenzgang geben. Deshalb wird oft versucht, Mikrophonierungsverfahren mit Druckempfängern zu verwenden, um von deren klanglichen Vorteilen zu profitieren.

2.2 Membrangröße

Die für diese Arbeit verwendbaren Mikrophone sind vorwiegend solche mit kleiner Membrangröße. Es wird fälschlicherweise behauptet, dass Großmembranmikrophone wärmer klingen und eine bessere Basswiedergabe bieten. In Wirklichkeit ist die Basswiedergabe unabhängig von der Membrangröße.

Von der Membrangröße abhängig ist im Wesentlichen der Störabstand und die Richtcharakteristik in den Höhen. Durch den Druckstau vor der Membran, der auftritt, sobald die physikalischen Abmessungen der Kapsel im Wellenlängenbereich liegen, wird ein Mikrofon ab der entsprechenden Frequenz stärker gerichtet. Somit bündeln Großmembranmikrophone im Höhenbereich stärker bzw. früher als Kleinmembranmikrophone.

Durch die Anwendung der Grenzflächentechnik kann der Störabstand auch um 6 dB verbessert werden, da man den Druckstau vor der Grenzfläche ausnutzt. Somit stört es nicht, dass man hier kleinere Kapseln verwenden muss, um Probleme im Höhenfrequenzgang zu vermeiden.

2.3 Richtcharakteristik

Solange die Richtcharakteristik nicht durch die Membrangröße oder die umgebende Akustik beeinflusst wird, bestimmt das Funktionsprinzip der Kapsel über die Richtcharakteristik. Im Grunde genommen kann die Richtcharakteristik aus dem „Anteil Druckempfänger“ und dem „Anteil Druckgradientenempfänger“ berechnet werden. Ein reiner Druckempfänger hat eine Kugelcharakteristik. Solange keine Abschattung stattfindet (Mikrofon ist kleiner als eine halbe Wellenlänge), wird der Schall von allen Seiten gleich aufgenommen. Ein reiner Druckgradientenempfänger hat eine Richtcharakteristik in Form einer Acht. Vor und hinter der Membran wird der Schall am stärksten aufgenommen. Neben der Membran (90° bzw. 270°) wird der Schall komplett ausgeblendet. Die Empfindlichkeit in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel ($s(\theta)$) ergibt sich über die allgemeine Mikrophonegleichung:

$$s(\theta) = A + B * \cos \theta \quad (1)$$

dabei gilt:

$$A + B = 1 \quad (2)$$

Eine Übersicht, wie man damit zu den verschiedenen Richtcharakteristika kommt, kann man der Darstellung 1 von Sengpiel entnehmen.

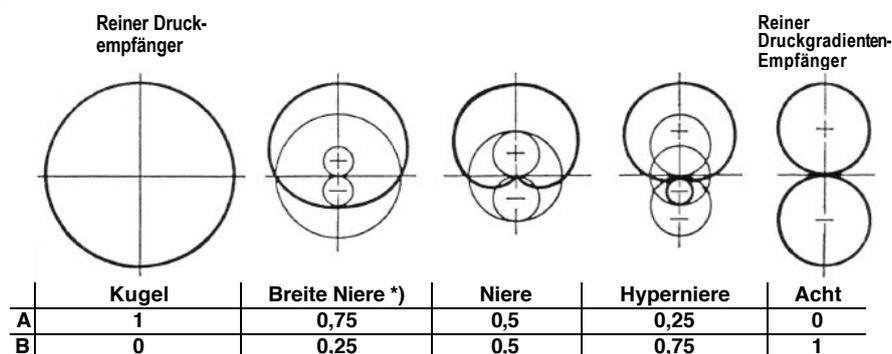


Abbildung 1: Zusammenhang der Mikrofon-Richtcharakteristika [35]

2.4 Elektretmikrophone

Die Elektretmikrophone werden besonders erwähnt, weil sie im Bereich Grenzflächenmikrophone häufig anzutreffen sind und oft mit besonders kleinen Kapseln gebaut werden.

Beim Elektretmikrofon ist die Kapsel aufgebaut wie ein Kondensatormikrofon, allerdings muss die Vorspannung nicht extern zugeführt werden, sondern wird schon bei

der Fertigung auf elektrochemischem Weg auf die Membran aufgebracht. Durch die vorpolarisierte Membran vereinfacht sich der weitere Aufbau. Normalerweise wird auch gleich ein Impedanzwandler im Gehäuse der Kapsel mit untergebracht. Elektretmikrophone haben sich im Bereich der Unterhaltungselektronik und der Telekommunikation schon lange durchgesetzt, durch hohe Stückzahlen sind sie preiswert und in hoher Qualität erhältlich.

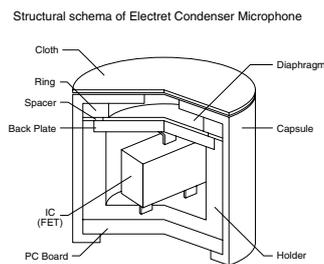


Abbildung 2: Aufbau Electretmikro-
phon

[18]

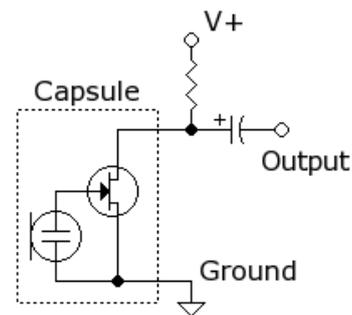


Abbildung 3: Schaltung Electretmikro-
phon

[40]

Auch die Messmikrophone, die später als Schallaufnehmer in den verschiedenen Trennkörpern verwendet werden, beinhalten Elektretkapseln.

2.5 Problembereiche der Mikrophonierung in der Praxis

Dieser Abschnitt beschreibt Problempunkte, die in der Praxis von Bedeutung sind, aber nicht immer beachtet werden.

Hieraus ergeben sich genauso Fehler, wie aus dem umgekehrten Phänomen, welches man in der Tontechnik manchmal antrifft: Aus einzelnen praktischen Erfahrungen werden Regeln geschneidert und für allgemein gültig erklärt. So schreibt Bruck 1985: *Misconceptions are rife in this fast-moving, fast-spending segment of the entertainment industry, where guesswork becomes engineering fact after the first take [8].*

- Man stößt auf das Problem, dass ein Mikrophonsystem an dem Ort, an welchem man aufnehmen möchte, nicht leicht anzubringen ist. Gerade bei der Aufnahme von Konzerten versperren Stative oft die Sicht und sind deshalb unerwünscht. Das Fliegen (Aufhängen) von Mikrofonen ist an geeignetes Seilmaterial und Befestigungsmöglichkeiten am Aufnahmeort gebunden.
- Es gibt Unterschiede zwischen Studioaufnahmen und z. B. dem Mitschnitt von Konzerten. Während im Studio die Form und Größe eines Mikrophons weitge-

hend unbedeutend ist, muss ein Mikrofon, sobald Publikum anwesend ist, auch ästhetischen Gesichtspunkten genügen. Dies ist sowohl in Bezug auf Form und Größe, als auch in Bezug auf Farbe, Gewicht und das dadurch nötige Befestigungsmaterial zu beachten.

Des Weiteren erzeugt das Publikum bei einem Livemitschnitt auch unerwünschte Geräusche, was die Aufstellung und die Wahl der möglichen Richtcharakteristik des Mikrophons beeinflusst, welches diese ausblenden soll.

Oft wird man durch Störgeräusche gehindert, das Mikrofon am optimalen Aufstellungsort aufzubauen. Dies ist vor allem bei Systemen, die weit im Raum stehen müssen, ein Problem.

- Ein weiteres Problem, was bei der Entwicklung oft übersehen wird, ist der Zeitfaktor bei der Vorbereitung einer Aufnahme. Auch bei einer gut geplanten Aufnahme wird am Ende oft die Zeit knapp. Notwendige Änderungen am Setup werden oft erst in letzter Minute bekannt und die Anforderungen ändern sich plötzlich. Hier ist es wichtig, wie schnell ein Mikrofon aufgebaut werden kann. Werden spezielle Kabel oder Vorschaltgeräte benötigt, steigt der Aufwand.

Nicht jeder dieser Punkte ist gleich wichtig und für viele sind Lösungen durch entsprechendes Zubehör möglich.

2.6 Grenzflächenmikrophone

Bei den Grenzflächenmikrofonen macht man sich 2 positive Effekte zunutze, indem man eine Mikrophonkapsel bündig in eine große Fläche einlässt. Dabei ist eine große Fläche eine, die in ihren Abmessungen mindestens etwa der Wellenlänge der tiefsten aufzunehmenden Frequenz entspricht (Vergleiche [12] und [34] und [25]). Typischerweise sind dies die Begrenzungsflächen eines Raumes, meist der Fußboden. Je nach Instrument ist es auch möglich, große Holz- oder Plexiglasplatten zu verwenden, oder zum Beispiel (mit Abstrichen an den Frequenzgang durch die zu geringe Größe) den Deckel eines Flügels.

Vor solchen Flächen bildet sich ein Druckmaximum im Schallfeld. Dadurch ergibt sich an der Mikrophonkapsel ein Pegelgewinn von 6 dB durch den Druckstau.

Ein weiterer Effekt ist, dass Reflexionen von der Grenzfläche nicht aufgenommen werden, wenn das Mikrofon darin montiert ist. Deshalb werden Grenzflächenmikrophone auch in Rednerpulte integriert, oder unter akustisch eher ungünstigen Bedingungen eingesetzt. Kammfiltereffekte können so vermieden werden. Einen weiteren Vorteil erhält man dadurch, dass ein Teil der Frequenzgangseinbrüche durch Raumresonanzen ausgeblendet wird, da sich diese an der Grenzfläche nicht ausbilden können.



Abbildung 4: Grenzflächenmikrofon GFM 132 von Neumann [26]

Die Entwicklung geht zurück auf H.F. Olson und wahrscheinlich auch Lord Raleigh [8]. Typischerweise verwendet man als Mikrofonkapseln Druckempfänger. Diese sind auch die einzigen, die bei bündigem Einbau in eine Grenzfläche noch funktionieren können, da sie keine Schallführungen an der Kapselrückseite benötigen. Die Richtcharakteristik wird dadurch zur Halbkugel, man erhält ein Bündelungsmaß von 3 dB. Raumenterteile werden somit gegenüber dem Direktschall etwas gedämpft. Um den gleichen Raumeindruck zu erhalten, muss man ein Grenzflächenmikrofon weiter weg von der Schallquelle positionieren.

Wichtig bei der Kapsel eines Grenzflächenmikrophons ist ferner, dass der Durchmesser kleiner ist als eine halbe Wellenlänge der höchsten aufzunehmenden Frequenz. Sonst liegt bei streifendem Schalleinfall, das Druckmaximum und das Druckminimum gleichzeitig vor der Membran. Man erhält ab einer Grenzfrequenz einen Höhenabfall, beginnend mit Einbrüchen bei einzelnen Frequenzen. Um den Hörbereich gut zu übertragen, müssen die Kapseln von Grenzflächenmikrophonen kleiner als 1 cm Durchmesser sein. Typischerweise werden Kapseln mit ca. 6-7 mm Durchmesser verwendet. Der Nachteil bei kleinen Kapseln ist, dass der Anstieg des Eigenrauschens aufgrund der kleinen Membrangröße den Gewinn an Signal - Störabstand durch den Grenzflächeneffekt teilweise wieder zunichte macht.

2.6.1 Grenzflächenmikrophone aus Standard - Studiomikrophonen

Ein weiterer Punkt (neben der Höhenabsenkung, die sich aus der Kapselgröße ergibt), den man beachten muss, wenn man Standardmikrophone als Grenzflächenmikrophone einsetzen will, ist, dass auch vor einer „normalen“ Mikrofonkapsel ein Druckstau auftritt, wenn die Wellenlänge im Bereich der Membrangröße liegt. Dieser wird bei der Entwicklung der Kapsel normalerweise berücksichtigt und im Kapseldesign verwendet, um den gewünschten Frequenzgang in den Höhen zu erhalten. Da bei einer Grenzflächenmontage der Druckstau aber im gesamten Übertragungsbereich vorliegt, fällt dieser Effekt weg. Es ist mit einer weiteren notwendigen Höhenanhebung zu rechnen,

eine letzte Höhenanhebung, die oft nötig ist, ergibt sich daraus, dass viele Instrumente speziell die Höhen gerichtet abstrahlen und ein Mikrophon auf dem Fußboden nicht den gesamten Höhenanteil empfängt. T. Przybiilla und W. Schmidt beschreiben in Ihrem Paper [27] über den Einsatz von herkömmlichen Studiomikrophonen als Grenzflächen- bzw. Bodenmikrophone den Vorteil, wenn man die Kapsel eines herkömmlichen Mikrophons nicht einfach auf den Boden legt, sondern sie schräg auf den Boden richtet, um den Abstand zur Grenzfläche und damit den Höhenabfall im Mittel etwas zu reduzieren (Vergl. Abbildung 5) ¹

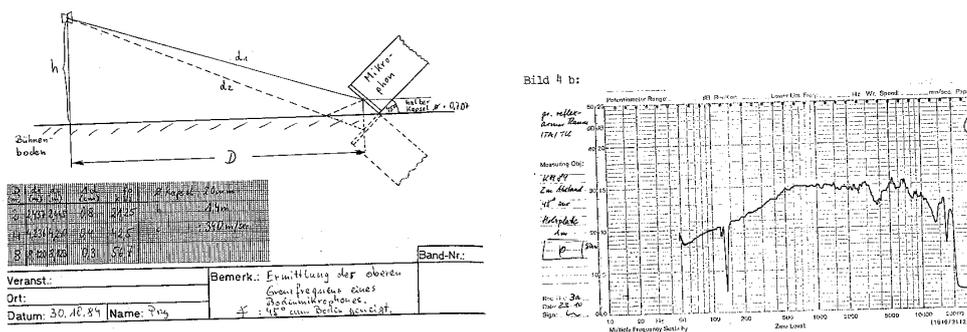


Abbildung 5: Verbesserte Montage von herkömmlichen Mikrophonen als Bodenmikrophon

[27]

Die Autoren konnten auch keine erhöhte Trittschallempfindlichkeit der Boden- oder Grenzflächenmikrophone feststellen.

Im Verlauf der Messungen verschiedener Studiomikrophone als Grenzflächenmikrophon wird festgestellt, dass sich Druckgradientenempfänger (Vergl. 6) unter Grenzflächenbedingungen betreiben lassen, ohne dass die Frequenzgänge durch die nicht bündige Montage und den Mikrophonkörper als Schallhinderniss wesentlich gestört werden. Reine Druckempfänger hingegen leiden stark unter den Artefakten.

Des Weiteren verändert sich durch das Anwinkeln das Polardiagramm des Mikrophons. Dieses flacht beim Mikrophon, welches plan auf der Grenzfläche liegt, zu hohen Frequenzen hin ab.

¹Es ist anzumerken, dass es sich um relativ alte Messungen handelt. Nach den Messungen ist ein Winkel von 45 Grad eher zu groß, da die Welligkeit im Frequenzgang von vorn schon ausgeprägt ist. Ein Winkel von etwa 30 - 35 Grad ist anhand meiner Messungen geeigneter. Der Diffusfeldfrequenzgang eines KM 184, welches fast genau dem damals verwendeten Mikrophon entspricht, ist weitgehend linear. Es zeigt sich ein kleiner Höhenabfall, wenn man es leicht gewinkelt auf eine Grenzfläche montiert. Zu bemerken ist, dass je nach Winkel die Welligkeiten an verschiedenen Stellen auftreten.

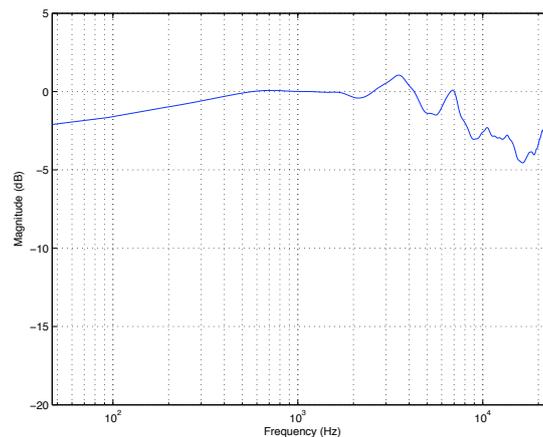


Abbildung 6: Diffusfeldfrequenzgang eines leicht angewinkelten KM 184

Abbildung 7 zeigt das vertikale Polardiagramm eines Kleinmembran- Nieren- Studiomikrophons. Man sieht die Abflachung des Polardiagramms bei hohen Frequenzen. Winkelt man das Mikrophon an, um den nutzbaren Frequenzbereich zu erweitern, erweitert sich dieser nicht gleichmäßig für alle Raumrichtungen.

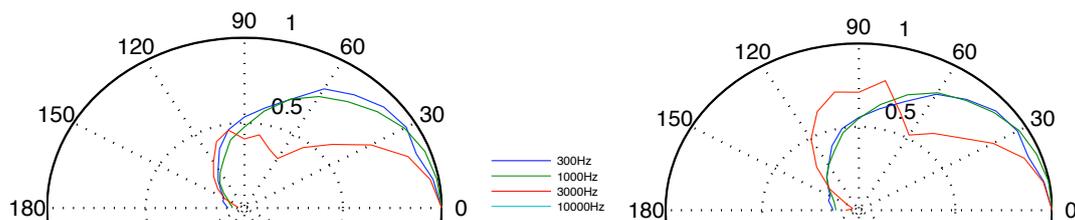


Abbildung 7: Polardiagramm (vertikal) KM184 gewinkelt. links: 30° rechts: 45°

Erst bei 45 Grad Winkel haben Instrumentalisten oder Sänger, die direkt vor dem Mikrophon stehen, einen Vorteil von der Anwinkelung. Jetzt ist die Empfindlichkeit zwischen 60 und 90 Grad Erhebungswinkel gestiegen. Allerdings ist gerade die Empfindlichkeit für hohe Frequenzen von oben höher als die für tiefe. Somit ist das Anwinkeln von Mikrophonen in speziellen Fällen ein Vorteil. Der von Schmidt und Przybilla gefundene linearere Frequenzgang bei weiterer Entfernung hängt somit nicht ausschließlich von der Richtcharakteristik der Schallquelle ab. Er hängt auch mit dem unregelmäßigen Polardiagramm des Mikrophons für Schalleinfall von oben zusammen.

Ein reiner Druckempfänger profitiert vom Winkeln etwas mehr. Allerdings zeigt dieser auch ohne Winkelung stärkere Frequenzgangseinbrüche beim Schalleinfall von oben. Der Erfolg hängt folglich nicht nur vom genauen Winkel und der Quellposition, sondern auch vom Mikrophontyp ab.

2.6.2 Unterschiede der Oberfläche von Grenzflächen

Insbesondere bei der Verwendung von Messmikrophonen als Grenzflächenmikrophon, kann man feststellen, dass die Messwerte mit der Art der Oberfläche variieren. Hilfreich ist es, unter das Mikrophon eine kleine Plexiglasscheibe zu legen, um im hochfrequenten Bereich reproduzierbare Messungen zu erhalten. Allerdings entstehen dadurch zusätzliche Kantenreflexionen, die Kanten müssen daher abgeflacht werden.

Für die Fertigung der Prototypen wird ein Material gesucht, welches sich leicht bearbeiten lässt und dennoch eine ausreichend schallharte Oberfläche vorweist. Styropor lässt sich leicht bearbeiten, jedoch ist die Oberfläche nicht komplett schallhart. (Vergl. Abbildung 8)

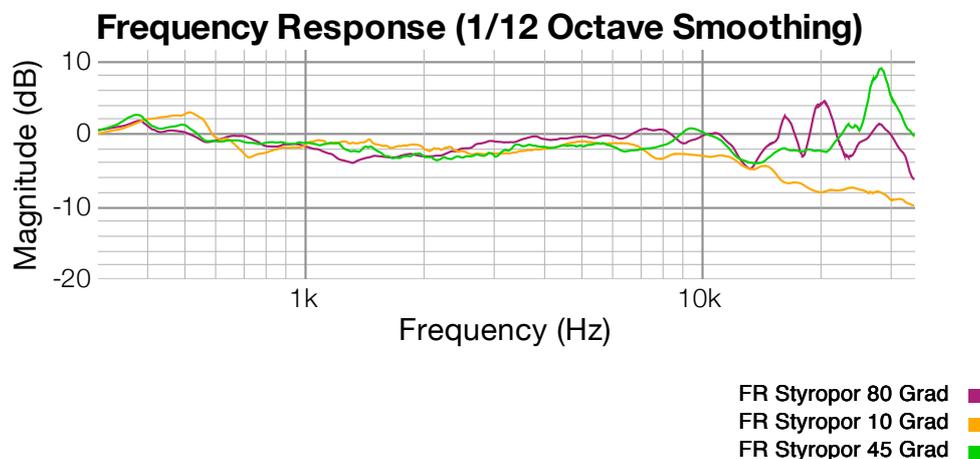


Abbildung 8: Frequenzgänge von Styropor bei verschiedenen Schalleinfallswinkeln

Die Messung erfolgt mit einem 1/4 Zoll Messmikrophon, welches plan auf einer Styroporplatte mit etwa 7 x 30 cm liegt. Es fällt auf, dass die Höhen stark bedämpft werden, für Schalleinfall von vorn bis zu 8 dB bei 20 KHz. Auch im mittleren Frequenzbereich fallen Unregelmäßigkeiten auf. Die Überhöhung knapp unter 20 kHz bei manchen Messungen ist auf einen Fehler in der Referenzmessung zurückzuführen. Aufgrund der Kapselgröße tritt hier ein Einbruch im Frequenzgang für Schalleinfall parallel zur Membran auf. Bei dämpfendem Untergrund ist dieser weniger ausgeprägt. Somit zeigt die Messung dann eine Überhöhung.

Behandelt man die Oberfläche, kann man die akustischen Eigenschaften verbessern. Mit zwei verschiedenen Spachtelmassen auf Acrylbasis wird, die Styroporplatte mehrfach dick eingestrichen. Man sieht, dass damit der Frequenzgang bis auf +/- 1dB an den der schallharten Plexiglasplatte angenähert werden kann (Vergl. Abbildung 9).

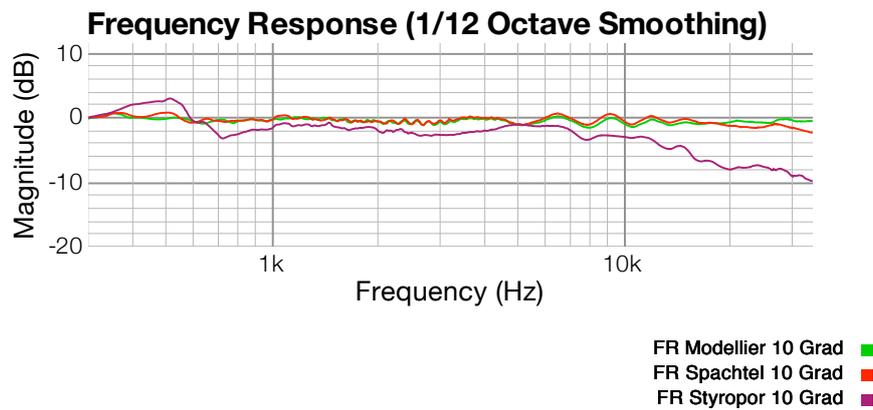


Abbildung 9: Frequenzgänge von Styropor mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung bei Schalleinfall von vorn

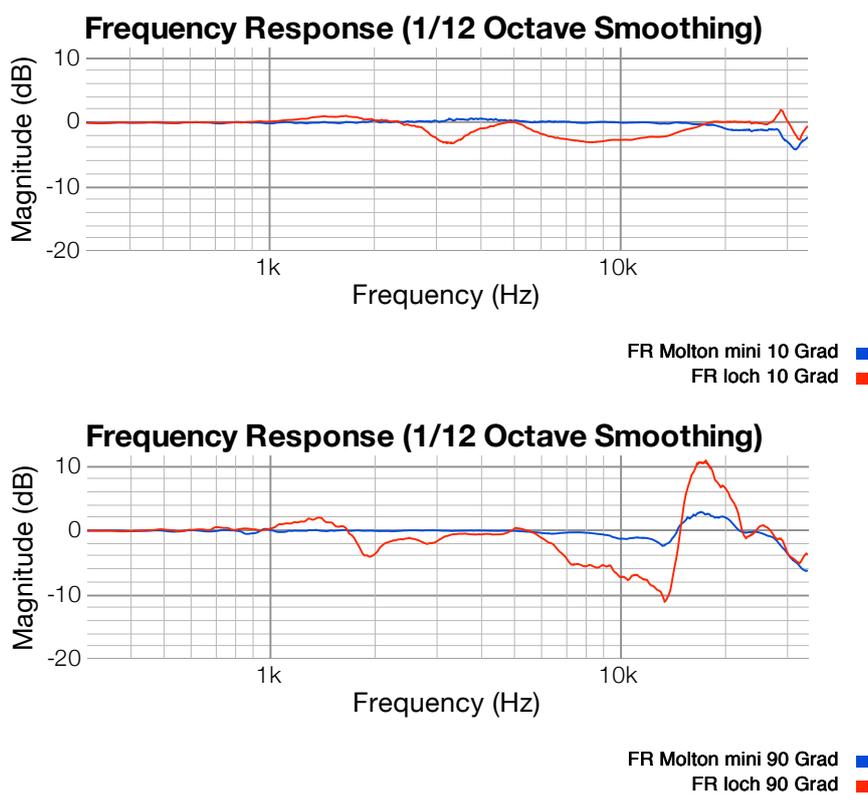


Abbildung 10: Frequenzgangsänderung durch absorbierendes Material auf der Grenzfläche unter der Kapsel (oben: Schalleinfall unter 10° , unten: senkrechter Schalleinfall)

Der Einbruch im Frequenzgang bei Schalleinfall von oben kann durch das Oberflächenmaterial beeinflusst werden. Mit einem kleinen Stück absorbierenden Materials unter der Mikrophonkapsel wird der Einbruch reduziert, der umliegende Höhenbereich aber ebenfalls abgedämpft. Es reichen bereits sehr kleine Absorber (Vergl. Abbildung 10).

Ein kleines Stück Molton, ca. 6 × 6 mm dämmte schon merklich und beeinflusste den Frequenzgang wenig. Ein Loch in der Oberfläche (ca. 7mm Durchmesser) gefüllt mit Schaumstoff, störte den Frequenzgang schon stark. Für Schalleinfall von oben wird zwar der Frequenzgang bei 20 kHz angehoben, dafür sind alle anderen Frequenzgänge nicht mehr brauchbar.

2.6.3 Grenzflächen mit Druckgradientenempfängern

Um einen Druckgradientenempfänger zu verwenden, wird dieser möglichst nah an der Grenzfläche angebracht. Dabei soll der Abstand der gerichteten Mikrophonkapsel zur Grenzfläche möglichst klein sein. Ist die Entfernung zwischen Kapseloberkante und Grenzfläche kleiner als $1/4$ der Normalkomponente der Wellenlänge, kann man die Kapsel gleich betrachten, wie eine Kapsel, die in die Fläche eingelassen ist. Montiert man eine Kapsel in dieser Weise, *...so erhält man eine Richtcharakteristik, deren Hauptachse in die Grenzfläche fällt und deren Druckgradientenanteil höchstens gleich dem Druckgradientenanteil des Wandlers selbst ist. Ist der Wandler tangential zu der Grenzfläche orientiert, dann addieren sich das Bündelungsmaß des Wandlers und der Grenzflächenanordnung.* [2] Tabelle 1 verdeutlicht dies.

Richtcharakteristik der Kapsel	Bündelungsmaß des Grenzflächenmikrophons
Kugel	3 dB
Niere	8 dB
Superniere	9 dB
Richtrohr	größer

Tabelle 1: Bündelungsmaß von Grenzflächenmikrophonen mit Druckgradientenempfängern im Vergleich zum reinen Druckempfänger

Das Bündelungsmaß erhöht sich um 3dB. (Vergl. [9]).

Es gibt gerichtete Grenzflächenmikrophone verschiedener Firmen und auch die Verwendung von gerichteten Studiomikrophonen als Bodenmikrofon ist prinzipiell möglich. Kleinere Kapseln verbessern auch hier den Frequenzgang in den Höhen.

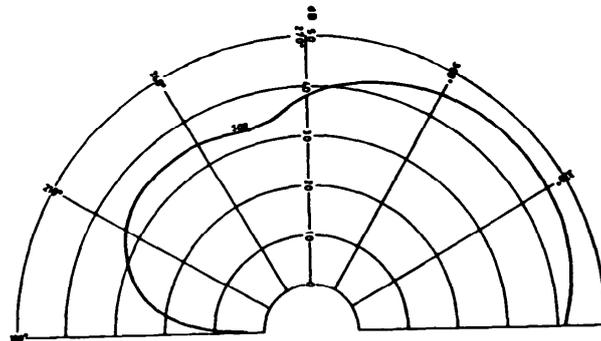


Abbildung 11: Richtcharakteristik eines Grenzflächen-Richtmikrophons mit Nierenkapsel nach Beckmann

[2]

2.6.4 PZM

Das „Pressure Zone Microphone - PZM“ ist eine Entwicklung der Firma Crown. Diese versuchte mit hohem Marketingaufwand, das Prinzip ihrer Grenzflächenmikrophone publik zu machen und stellte das PZM als ein ideales Mikrofon für nahezu alle Aufnahmesituationen dar. Dadurch wurde die Technik der Grenzflächenmikrophone weitläufig bekannt gemacht, jedoch kann das Mikrofon nicht alle Versprechungen halten. Hinzu kommt noch, dass das PZM einen Designfehler aufweist. Die Entwickler glaubten, dass kein Direktschall die Membran erreichen darf, da man nur die Staudruckzone ausnutzen wollte. Dass hier ein Denkfehler vorliegt, bewiesen Lipshitz und Vanderkooy in [22] ²

Durch den Aufbau mit einer kleinen Kapsel, die verkehrt herum nahe vor einer Metallplatte angebracht wird, nutzt man nicht den Grenzflächeneffekt besonders gut aus, sondern generiert zusätzlich Resonanz und Abschattungseffekte. Crown lies sich die Bezeichnung „Pressure Zone Microphone“ markenrechtlich schützen.

Es wurden zahlreiche Schriften zu Grenzflächenmikrofonen nach diesem Prinzip verfasst (meist mit Titeln wie „The Pressure Zone Microphone...“ oder „The Pressure Recording Process...“ z. B. [1]), die interessante Informationen enthalten, teilweise aber stark durch das Marketing gefärbt sind.

2

„This microphone obscures the diaphragm from receiving any direct sound by pointing it towards the rigid boundry, in the mistaken belief that, were it pointing forwards, it would display the on-axis rise characteristic of such microphones when used free-field. It is shown, that this is not true, and that, for a given capsule size, the frequency and polar responses are significantly degraded by obscuring the diaphragm.“ ‘

2.6.5 Vor- und Nachteile von Grenzflächenmikrophonen

In [27] wird auf die Vor- und Nachteile von Bodenmikrophonen eingegangen. Die Auflistung lässt sich mit wenigen Änderungen bestätigen.

Vorteile:

- Wegfall von störenden Bodenreflexionen und damit Verminderung von Kammfiltereffekten.
- Mögliche Verbesserung des Signal Rauschabstandes
- Unsichtbare Mikrophonierung wird möglich.
- Durch den höheren Bündelungsgrad ergibt sich bei Beschallungsanwendungen eine erhöhte Rückkopplungssicherheit.
- Durch den höheren Bündelungsgrad kann der Abstand zu den Instrumenten vergrößert werden. Eine ausgewogene Aufnahme ist mit einer geringeren Anzahl an Mikrofonen möglich.

Nachteile:

- Hohe Empfindlichkeit gegenüber der Nahfeldakustik (Hindernisse) sowie gegenüber Geräuschen in unmittelbarer Nähe.
- Klangfärbungen in Abhängigkeit der Richtcharakteristik der Instrumente. Speziell Höhenabfall bei zu naher Aufstellung.
- Erklärungsbedarf für Künstler und andere Mitwirkende, da die Mikrophonierung ungewohnt ist und vielen im ersten Moment unlogisch erscheint.

Des Weiteren erwähnt Jürg Jecklin in seiner Theorie der Tontechnik [20] die virtuelle Raumvergrößerung, die bei der Aufnahme mit Grenzflächenmikrophonen entsteht. Grenzflächenmikrophone können ihre Vorteile also vor allem in zu kleinen oder akustisch schwierigen Räumen unter Beweis stellen. Dies deckt sich mit Erfahrungen des Autors.

3 Trennkörperstereophonie

Bei der Trennkörperstereophonie werden zwei Mikrophone durch einen Körper separiert. Das Ziel dabei ist es, das Stereobild nach bestimmten Kriterien anzupassen und die Kanaltrennung im Vergleich zur selben geometrischen Anordnung ohne Trennkörper zu verbessern. Die Ansätze hierzu liegen oft zwischen Äquivalenz- und kopfbezogener Stereophonie und erweitern diese um andere Anwendungsbereiche oder andere Mikrofontypen. Bei klassischen Trennkörpern kommen unterschiedliche Materialien zum Einsatz, die zwischen 2 Mikrofonen montiert werden. Es werden schallharte (Kunststoff, Holz, Glas / Keramik) und schalldämmende Materialien (Schaumstoffe, Stoffe) verwendet.

Druckempfänger bieten oft klangliche Vorteile. Eine winkelabhängige Intensitätsveränderung ist normalerweise nicht möglich. Hier setzt der Trennkörper an. Durch Abschattung des Mikrophons in eine Richtung und / oder durch Druckstau in die andere Richtung wird eine Pegeldifferenz in Abhängigkeit des Schalleinfallswinkels geschaffen. Diese Pegeldifferenz ist frequenzabhängig. Die Trennkörper sind im hohen Frequenzbereich immer ein Hindernis für den Schall. Im tieffrequenten Bereich ist die Wellenlänge des Schalls so groß, dass der Trennkörper aufgrund realisierbarer Größen i.d.R. kein nennenswertes Hindernis mehr darstellt. Hier tragen nur noch die Laufzeitdifferenzen zwischen den Mikrofonen zur Ortung bei.

Diese Tatsachen entsprechen recht gut dem natürlichen Hören. Insofern stellen viele Trennkörper auch eine Annäherung an den menschlichen Kopf dar. Es werden oft Mikrophonabstände verwendet, die dem Ohrabstand ähnlich sind und Trennkörper, die in ihren geometrischen Ausmaßen etwa dem Kopf entsprechen. Jedoch ist dies nicht zwingend nötig und speziell bei Lautsprecherwiedergabe auch nicht zwangsweise zielführend. Auf eine Nachbildung des Außenohres wie beim Kunstkopf wird gewöhnlich verzichtet.

3.1 klassische Trennkörpermikrophone

3.1.1 OSS - Jecklinscheibe

OSS heißt „Optimal Stereo System“ wird aber oft nach seinem Erfinder, dem Schweizer Tonmeister Jürg Jecklin als „Jecklinscheibe“ bezeichnet. Das Verfahren verwendet eine Runde Scheibe, meist mit 30 - 35cm Durchmesser, die zwischen den Mikrofonen montiert wird. Auch wenn es dabei durch die Reflexionen an der Scheibe zu Kammfiltereffekten kommt (man versucht diese durch das Aufbringen einer Schaumstoffschicht auf die Scheibe zu vermindern), ist es ein Trennkörperverfahren, welches häufig eingesetzt wird. Auch in Hörtests schneidet es oft gut ab. Zwei Mikrofonhalterungen sind an die Seiten der Scheibe montiert, es kann fast jedes handelsübliche Mikrofon angebracht werden. Die Anschaffungskosten sind durch den einfachen Aufbau gering,

ein Selbstbau ist möglich. Als Mikrophone sind vom Erfinder Druckempfänger vorgesehen, gelegentlich findet man auch Nieren. Die Mikrophone werden leicht gewinkelt angebracht, wobei die Kapseln einen Abstand von 16 - 36cm haben. (In verschiedenen Publikationen werden hier unterschiedliche Werte genannt.) Das Verfahren entstand ca. 1980. Gegenüber seiner AES Paper [19] publiziert Jecklin aber heute andere Maße.

Die abschattende Wirkung des Trennkörpers funktioniert etwa ab 800 Hz. Kammfiltereffekte sind vor allem zwischen 1 kHz und 8 kHz zu beobachten, da hier die aufgebraute Dämmschicht noch nicht genug absorbiert, die Platte aber bereits groß genug für Reflexionen ist. Die dadurch entstehende Klangfärbung ist um so geringer, je frontaler der Schalleinfall ist, es wird der Raumschall stärker beeinflusst als der Direkt-schall. Allerdings ist die Wirkung der Trennscheibe im vorderen Bereich auch nahezu vernachlässigbar.

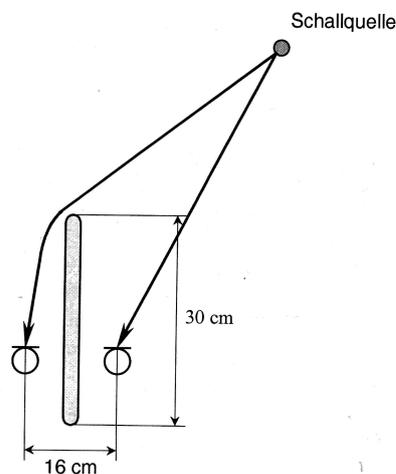


Abbildung 12: OSS-Mikrofonanordnung
[15]

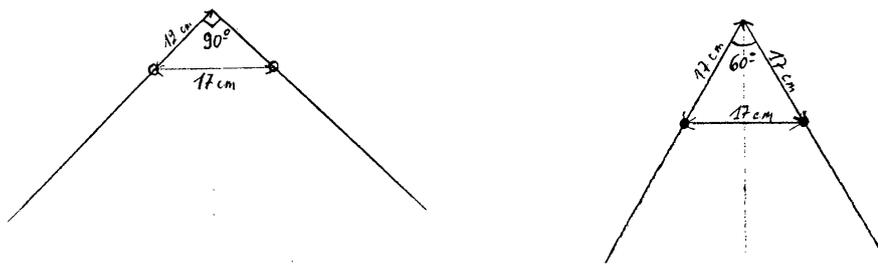
Ein akustischer Schirm zur Erhöhung der Richtwirkung, wie ihn der Erfinder im Originalpaper von 1881 noch vorschlägt, fand keine Verbreitung.

3.1.2 Grenzflächenkeil

Der Grenzflächenkeil wurde ca. 1885 von Defossez entwickelt. Auch wenn dieses Mikrofon geringe Verbreitung fand, liegt in der Idee doch die Grundlage für heutige Trennkörperstereophonieanordnungen.

Auf einem mit der Spitze nach vorn gerichteten Keil mit einem Winkel von 60-90 Grad zwischen den Keilflächen werden zwei Grenzflächenmikrophone so angeordnet,

dass ihr Abstand mit 17cm ungefähr dem Ohrabstand entspricht. Die daraus entstehenden stereophonen Signale ähneln denen einer Jecklinscheibe, haben jedoch den Vorteil, dass durch die bündige Membrananordnung keine Kammfiltereffekte entstehen. Die Pegeldifferenzen werden nicht nur durch Abschattung, sondern auch durch Staudruckeffekte erzeugt, wodurch sie stärker ausfallen. Dies bringt auch Vorteile bei der Klangfarbe, vor allem weil diese wesentlich weniger abhängig von der Schalleinfallrichtung ist.



[11]

Abbildung 13: Defossez - Geometrie von 2 gut funktionierenden Anordnungen des Grenzflächenkeils

Die Grundlagen, die mit diesem Verfahren gelegt werden, findet man später in verbesserter Form sowohl beim Trennkörper „Source“ von Graf als auch bei dem Kugelflächenmikrofon von Theile wieder, wo auch auf die Staudruckeffekte detaillierter eingegangen werden wird.

3.1.3 CLARA

Das 1985 von Prof. Peters entwickelte Verfahren, welches er „Clara“ taufte, ähnelt dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Grenzflächenkeil. Allerdings wird die Geometrie des Trennkörpers verändert, statt einem Keil kommt eine parabelförmig gebogene Plexiglasscheibe zum Einsatz. Statt der Grenzflächenmikrophone werden Kleinmembran - Studiomikrophone verwendet, die allerdings bündig in die Oberfläche eingelassen werden und somit wie Grenzflächenmikrophone wirken. Hierbei erhält man die gleichen Nachteile, wie sie im Kapitel 2.6.1 beschrieben werden. Durch die Parabelform des Trennkörpers führen schon wesentlich geringere Änderungen des Einfallswinkels zu Abschattungs- und Staudruckphänomenen, was für eine ausgeprägtere Stereoabbildung, vor allem im Bereich der vorderen 30° sorgt. Allerdings sorgt die Staudruckzone vor dem Mikrofon auch für eine Überhöhung im Mittenbereich bei frontalem Schalleinfall.

3.1.4 weitere Typen bzw. Varianten

Aus den beschriebenen Grundformen wie „Kopf, Scheibe, Keil, Parabel“ und auch der Kugel, die in Versuchen oft verwendet werden, entwickelten sich einige Verfahren, die teilweise bekannt wurden, teilweise schnell wieder in Vergessenheit gerieten.

Frühe Modelle, wie der „Tête Charlin“ (Vergl. Abbildung 99), eine mit absorbierendem Material überzogene Blechkugel, oder frühe Kunstköpfe orientierten sich hauptsächlich an der Form des menschlichen Kopfes, hatten aber vor allem mit der noch nicht ausreichend entwickelten Mikrophontechnik zu kämpfen. Auch welche akustischen Anteile der Kopf beisteuert und welche man davon in der Aufnahme haben will, wurde damals noch nicht genauer betrachtet.

Etwa 1990 und somit fast gleichzeitig mit dem Erscheinen des Kugelflächenmikrophons schlägt Geller eine Kugel oder einen Ball als Trennkörper vor.

1999 beschreibt Graf in seiner Diplomarbeit eine Art Scheibenkunstkopf, der die Reihe OSS - Grenzflächenkeil - CLARA fortsetzt und mittels Simulation und Hörversuchen optimiert.

3.2 spezielle Trennkörpermikrophone

Hier sollen weitere Trennkörperverfahren beschrieben werden. Alle Verfahren versuchen die Prinzipien eines oder mehrerer der vorher genannten Trennkörpertechniken aufzugreifen und zu verbessern. Sie entstehen durch gezielte Entwicklung und nicht durch einzelne Versuche in Studios oder Aufnahmesituationen.

3.2.1 Crown - SASS

Das „Stereo Ambient Sampling System“ (SASS) von Crown ist durch die Verwendung eines absorbierenden Trennkörpers interessant. Durch den bündigen Einbau der Mikrophone entstehen keine Kammfiltereffekte.

Der grundsätzliche Aufbau besteht aus einem flachen Keil, auf dem 2 Grenzflächen montiert sind. Dabei haben die Kapseln wieder ungefähr Ohrabstand. In der Mitte des Keils befindet sich eine Art „Nase“ aus Schaumstoff (von Crown „Foam Barrier“ genannt). Sie vermindert das Kanalübersprechen in den hohen Frequenzen. Der Höhenabfall auf der der Schallquelle abgewandten Seite wird nicht durch einen Höhenanstieg auf der zugewandten Seite kompensiert. Es ergibt sich deshalb eine positionsabhängige Färbung bei diesem Stereomikrophon. Allerdings wird auch vermieden, dass seitlich positionierte Instrumente auf einem Kanal spitz klingen, ein Kritikpunkt, der vor allem beim KFM erwähnt wird. Laut Crown erhöht der Schaumstoffkörper zwischen den Kapseln auch die Monokompatibilität. Frequenzen mit ausreichend kleinen Wellenlängen für Auslöschungen werden durch den dicken Schaumstoffkörper absorbiert. Das

Mikrofon hat hinten eine Breite von 29,2 cm und eine Tiefe von 14,5 cm. Die Höhe beträgt 13,4 cm. Das gesamte Mikrofon ist diffusfeldentzerrt. (vergl. [10])



Abbildung 14: Crown SASS-P MK II
[10]

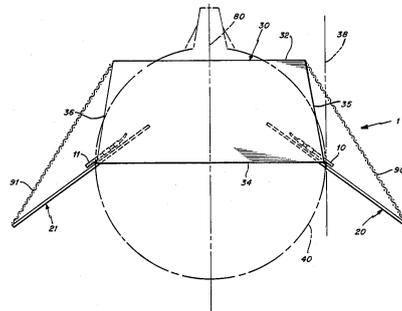


Abbildung 15: SASS-P Entwicklung
[3]

Wie die Form entsteht, kann man der Grafik aus dem zugrunde liegenden Patent [3] von Billingsley entnehmen. Es wird ein Kunststoffkörper als Grenzfläche konstruiert und um ein weiteres Trennelement aus Schaumstoff erweitert. Statt der eingebauten PZM Mikrofonen lassen sich auch normale Studiomikrophone einbauen. Dies zeigen sowohl das originale Patent von Billingsley als auch [4].

3.2.2 SOURCE - „Scheibenkunstkopf“ nach Graf

Dieses Trennkörpermikrofon (Vergl. Abbildung 16) entstand im Zuge der Diplomarbeit von Franz Graf und wurde als Ersatz für den Kunstkopf in der Psychoakustik, speziell im Bereich der Fahrzeugakustik entwickelt. Hier wird es auch erfolgreich eingesetzt. Unterschiede zu dieser Arbeit ergeben sich speziell durch die Abhörsituation. In der Psychoakustik wird normalerweise mit Kopfhörer abgehört, im Musikbereich ist die Lautsprecherwiedergabe dominierend. Somit ist eine etwas andere Herangehensweise nötig.

Für die Arbeit von Graf [15] steht als Zielbereich die Psychoakustik bzw. die akustische Messtechnik fest. Hierfür werden spezielle Anforderungen an das Aufnahmemikrofon gestellt. Manche davon sind durchaus auch für ein Aufnahmesystem für Musik sinnvoll anzuwenden, wie z.B. die Forderung nach einem mechanisch kompakten und stabilen System oder die Forderung nach Originaltreue und Qualität. Die Forderung der mathematischen Beschreibbarkeit erleichtert die Entwicklung eines Systems. Die Forderung nach Kalibrierbarkeit und der exakten Erfassbarkeit des Schallfeldes sind bei einem Aufnahmesystem für Musik weniger wichtig.

Diese Forderungen bedingen eine Form aus geometrischen Grundelementen, um die mathematische Beschreibbarkeit und die Reproduzierbarkeit zu ermöglichen. Die For-

derung nach Kalibrierbarkeit und Qualität löst Graf mit der Verwendung von Messmikrofonen als Schallaufnehmer. Ausgehend von den geometrischen Grundformen und der Analyse der existierenden Systeme modelliert er verschiedene Formen von Scheiben und Keilen und variiert die geometrischen Parameter sowie die Materialeigenschaften. Er simuliert die winkelabhängigen Amplitudengänge der verschiedenen Varianten. Die besten Varianten werden als Modell gebaut und in Hörversuchen verifiziert.

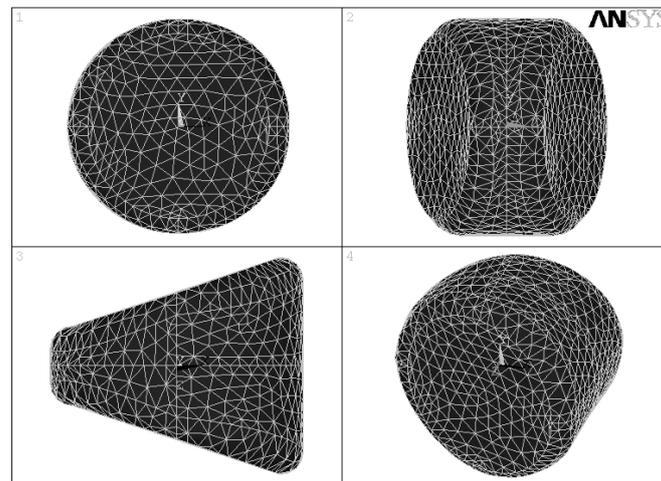


Abbildung 16: Diskretisiertes Modell eines Trennkörper Prototypen
[16]

Die Kosten des neuen Systems betragen einen Bruchteil der bisher verwendeten Kunstkopfsysteme. Gleichzeitig werden die akustischen Ergebnisse verbessert. In Hörversuchen beweist „Source“ die gute Lokalisierbarkeit von Schallereignissen, vor allem in der Frontalebene.

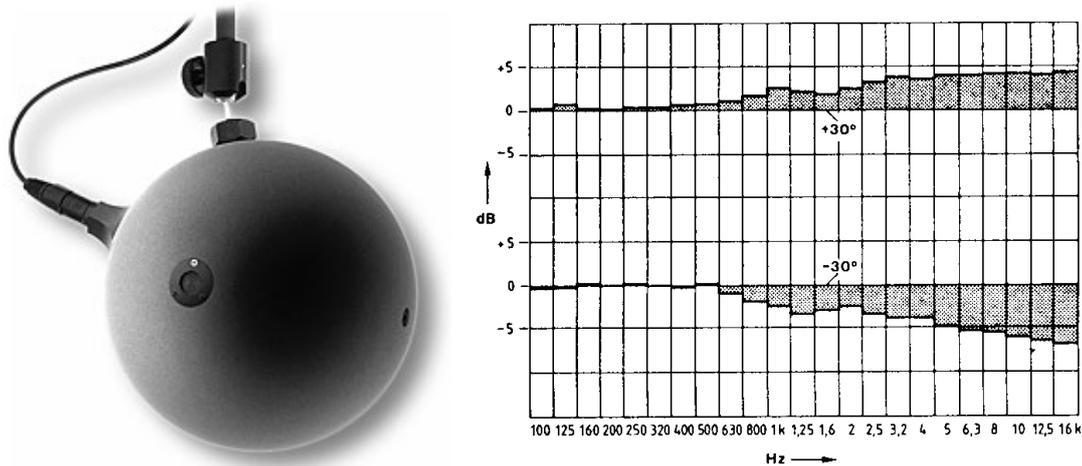
Auch der Scheibenkunstkopf von Graf ist ein Trennkörperverfahren, das zwar bündig montierte Mikrophone zur Vermeidung von Kammfiltereffekten verwendet, den Grenzflächeneffekt aber nur am Trennkörper ausnutzt.

3.2.3 Das Kugelflächenmikrophon

Beim Kugelflächenmikrophon wird ein Ansatz verwendet, die Räumlichkeit unter Berücksichtigung der darstellbaren Parameter möglichst gut zu simulieren.

Das Kugelflächenmikrophon (KFM) verwendet bündig montierte Kapseln in einer Kugel mit 20 cm (auch Versionen mit 16 und 18 cm Durchmesser sind erhältlich) Durchmesser. Zum Mikrophon existiert ein Theoriewerk von Theile (Vergl. z.B. [37]), zur Funktion des Mikrophons und zur Wahrnehmung von Räumlichkeit bei Aufnahmen. Hierbei widmet sich Theile vor allem der für die Musik wichtigen Wiedergabe über

mit Schoeps. Dadurch steht seit 1990 ein serienreifes Produkt zur Verfügung. Bemerkenswert ist die verwendete Kapsel (Vergl. Abbildung 18). Man hat bei Trennkörpern mit bündig montierten Kapseln das gleiche Problem wie bei Grenzflächenmikrofonen, wenn der Kapseldurchmesser in den Bereich einer Wellenlänge kommt. D.h. auch hier muss man kleine Kapseln verwenden, um einen linearen Frequenzgang zu erhalten. Um den Störabstand nicht zu verschlechtern, werden mehrere kleine Kapseln übereinander angeordnet, um die Membranfläche zu vergrößern. Für frontal einfallende Schallwellen verhalten sich diese näherungsweise wie eine einzelne Kapsel mit kleinem Durchmesser und erfüllen die Bedingungen für die Grenzflächenmontage. Für Schall von oben / unten ergibt sich ein Höhenabfall, der aber nicht störend auffällt, da nur die Raumreflexionen betroffen sind und nicht der Direktschall. Zusätzlich zur speziellen Kapsel ist auch die notwendige Entzerrung in das Mikrophonegehäuse eingebaut. Dadurch wird der Forderung nach Linearität für Schalleinfall von vorne Rechnung getragen, um damit Klangfarbenfehler zu vermeiden.



[29, 37]

Abbildung 19: links: KFM6-Mikrofon, rechts: Frequenzgänge des KFM für 30° seitlichen Schalleinfall

Bemerkenswert sind die Überlegungen, die Teile zur Aufnahme und Wiedergabe mit Trennkörpersystemen bzw. Lautsprechern anstellt und die in die Entwicklung des Kugelflächenmikrophons eingehen. Sein Assoziationsmodell wird in Kapitel 6.1.2 beschrieben.

In der Literatur findet sich Kritik an der Klangfarbe von seitlich angeordneten Instrumenten (Vergl. Abbildung 19). Sengpiel stellt in Bezug auf Trennkörper-Systeme und speziell auf das Kugelflächenmikrofon fest: „Es klingt wirklich unnatürlich, den

Kontrabass mit dem Anstrich ganz rechts zu hören und den Grundton aus der Mitte, obwohl das Instrument halb rechts aufgestellt ist.“ [32]

Aus den Urteilen folgt, dass das Kugelflächenmikrofon samt der zugehörigen Theorie zwar ein guter Ansatz ist, die Kugelform als Trennkörper sowie die verwendete Entzerrung aber noch nicht das Optimum darstellt.

3.3 Trennkörperverfahren Zusammenfassung

Generell bietet die Technik der Äquivalenzstereophonie vielversprechende Ergebnisse als Hauptmikrofon. Trennkörperverfahren stellen eine Möglichkeit dar, die Äquivalenzstereophonie umzusetzen. Sie bieten die Möglichkeit trotz Laufzeitstereophonie die Probleme von Phasing und Monokompatibilität gering zu halten, die z. B. Lipshitz [23] an den Laufzeitverfahren kritisiert.

Des Weiteren bietet die Trennkörpertechnik eine Möglichkeit, trotz Druckempfängern als Kapsel nennenswerte Intensitätsdifferenzen zu erreichen.

Bemerkenswerte Erkenntnisse erhält Braun in seinem Vergleich verschiedener Trennkörperverfahren [7]. Er vergleicht OSS, das Kugelflächenmikrofon, einen Kunstkopf und eine Kugel als Trennkörper sowohl messtechnisch als auch in einem Hörtest. Erstaunlicherweise erhalten nicht die Verfahren, deren messtechnische Bewertung besonders gut ist, die besten Ergebnisse im Hörtest. Dies lässt darauf schließen, dass die Entwicklung im Bereich der Trennkörperverfahren noch nicht abgeschlossen ist und neue Ansätze zur Optimierung gesucht werden müssen.

Eine große Anzahl verschiedener Trennkörper betrachtet Lechner in seiner Arbeit [21]. Dabei untersucht er verschiedene Keilformen und Materialien vor allem messtechnisch und auf die Winkelabbildungstreue. Aufgrund seiner Versuche hält er Mikrofonanordnungen mit Trennscheiben für besonders winkeltreu. Des weiteren hält er die Verwendung von schallharten Materialien für eher ungeeignet und schlägt die Verwendung poröser Absorber als Trennkörper vor.

Die teilweise widersprüchlichen Anforderungen der Wiedergabe über Lautsprecher und der Wiedergabe über Kopfhörer werden sich auch mit der Trennkörpertechnologie nicht aus der Welt schaffen lassen. Die Entscheidung, welchen Weg man geht, wird vor allem von der Anwendung abhängen. Es lassen sich mit der Trennkörpertechnik jedoch recht 'kompatible' Aufnahmen erstellen.

4 Vorversuch Halbkugelflächenmikrophon

Um vor Beginn der theoretischen Arbeit einen Eindruck von den zu erwartenden Problemen und Möglichkeiten eines Trennkörper-Grenzflächen-Stereomikrophons zu bekommen, wird ein Vorversuch durchgeführt. Um ein repräsentativeres Ergebnis zu erhalten, wird mit Mikrofonen, bzw. Mikrofonkapseln von einem Hersteller gearbeitet. Verwendet wird das, auf der KUG vorhandene, Sortiment von Schoeps Mikrofonen, da

- diese sowohl in ausreichender Anzahl vorhanden waren, um gleichzeitig mehrere Aufnahmepositionen zu verwirklichen.
- sie abgesetzte Kapseln zur Verfügung stellten (Colette-System) und dadurch in den Trennkörper einbaubar sind.
- das Kugelflächenmikrofon derselben Firma verfügbar war.

Das erste Problem ist bereits in der obigen Auflistung ersichtlich. Das neue Mikrofon soll die Möglichkeit bieten, mit normalen Studiomikrofonen zu arbeiten. Standard-Kleinmembranmikrophone im Studiobereich sind meist ca. 10 cm lang (einzelne Modelle auch größer). Zur Länge addiert sich noch der benötigte XLR Stecker. Damit ist ein bündiger Einbau von gegenüberliegenden Kapseln nur in Trennkörper mit mehr als 30 cm Ausdehnung möglich. Dies führt zur ersten Einschränkung bei der Verwendbarkeit von normalen Studiomikrofonen für ein Trennkörper-Grenzflächen-Stereomikrofon.

Ob diese Einschränkung besteht, hängt im Endeffekt von den Dimensionen des Trennkörpers ab. Zumindest für den Vorversuch besteht sie, da der Trennkörper einen Durchmesser von 20cm hat.

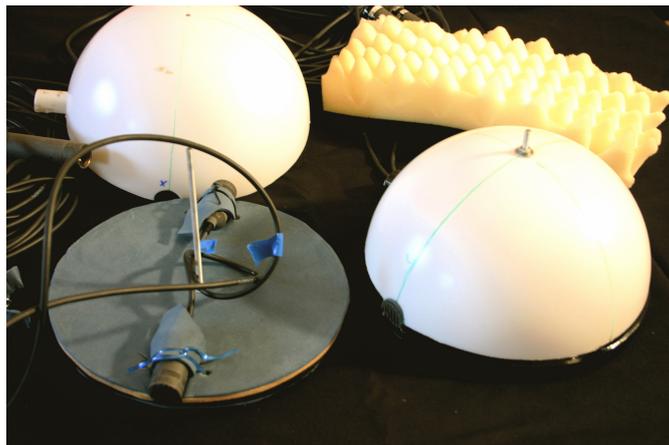


Abbildung 20: HKFM - offen und geschlossen

Entsprechend dem Kugelflächenmikrophon wird für die Grenzflächenversion eine Halbkugel mit 20cm Durchmesser verwendet (Vergl. Abbildung 20). Da es vom Kugelflächenmikrophon von Schoeps inzwischen auch eine kleinere Variante, das KFM360 gibt, wird eine weitere Kunststoffhalbkugel mit 16 cm Durchmesser verwendet. Zum Einsatz kommen bei den Testaufnahmen somit zwei „Halbkugelflächenmikrophone“ mit 20cm Durchmesser, eines mit 16cm Durchmesser, sowie das KFM6 in der Originalversion.

4.1 Aufnahmesituation

Die Mikrophone standen an einem Wochenende für Aufnahmen zur Verfügung. Aufgenommen wird eine Aufführung des Canto General mit Chor, Orchester, Percussion und Solisten in der Heilandskirche in Graz, sowie ein Chorkonzert, teilweise mit Bandbegleitung im Stift St. Lambrecht. Dabei wird jeweils eine geeignete Position für das Kugelflächenmikrophon gesucht und dann eine 20 cm Halbkugel darunter positioniert. Mit den Positionen der anderen Mikrophone wird experimentiert. Als erschwerend erweist sich der Umstand, dass beide Konzerte teilweise verstärkt sind. Da die Heilandskirche verhältnismäßig klein ist und für den großen Publikumsandrang weitere Stühle im Mittelgang der Kirche aufgestellt sind, ist das Finden einer geeigneten Aufnahme-position schwierig. Die Mikrophone befinden sich mitten im Publikum, da das KFM mit seinem Aufnahmewinkel von 90° eine relativ weit entfernte Aufstellung bedingt.



Abbildung 21: Aufstellung Konzert Heilandskirche



Abbildung 22: Details zur Aufstellung

Die Beschallungsanlage, die in den Höhen stärker bündelt als bei tiefen Frequenzen, verfälscht das Ergebnis. Das Halbkugelflächenmikrophon am Boden steht nah an

den Stühlen, somit werden vor allem hohe Frequenzen abgeschattet. Gleichzeitig wird auch Schall von der Unterseite der Stühle und Bänke reflektiert. Für einen weiteren Höhenabfall sorgt der Teppichboden im Mittelgang der Kirche. Außerdem ergibt sich das Problem der Abschattung durch den Dirigenten, bzw. das Dirigentenpodest.

In St. Lambrecht sind die Verhältnisse besser. Hier ist der Abstand zwischen den Bänken größer, die Kirche hat einen weiteren Mittelgang. Auch handelt es sich um eine große Kirche, wohingegen der Klangkörper (Chor+Band) im Vergleich eher klein ist. Der Fußboden ist aus Stein. Hier lässt sich die Aufstellung der Mikrofone wesentlich besser realisieren. Zwar wird auch hier mit einer Beschallungsanlage gearbeitet, aber diese ist in einer günstigeren Position für die Aufnahme.

4.2 Handhabung:

Der Aufbau des Trennkörper – Grenzflächen - Stereomikrophons (TKGSM) bereitet grundsätzlich keine besonderen Schwierigkeiten. Das Mikrophon benötigt keinen Ständer und kann einfach an der gewünschten Stelle auf den Fußboden gelegt werden. Körperschallprobleme werden nicht stärker als bei konventioneller Mikrophonierung wahrgenommen.

Ein Problem ist der Schutz des Mikrophons vor Zerstörung durch Zuschauer oder Akteure. Das Mikrophon am Boden wird oft nicht oder erst zu spät wahrgenommen. Es ist in jedem Fall bis unmittelbar vor Aufnahmebeginn ein Schutz nötig. In St. Lambrecht kann der Bereich um die Mikrofone abgesperrt werden und die Künstler sind darauf vorbereitet, auf das Mikrophon zu achten. In der Heilandskirche müssen in der Pause Stühle über das Mikrophon gestellt werden, um zu verhindern, dass herumlaufende Personen es übersehen. Ein Stecker direkt am Mikrophon wäre hilfreich.

Teilweise wäre die Montage an Decken oder Wänden sinnvoll. Diese benötigt aber spezielle Halterungen, sowohl für das Mikrophon, als auch für die Kabel.

4.3 Vergleich der Aufnahmen:

4.3.1 Klangeindruck:

Die akustischen Eigenschaften sind abhängig von der nahem Umgebung des Mikrophons. Zunächst muss der Frequenzgang entzerrt werden, um gehörmäßig ausgewogen zu wirken. Dazu wird ein High Shelf mit einer Anhebung von ca. 12 dB bei 3,15 kHz in den Eingangskanälen des Mischpults eingestellt, damit der Klang etwa dem des KFM's entspricht. Es ergeben sich grundsätzliche Tendenzen:

- Das Klangbild bei gleicher Position ist diffuser als das KFM. Applaus wird gleichmäßiger wahrgenommen. Der Unterschied der Klangfarbe des Applauses bei den verschiedenen Positionen ist verhältnismäßig gering.

- Die Stereoabbildung ist bei den verwendbaren Aufnahmen gleichmäßiger als beim KFM. Es gibt aber Fehllokalisationen einzelner Instrumente beim Halbkugelmikrofon. Bei den Aufnahmen in der Heilandskirche rückt das Orchester im Vergleich etwas näher und wirkt enger. Die Distanz wird schlechter wiedergegeben, die räumliche Tiefe hingegen besser.
- Vor allem bei der Aufnahme in St. Lambrecht hat das Halbkugelflächenmikrofon eine präzisere Abbildung im Bassbereich und eine bessere Tiefenstaffelung. Auch im Mitteltonbereich ist die Aufnahme ausgewogener. Im Gegensatz dazu werden bei reflektierenden Objekten in der Nähe, wie beispielsweise den Stühlen in der Heilandskirche, starke Kammfiltereffekte und ungleichmäßige Frequenzgänge wahrgenommen.

4.3.2 Vergleich KFM mit HKFM

Zuerst fällt der dumpfere Klang des HKFM auf, wohingegen das KFM spitz wirkt.

Nach der Entzerrung fällt auf, dass das Halbkugelflächenmikrofon entfernter bzw. diffuser klingt. Die Abbildung im Vergleich zum KFM ist weniger präzise, dafür ausgewogener, wobei die Unterschiede zwischen den Aufnahmesituationen stark sind. Steht das HKFM etwas näher an der Quelle, sind die Verfahren sich ähnlicher. Durch die Position am Boden sind Störungen durch Personen in der Nähe wahrscheinlicher. Konkret werden hier Fußgeräusche des Publikums sowie die Abschattung durch den Dirigenten in der Heilandskirche festgestellt und ein quietschendes Dirigentenpodest in St. Lambrecht.



Abbildung 23: HKFM - Probleme mit dem Dirigentenpodest

4.3.3 Schlagzeug

Das Stereobild ist breit, aber mit den Panpots gut regelbar. Auch eine Verschiebung des Schlagzeugs im Stereobild ist realisierbar, ohne dass der Klangeindruck verfälscht wird. Die Abbildung ist natürlich, die Ortung stabil bei einem überraschend weiten Sweetspot.

Klanglich wirkt die Aufnahme schon ohne Entzerrung verwendbar. Eine Anwendung als „Overhead-Mikrofon“ ist denkbar.



Abbildung 24: HKFM für Schlagzeug



Abbildung 25: HKFM für Chor

4.3.4 Chor

Trotz der sehr nahen Aufstellung ist der Chor auch im Vergleich zum „Quasi - ORTF“, welches sonst als Hauptmikrofon für den Chor dient, gleichmäßig abgebildet. Instrumente bzw. Solisten außerhalb des Aufnahmebereichs klingen natürlicher als mit dem ORTF. Das HKFM klingt räumlicher als das ORTF in etwa derselben Position nur 2m höher. Dieses bildet im Vergleich präziser ab. Störgeräusche, die in Bodennähe entstehen, wie das Klappern von Stativen und Schuhen, werden aufgenommen, sind auf dem ORTF dagegen kaum wahrnehmbar.

4.4 Frequenzgänge:

Erwartet wurden Frequenzgänge, die aufgrund der zu großen Kapseln für die Grenzflächenanwendung ab etwa 10kHz mit ca. 6 dB/Oktave abfallen. Es stellt sich heraus, dass dieser Abfall wesentlich tiefer und wesentlich stärker einsetzt als erwartet. Es spielen einige Faktoren eine Rolle:

- Die Größe der Mikrofonkapseln ist zu groß für die Grenzflächenanwendung.

- Die Abstimmung der Kapseln, die normalerweise den Druckstau vor dem Mikrofon bei hohen Frequenzen ausnutzt, wird durch die Grenzflächenmontage verändert.
- Die Abstrahlcharakteristik der Instrumente führt meistens dazu, dass hohe Frequenzen gebündelt abgestrahlt werden und nicht unbedingt in Richtung Boden.
- Der Boden kann nicht als ideal schallhart betrachtet werden (speziell in der Heilandskirche mit einem Teppichboden). Hohe Frequenzen werden eher gedämpft als tiefe.

Dieses Ergebnis zeigt, dass bei der Entwicklung des Trennkörpers darauf geachtet werden soll, dass dieser den Frequenzgang zu hohen Frequenzen eher anhebt, da eine derartige Entzerrung schnell zu einem hörbaren Ansteigen des Rauschens auf der Aufnahme führen kann.

Zur Untersuchung der Frequenzgänge werden einzelne Ausschnitte der Aufnahme ausgewählt und mit einem Real-Time-Analyzer betrachtet. Dabei wird eine ausreichend lange Stelle ausgewählt, über die gemittelt wird. Da es sich nicht um Messsignale, sondern musikalisches Ausgangsmaterial handelt, können die Ergebnisse nicht als absoluter Frequenzgang betrachtet werden. Rückschlüsse kann man aus den Differenzen zwischen den verschiedenen Mikrofonen ziehen.

Bei den Aufnahmen aus der Heilandskirche können die verschiedenen Mikrofonpositionen verglichen werden.

Das hintere Halbkugelflächenmikrofon gleicht dem Kugelflächenmikrofon, wenn man vom Höhenabfall absieht. Für Einflüsse der Raumakustik sprechen periodische Einbrüche im tieffrequenten Bereich, die beim mittleren HKFM sichtbar sind. Auf Auslöschungen durch Reflexionen lässt auch der Frequenzgang des kleinen HKFM schließen. Oberhalb von 1kHz fällt der Direktschall so stark ab, dass der Frequenzgang durch den diffusen Raumschall geprägt wird.

Das vordere Mikrofon wird im Höhenbereich abgeschattet, zusätzlich spielen insbesondere stark bündelnde Instrumente darüber hinweg. Das hintere Mikrofon befindet sich im diffusen Raumschall und hat einen weiteren Höhenabfall durch den größeren Abstand zur Quelle zu verzeichnen. Dass dieses Verhalten nicht vom Mikrofon selbst verursacht wird, sieht man, wenn die Spektren von Applaus (Vergl. Abbildung 26) betrachtet werden. Hier sind die Bedingungen für die Mikrophone ähnlicher, die messtechnischen Unterschiede gering.³

³Der Bassabfall bei der kleinen Halbkugel ist auf einen Messfehler zurückzuführen (jemand ist in der verwendeten Passage gegen das Mikrofon gestoßen).

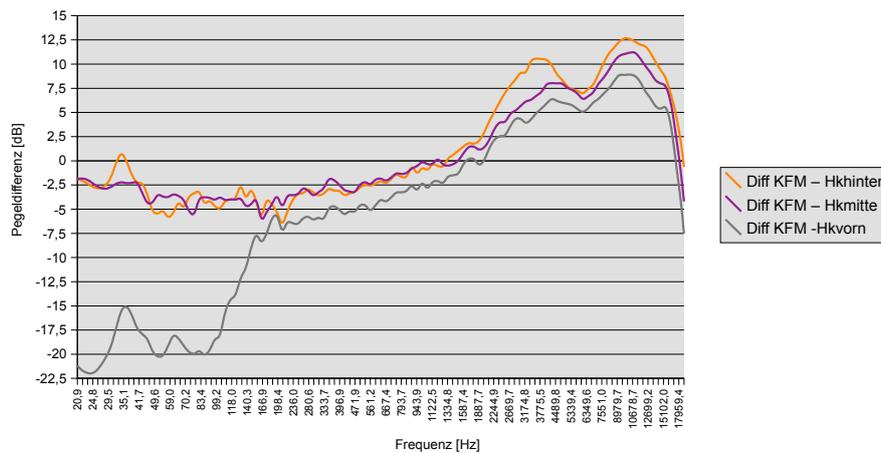


Abbildung 26: Frequenzgangsdifferenzen der Mikrophone in der Heilandskirche bei Applaus

Es wird die Differenz vom Frequenzgang des KFM zu den verschiedenen Halbkugeln berechnet. Die sich daraus ergebenden Frequenzgänge zeigen zwar eine starke Welligkeit aufgrund der unterschiedlichen Positionen, man sieht, welche Equalizereinstellung nötig wäre, um die Halbkugeln an den Frequenzgang des KFM anzugleichen.

Für die Aufnahmen in St. Lambrecht wird der Frequenzgang der Entzerrung nach Geschmack dargestellt (Vergl. Abbildung 27), indem die Frequenzgänge der unbearbeiteten Signale von den entzerrten abgezogen werden. Man sieht, dass die Frequenzgangsdifferenz mit Entzerrung wesentlich geringer ist als ohne. Der Höhenabfall des HKFMs ist leicht überkompensiert. Beim KFM wurden die Höhen bei 7 kHz leicht abgesenkt. Dadurch ist der Klang weniger spitz.

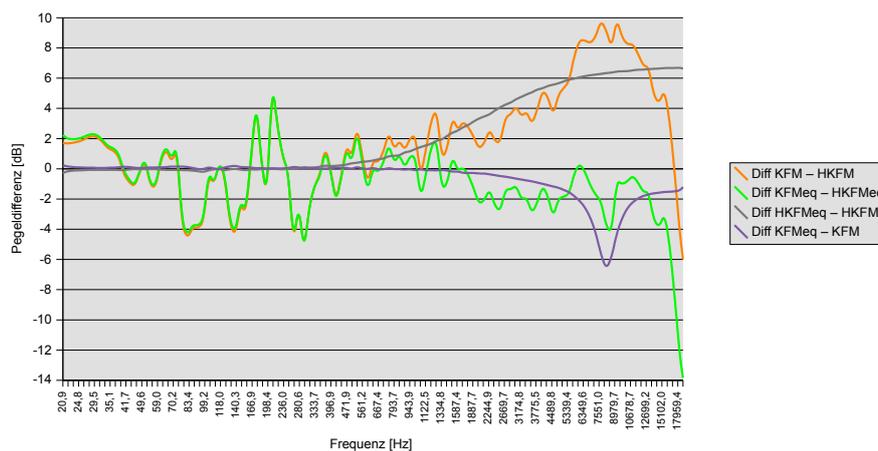


Abbildung 27: Frequenzgangsdifferenzen und Geschmacksentzerrung St. Lambrecht

4.5 Vergleich der ermittelten Frequenzgänge mit einer Messung

Mit dem im Laufe der Diplomarbeit geschriebenen Messprogramm ist es möglich, den Diffusfeldfrequenzgang des Halbkugelflächenmikrophons aus dem Vorversuch nachträglich zu messen. Das Ergebnis entspricht, wenn man die bekannten Messfehler berücksichtigt, weitgehend den Erfahrungen des Vorversuchs. Durch Fehler von Messraum und Referenzmikrofon werden oberhalb 10 kHz Überhöhungen im Frequenzgang dargestellt, die nicht der Realität entsprechen, sondern durch eine für die Grenzflächenmontage zu große Kapsel des Referenzmikrophons hervorgerufen werden.

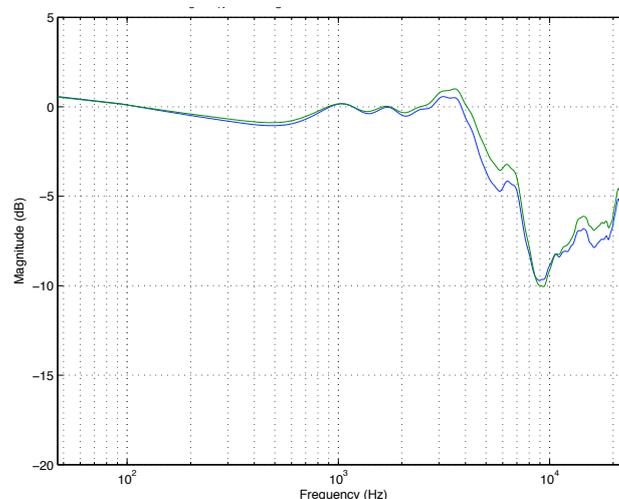


Abbildung 28: Gemessener Frequenzgang eines 20cm HKFM mit Schöps MK5 Kapseln, kalibriert mit einem 1/2 Zoll Messmikrofon auf der Grenzfläche liegend.

4.6 Ergebnisse und Einschränkungen

Der Vorversuch zeigt einige, teilweise unerwartete Ergebnisse :

- Der Aufnahmebereich soll an die Aufnahmesituation angepasst sein. Wählbare Aufnahmewinkel sind ein Vorteil. Wenn nur ein Aufnahmewinkel möglich ist, sind 90 Grad eher zu wenig.
- Das Mikrofon reagiert empfindlich auf die akustischen Eigenschaften der nahen Umgebung. Hindernisse bzw. reflektierende Flächen sollen ausreichend weit entfernt sein, wenn sie sich nicht ganz vermeiden lassen. Die „Sicht“ auf den Klangkörper muss frei sein. Falls der Untergrund nicht schallhart ist (z. B. Teppichboden), muss eine schallharte Platte unterlegt werden.

- Für kleine Ensembles, die ohne Dirigent auftreten, dürfte eine vorteilhafte Mikrofonierung im Nahbereich möglich sein. Hier ist das TKGFSM auf dem Boden eine einfache und effektive Aufnahmemöglichkeit.
- Auch die Aufnahme von einzelnen Instrumenten oder Instrumentengruppen ist möglich. Somit ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten in der U-Musik oder als Stützmikrofon.
- Die Richtcharakteristik soll den von vorn eintreffenden Schall stärker berücksichtigen. Eine gleichmäßige Berücksichtigung jeder Raumrichtung ergibt einen zu starken Anteil an Raumanteilen, bei einer ausreichend entfernten Aufstellung, die den Klangkörper homogen erscheinen lässt.
- Der Aufstellungsort entspricht dem herkömmlicher Trennkörpermikrophone ähnlicher Form.
- Eine elektronische Entzerrung ist notwendig, wobei eine Höhenanhebung der wichtigste Filter ist.

Folgende Einschränkungen sind prinzipiell nicht zu vermeiden:

- Je nach Trennkörper können Studiomikrophone nur dann zum Einsatz kommen, wenn sie die Möglichkeit für abgesetzte Kapseln bieten.
- Ein Trennkörper-Grenzflächen-Stereomikrofon kann bei großen Klangkörpern (z. B. Orchester) nur in ausreichend großen Räumen eingesetzt werden, um die nötigen Abstände einzuhalten.
- Durch die Gefahr, dass das Mikrofon nicht gesehen wird und dadurch unabsichtlich zerstört wird, ist eine Anwendung in Situationen mit Publikum nur eingeschränkt möglich. Man muss den Bereich um das Mikrofon entweder absperren oder es an der Decke befestigen.
- Die Handhabung und die Arbeitsweise erfordern viel Vorsicht und erzeugen einiges an Erklärungsbedarf bei der Anwendung.

5 Anwendungsbereich

Aufgrund des Vorversuchs, der Literaturrecherche und den Erfahrungen mit den Prototypen kann der Anwendungsbereich eines Trennkörper-Grenzflächen-Stereomikrophons eingegrenzt werden. Tabelle 2 fasst die Ergebnisse zusammen.

5.1 Virtuelle Raumvergrößerung

Grenzflächenmikrophone können genutzt werden, um Räume virtuell akustisch zu vergrößern. Bei geeigneter Montage auf der Fläche der frühesten Reflexionen, welche die wahrgenommene Raumgröße beeinflussen, werden Reflexionen dieser Fläche nicht direkt aufgenommen, sondern höchstens als (spätere) Sekundärreflexionen über andere Flächen. Dies ist insbesondere bei flachen Räumen sinnvoll, in welchen starke Decken oder Bodenreflexionen vorherrschen.

Diese Möglichkeiten sind speziell für Studioaufnahmen interessant.

Während sich bei der Orchesteraufnahme im Konzert meist Probleme ergeben, ist eine Aufnahme von Orchestern unter Studiobedingungen mit Trennkörper - Grenzflächen - Stereo-Mikrophonen möglich, da die praktischen Probleme umgangen werden können.

5.2 Kleines Ensemble ohne Dirigent

Bei einem kleinen Ensemble ohne Dirigent entfällt dieser als Schallhindernis für ein typischerweise mittig positioniertes Mikrofon. Bei einem TKGSM mit ausreichend großem Aufnahmewinkel ist eine nahe Mikrofonierung möglich. Allerdings müssen hierfür die Instrumente zwingend eine ähnliche Abstrahlcharakteristik haben. In diesem Fall können entstehende Färbungen mit einem Equalizer ausgeglichen werden. Somit ist die Aufnahme eines Streichensembles oder eines kleinen Chores möglich. Vor allem gemischte Ensembles mit Bläsern und Streichern lassen sich schwer aufnehmen. Testaufnahmen mit einem eiförmigen Trennkörper und einem Ensemble aus Streichern, kleinem Chor, Gitarre und Klavier ergaben eine auffällig gute Räumlichkeit und eine originalgetreue Wiedergabe, die selbst Laien positiv auffällt. Die Stücke desselben Ensembles ergänzt mit einer Klarinette waren nicht verwendbar, da diese in Abhängigkeit der gespielten Töne unnatürlich laut hervortritt.

5.3 Einzelinstrumente und Stützmikrofon für Instrumentengruppen

Testaufnahmen zeigen, dass es durchaus denkbar ist, ein TKGSM als Stützmikrofon für Instrumentengruppen und Einzelinstrumente zu verwenden.

Mögliche Anwendungsbereiche	ungeeignete Anwendungsbereiche
Deckenmontage Studioaufnahmen kleine Ensembles mit homogener Besetzung und Einzelinstrumente	Aufnahmen im Publikumsbereich schnelle Konzertmitschnitte Orchesterkonzerte mit zentralem Dirigent Ensembles mit stark unterschiedlichen Einzelinstrumenten
Montage auf Bühnen und festen Untergründen Virtuelle Raumvergrößerung	Montage auf Untergründen, die schwingen oder stark frequenzabhängig absorbieren

Tabelle 2: Mögliche und ungeeignete Anwendungen von Trennkörper-Grenzflächen-Stereomikrofonen

Es entsteht der Vorteil einer kompakten und dennoch stereophonen Stütze. Durch die hohen Pegelunterschiede im hochfrequenten Bereich durch den Trennkörper ist es möglich, die Panoramaregler ohne wahrnehmbare Kammfiltereffekte zu verwenden und somit ein hartes LR-Panning zu vermeiden.

5.4 Einschränkungen der Verwendbarkeit

Die Beschäftigung mit der praktischen Aufnahmetechnik mit Grenzflächenmikrofonen zeigt Einschränkungen der Anwendbarkeit dieser Technik. So ist in vielen Fällen eine sinnvolle Platzierung nicht möglich. Entweder verringern Abschattungen oder ungewollte Reflexionen durch Gegenstände oder Personen die Aufnahmequalität oder die Beschädigungsgefahr ist zu groß. Im Laufe der Tests wurde ein Mikrofon von einem durch den dunklen Konzertsaal hetzenden Photographen zertreten, bei einem wurde das Kabel durch einen Konzertgast zerstört.

Problematisch bei Decken oder Wandmontage sind schwingfähige Untergründe oder solche mit stark frequenzabhängiger Absorption. Speziell bei Decken und Wandverkleidungen aus dünnen Holzpaneelen gibt es Schwierigkeiten.

Auch relativ kleine Gegenstände können in der Nähe des Mikrophons oder zwischen diesem und der Schallquelle störende Reflexionen und / oder Abschattungen verursachen.

6 Trennkörper-Grenzflächen-Stereomikrophon

Im Vorversuch wurden Erkenntnisse in Bezug auf die Funktionsfähigkeit und die Anwendbarkeit von Trennkörper-Grenzflächen-Stereomikrophonen gesammelt. In diesem Kapitel soll untersucht werden, wie die genannten Einschränkungen vermieden werden können und wie ein geeigneter Trennkörper aussehen kann.

Hierzu wird ein Messprogramm programmiert und einige Trennkörpermikrophone sowie einige konventionelle Mikrophone werden vermessen und auf verschiedene akustische Parameter untersucht.

6.1 Vorüberlegungen

Dieses Kapitel geht auf Verfahren der stereophonen Aufnahme ein, die später gebraucht werden.

6.1.1 Summenlokalisierung und Äquivalenzstereophonie

Zur Aufnahme in Stereo werden entweder Laufzeitunterschiede, Pegelunterschiede, oder eine Kombination aus beidem herangezogen, um eine Richtungsabbildung zu ermöglichen.

Verfahren, die beide Ansätze verwenden, werden als Äquivalenzverfahren bezeichnet. Das Wahrnehmen einer Phantomschallquelle aufgrund der Überlagerung zweier Lautsprecher signale wird als Summenlokalisierung bezeichnet.

6.1.1.1 Intensitätsstereophonie

Bei der Intensitätsstereophonie ⁴ wird versucht, eine Stereoabbildung allein durch Pegeldifferenzen zwischen dem linken und rechten Lautsprecher zu erzeugen. Die nötigen Pegeldifferenzen nach Sengpiel sind exemplarisch in Abbildung 29 dargestellt. Bei der Summenlokalisierung wird ausgenutzt, dass das Gehör einen Pegelunterschied zwischen den Lautsprechern bei ansonsten gleichem Signal als Phantomschallquelle in Richtung des lautereren Lautsprechers interpretiert. Es werden (je nach Autor und Signal) 15 bis 20dB Pegelunterschied für die Ortung in einem Lautsprecher benötigt.

Dieses Phänomen ist durchaus interessant, da die Situation nicht dem natürlichen Hören einer einzelnen Quelle mit seitlicher Position entspricht, wenn man sich die Ohrsignale anschaut. Erstaunlicherweise überzeugen trotzdem gerade die intensitätsstereophonen Verfahren durch eine besonders präzise Richtungsabbildung.

⁴Im Grunde genommen ist der Name Intensitätsstereophonie irreführend, da in der Akustik unter Intensität **nicht** die Pegeldifferenz verstanden wird, um die es bei diesen Verfahren geht. In der Akustik versteht man unter Intensität den logarithmischen Quotienten aus der Schalleistung pro Fläche, also die pro Zeiteinheit durch ein Flächenelement hindurchtretende Schallenergie.

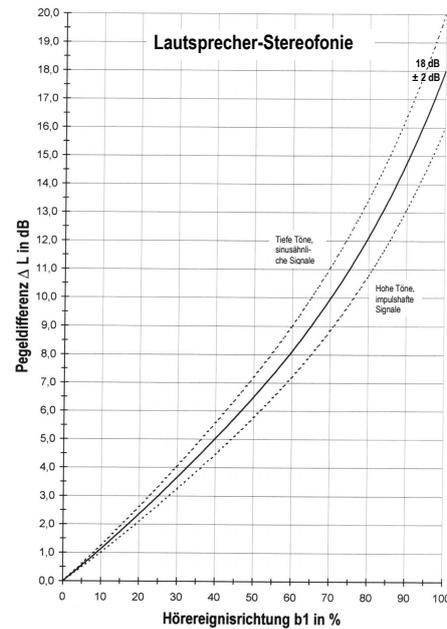


Abbildung 29: Hörereignisrichtung b_1 in Abhängigkeit von der Interchannel-Pegeldifferenz

Aus den Pegeldifferenzen zwischen den Kanälen berechnet sich die Hörereignisrichtung mit der Näherungsformel von Sengpiel [31]:

$$b_1 = 1,729349558 * 10^{-4} * \Delta L^4 - 4,932667999 * 10^{-3} * \Delta L^3 - 0,1485249855 * \Delta L^2 + 8,81863307 * \Delta L \quad (3)$$

mit

b_1 ... Hörereignisrichtung durch Pegeldifferenz in %

ΔL ... Pegeldifferenz in dB

Um reine Pegelunterschiede, ohne Laufzeitunterschiede zu generieren, müssen die Mikrophone im selben Punkt sein. Der Pegelunterschied wird durch die Richtcharakteristik und durch den Winkel, in welchem die Kapseln zueinander montiert sind, erzeugt.

6.1.1.2 Laufzeitstereophonie

Bei der Laufzeitstereophonie werden die zeitlichen Unterschiede zwischen zwei Mikrophenen, die durch deren Abstand entstehen, ausgenutzt. Um möglichst keine Pegeldifferenzen zwischen den beiden Kanälen zu erhalten, werden meistens Mikrophone

mit Kugelcharakteristik eingesetzt. Kommt der Schall an einem Ohr früher an, als am anderen, wird dies vom Gehirn als eine Schallquelle mit einem bestimmten Einfallswinkel interpretiert. Je nach Autor und Signal ist eine Laufzeitdifferenz von 1 ms bis 2 ms für eine Vollausslenkung in einem Lautsprecher nötig. Die aus der Laufzeitdifferenz resultierende Hörereignisrichtung berechnet sich nach Sengpiel [30] folgendermaßen:

$$b_2 = 21,090084 * \Delta t^4 - 61,293151 * \Delta t^3 + 17,099029 * \Delta t^2 + 107,74868 * \Delta t \quad (4)$$

mit

b_2 ...Hörereignisrichtung durch Laufzeitdifferenz in %

Δt ...Laufzeitdifferenz in ms

Tabelle 3 zeigt die entstehenden Laufzeitdifferenzen für verschiedene Einfallswinkel und verschiedene Mikrophonabstände.

	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0 cm	0	0	0	0	0	0	0
10 cm	0	0,08	0,15	0,21	0,25	0,28	0,29
15 cm	0	0,11	0,22	0,31	0,38	0,42	0,44
20 cm	0	0,15	0,29	0,41	0,5	0,56	0,58
25 cm	0	0,19	0,36	0,52	0,63	0,7	0,73
30 cm	0	0,23	0,44	0,62	0,76	0,84	0,87
40 cm	0	0,3	0,58	0,82	1,01	1,13	1,17
50 cm	0	0,38	0,73	1,03	1,26	1,41	1,46
70 cm	0	0,53	1,02	1,44	1,77	1,97	2,04
90 cm	0	0,68	1,31	1,86	2,27	2,53	2,62
110 cm	0	0,83	1,6	2,27	2,78	3,1	3,21
120 cm	0	0,91	1,75	2,47	3,03	3,38	3,5
140 cm	0	1,06	2,04	2,89	3,53	3,94	4,08
160 cm	0	1,21	2,33	3,3	4,04	4,51	4,66
180 cm	0	1,36	2,62	3,71	4,54	5,07	5,25
200 cm	0	1,51	2,92	4,12	5,05	5,63	5,83
250 cm	0	1,89	3,64	5,15	6,31	7,04	7,29

Tabelle 3: Laufzeitdifferenz (in ms) in Abhängigkeit von Mikrophonabstand und Einfallswinkel

Mit dem Abstand der Mikrophone verändert sich auch der Aufnahmewinkel der Anordnung (Vergl. Tabelle 4). Für Abstände bis ca. 30 cm wird 100 % Hörereignisrichtung nie erreicht, für größere Abstände schrumpft der Aufnahmewinkel sehr schnell.

Abstand	17cm	20cm	30cm	50cm	70cm	110cm
Aufnahmewinkel 75%	180° *	180° *	84°	74°	52°	32°

Tabelle 4: Aufnahmewinkel AB

6.1.1.3 Äquivalenzverfahren

Bei den Äquivalenzverfahren werden Laufzeit- und Pegelunterschiede ausgenutzt. Sie kommen somit dem natürlichen Hören näher als die anderen Verfahren. Dabei addiert sich die Hörereignisrichtung aus Laufzeit- und Pegelstereophonie.

Bei der Erzeugung der Laufzeit- und Pegeldifferenzen kommen unterschiedliche Techniken zum Einsatz. Es kann mit verschiedenen Richtcharakteristika, Winkeln, Mikrofonabständen und mit Trennkörpern unterschiedlicher Art gearbeitet werden.

Einige benannte Verfahren der Äquivalenzstereophonie mit Nierenkapseln sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Methode	Entwickler	Öffnungsw.	Basisbreite	Aufnahmew. 75%
ORTF	Französischer Rundfunk	110°	17cm	68°
OLSON	Schwedischer Rundfunk	135°	20cm	54°
DIN	Deutscher Normvorschlag	90°	20cm	70°
RAI	Italienischer Rundfunk	110°	21cm	60°
NOS	Holländischer Rundfunk	90°	30cm	54°

Tabelle 5: Einige Äquivalenzverfahren

6.1.1.4 Kopfbezogene Stereophonie

Bei der kopfbezogenen Stereophonie wird versucht, die Ohrsignale wieder herzustellen, wie sie beim natürlichen Hören vorhanden sind. Der verbreitetste Ansatz hierzu ist der Kunstkopf, bei dem die Ohren durch Mikrophone ersetzt werden. Auch wenn dieser Ansatz zunächst vielversprechend wirkt, ergeben sich einige Probleme, diesen so umzusetzen, dass er auch wirklich anwendbar ist. Die Kopfform und die Form der Ohrmuschel unterscheidet sich aber von Person zu Person, so dass die Ohrsignale individuell unterschiedlich sind. Das Hören mit „fremden“ Ohren funktioniert nicht immer. Ein typischer Fehler, der häufig auftritt ist zum Beispiel die Im-Kopf-Lokalisation. Des Weiteren gehören zum natürlichen Hören auch unbewusste Kopfbewegungen, genauso wie die optischen Reize, sowie eine gewisse Gewöhnung an den Raum, in welchem

man sich befindet. Diese Faktoren werden mit den üblichen Verfahren nicht erfasst. Einen Nachteil stellen auch die Abhörmöglichkeiten da. Da die Aufnahme schon Ohrsignale enthält, dürfen wiedergabeseitig keine weiteren Einflüsse mehr hinzukommen. Somit ist ein Abhören nur mittels Kopfhörer möglich.

6.1.2 Assoziationsmodell nach Theile

In seinem Assoziationsmodell vergleicht Theile das räumliche Hören über Lautsprecher mit der 3-dimensionalen Wahrnehmung von Szenen auf Bildern oder Zeichnungen. Es beruht darauf, dass der wahre Abstand der Schallquelle der Abstand Lautsprecher - Hörer ist. Wie bei einer Zeichnung, wo auch keine wirkliche räumliche Tiefe existiert. Dennoch wird in beiden Fällen räumliche Tiefe wahrgenommen.

Er kritisiert den Versuch, bei der Wiedergabe über Lautsprecher dieselben Ohrsignale zu generieren wie in einer natürlichen Hörumgebung. Dies führt zur Meinung, dass die Phasen und Intensitätsverhältnisse am Ohr gleichwertig mit dem Hören in einer Konzertsituation sein müssen. Basierend auf diesem Modell begründet Lipshitz in seinem Paper [23] seine Aussage, dass die Technik der Laufzeitstereophonie keine guten Ergebnisse produzieren kann. *„I believe that spaced-microphone recording techniques are fundamentally flawed, although highly regarded in some quarters, and that coincident-microphone recordings are the correct way to go.“* [23]

Theile erhält mit seinem Assoziationsmodell völlig andere Ergebnisse. Er nimmt an, dass das Gehör die Wirkung des Außenohrs auf die Ohrsignale erkennt und dadurch in der Lage ist, aus den Ohrsignalen auf die Beschaffenheit der Schallquelle zu schließen. Es findet sozusagen eine Art inverse Filterung der Ohrsignale statt. Diese ist dabei so komplex angelegt, dass sie nicht nur Ort und Art der Schallquelle berücksichtigt, sondern dies ebenso für mehrere Schallquellen kann, die als summiertes Signal beim Ohr eintreffen.

Daraus schließt er, dass es nicht darauf ankommt, die exakten Zeit und Pegeldifferenzen, die am Hörort in der Aufnahmesituation herrschen, exakt zu rekonstruieren, sondern die Parameter, welche zu einer vergleichbaren Wahrnehmung führen, zu extrahieren und damit einen vergleichbaren Höreindruck unter den Bedingungen am Abhörort zu simulieren. Konkret geht Theile auf die Simulation der räumlichen Tiefe und auf die entstehende Klangfarbe ein. Er unterscheidet zwischen einer „ortsbestimmenden Stufe“ und einer „gestaltbestimmenden Stufe“ beim Hörvorgang.

Das Assoziationsmodell wurde genutzt, um das Kugelflächemikrophon (vergleiche 3.2.3) zu entwickeln.

6.1.2.1 Simulation der räumlichen Tiefe

In der Stereophonie werden Phantomschallquellen zur Richtungslokalisierung genutzt. Die hierzu notwendigen Laufzeit bzw. Pegelunterschiede können berechnet wer-

den. Das entstehende Schallfeld hat jedoch mit dem originalen Schallfeld einer seitlich positionierten Quelle wenig zu tun. Die Ohrsignale, die durch zwei gleichzeitig spielende Lautsprecher entstehen, entsprechen nie denen, die eine einzelne Schallquelle erzeugt. Insofern ist es verwunderlich, dass das Prinzip der Phantomschallquellen so gut funktioniert. „Eine am Ort der Phantomschallquelle befindliche gedachte Realschallquelle mit gleichen Eigenschaften wie die Phantomschallquelle würde zu völlig anderen Ohrsignalen führen.“ [37]

Die Summenlokalisierungstheorie beschreibt zwar die Richtungsabbildung der darauf beruhenden Mikrophonmodelle, dies ist laut Theile jedoch nicht mit der Abbildung der Räumlichkeit gleichzusetzen.

Zum Erzielen eines guten Räumlichkeitseindrucks greift man oft auf Verfahren zurück, die sich mit der Summenlokalisierung nicht mehr erklären lassen. Zum Beispiel entfernte Mikrophone, deren Phasen und Pegelbeziehungen keine korrekte Summenlokalisierung mehr ermöglichen, aber den Räumlichkeitseindruck verbessern. Benutzt werden auch künstliche Reflexionen und Nachhall. Theile vergleicht dies mit der fiktiven Tiefe bei der Darstellung räumlicher Phänomene auf Zeichnungen, wo ein 2-dimensionaler Raum zur Verfügung steht, aber ein 3-dimensionaler räumlicher Eindruck geschaffen wird (Vergl. Abbildung 30).

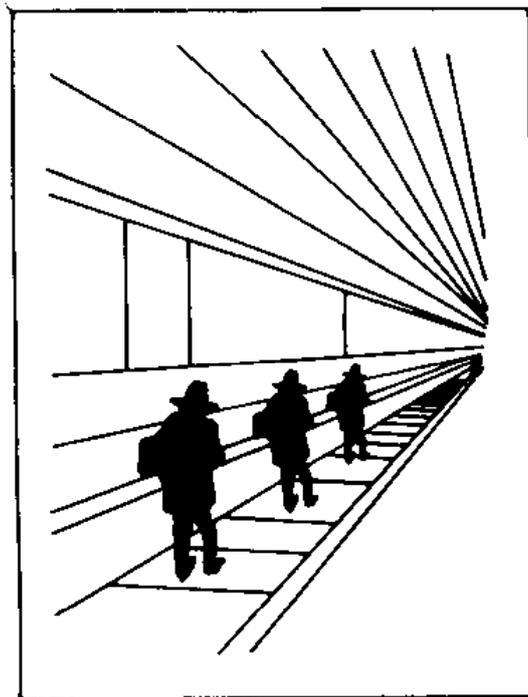


Abbildung 30: Fiktive Tiefe durch Darstellung räumlicher Phänomene
[37]

6.1.2.2 Klangfarbe

Verfahren wie der Kunstkopf genügen in hohem Maße den Anforderungen des Assoziationsmodells, solange man sie über Kopfhörer wiedergibt. Über Lautsprecher wiedergegeben entstehen aber Verfärbungen. Theile erklärt dies damit, dass in der „ortsbestimmenden Stufe“ des Gehörs eine inverse Filterung des Signals mit dem ortsabhängigen Frequenzgang dieser Hörereignisrichtung vollzogen wird. Dadurch steht der „gestaltbestimmenden Stufe“ ein Quellsignal zu Verfügung, welches unabhängig von der Position bewertet werden kann. Dies ermöglicht beim natürlichen Hören ein Erkennen der Klangfarbe, nahezu unabhängig vom Ort des Hörereignisses.

Bei der Lautsprecherwiedergabe erkennt die „ortsbestimmende Stufe“ allerdings den Ort des Lautsprechers. Dadurch wird ein falscher inverser Filter angewendet und somit eine Klangfarbenänderung wahrgenommen. Da bei der Kopfhörerwiedergabe die Wirkung des Außenohres ausgeschaltet ist, können hier die Ohrsignale oft richtig zugeordnet werden. Unter anderem begründet Theile dadurch seine Forderung nach einer linearen Wiedergabe des Diffusschallfeldes durch ein Stereomikrophon.

Es wird in dieser Arbeit versucht, in Anlehnung an das Assoziationsmodell nicht nur die Summenlokalisation, sondern auch andere psychoakustische Phänomene zu berücksichtigen.

6.1.3 Shuffling

Bei den Shuffling-Techniken wird das aufgenommene Stereo Signal mittels einer MS-Matrix in ein Mitten- und ein Seitensignal umgewandelt. Dies bietet den Vorteil, dass man durch getrennte Bearbeitung von Mitten- und Seitensignal (Vergl. Abbildung 31) wie bei der MS-Mikrophontechnik die Räumlichkeit beeinflussen kann. Nach der Bearbeitung wird das Signal wiederum mittels einer Matrix in Signale für linken und rechten Kanal umcodiert.

$$M = L + R \quad (5)$$

$$S = L - R \quad (6)$$

bzw:

$$2 * L = M + S \quad (7)$$

$$2 * R = M - S \quad (8)$$

Das Mittensignal entspricht der Mono-Summe, das Seitensignal der Differenz der Kanäle. Erstaunlich ist, dass trotz der Möglichkeiten die Anzahl der kommerziellen Prozessoren für diese Technik gering ist.

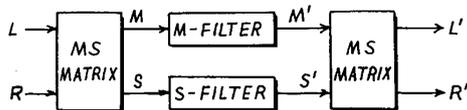


Abbildung 31: Schematische Darstellung eines Shufflers
[13]

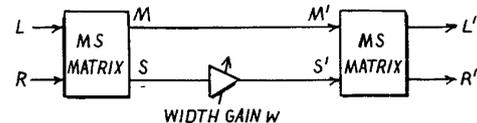


Abbildung 32: Kontrolle der Basisbreite bei Amplitudenstereophonie
[13]

6.1.3.1 Stereo Shuffling

Das Stereo-Shuffling entspricht der Anwendung eines Filters im Signalweg des Seitensignals. Teilweise wird ein inverses Filter im Mittensignal verwendet, um den Frequenzgang des Stereo-Signals nicht zu verändern. Zusätzlich bleibt die Möglichkeit, den Anteil des Seitensignals im Vergleich zum Mittensignal generell zu variieren.

Die Forderung nach einem solchen Shuffling entsteht durch die ungleichmäßige Abbildung der Stereo-Breite bei Lautsprecherwiedergabe. Es entsteht der Effekt, dass tiefe Frequenzen zur Mitte hin verschoben werden, wohingegen hohe Frequenzen relativ dazu eher zu den Außenbereichen drängen. Sengpiel hat dies in seinem Artikel [36] für die Wiedergabe bei Stereo-Lautsprecherlokalisierung untersucht (Vergl. Abbildung 33). Hiernach wird die größte Abweichung zur Mitte, gegenüber der typischen Hörereignisrichtung bei breitbandigen Signalen, bei ca. 400 Hz erreicht. Die größte Abweichung nach außen entsteht bei 4 kHz. Um ein breitbandiges Signal im äußeren Randbereich des Stereobildes korrekt wiederzugeben, ist hiernach bei 400 Hz ca. 4 dB mehr Pegeldifferenz nötig als bei 4 kHz.

Zum Ausgleich kann das Seitensignal entsprechend gefiltert werden. Zu beachten ist, dass der Filter die Phasenbeziehungen der Signale nicht zu stark verändern, da sonst ein korrektes Zusammensetzen nicht mehr möglich ist.

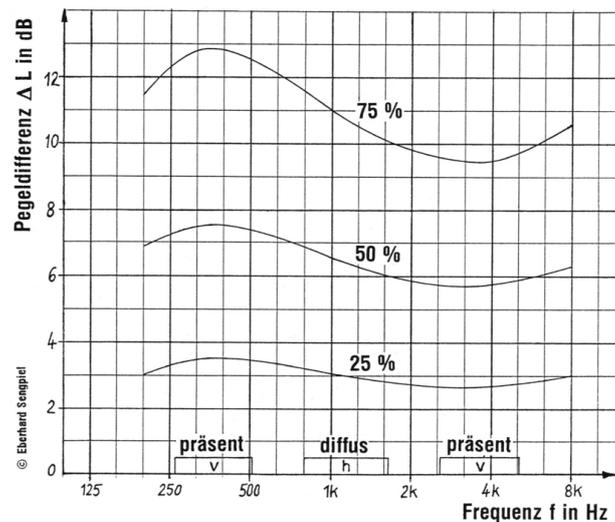


Abbildung 33: Pegeldifferenz in Abhängigkeit von der Frequenz bei schmalbandigen Interchannel-Signalen.

[36]

6.1.3.2 Stereo Shuffling bei Trennkörpermikrofonen

Speziell bei Trennkörpermikrofonen ist der Effekt des Shufflings besonders zu beachten. Durch die begrenzte Ausdehnung des Trennkörpers wird die Kanaltrennung bei hohen Frequenzen stärker ausfallen als bei tiefen. Damit ein Trennkörper bei 400 Hz noch eine abschattende Wirkung zeigt oder als Grenzfläche angesehen werden kann, muss sein Durchmesser ca. 85 cm betragen. Mit Shuffling bei Trennkörperaufnahmen können die tieffrequenten spektralen Differenzen verstärkt werden.

6.1.3.3 Abbildungsfunktion

Die Abbildungsfunktion stellt die wiedergabeseitige Hörereignisrichtung in Prozent im Verhältnis zum Schalleinfallswinkel und der Frequenz dar.

Das Shuffling für die Stereoabbildung über Lautsprecher wird im Messprogramm berücksichtigt. Es wird eine lineare Funktion, genähert an die Werte von Sengpiel angewendet, bei welcher der Pegel für gleiche Hörereignisrichtung von 4 kHz zu 400 Hz linear um 4 dB ansteigen muss. Die Berücksichtigung des Shufflings kann auch abgeschaltet werden. Die Unterschiede in der Abbildungsfunktion zeigt Abbildung 34.

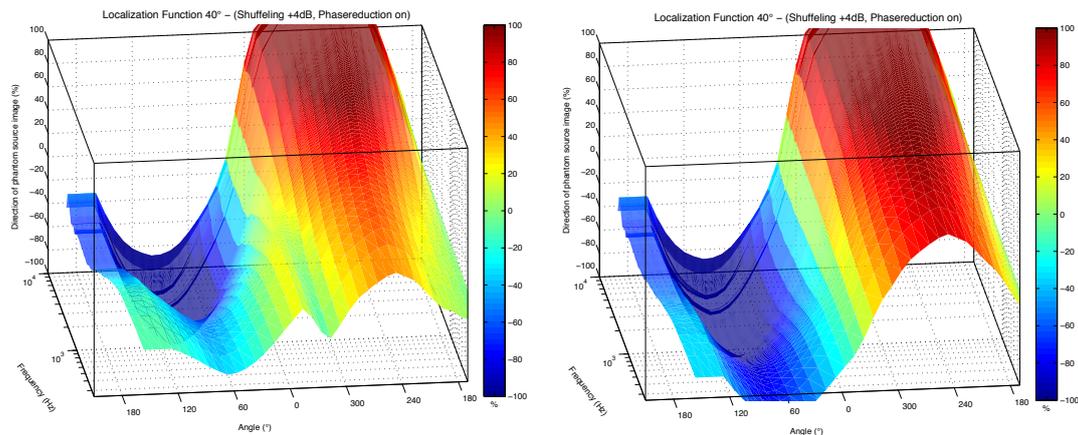


Abbildung 34: Abbildungsfunktion eines Kugelflächenmikrophons. Links: mit Berücksichtigung des Stereo-Shufflings. Rechts: Ohne Berücksichtigung des Shufflings bei Lautsprecherwiedergabe

6.2 Messtechnische Untersuchung verschiedener Mikrophone und Trennkörper

Es wird die Impulsantwort des Mikrophons aus den verschiedenen Raumrichtungen aufgenommen. Mit Hilfe dieser Daten lassen sich dann die akustisch wirksamen Parameter berechnen. Im Wesentlichen sind dies die Frequenzgänge aus verschiedenen Richtungen und die Richtcharakteristik bei verschiedenen Frequenzen. Mit Hilfe dieser Daten lässt sich dann die Stereoabbildung und die winkelabhängige Hörereignisrichtung berechnen. Durch Mitteln der Frequenzgänge über verschiedene Bereiche kann auf den wirksamen Gesamtfrequenzgang für verschiedene Raum- und Aufnahmebereiche geschlossen werden.

Zunächst werden die Unterschiede von Einzelmikrophonen im Grenzflächen und im räumlich unbegrenzten Betrieb untersucht. Für diesen soll hier der Begriff „**unbegrenztes Schallfeld**“ eingeführt werden.

6.2.1 Einzelmikrophone unter Grenzflächenbedingungen und im unbegrenzten Schallfeld

Die Membran eines Grenzflächenmikrophons soll plan in die Grenzfläche integriert sein, um richtig zu funktionieren. Alle anderen Montagevarianten sind mit akustischen Nachteilen behaftet, die auf Abschattungserscheinungen des Kapselgehäuses oder Resonanzen in entstehenden Hohlräumen beruhen. Diese Erscheinungen wurden von Lipshitz und Vanderkooy untersucht [22].

Will man herkömmliche Studio- oder Messmikrophone als Grenzflächenmikrophon

verwenden, ist eine Montage in der Grenzfläche meist nicht möglich. Gute Ergebnisse kann man auch mit einem Mikrophon, welches auf die Grenzfläche gelegt wird, erreichen, vorausgesetzt es ist ausreichend klein und es entsteht kein zusätzlicher Abstand zwischen Kapsel und Grenzfläche. Allerdings kann man so ein Mikrophon nur bis zu einer durch seinen Durchmesser bestimmten oberen Grenzfrequenz als Grenzflächenmikrophon bezeichnen. Solange die halbe Wellenlänge der eintreffenden Frequenzen größer ist als der Durchmesser des Mikrophons, besteht kein Unterschied zu einem realen Grenzflächenmikrophon. Für höhere Frequenzen treten mehrere Umstände ein, die den Frequenzgang und das Richtverhalten dieser Anordnung maßgeblich verschlechtern:

- Der Mikrophonkörper samt dem Anschlussstecker und Kabel schattet Frequenzen ab. Vor allem der Frequenzgang von hinten wird dadurch in den Höhen stark abgesenkt.
- Wenn die Membran in die Größenordnung der halben Wellenlänge kommt, können sich bei streifendem Schalleinfall Maxima und Minima einer Welle gleichzeitig auf der Membran befinden. Dadurch wird die Ausgangsspannung der Kapsel abgeschwächt.
- Für einen Punkt auf der Membran, der mehr als eine halbe Wellenlänge von der Grenzfläche entfernt ist, kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass er sich noch im Bereich des Druckmaximas durch den Grenzflächeneffekt befindet. Der Pegel ist geringer und Reflexionen aus der Grenzfläche werden möglich, was zu kammfilterartigen Frequenzgängen führen kann.
- Bei typischen Studiomikrofonen tritt, wenn der Durchmesser in den Bereich der Wellenlänge kommt, auch im unbegrenzten Schallfeld ein Druckstau auf, da die Membran als Hindernis das Schallfeld beeinflusst. Dieser Druckstau bei frontalem Schalleinfall führt zu einem Pegelanstieg der hohen Frequenzen und wird kompensiert. Bei der direkten Montage auf einer Fläche entsteht kein zusätzlicher Druckstau im oberen Frequenzbereich. Durch die Kompensation in der Kapsel fällt der Frequenzgang ab.

Diese Punkte führen dazu, dass sich der Frequenzgang oberhalb einer durch den Durchmesser des Mikrophons bestimmten Frequenz verschlechtert. Die einzige Möglichkeit, dies zu umgehen, besteht in der Verwendung von hinreichend kleinen Mikrofonen. Dadurch verliert man aber teilweise die Vorteile der Grenzflächenanordnung in Bezug auf den SNR.

Eine größere Kapsel lässt sich mit einer ovalen Membran realisieren. Durch eine ovale Membran ist die Kapsel in der Hauptschalleinfallrichtung klein und bietet eine

entsprechend hohe Grenzfrequenz. Quer dazu ist die Kapsel größer, die Grenzfrequenz damit niedriger, was aber in dieser Richtung, in der i.d.R. nur Raumreflexionen zu erwarten sind, nicht stört. Durch die größere Fläche verbessert sich der SNR. Ein ovales Mikrophon kann beispielsweise durch mehrere kleine nebeneinander angeordnete Mikrophone erzeugt werden. Im Versuch werden 4 Elektretkapseln direkt nebeneinander in eine Kunststoffkugel eingebaut. Die Schaltung ist so gestaltet, dass jede Kapsel einzeln angeschlossen werden kann. Die Messung bestätigte nicht nur den verbesserten SNR, sondern auch einen ausgewogeneren Frequenzgang bei der Verwendung mehrerer Kapseln. Die Fehler, die sich durch die Streuung der einzelnen Kapseln und den Prototypenaufbau nicht vermeiden lassen, mitteln sich bei Verwendung von 4 Kapseln größtenteils heraus.

6.2.2 Vergleich von Trennkörper und Grenzflächentrennkörper

Es stellt sich die Frage, wie sich das Verhalten von Trennkörpermikrofonen ändert, wenn man das Pendant auf einer Grenzfläche aufbaut. Hierzu werden Trennkörper in verschiedenen Größen aufgebaut und vermessen. Das halbierte Pendant dazu wird auf der Grenzfläche vermessen. Zum Test kommen Kugelflächenmikrophone sowie Scheibentrennkörper in der Art der OSS - Scheibe. Die Unterschiede zwischen den Varianten sind gering.

6.2.2.1 OSS und Halb-OSS

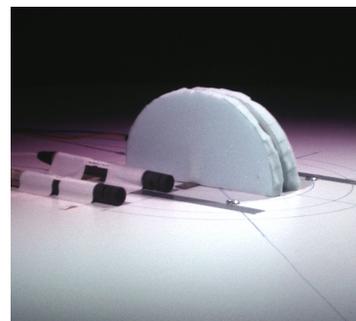
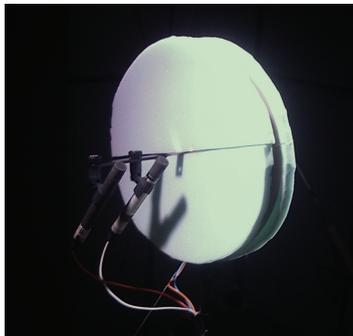


Abbildung 35: OSS und Halb OSS im Messraum

Die Scheiben werden in verschiedenen Größen aus einer 2cm starken MDF Platte ausgesägt und beidseitig mit ca 2cm Schaumstoff beklebt. In der Mitte ist eine Stereoschiene mit 4 Druckempfängern (Schöps - CMC6 MK5) montiert, so dass Messungen für einen Mikrophonabstand von 18 cm und 36 cm gleichzeitig durchgeführt werden können. Für die Grenzflächenmessung wird die Scheibe halbiert. Tabelle 6 enthält die

Typ:	Durchmesser Scheibe	Mikroabstand	Delay max berechnet	Delay max gemessen	Pegelunterschied max LR	Pegelunterschied 1kHz	Hörereignisrichtung max
	[cm]	[cm]	[ms]	[ms]	[dB]	[dB]	[%]
OSS	0	18	0,52	0,5	1	0,5	40
GF-OSS	0	18	0,52	0,5	1	0	40
OSS	20	18	0,78	0,6	4	0	80
GF-OSS	20	18	0,78	0,65	3,5	0	90
OSS	28	18	0,97	0,7	6	1	90
GF-OSS	28	18	0,97	0,75	6	2,5	100
OSS	0	36	1,05	1	1	0	10
GF-OSS	0	36	1,05	1	0	0	40
OSS	35	18	1,15	0,8	7	2	100
GF-OSS	35	18	1,15	0,9	7,5	3	100
OSS	20	36	1,2	1,1	2,5	0,5	90
GF-OSS	20	36	1,2	1,15	3	1	90
OSS	35	36	1,46	1,2	4,5	2	100
GF-OSS	35	36	1,46	1,35	4	2	100
GF-OSS	50	18	1,55	1,3	8,5	2	100
GF-OSS	50	36	1,8	1,5	5,5	2,5	100

Tabelle 6: OSS und Grenzflächen OSS bei verschiedenem Scheibendurchmesser und unterschiedlichen Mikrofonabständen

Eckdaten der verschiedenen vermessenen OSS-Varianten. Zu jeder Kombination von Scheibendurchmesser und Mikrofonabstand wird die maximal mögliche Verzögerung zwischen den Kanälen berechnet und mit dem maximalen Messwert verglichen. Die maximal möglichen Laufzeit erzeugt der Weg zwischen den Mikrofonkapseln:

$$\Delta t = \frac{2 * \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}}{c} \quad (9)$$

mit

Δt ...maximaler Laufzeitunterschied

b ...Mikrofonbasis

h ...Durchmesser der Scheibe

c ...Schallgeschwindigkeit

Es fällt auf, dass die gemessenen Werte kleiner sind als die berechneten. Außerdem sind die Werte bei Grenzflächenanordnung etwas größer.

Es gibt potentielle Messfehler. Abweichungen in der Messgenauigkeit können folgende Ursachen haben:

- Ungenauigkeiten im Scheibendurchmesser.
Die Scheiben werden mit einer Stichsäge ausgesägt. Durch die Handarbeit lassen sich Abweichungen nicht gänzlich vermeiden. Es ist davon auszugehen, dass der Durchmesser entlang des Umfangs \pm einem halben cm eingehalten wurde. Dies erklärt Abweichungen von etwa 0,06ms.
- Fehler beim Ablesen aus dem Diagramm
Die Werte werden aus Mess-Diagrammen abgelesen. Die Ablesegenauigkeit des Delays beträgt dabei maximal 0,05 ms.
- Vernachlässigung der Scheibendicke
Die Scheibe wird aus 22mm MDF gefertigt. Somit entsteht hier ein Fehler. Allerdings wird dadurch der Umweg in Wirklichkeit größer und nicht kleiner. Somit ist er nicht relevant.
- Positionsabweichungen
Trotz sorgfältiger Positionierung mittels 3 Laserpointern, gibt es Abweichungen des Zentrums. Im unbegrenzten Schallfeld führt jede Positionsabweichung zu kürzeren Verzögerungsmaxima, bei der Grenzflächenmessung nur jede Positionsabweichung der Grenzfläche nach unten (im Vergleich zu den Messlautsprechern). Eine Abweichung um 2cm führt schon zu 0,12 ms kleineren Verzögerungen. Somit scheint die Positionsabweichung die größte Fehlerquelle.

Die Abweichungen, die sich hieraus erklären lassen, liegen bei ca. 0,3ms und somit im selben Bereich wie die Messwertsabweichungen vom errechneten Wert. Allerdings bleibt anzumerken, dass die Messwerte ohne Trennkörper genauer als 0,06ms sind, was dagegen spricht, die gesamte Abweichung auf Messfehler zu schieben.

Zum Erreichen des maximalen Delays (Vergl. Abbildung 36) muss sich die Schallquelle direkt vor dem ersten Mikrofon befinden. (In der Abbildung entspricht dies dem gestrichelten Weg. Für entfernte und erhöhte Quellen wird Umweg kleiner. Für große Entfernungen kann man von gleichzeitigem Eintreffen des Schalls am zugewandten Mikrofon und darüber, in der Höhe h des Trennkörpers ausgehen.)

Berücksichtigt man den Quellabstand von 1m in der Formel, stimmen die gemessenen Werte bei den meisten Messpunkten genauer als \pm 0,1ms. Dies zeigt eine weitere, bisher unbeachtete Eigenschaft von Trennkörpermikrofonen. Im Gegensatz zur reinen Laufzeitstereophonie ist die Laufzeit zwischen den Kanälen nicht nur von der Schalleinfallrichtung, sondern auch vom Quellabstand abhängig. Eine entfernte Quelle wird somit mit weniger Laufzeitdifferenz, also zentraler abgebildet als eine nahe.

Es lässt sich kein Aufnahmewinkel als Einzahlwert bestimmen. Dies ist ein Grund für sprunghafte Ortungen bei sehr naher Aufstellung (z.B. Solisten), die in der Literatur erwähnt werden.

$$\Delta t_n = \frac{\sqrt{a^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2} - \left(a - \frac{b}{2}\right)}{c} \quad (10)$$

mit

Δt_n ...maximaler Laufzeitunterschied mit Berücksichtigung des Quellabstandes

b ...Mikrofonbasis

h ...Durchmesser der Scheibe

a ...Abstand zum Mittelpunkt des Trennkörpers

c ...Schallgeschwindigkeit

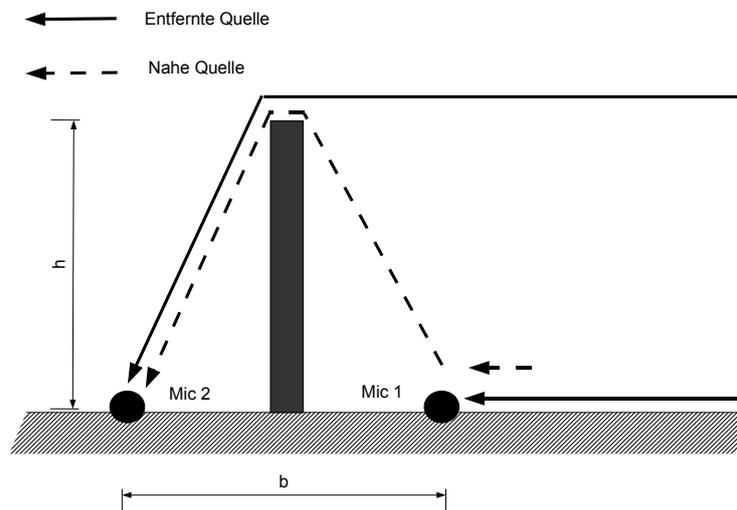


Abbildung 36: Schallumweg in Abhängigkeit der Höhe des Trennkörpers und der Entfernung bzw. Position der Quelle

Die Pegelunterschiede zwischen der Ausführung für freie Aufstellung und Grenzflächenversion sind vernachlässigbar gering. Sie stammen wohl eher aus Mess- und Ablesefehlern und von Ungenauigkeiten in der Aufstellung. Die, durch die Kapselgröße und den Staudruck vor der Grenzfläche hervorgerufenen, Frequenzgangsunterschiede gehen am stärksten in die Aufnahme ein.

Nachdem die Kanaldifferenzen für Pegel und Laufzeit praktisch gleich sind, gibt es keine wesentlichen Unterschiede in der Abbildung des Stereosignals. Bei den Messungen bestätigt sich dies in vergleichbaren Werten für die Hörereignisrichtung.

6.2.2.2 KFM und Halbkugelflächenmikrophon

Getestet werden einerseits die praktisch erprobten Prototypen des Vorversuchs, sowie einige neue Varianten in anderen Größen und mit Bestückung aus Elektret-Mikrofonen.

Auch hier bestätigten sich die Ergebnisse des Messaufbaus mit der OSS-Scheibe und der Eindruck des Vorversuchs. Prinzipiell entspricht die Stereoabbildung der im unbegrenzten Schallfeld.

Im Vergleich zur unbegrenzten Variante, bei der ja auch ein Grenzflächeneffekt am Trennkörper auftritt, ändert sich der Frequenzgang im tieffrequenten Bereich. Beim herkömmlichen Trennkörper ist die Grenzfläche zu klein, um hier eine Wirkung zu zeigen, deshalb fällt der Frequenzgang ab. Das passiert beim Grenzflächentrennkörper nicht. Dies betrifft nicht nur das Kugelflächenmikrophon, sondern auch alle anderen Trennkörper mit eingelassenen oder nah angebrachten Kapseln an einem schallharten Trennkörper.



Abbildung 37: Kugelflächenmikrophon und Halbkugelflächenmikrophon im Messraum

6.3 Optimierungskriterien

Es müssen Parameter gefunden werden, die messbar sind und die akustischen Eigenheiten des Mikrophons sinnvoll beschreiben. Dabei gilt es abzuwägen, ob es zielführend ist, das Ergebnis direkt zu betrachten, oder sich zu überlegen, wie sich die Werte auswirken, wenn das aufgenommene Signal in einer durchschnittlichen Hörumgebung abgehört wird.

6.3.1 Frequenzgang

Bei einem Stereomikrophon kommt es nicht nur darauf an, dass die Klangquelle ausreichend neutral wiedergegeben wird. Der Frequenzgang geht auch in die Distanzwahrneh-

mung und die Lokalisation ein. Generell lässt sich sagen, dass eine Diffusfeldentzerrung um so wichtiger ist, je weiter entfernt von der Schallquelle das Mikrophon steht und je mehr Raumanteile aufgezeichnet werden. Eine Aufstellung ausserhalb der Hauptabstrahlrichtung der hohen Frequenzen (zum Beispiel oberhalb oder unterhalb im Falle von Grenzflächenmikrophonen) macht bei den meisten Klangkörpern eine Höhenanhebung notwendig.

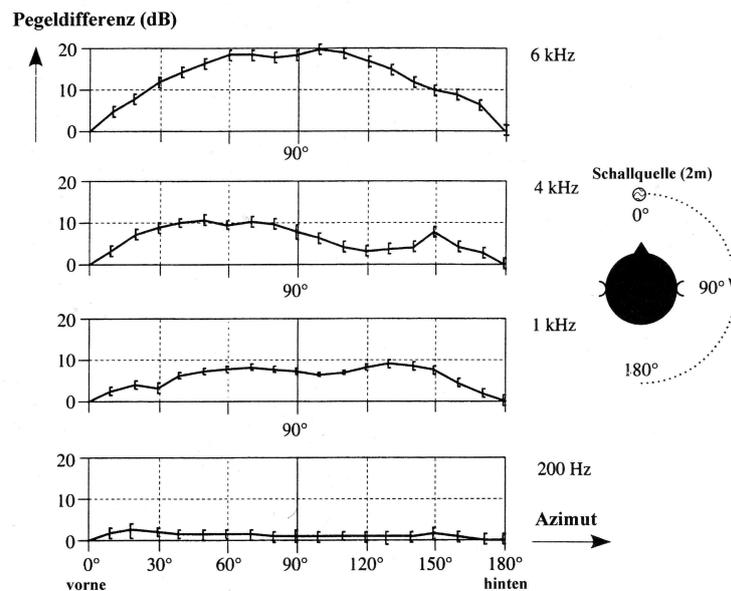


Abbildung 38: Pegeldifferenzen als Funktion der Position der Schallquelle nach Hugonet

[15]

Da das TKGFSM aber sowohl Direktschall als auch diffuse Raumanteile aufnehmen soll, ist eine differenzierte Betrachtung verschiedener Richtungen nötig:

- Vorderer Bereich des Mikrophons:

In diesem Bereich befindet sich die Klanquelle, die natürlich wiedergegeben werden soll. Speziell bei Lautsprecherwiedergabe ist hier auf eine lineare Übertragung zu achten. Es wird zwar in psychoakustischen Arbeiten gezeigt, dass es Frequenzbereiche gibt, die eine Lokalisation nach vorn hervorrufen, jedoch funktioniert dies bei Wiedergabe über Lautsprecher meist nur eingeschränkt.

Aufgrund der Richtcharakteristik der Instrumente, der Aufstellung und der Kapselgröße ist mit einem Höhenabfall an den Mikrophonen zu rechnen. Dieser soll für Schall von vorn akustisch ausgeglichen werden.

Die Ortung nach vorn könnte, nach den Arbeiten von Blauert und Hugonnet (Vergl: Kapitel 39 - Richtungsbestimmende Bänder nach Blauert), durch eine leichte Absenkung des Bereichs um 1kHz weiter verstärkt werden. Da zuhause meist leiser als in Originallautstärke abgehört wird, wäre damit auch einem leichten Loudness-Effekt Rechnung getragen. Es wird eine präsenze Wirkung des Klangs erzeugt. Dieser erscheint dem Hörer „relativ näher“ (Vergl. [5]).

- Hinterer Bereich:

Für die Ortung nach hinten sind laut Blauert vor allem die Frequenzbereiche um 1 kHz und um 12 kHz prägend. Nach Hugonnet (Vergl. Abbildung 38) ist die Pegeldifferenz zwischen hinten und vorn eher gering. Man kann als angenäherte Kopfform eine Kugel annehmen. Die Richtwirkung wird hauptsächlich durch die Form der Ohrmuscheln erzeugt. Dies spricht für einen leichten Abfall der hohen Frequenzen. Weniger höhenhaltige Signale werden entfernter wahrgenommen und Störgeräusche durch Publikum zeichnen sich oft durch einen starken Anteil an hohen Frequenzen aus.

- Oberer Bereich:

Laut Abbildung 39 korreliert die Antwort oben mit Spektren um 8 kHz. Dies ist für die Konstruktion eines TKGFSM kein Nachteil. Im Bereich vorn-oben soll der Frequenzgang eine Höhenanhebung aufweisen. Nach hinten ist ein Höhenabfall geschickter.

- Unterschiede Links / Rechts:

Da wir von links genauso hören wie von rechts, müssen Unterschiede im Spektrum des einen Mikrophons im Spektrum des anderen Mikrophons ausgeglichen werden, damit eine Auslenkung in der Horizontalebene keine Klangfarbenänderung hervorruft. Es soll darauf geachtet werden, dass die Frequenzgangsdifferenzen im Aufnahmebereich nicht zu groß sind, da sonst Fehlortungen auftreten können. Bei vielen Instrumenten sind die Spektren beim Anschwingen im oberen Bereich angehoben und werden dann im Klangverlauf eher grundtonlastig. Zu starke frequenzabhängige Pegeldifferenzen zwischen linkem und rechtem Kanal in diesem Bereich führen schnell dazu, dass die Ortung sich im Klangverlauf verschiebt.

Durch die Kopfform sind die Unterschiede zwischen links und rechts beim natürlichen Hören recht groß, vor allem im mittleren und oberen Bereich, im Bassbereich ist die spektrale Differenz durchgängig gering. Jedoch führt eine entsprechende Aufnahme nur bei Kopfhörerwiedergabe zu guten Ergebnissen. Für die Lautsprecherwiedergabe, wo solche spektrale Differenzen zusätzlich in der Wiedergabesituation entstehen, werden Klangfarbenänderungen hervorgerufen.

- Diffusfeldfrequenzgang:

Theiles Forderung nach einem linearen Diffusfeldfrequenzgang soll näherungsweise eingehalten werden, wenn man über alle Einfallrichtungen mittelt. Grobe Welligkeiten im Frequenzgang treten als Färbung der Aufnahme hervor.

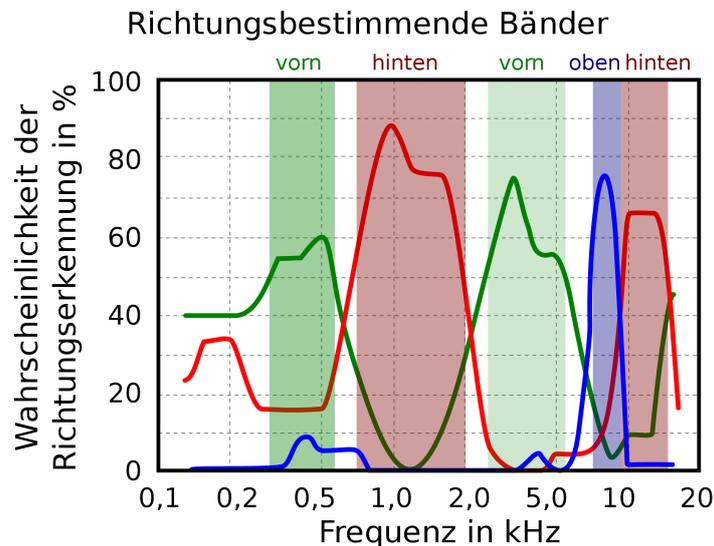


Abbildung 39: Richtungsbestimmende Bänder nach Blauert [40]

Um den Klangcharakter bei einer realen Aufnahme anzupassen, kann es leicht sein, dass abhängig von der Aufnahmeposition eher mehr oder weniger Höhen nötig sind, um einen natürlichen Klangeindruck zu erhalten. Eine leichte Absenkung der mittleren Frequenzen würde berücksichtigen, dass die Lautsprecher seitlich stehen und somit der Klang beim Abhören etwas durch die Einfallrichtung gefärbt wird. Die meisten HIFI-Lautsprecher sind jedoch schon entsprechend entzerrt.

6.3.2 Laufzeitdifferenzen

Sowohl der winkelabhängige Frequenzgang, als auch die Laufzeitdifferenz in Abhängigkeit des Einfallswinkels geht in die Abbildung ein. Bei einem Trennkörpermikrofon beeinflusst diese die Form des Trennkörpers - insbesondere seine Ausdehnung in Bezug auf den eintreffenden Schall - und der Abstand der Mikrofonkapseln.

Untersucht wird die Laufzeit zwischen den Kanälen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel der Schallquelle. Die Laufzeit in Abhängigkeit vom Einfallswinkel ist ein Bestandteil der Richtungsordnung. Hier kann die Summenlokalisierungstheorie herangezogen werden. Laut Sengpiel ist für eine Vollausslenkung eine Laufzeitdifferenz von 1,5ms

nötig. Der dadurch nötige Abstand ergibt sich aus dem gewünschten maximalen Einfallswinkel nach Tabelle 3 für reine Laufzeitstereophonie. Für eine Vollausslenkung unter typischen Aufnahmebedingungen sind hiernach Mikrofonabstände um 50 - 70 cm nötig. Für Trennkörperanwendungen ist dies zu groß, da noch Amplitudendifferenzen hinzu kommen.

Die Laufzeiten zwischen den Kanälen sollen groß genug sein, dass bei tiefen Frequenzen eine nahezu 100% seitliche Hörereignisrichtung möglich ist.

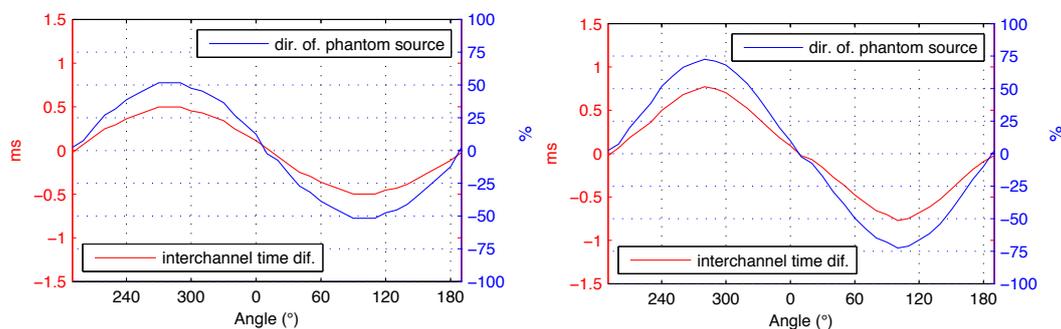


Abbildung 40: Gemessene Laufzeitdifferenz und die daraus resultierende Hörereignisrichtung für einen Mikrofonabstand von 19 cm unter 30° auf der Grenzfläche, links: AB - rechts: zusätzlich mit OSS-Scheibe

Abbildung 40 zeigt die gemessenen Laufzeitdifferenzen für zwei AB Anordnungen mit 19 cm Mikrofonabstand in Abhängigkeit vom Einfallswinkel. Dabei fällt auf, dass für größere Laufzeitdifferenzen die Hörereignisrichtung einer flacheren Kurve folgt und die Randbereiche bei der Laufzeitstereophonie nicht linear abgebildet werden. Dieser Effekt ist bekannt und wird in der Literatur (beispielsweise [35]) erwähnt. Bringt man einen Trennkörper zwischen die Mikrophone (in diesem Fall eine OSS Scheibe mit 35 cm Durchmesser), muss der Schall diesen bei seitlichem Einfall zusätzlich umlaufen. Dadurch erhöht sich die Laufzeitdifferenz. Dieser Effekt ist besonders auffällig beim kleinem Mikrofonabstand. Auffällig ist der durch den Trennkörper entstehende größere lineare Bereich der Hörereignisrichtung. Der Effekt des Stauchens der Randbereiche tritt somit weniger auf. Dies fällt speziell bei im Vergleich zur Mikrofonbasis großen Trennkörpern auf. Es ist davon auszugehen, dass der Laufzeitanteil an der Stereoabbildung durch einen Trennkörper in der Regel günstigere Eigenschaften aufweisen wird.

6.3.3 Richtcharakteristik des Gesamtsystems

Die Richtcharakteristik muss bei einem Trennkörpermikrofon frequenzabhängig betrachtet werden. Sie steht wiederum im Zusammenhang mit den richtungsabhängigen Frequenzgängen. Sowohl die vertikale als auch die horizontale Richtwirkung sind von Bedeutung für die Aufnahme. Zur Untersuchung ist im Messsystem eine Ballon-Darstellung für den 3-dimensionalen Eindruck, sowie vertikale und horizontale Polar-diagramme realisiert.

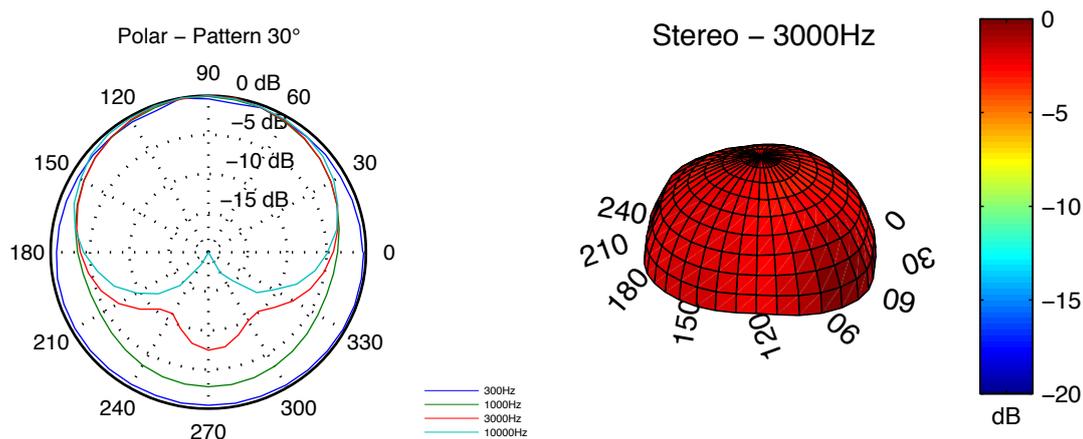


Abbildung 41: links: Polardiagramme des linken Kanals eines HKFM aus dem Vorversuch, rechts: 3-dimensionale Darstellung der Gesamtrichtcharakteristik des HKFM bei 3 kHz

Beispielsweise ergibt sich beim Kugelflächenmikrofon in den Höhen eine Charakteristik, die etwa einer Niere entspricht und zur Seite schaut (Vergl. Abbildung 41). Aus der Überlagerung der Richtcharakteristiken beider Kapseln bildet sich eine Gesamtrichtcharakteristik, die vier Maxima aufweist: Nach vorn, zu jeder Seite und nach hinten. Die Pegelunterschiede betragen 3-5 dB und variieren mit dem Kugeldurchmesser und der Frequenz.

Eine solche Richtcharakteristik ermöglicht keine optimal gleichmäßige Stereowiedergabe.

Ein Stereomikrophonsystem, das oft eine gute Abbildung des Stereobildes erreicht, ist das ORTF. Hier bildet die kombinierte Richtcharakteristik der Kapseln eine Form, die einer Niere ähnelt und deren Hauptachse in der Mitte des Aufnahmebereichs liegt (Vergl. Abbildung 42). Ähnliche Charakteristika ergeben sich bei der reinen Pegelstereophonie mit XY oder MS. In jedem Fall haben gebräuchliche Stereomikrophonsysteme mit guter Winkelabbildung einen gleichmäßigen Verlauf der winkelabhängigen Empfindlichkeit.

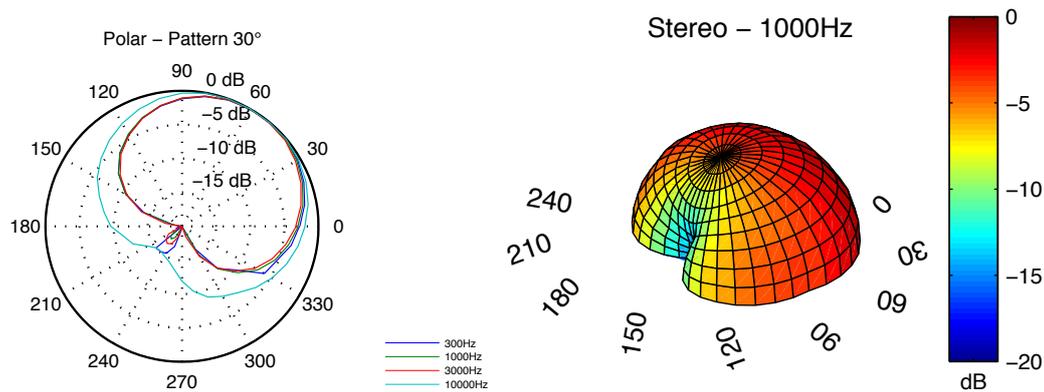


Abbildung 42: links: Polardiagramme des linken Kanals eines ORTFs aus zwei Grenzflächennierenmikrophonen, rechts: 3-dimensionale Darstellung der Gesamttrichtcharakteristik bei 1 kHz

Solch eine Richtcharakteristik ist das Ziel, wenn es um das TKGFSM geht. Idealerweise soll dabei der Aufnahmewinkel, den die Pegelstereophonie im hochfrequenten Bereich erzeugt, mit dem Aufnahmewinkel durch die Laufzeitstereophonie im tieffrequenten Bereich übereinstimmen.

Die Richtcharakteristik des Gesamtsystems soll sich mit der Frequenz nicht zu stark verändern. Dies gilt insbesondere im Grund- und Mitteltonbereich, in welchem das Gehör besonders empfindlich auf Lokalisations- und Klangänderungen reagiert. Ansonsten werden Instrumente in Abhängigkeit der Lage, in der sie gerade spielen, an unterschiedlichen Orten abgebildet. Diese Forderung kann man für den Raumbereich, aus welchem man nur diffuse Reflexionen erwartet, etwas auflockern.

6.3.4 Aufnahmewinkel / Aufnahmebereich

Die Begriffe Aufnahmebereich, Aufnahmewinkel, Öffnungswinkel etc. (Vergl. Abbildung 43) werden oft verwechselt und in den Quellen teils unterschiedlich verwendet. Die folgende Auflistung dient der Begriffsklärung:

- **Ausdehnungsbereich / Ausdehnungswinkel:**
Der Bereich, den eine Klangquelle, z. B. ein Orchester, physikalisch einnimmt. Wird in der Regel als der Winkel angegeben, unter dem ein Mikrophonsystem die äußeren Kanten der Klangquelle „sieht“.
- **Öffnungswinkel ϵ :**
Der Winkel zwischen den vorderen Maxima der Richtcharakteristika zweier Mi-

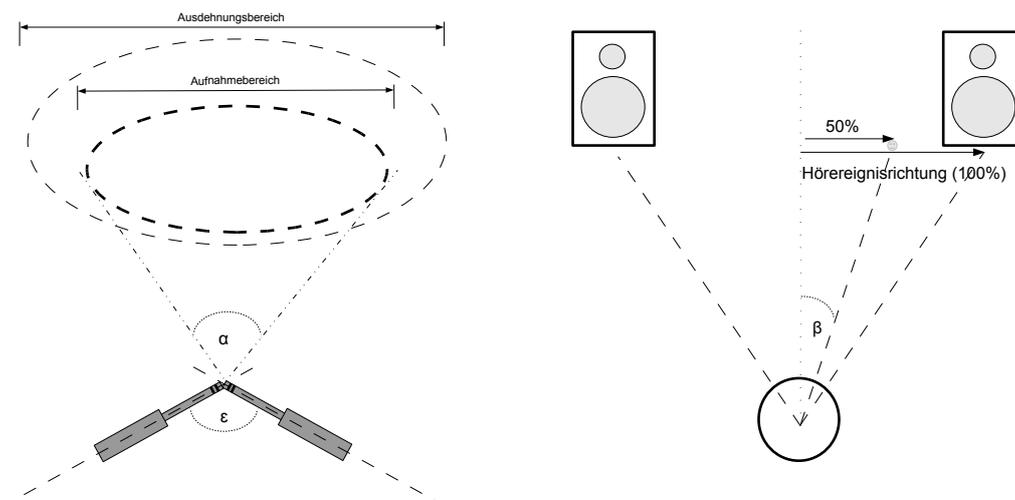


Abbildung 43: Winkel, Bereiche und Hörereignisrichtung bei Aufnahme und Wiedergabe

krofonkapseln. Bei XY beispielsweise der Winkel zwischen den Mikrofonen. Wird in anderen Publikationen auch als Aufstellungswinkel bezeichnet.

- Aufnahmebereich (Mono):
Der Bereich zwischen den Punkten, in welchen die Empfindlichkeit des Mikrophons aufgrund der Richtcharakteristik um 3 dB abfällt.
- Aufnahmebereich (Stereo):
Der eingeschlossene Ausdehnungsbereich, den eine Mikrofonanordnung, bei Lautsprecherwiedergabe korrekt auf der Lautsprecherbasis staffelt.
- Aufnahmewinkel α (Stereo):
Derjenige Winkel, der aus der Mikrofonperspektive den Aufnahmebereich abbildet.
Hier findet man unterschiedliche Angaben: Sengpiel gibt beispielsweise den halben Winkel an, dafür meist mit vorangestelltem +/- . Andere verwenden den Aufnahmewinkel gleichbedeutend mit dem Aufnahmebereich. Williams verwendet den Begriff Stereo-Aufnahmewinkel für den Aufnahmebereich (bei einer Pegeldifferenz von 15dB für volle Auslenkung). Eine weitere Definition ist die, dass Signale innerhalb des Aufnahmewinkels polaritätsrichtig und somit ortbar (Anmerkung: zwischen den Lautsprechern) aufgezeichnet werden können [28].
- Hörereignisrichtung:
Prozentual ausgedrückte Richtung zwischen der Mitte (0 %) und der Position einer Lautsprecherbox (100 %), aus der eine Phantomschallquelle bei der

Wiedergabe wahrgenommen wird. In der Literatur findet sich auch der Abbildungswinkel (β), der im Prinzip dasselbe ausdrückt, nur als Winkel bei einer Standard-Lautsprechaufstellung mit Hörposition auf der Spitze eines gleichseitigen Dreiecks.

- Quellwinkel:
Derjenige Winkel, unter dem die Schallquelle sich aus Sicht des Mikrophons befindet.

Unterschiede finden sich bei der Angabe der Winkel, die teilweise als Auslenkung von der 0°-Linie und teilweise von der einen zur anderen Seite des Mikrophonsystems gemessen werden. Da normalerweise Stereomikrophone symmetrisch aufgebaut sind, soll hier der Winkel von einer Seite zur anderen verwendet werden.

Ist der Aufnahmebereich kleiner als der Ausdehnungsbereich des Orchesters, erhält man den Effekt des „Lochs in der Mitte“. Die Instrumente werden bevorzugt an den äußeren Enden der Stereobasis abgebildet. Ist der Aufnahmebereich größer als der Ausdehnungsbereich des Orchesters, erfolgt die Abbildung nicht auf der vollen Basisbreite der Lautsprecher. Es entsteht ein Schwerpunkt im Center-Bereich.

Ist der Aufnahmewinkel vorgegeben, muss der Abstand zur Schallquelle angepasst werden, damit der Aufnahmebereich möglichst mit dem Ausdehnungsbereich übereinstimmt. Allerdings verändert man damit gleichzeitig den Anteil von Direktschall und Reflexionen, was eine Auswirkung auf die empfundene Räumlichkeit hat. Ist die Aufstellung weit entfernt, steigen die Anteile von Störschall und Nachhall an, ist sie zu nah, treten einzelne Instrumente zu stark hervor.

Die Änderung des Aufnahmewinkels ist mit einer veränderten Geometrie des Mikrophonsystems verbunden, wenn man von rein elektronischen Verfahren, wie sie z.B. bei MS möglich sind, absieht. Die Möglichkeiten der Veränderungen des Aufnahmewinkels eines Trennkörpersystems, bei dem die Mikrophone so montiert sein sollen, dass der Grenzflächeneffekt auch am Trennkörper ausgenutzt werden soll, sind somit begrenzt. Die Form bzw. die Größe des Trennkörpers muss hierzu verändert werden.

Eine Möglichkeit ist die Veränderung der Mikrofonposition auf dem Trennkörper. Es stellt sich allerdings die Problematik, dass jede Veränderung der Mikrofonposition eine frequenzabhängig geänderte Richtcharakteristik hervorruft. Es ist denkbar, zwei oder drei Montagemöglichkeiten vorzusehen, die definiert sind und für die entsprechende Entzerrungskurven vorliegen.

6.3.5 Durchschnittliche Hörumgebung

Die Effekte des Hörraums sind schwer in Formeln zu fassen und auch nicht wirklich berechenbar, da jeder Hörer andere Bedingungen vorfinden wird. Der Hörraum bleibt somit ein unbekannter Faktor, außer man produziert Aufnahmen für vorgegebene Räume.

Einige grundsätzliche Feststellungen zur durchschnittlichen Hörumgebung sollen hier dennoch getroffen werden:

- Es ist davon auszugehen, dass der Wiedergaberaum in den meisten Fällen kleiner ist als der Aufnahmeraum. Dadurch steigt der Anteil an frühen Reflexionen, vor allem von hinten.
- Da der typische Hörraum kleiner ist als der Aufnahmeraum, fällt es schwerer, der aufgenommenen Räumlichkeit „zu glauben“. Eine Wiedergabe des realen Schallfelds am Aufnahmeort ist nicht ausreichend, um beim Hörer den Eindruck zu vermitteln, sich am originalen Aufnahmeort zu befinden. Es muss eine „verstärkte Räumlichkeit“ aufgenommen werden, um zur selben Empfindung zu gelangen.
- Die Nachhallzeit ist in der durchschnittlichen Hörumgebung meist geringer als im Konzertsaal. Somit ergibt sich bei der Wiedergabe ein zusätzlicher Anfangsnachhall, der sich mit dem Anfangsnachhall der Aufnahme überlagert. Gleichzeitig stellt die Nachhallzeit des Wiedergaberaums die kleinstmögliche Nachhallzeit dar, die wahrgenommen werden kann.
- Die Höhe der Lautsprecher über dem Boden entspricht ungefähr der Ohrhöhe des Hörers. Viele Instrumente (z.B. Sänger, viele Streicher, Blechbläser ...) erzeugen Schall in dieser Höhe. Es ist davon auszugehen, dass durch Bodenreflexionen verursachte Veränderungen des Frequenzgangs und der Räumlichkeit beim Hörer besonders stark anzutreffen sind. Deswegen soll das Mikrofon nicht in Ohrhöhe aufgestellt werden.
- Durch die Lautsprecherwiedergabe entsteht ein zusätzliches Übersprechen, welches auf der originalen Aufnahme nicht vorhanden ist. Dieses wird in großem Maße von den Abmessungen des menschlichen Kopfs geprägt. Es ist eine stärkere Kanaltrennung als bei Kopfhörerwiedergabe erforderlich.

6.3.6 Reproduktion der Räumlichkeit

Eine genaue Reproduktion der Ohrsignale nicht unbedingt zielführend. Eine verbesserte Darstellung der Räumlichkeit kann oft durch zusätzliche Reflexionen, verstärkten Nachhall und eine geeignete Korrelation der Kanäle erreicht werden.

Für die Ortsabbildung im vorderen Bereich soll die Summenlokalisierungstheorie verwendet werden. Zur Abbildung der Räumlichkeit sollen die simulierenden Aspekte berücksichtigt werden.⁵

⁵Dies stützt sich auch auf eine Erfahrung, aus der Beschallungstechnik: Koinzidente Stereomikrofonanordnungen bieten zwar eine genaue Abbildung der Position des Klangkörpers, werden bei Aufnahmen aber aufgrund der zu geringen Räumlichkeitswahrnehmung selten, oder in Kombination

6.3.7 Überlegungen zur Form

Es muss mindestens eine Seite des Körpers plan sein, um auf der Grenzfläche aufliegen zu können und auch die Mikrophone sollen sich idealerweise in einer Fläche bzw. Kante befinden, die vom Untergrund direkt in den Trennkörper übergeht. Ansonsten können Reflexionen entweder von der Fläche oder vom Trennkörper zum Mikrofon gelangen.

Des Weiteren ist eine Symmetrie in der Medianebene erforderlich, um eine gleichartige Abbildung auf der linken und der rechten Seite zu sichern. Vorn und hinten muss die Form nicht zwingend symmetrisch sein, da es durchaus wünschenswert sein kann, Raum und Klangkörper unterschiedlich zu erfassen.

Es macht Sinn, auf die Kantenreflexionen zu achten. Hierbei ist es um so ungünstiger, je regelmäßiger eine Form ist. Bei einer kreisförmigen Kante um ein Mikrofon in deren Mittelpunkt haben alle Kantenreflexionen die gleiche Laufzeit, was zu starken Frequenzgangschwankungen im Bereich der zugehörigen Frequenzen führt. Auch Rechtecke und gleichseitige Dreiecke führen zu eher ungünstigen Verhältnissen der Kantenreflexionen. In [25] wird das Entstehen dieser Kantenreflexionen und die Entwicklung einer geeigneten Form der Mikrofonplatte eines Grenzflächenmikrophons beschrieben.

Beim Trennkörpermikrofon addiert sich die Hörereignisrichtung durch die Laufzeitdifferenz mit der durch die Pegeldifferenz entstehenden Hörereignisrichtung. Da diese aber prinzipiell zu den tiefen Frequenzen hin abfällt, darf der Schallweg nicht wesentlich kleiner als 50 cm sein, wenn man im tieffrequenteren Bereich noch eine ausreichende Auslenkung erzielen will. Für eine Kugel oder Halbkugel ergibt sich dadurch ein Durchmesser von etwa 32 cm. Zumindest in einer Ausdehnungsrichtung wird der Trennkörper somit zwischen 25 und 50 cm groß werden. Kleinere Körper können im tieffrequenten Bereich ohne nachträgliche Signalverarbeitung nie 100% Hörereignisrichtung erreichen.

Entsprechend den Forderungen für den Frequenzgang von hinten soll das Mikrofon nicht an der breitesten Stelle des Trennkörpers sitzen. Der Trennkörper soll hinter der Mikrofonkapsel noch mindestens 2,5 cm (entsprechend einer Abschattung oberhalb von knapp 14 kHz) und bis zu 17 cm (entsprechend einer Abschattung oberhalb 2 kHz) überstehen. Diese Werte werden aber durch die entstehende Richtwirkung des Mikrophons beeinflusst und können dadurch je nach Winkel der Kapsel zur Medianebene auch abweichen.

mit Raummikrofonen verwendet. Bei der Beschallung in Kirchen konnte die umgekehrte Erfahrung gemacht werden: Da hier der Raumeindruck größtenteils erst nach der Lautsprecherwiedergabe entsteht, haben sich koinzidente Verfahren bewährt und zu einem natürlichen Klangeindruck geführt.

6.4 Entwurf von Trennkörpern

Im Kapitel 6.3.7 werden die grundlegenden Gesichtspunkte für die Formgebung eines Grenzflächen-Trennkörper-Stereo-Mikrophons aufgezählt. Die Vergleiche gebräuchlicher Formen von Trennkörpern im Kapitel 6.2.2 mit der Grenzflächenvariante ergeben kaum Unterschiede in der Stereoabbildung. Somit kann man die Grundform eines bewährten Trennkörpers auf die Grenzfläche übertragen hier weiter optimieren.

Vielversprechend erscheinen hierbei vor allem abgerundete Keilformen, wie sie z. B. mit „Source“ oder mit dem „Clara-System“ als Trennkörper im unbegrenzten Schallfeld existieren. Die Kombination von Kugel und Keil, z. B. als „Ei-Form“ ist auch vielversprechend. Die reine Scheibenform (OSS / Jecklin) in abgewandelter oder ursprünglicher Form überrascht häufig in psychoakustischen Vergleichen, da sie zwar messtechnisch schlecht abschneidet, jedoch von den Zuhörern im Gesamturteil meist gut bewertet wird (Beispielsweise im Vergleich [14] (Abbildung 44) oder [7]).

	Kunstkopf		Scheibe		linearer Keil		exp. Keil	
Besser								
Originaler								
Pegelbalance								
Stereoabbildung								
Räumlichkeit								
Hall								
Klangfarbe								
Differenzierbarkeit								

Abbildung 44: Gesamtergebnis über alle Hörbeispiele (bei Lautsprecher (blau) und Kopfhörerwiedergabe (rot))
[14]

Ausschlaggebend für die klangliche Qualität eines TKGSM sind auch die Größe und die Entzerrung des Mikrophons. Es soll ein neuer Ansatz verwendet werden und versucht werden, die Form im vorderen Bereich über die Summenlokalisierung zu berechnen. Die hierzu im folgenden angewandten Formeln stammen von Sengpiel [35] und von Wittek [42]. Die Formeln von Sengpiel sind lediglich zur Berechnung der reinen Laufzeitdifferenz und der reinen Intensitätsstereophonie vorgesehen und berücksichtigen nicht die Pegelunterschiede, die bei der Laufzeitstereophonie durch unterschiedliche Mikrophonabstände entstehen. Außerdem geht Sengpiel von verhältnismäßig großen Werten für das Erzielen von 100% Hörereignisrichtung aus.

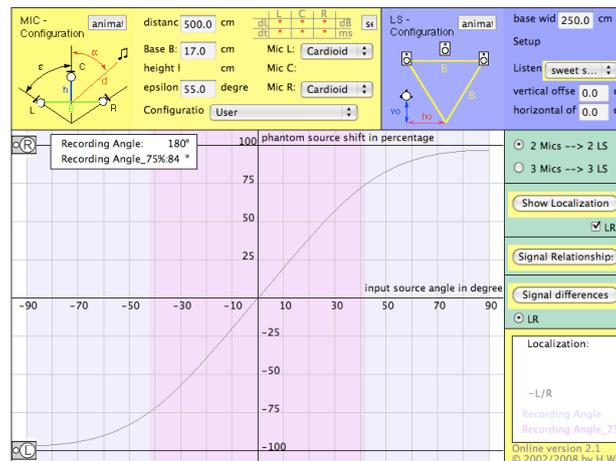


Abbildung 45: Image Assistent unter www.hauptmikrofon.de [41]

Wittek berücksichtigt auch weitere Rahmenbedingungen, sowie die unterschiedliche Empfindlichkeit des Gehörs für Laufzeit und Pegeldifferenzen bei verschiedenen Hörereignisrichtungen. Allerdings stehen dadurch keine komplett analytischen Formeln zur Verfügung. Für die Berechnung der Werte von Wittek wird der Image-Assistent [41] (Vergl. Abbildung 45) verwendet, der das Formelwerk komfortabel umsetzt.

Für den Raumbereich sollen vor allem simulierende Aspekte berücksichtigt werden. Als Vorgabe dient dabei der Aufnahmewinkel. Im Beispiel wird von $\alpha = 120^\circ$ ausgegangen.

6.4.1 Aufnahmewinkel Laufzeit

Für tiefe Frequenzen ist ein praktisch realisierbarer Trennkörper normalerweise kein Hindernis, deshalb zählt hier die reine Laufzeitstereophonie. Nach dieser soll der Schallumweg Δl definiert werden.

$$\Delta l = b * \sin \theta \quad (11)$$

$$\Delta t = \frac{b}{c} * \sin \theta \quad (12)$$

mit

θ ...Einfallswinkel

b ...Mikrofonbasis

Δl ...Schallumweg

Δt ...Laufzeitdifferenz

c ...Schallgeschwindigkeit (343 m/s @ 20°C)

Es ergibt sich somit der nötige Schallumweg für die Auslenkung ab der Mitte zu einem Winkel θ bei gegebener Laufzeitdifferenz mit:

$$\Delta l = \frac{\Delta t * c}{\sin \theta} \quad (13)$$

Es werden in der Literatur verschiedene Werte für die nötige Laufzeitdifferenz angegeben (Vergl. Tabelle 7).

		Sengpiel			Wittek
Hörereignisrichtung	H	100%	75%	50%	100%
Laufzeit	Δl	1,5 ms	0,81 ms	0,48 ms	1 ms
Umweg	Δt	51,5 cm	27,8 cm	16,46 cm	34,3 cm

Tabelle 7: Laufzeitdifferenz und Schallumweg nach Wittek und Sengpiel

Mit diesen Werten kann man den nötigen Schallumweg für einen gegebenen Aufnahmewinkel errechnen. Für einen Aufnahmewinkel von 120° ergibt sich nach Sengpiel ein Δl von 59 cm für 100 % und ein Δl von 19 cm für eine Hörereignisrichtung von 50 % . Witteks Formeln ergeben einen Wert von 35 cm für Δl die folgenden Berechnungen übernommen werden soll.

6.4.2 Berechnung der Breite

Da mit dem Kugelflächenmikrophon trotz unzureichender und häufig kritisierte Ortsabbildung erstaunlich gute Aufnahmen der Räumlichkeit möglich sind, wird zunächst mit dem erhaltenen Δl eine passende Kugel ermittelt. Dazu wird angenommen, dass die Mikrophone parallel auf dem Kugeläquator sitzen (Vergl. Abbildung 46). Der halbe Umfang U entspricht dem maximalen Schallumweg Δl für eine Quelle direkt vor einer Mikrophonkapsel. Für entfernte oder hohe Quellen wird die Laufzeitdifferenz entsprechend kürzer.

$$\Delta l = \frac{1}{2} * U \quad (14)$$

$$U = 2 * \pi * r \quad (15)$$

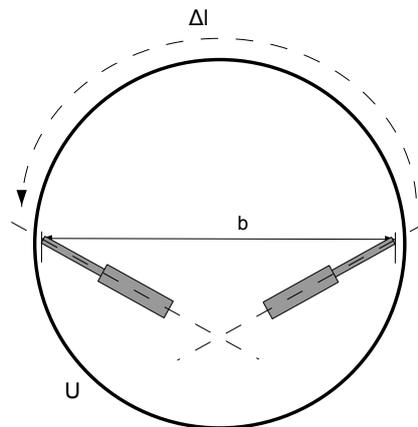


Abbildung 46: Berechnung der Breite

Es berechnet sich der Radius r und die Mikrofonbasis b einer passenden Kugel mit

$$r = \frac{\Delta l}{\pi} \quad (16)$$

$$b = 2 * r \quad (17)$$

Somit ergibt sich bei einem Δl von 35cm eine Mikrofonbasis von 22cm.

6.4.3 Aufnahmewinkel Pegelstereophonie

Rechnet man mit reiner Intensitätsstereophonie, ergeben sich die Pegelunterschiede durch die Richtcharakteristik des Mikrophons und durch den Winkel der Mikrofonachsen zueinander, sowie durch den Einfallswinkel des Schalls. Es wird die allgemeine Mikrofontgleichung (Vergl. Gleichung 1) mit den Parametern A und B herangezogen, um die Pegeldifferenz ΔL eines koinzidenten Mikrofonpaares zu berechnen. (Vergl. z.B. [33])

$$\Delta L = 20 * \log \frac{X}{Y} \quad (18)$$

Durch

$$X = A + B * \cos(\epsilon + \theta) \quad (19)$$

und

$$Y = A + B * \cos(\epsilon - \theta) \quad (20)$$

ergibt sich die Pegeldifferenz für reine Pegelstereophonie in Abhängigkeit vom Achswinkel ϵ und Schalleinfallswinkel θ zu

$$\Delta L = 20 * \log \frac{A + B * \cos(\epsilon + \theta)}{A + B * \cos(\epsilon - \theta)} \quad (21)$$

mit

θ ... Einfallswinkel

ΔL ... Pegelunterschied in dB

A ... Kugelkomponente der Richtcharakteristik

B ... Achterkomponente der Richtcharakteristik

Die Komponenten der Richtcharakteristik und das zugehörige Bündelungsmaß sind für einige Beispiele in der Tabelle 8 aufgeführt:

	A	B	Bündelungsmaß (dB)
<i>Kugel</i>	1	0	0
<i>Breite Niere</i>	0,67	0,33	3,17
<i>Niere</i>	0,5	0,5	4,77
<i>Hyperniere</i>	0,25	0,75	6
<i>Acht</i>	0	1	4,77

Tabelle 8: Komponenten der Richtcharakteristik und Bündelungsmaß

Das Bündelungsmaß eines Druckempfängers in Grenzflächenanordnung beträgt 3 dB und entspricht somit in etwa dem einer breiten Niere. Die Maximale Pegeldifferenz von zwei breiten Nieren entsteht, wenn diese Rücken an Rücken stehen und mit $\theta = 90^\circ$ beschallt werden. Die Kanaltrennung beträgt dann ca. 9,5 dB. Aus den Messungen des Kugelflächenmikrophons sind teilweise noch höhere Pegeldifferenzen für den abgewandten Kanal ersichtlich.

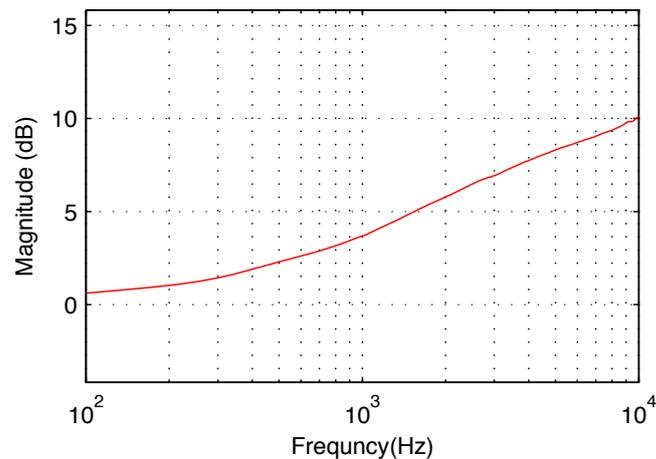


Abbildung 47: Spektrale Differenzen des KFM für seitlichen Schalleinfall (gemittelt von 0 - 180° horizontal, -20 - 30° vertikal) zwischen den Kanälen

Diese Pegeldifferenz allein reicht nicht für 100% Hörereignisrichtung. Man kann annehmen, dass der volle Aufnahmewinkel im hochfrequenten Bereich nicht erforderlich ist und summiert die Werte der Hörereignisrichtung, die sich im mittleren Frequenzbereich durch Laufzeit und Pegelstereophonie ergeben. Somit kann für jedes Verfahren von 50% Hörereignisrichtung ausgegangen werden.

Achswinkel ϵ		Breite Niere mit Abstand nach Wittek / Image Assistent							Sengpiel (zum Vergleich)		
α	Niere	0 cm	16 cm	20 cm	22 cm	24 cm	26 cm	28 cm	Niere	WC	WC 50 %
90°	92°	-	-	-	-	90°	78°	66°	-	-	90°
110°	79°	-	-	76°	65°	55°	45°	36°	82°	-	72°
120°	73°	-	90°	64°	54°	45°	36°	27°	76°	-	66°
160°	54°	-	55°	39°	31°	23°	16°	9°	57°	-	50°

Tabelle 9: Benötigte Achswinkel ϵ für Nieren und Breite Nieren (WC) für vorgegebenen Aufnahmewinkel α nach Wittek und Sengpiel

In Tabelle 9 sind die nötigen Achswinkel für einige Aufnahmewinkel, die mit den Formeln bzw. dem Image Assistent ermittelt werden, aufgeführt. Für den Trennkörper mit 120° Aufnahmewinkel und 22 cm Basis liegen die Mikrofonwinkel ϵ zwischen 54 und 76 Grad. Es werden die Werte von Wittek verwendet. Mit dem 54° -Winkel soll die Tangentialfläche im Bereich der Mikrofonkapsel in der Horizontalen geneigt sein.

6.4.4 Berechnung des Winkels der Tangentialfläche

Im vorigen Abschnitt wird der Winkel der Tangentialfläche um die Mikrofonkapseln für die Horizontalrichtung berechnet. Das heißt, man muss im vorderen Bereich von der Kugelform abweichen.

Deshalb soll versucht werden, die Kugel im vorderen Bereich etwas in eine Keilform zu verformen (Vergl. Abbildung 48). Die Mikrofonbasis bleibt erhalten, die Kugel wird im vorderen Bereich gedehnt. Dabei sollen einerseits die seitlichen Flanken des Keils möglichst genau den Winkel ϵ erzeugen, andererseits soll die Laufzeit Δt und damit der Umfang vor den Mikrofonkapseln erhalten bleiben. Zusätzlich soll die Stirnseite des Trennkörpers parallel zur Basis b abgeflacht werden, um zu vermeiden, dass zentrale Instrumente bei kleiner Bewegung sprunghaft zu einem Lautsprecher wandern. Dieses Phänomen wird bei spitzen Keilen beobachtet. Alle Bedingungen zu erfüllen, fordert Kompromisse.

Nimmt man zunächst einen spitzen Keil an, dessen Spitze etwas abgeschnitten ist, lassen sich die zugrunde liegenden Maße berechnen. Später kann eine parabelförmige Fläche dem Keil angenähert werden.

Hierfür werden einige geometrische Maße eingeführt:

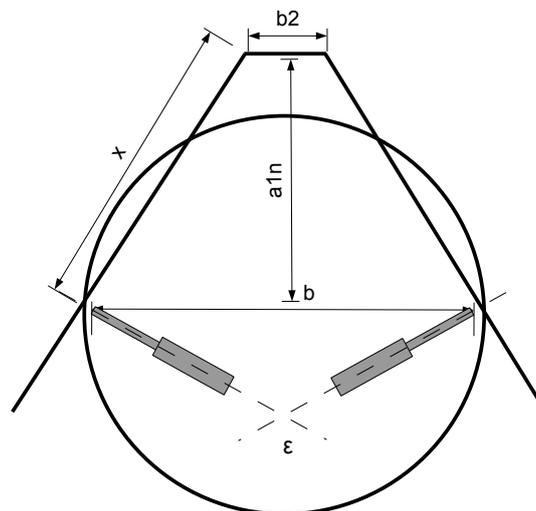


Abbildung 48: Berechnung des Winkels der Tangentialfläche

b_2 ...Breite der Stirnfläche des Trennkörpers

x ...Länge einer seitlichen Flanke des Keils

a_1 ...Abstand von b zu b_2 , bzw. Länge des vorderen Teils des Mikrophons

Aus der Bedingung für die Laufzeit erhält man:

$$\Delta l = 2 * x + b_2 \quad (22)$$

Aus der Geometrie ergibt sich:

$$x = \sqrt{a_{1n}^2 + \left(\frac{1}{2} * (b - b_2)\right)^2} \quad (23)$$

$$a_{1n} = \sqrt{x^2 - \left(\frac{b - b_2}{2}\right)^2} \quad (24)$$

somit wird:

$$a_1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta l - b_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{b - b_2}{2}\right)^2} \quad (25)$$

Die Länge a_1 lässt sich auch aus dem Öffnungswinkel ϵ bestimmen:

$$a_{10} = \frac{\frac{b}{2}}{\tan(90^\circ - \epsilon)} \quad (26)$$

Somit bleibt b_2 als freier Parameter. Er wird bei vielen Berechnungen durch den vorgegebenen Winkel ϵ negativ, was gleichbedeutend damit ist, dass der Trennkörper für die gegebene Laufzeit Δt zu lang ist. Es wird ein realisierbarer Wert für b_2 vorgegeben und a_1 entsprechend verkürzt. Dadurch verändert sich der Winkel der Seitenfläche. Dies kann aber toleriert werden, solange die Abweichung vom originalen ϵ nicht zu groß ist. Der größere Winkel im vorderen Bereich kann durch einen kleineren Winkel beim im folgenden beschriebenen Überstand ausgeglichen werden. Somit nähert man eine exponentiell größer werdende Keilform an und kann ϵ bei der Mikrophonkapsel einhalten.

Für den Beispieltrennkörper (X1A) wird $b_2 = 2\text{cm}$ gewählt. Damit wird $a_1 = 13\text{cm}$ und weicht damit um 2,3 cm von a_{10} ab.

6.4.5 Berechnung des vertikalen Winkels der Tangentialfläche

Die Mikrofonkapsel soll sich im Übergang von Grenzfläche zu Trennkörper befinden. Dabei muss die Neigung der angrenzenden Fläche so gewählt sein, dass das entfernteste Instrument noch erfasst wird. Die Fläche senkrecht zu beginnen, ist gleichbedeutend mit einer Verstärkung der Richtwirkung parallel zur Grenzfläche.

Für eine grobe Abschätzung kann man annehmen, dass große Instrumente im Orchester hinten stehen. Als Abstand für einen entfernten Musiker werden 10 m angenommen. Da wenige reale Aufführungsräume Hallradien größer als 10 m haben und danach eine Betrachtung des direkten Schallpfads weniger relevant wird, ist dies ausreichend. Ein naher Musiker kann ab etwa 1 m vor dem Mikrofon stehen. Es wird 50 cm Höhe für den Abstrahlort eines niedrigen Instrumentes und 1,7 m Höhe für den eines hohen Instruments angenommen. Daraus ergeben sich Einfallswinkel zwischen 10° und 60° , somit soll die Tangentialfläche um die Mikrofonkapsel zwischen 30 und 80 Grad geneigt sein. Um springende Ortungen zu vermeiden, kann die Oberkante des Trennkörpers im vorderen Bereich weiter abgeflacht werden. Im hinteren Bereich darf er spitzer zulaufen, da durch die Grenzflächenmontage die Richtcharakteristik meist eher nach oben als zur Seite tendiert.

6.4.6 Berechnung des Überstands

Einen Höhenabfall von hinten, verbunden mit einem Höhenanstieg von vorn, lässt sich erreichen, in dem die Mikrofonkapseln nicht an der breitesten Stelle des Trennkörpers sitzen, sondern dahinter noch eine Art „Überstand“ ist. Dieser wirkt, sobald seine Abmaße in den Bereich der halben Wellenlänge gelangen. Durch den Druckstau von vorn werden die Höhen angehoben, von hinten werden sie durch den überstehenden Rand abgeschattet. Den Überstand kann man über die Wellenlänge λ mit der Schallgeschwindigkeit und der Frequenz berechnen.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (27)$$

Laut den richtungsbestimmenden Bändern werden 10 - 13 kHz vorwiegend hinten geortet, während darüber die Wahrscheinlichkeit einer Ortung im vorderen Bereich wieder steigt. Es wird eine Frequenz von 12,5 kHz für den Überstand gewählt. Daraus ergibt sich, unter der Annahme von Abschattungen ab der halben Wellenlänge, ein Überstand $U_e = 1,4 \text{ cm}$.

Bis zum Erreichen des Überstandes, soll die Fläche mit dem Öffnungswinkel ϵ fortgeführt werden. Der Abstand zwischen der Mikrofonbasis b und der breitesten Stelle des Überstandes kann folgendermaßen berechnet werden:

$$a_2 = \frac{U_e}{\tan(90^\circ - \epsilon)} \quad (28)$$

Damit endet der Anteil der Keilform mit der Breite $2 * U_e + b$ (Hier: 25 cm).

6.4.7 Rückseite

Für die Rückseite des Trennkörpers ist eine Kugelform gut geeignet. Ihre räumliche Wiedergabe entspricht den Anforderungen. Durch die Vorzugsrichtungen der Richtcharakteristik zur Mitte und zur Seite kann störender Direktschall des Publikums verringert werden. Ihr Radius R ergibt sich aus der breitesten Stelle:

$$R = 0,5 * (2 * U_e + b) \quad (29)$$

Für den Beispieldrennkörper ergibt sich $R = 12,5cm$. Über den Radius lässt sich der Aufnahmewinkel für den Schalleinfall von hinten abschätzen:

$$\alpha_h = \arcsin \left(\frac{c * \Delta t_{max}}{R * \pi} \right) \quad (30)$$

Nimmt man für Δt hier einen Wert von 0,81s, wie in Sengpiel für 75 % Hörereignisrichtung vorschlägt und der nah an Witteks RecordingAngle75% liegt, erhält man für den beschriebenen Trennkörper einen hinteren Aufnahmewinkel von etwa 90° .

6.4.8 Grundform des Trennkörpers

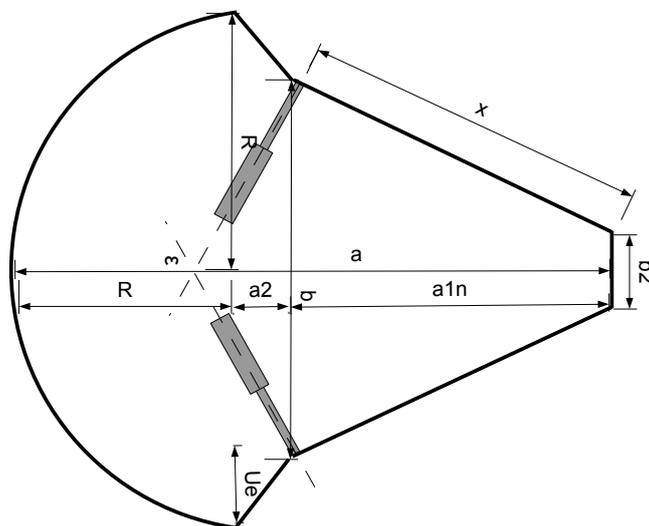


Abbildung 49: Grundfläche des neuen Trennkörpers

Mit diesen Ausführungen ist die Grundform des Trennkörpers festgelegt (Vergl. Abbildung 49). Auf harte Kanten soll verzichtet werden. Eine abgerundete Form vermeidet abrupte Änderungen der Charakteristik und Kantenreflexionen.

Die Form, die sich so berechnen lässt, ähnelt am ehesten einem Tropfen oder einem Ei. Somit bleibt zu prüfen, ob sich derartige Körper genauso als Trennkörper eignen, wie die beschriebene Form.

Typ		Seng- piel 50	Wittek Äqui- va- lenz	Seng- piel Niere	Wittek Niere	
verwendeter Laufweg:	Δl	0,19	0,35	0,59	0,35	<i>m</i>
Radius Kugelfläche	r	0,06	0,11	0,19	0,11	<i>m</i>
Basis	$b = 2 * r$	12	22	38	22	<i>cm</i>
Epsilon	ϵ	66	54	76	73	<i>Grad</i>
Berechnung der Länge hinter der Basis	a_2	3,1	1,9	5,5	4,5	<i>cm</i>
Berechnung des hinte- ren Radius über den Umfang	R	7,4	12,5	20,3	12,5	<i>cm</i>
Mindestbreite Spitze	b_{2n}	2,0	2,0	2,0	2,0	<i>cm</i>
Neue Länge zur Spitze	a_{1n}	6,8	13,0	22,4	13,0	<i>cm</i>
Differenz zur alten Län- ge a_{10}	$a_{10} - a_{1n}$	6,7	2,3	53,4	23,4	<i>cm</i>
Berechnung der Höhe für entfernte Quellen	h_{max}	45,0	38,7	26,5	38,7	<i>cm</i>
Berechnung der Höhe für nahe Quellen	h_{min}	25,0	23,2	17,4	23,2	<i>cm</i>
Breiteste Stelle	$2 * R$	14,8	25,0	40,6	25,0	<i>cm</i>
längste Stelle	a	17,3	27,4	48,2	30,0	<i>cm</i>
hinterer Aufnahmewin- kel (Sengpiel 75%)	α_{h75}		45	26	45	<i>Grad</i>
Laufweg hinten	l_h	0,2	0,4	0,6	0,4	<i>cm</i>

Tabelle 10: Beispielhafte Daten einiger Trennkörper mit 120 Grad Aufnahmewinkel

6.4.9 Berechnung der Höhe

Die nötige Höhe ergibt sich aus der Laufzeitdifferenz für 100% seitliche Hörereignisrichtung. Hier werden 1,5 ms angenommen. Durch eine ausreichend hohe Mittellinie des Trennkörpers soll sichergestellt werden, dass für seitlichen Schalleinfall die nötige Laufzeitdifferenz erreicht wird. Wie man in Abbildung 36 sieht, hängt die Höhe von der Mikrofonbasis der Anordnung und vom Abstand der Quelle zum Mikrofon ab.

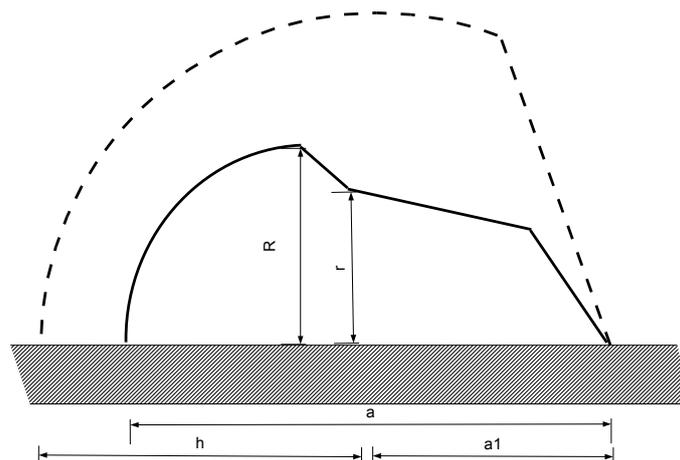


Abbildung 50: Seitenriss des neuen Trennkörpers (gestrichelt: modifizierte OSS-Scheibe)

Für 1,5 ms werden ca. 51,5 cm Wegdifferenz benötigt. Geht man von einer sehr nah positionierten Schallquelle aus, entspricht die Wegdifferenz Δl_h dem Weg von einer Kapsel über den Trennkörper zur anderen. Daraus ergibt sich die nötige Höhe des Trennkörpers mit

$$h_{min} = \sqrt{\left(\frac{\Delta l_{100\%}}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \quad (31)$$

Bei einem Kapselabstand von 22 cm muss die Höhe mindestens 23,2cm betragen. Für weit entfernte Schallquellen kann man davon ausgehen, dass die Schallstrahlen quasi parallel am Trennkörper eintreffen. Die Höhe berechnet sich dann zu

$$h_{max} = \sqrt{\left(\Delta l_{100\%} - \frac{b}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \quad (32)$$

Hier beträgt die Höhe bei einem Kapselabstand von 22 cm schon 39 cm.

Die nötige Höhe liegt zwischen den beiden Werten und hängt vom Abstand der Schallquelle ab. Der resultierende Trennkörper läuft nach oben spitz zu. Für die praktische Umsetzung (Vergl. Abbildung 50) stellt sich die Frage, ob man die Höhe oberhalb

von r bzw. R nicht durch eine Platte zwischen den 2 Hälften eines Trennkörpers realisieren kann. Ähnlich einem Trennkörper mit integrierter OSS-Scheibe. Diese soll einen Radius zwischen h_{min} und h_{max} haben.

Um die Abbildung im vorderen Bereich nicht zu stören, werden die Scheiben bei den Prototypen vorn bis an den Trennkörper gekürzt, damit dieser im Aufnahmebereich wirkt und nicht die OSS-Scheibe.

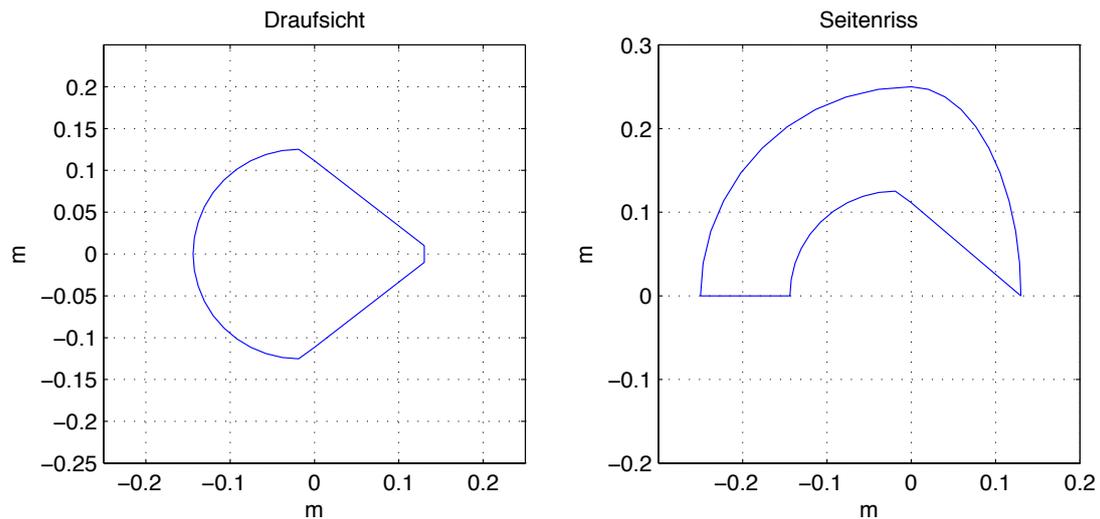


Abbildung 51: Draufsicht und Seitenansicht eines berechneten Trennkörpers

6.5 Entzerrung als Erweiterung

Die nötige Entzerrung des Gesamtsystems ergibt sich aus dem Diffusfeldfrequenzgang, bzw. dem gemittelten Frequenzgang über den Aufnahmebereich des Mikrophons. Letzterer soll für eine natürliche Wiedergabe über Lautsprecher linear sein und ersterer soll zumindest gleichmäßig verlaufen. Die nötige Entzerrung muss in vielen Fällen um eine zusätzliche Höhenanhebung erweitert werden, um der Richtcharakteristik der Instrumente Rechnung zu tragen, speziell bei naher Positionierung.

Zur Entzerrung der Aufnahmen werden in Matlab aus den Messungen die nötigen Korrekturimpulsantworten berechnet. Es werden 3 Entzerrkurven berechnet: Eine Entzerrkurve für das Diffusfeld, eine Entzerrkurve für den frontalen Aufnahmebereich und eine gemittelte Kurve.

Die eigentliche Entzerrung erfolgt in einem PD-Patch (Vergl. Abbildung 53), der die Faltung mit den berechneten Impulsantworten übernimmt.

6.5.1 Entzerrung der Spektraldifferenzen

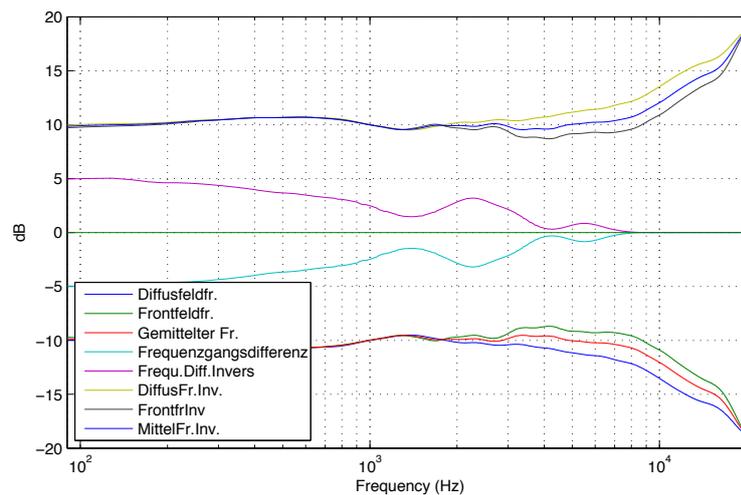


Abbildung 52: Beispiel von einem Satz berechneter Korrekturkurven zur Erstellung von Impulsantworten zur Entzerrung eines Trennkörpers (hier: Halbkugelmikrophon 15cm). Zur besseren Übersicht sind die Kurven der Frequenzgangsentzerrung um 10dB von der 0dB-Linie verschoben.

Zur Entzerrung der winkel- und frequenzabhängigen Pegeldifferenzen wird eine Dekodierung in ein MS-Signal benutzt. Während das Mittensignal bis auf einen Gruppenlaufzeitausgleich unverändert bleibt, wird der Frequenzgang des Seitensignals verändert. Im Unterschied zum normalen MS-Shuffling wird das Seitensignal mit jenem Frequenzgang entzerrt, welcher der invertierten Spektraldifferenz zwischen linkem und

rechtem Kanal im gewählten Aufnahmebereich entspricht. In den Randbereichen werden Begrenzungen eingefügt, um zu verhindern, dass das Seitensignal zu stark verändert wird. (Vergl. Abbildung 52)

Die Testaufnahmen mit den verschiedenen Trennkörpern haben von dieser Entzerrung profitiert. Es ist sowohl eine gleichmäßigere Abbildung der verschiedenen Stimmgruppen, als auch eine bessere Wahrnehmbarkeit der Raumtiefe möglich.

6.5.2 Zusätzliche Möglichkeiten des Tools zur Bearbeitung des Stereobildes

Zusätzlich zur Entzerrung der Frequenzgänge und des Seitensignals bietet das Tool noch einige weitere Möglichkeiten zur Korrektur der Trennkörperaufnahme.

- MS - Shuffling

Eine Entzerrung des Seitensignals, wie sie laut Sengpiel zur korrekten Lautsprecherwiedergabe intensitätsstereophoner Signale nötig ist, kann durchgeführt werden.

- Width - Einstellung der Basisbreite

Mit dem Width-Regler kann der Anteil des Seitensignals im Verhältnis zum Anteil des Mittensignals und damit die Basisbreite der Aufnahme geregelt werden. Es zeigt sich, dass die meisten Trennkörper nach einer Entzerrung ihrer Seitensignale zu weit abbilden und eine leichte Reduzierung des Seitensignals ein stabileres und natürlicheres Stereobild erzeugt.

- Input und Output - Balance

Für die richtige Funktion der Entzerrung müssen die Eingangssignale für mittige Schallquellen den gleichen Pegel aufweisen. Mit dem Input-Pan Regler können Abweichungen im Gain der Mikrophone ausgeglichen werden.

Mit dem Output - Balance Regler kann das Panorama am Ausgang verändert werden.

- Recording Balance

Mit diesem Regler kann die Balance der Aufnahme verändert werden, ohne die Pegel auf den Ausgangskanälen stark zu verändern und ohne die Mitte der Abbildung zu verschieben. Diese Funktion ermöglicht es, eine Aufnahme, die auf einer Seite zu leise ist, aber prinzipiell richtig abbildet, zu korrigieren, ohne die Mitte zu verschieben.

Zur Kontrolle von Eingang, Ausgang, Summen- und Differenzsignal stehen eine Reihe von Anzeigen zur Verfügung. Zur einfacheren Überwachung werden nicht nur die Werte selbst, sondern auch die Differenz zwischen Eingang und Ausgang des Entzerrers angezeigt.

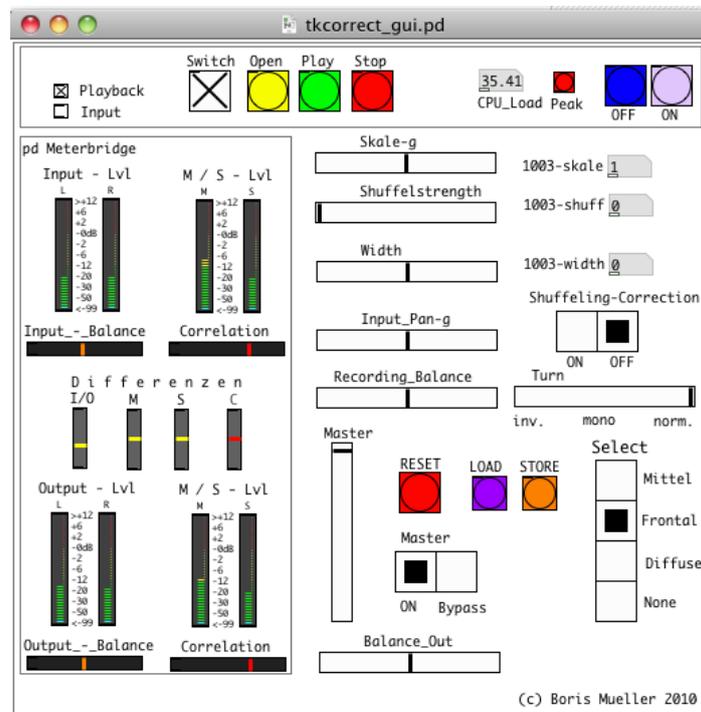


Abbildung 53: Tool zur Entzerrung von (Trennkörper-) Aufnahmen. Bedienoberfläche

7 Prototypen und Ergebnisse

Für eine weitere Messreihe werden Prototypen, deren Form aufgrund der bisherigen Untersuchungen besonders interessant erscheint, angefertigt. Es wird die große Hochspannungsversuchshalle (Tesla-Labor) der TU-Graz für die Messung verwendet. Für eine Vorauswahl wird zuerst eine Testaufnahmereihe mit einem Chor durchgeführt.

7.1 Grundsätzlicher Aufbau der Trennkörper

Alle Trennkörperteile sind aus Styropor gefertigt. Die Oberflächen sind mit Acrylspachtelmasse gestrichen.

Als Kapseln werden für alle Trennkörper Messmikrophone vom Typ MM1 von Beyerdynamic verwendet. Hierbei handelt es sich um Messmikrophone mit XLR-Anschluss in einem kleinen Gehäuse. Durch die kleine Membran werden Auslöschungen durch parallelen Schalleinfall zur Membran auf Bereiche oberhalb 10 kHz begrenzt. Durch das kurze Mikrophonehäuse ist ein Einbau in die meisten Trennkörper möglich. Somit können die Kapseln bündig in die Trennkörper integriert werden. Bei wenigen besonders kleinen Prototypen müssen die Mikrophone neben dem Trennkörper Platz finden.

Um eine bündige Montage der Kapseln auf der Grenzfläche gewährleisten zu können, obwohl der Mikrophonkörper aufgrund des XLR-Anschlusses dicker ist als die Kapsel, erhalten alle Trennkörper Grundplatten, in die das Mikrophonehäuse versenkt wird, so dass die Kapsel direkt auf der Grenzfläche aufliegt. Diese Grundplatten sind groß genug, um für die hohen Frequenzen einen Grenzflächeneffekt zu erreichen. Durch abgeschrägte Kanten und ungleiche Kantenlängen (nur eine Symmetrieachse in der Mikrofonmitte) werden Kantenreflexionen reduziert.

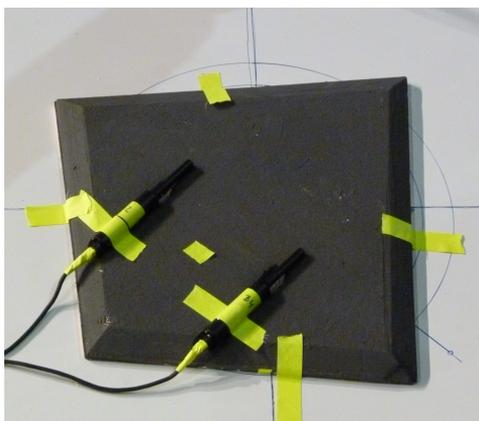


Abbildung 54: Mikrophongrundplatte mit 2 Messmikrofonen (Beyerdynamic MM1)



Abbildung 55: Messsituation in der Hochspannungshalle

Die meisten Trennkörper werden in 2 Varianten gebaut, einmal in ihrer vorgesehenen Form und einmal mit integrierter, modifizierter 25 cm OSS Scheibe. Um die Wirkung des Trennkörpers auf die Aufnahme im vorderen Bereich nicht zu verändern, wird die Scheibe am vorderen Rand des Trennkörpers in einem 80° Winkel abgeschnitten.

In den Messungen zeigt sich, dass die zusätzliche Scheibe in vielen Fällen eine linearisierende Wirkung auf die winkelabhängige Laufzeit hat und die Abbildung dadurch positiv beeinflusst. Allerdings zeigt sich auch, dass trotz Trennkörper unter einigen Winkeln Reflexionen das Mikrophon erreichen und durch die entstehenden Kammfiltereffekte, die Frequenzgänge und Polardiagramme verschlechtern.

7.2 GF-OSS - Halbierte OSS-Scheibe auf der Grenzfläche

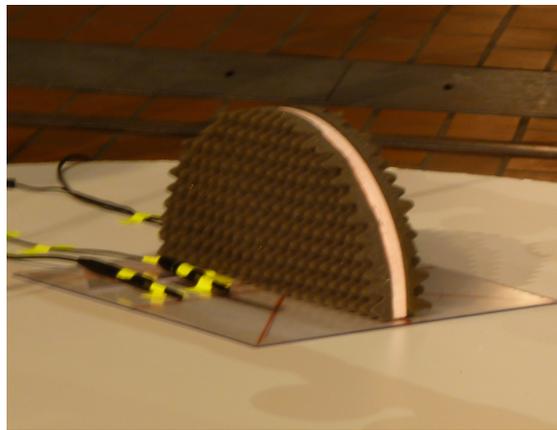


Abbildung 56: Grenzflächen - OSS

Hauptsächlich zu Vergleichszwecken wird bei der zweiten Messreihe eine OSS - Scheibe ($h = 25$ cm, Vergl. Abbildung 56) mit aufgenommen. Als Grundplatte dient hier eine dünne Plexiglasscheibe. Die Abstände der Kapseln betragen einmal 19cm und einmal 35 cm.

Im Diffusfeldfrequenzgang (Vergl. Abbildung 57) erkennt man die gestufte Absenkung zu den Höhen hin. Unterhalb von ca. 200 Hz hat die Scheibe keinen Einfluss mehr, was sich durch einen leichten Bassabfall ausdrückt. Zwischen etwa 200 und 600 Hz bildet sich ein Druckstau, der Pegel wird angehoben. Darüber zeigt sich eine starke Dämpfung durch die absorbierende Schicht auf der Platte. Der stärkere Höhenabfall oberhalb von 10 kHz ist durch die Membrangröße und die verwendete Kapselentzerrung bedingt. Betrachtet man einzelne Frequenzgänge, sieht man die Welligkeiten durch die Reflexionen an der Scheibe im mittleren Frequenzbereich.

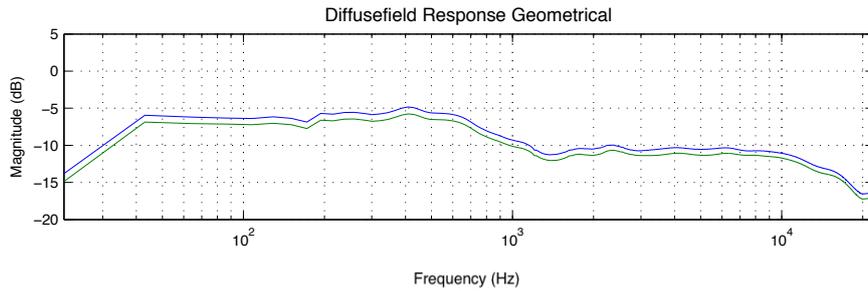


Abbildung 57: Diffusfeldfrequenzgang (aus Mittelung) OSS 19cm

Der wirksame Schallweg für Schalleinfall unter vertikal -30° liegt bei maximal 26 cm bzw. 38 cm. Eine Richtwirkung nach vorn wird erst bei sehr hohen Frequenzen durch die Bündelungseigenschaften der Mikrophone verursacht, dennoch ist das Gesamtsystem nicht ungerichtet (Vergl Abbildungen 58, 59). Vor allem die Variante mit 19cm Mikrophonabstand zeigt ab den oberen Mitten eine Richtwirkung zu den Seiten und in der Medianebene, so dass eine kreuzförmige Richtcharakteristik entsteht.

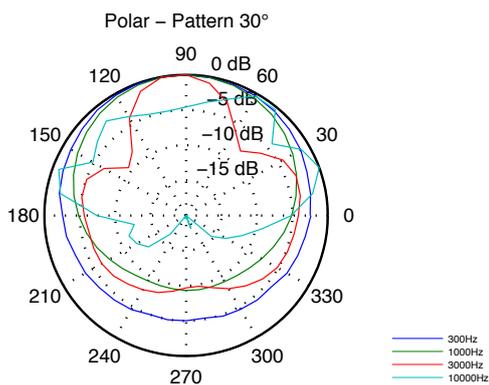


Abbildung 58: Polardiagramm - GF OSS - linker Kanal

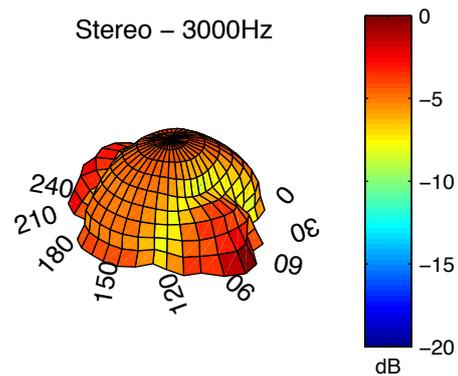


Abbildung 59: 3 Dimensionales Polardiagramm des gesamten Stereomikrophons bei 3 kHz

Auffällig ist ein leichter Präsenz-Filtereffekt der Anordnung im vorderen Bereich, verursacht durch einen Frequenzgangseinbruch um 1-2 kHz je nach Mikrophonabstand.

7.3 Halbkugelmikrophon - HKFM - Kugelflächenmikrophon in der Grenzfläche

Die bereits durchgeführten Messungen an Kugelflächenmikrophenen sollen unter besseren Messbedingungen verifiziert werden. Es wird eine Halbkugel mit 15 cm Durchmesser und eine mit zusätzlicher Trennscheibe vermessen (Vergl. Abbildung 60).



Abbildung 60: HKFM - 15cm aus Styropor, rechts: mit zusätzlicher Trennscheibe

Im Diffusfeldfrequenzgang zeigt sich beim Halbkugelflächenmikrophon eine Betonung der Mitten um 1,5kHz. Darüber zeigt sich ein shelv-artiger Höhenabfall. Im frontalen Bereich sind die hohen Mitten und die Höhen etwas stärker betont.

Die OSS-Scheibe bewirkt, in diesem Fall eine Linearisierung der gemittelten Frequenzgänge. Besonders im oberen Bereich werden die Einzelfrequenzgänge jedoch durch Kammfiltereffekte wellig.

7.4 Eiförmiger Trennkörper



Abbildung 61: Ei als Trennkörper mit 4 eingebauten Mikrofonen

Der eiförmige Trennkörper (Vergl. Abbildung 61) ist eine Variation der Kugelform. Um eine Richtwirkung nach vorn zu erreichen, werden die Kapseln etwas versetzt. Außerdem soll die Form leicht asymmetrisch von vorn nach hinten verlaufen, um Welligkeiten im Frequenzgang, wie sie an stark symmetrischen Strukturen entstehen, zu vermeiden. Es werden verschiedene Mikrofonpositionen entlang des „Ei-Äquators“ vermessen.

Bei den Testaufnahmen kamen 2 Größen von eiförmigen Trennkörpern zum Einsatz, wobei sich die Ergebnisse des kleineren (ca. 17cm Länge, 15 cm Breite) kaum von der Halbkugel unterschieden. Für die Messung werden zwei Positionen an einem 30cm

langen und ca. 25cm breiten Ei verwendet. Hierbei zeigte vor allem die hintere Position eine ansprechende räumliche Abbildung der Testaufnahmen und gute Messergebnisse.

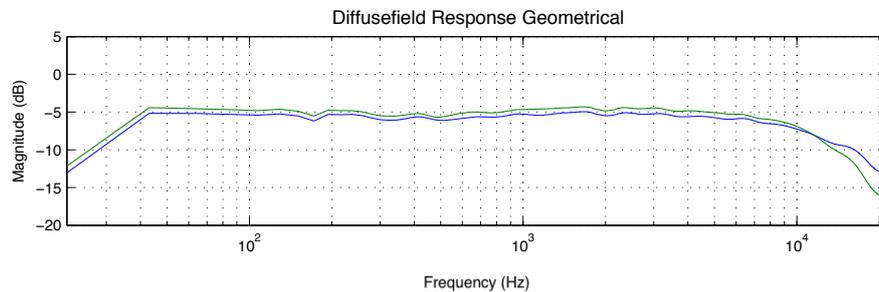


Abbildung 62: Diffusfeldfrequenzgang (aus Mittelung) der hinteren Mikrofonposition des eiförmigen Trennkörpers

Ab 5 kHz beginnen die Höhen leicht abzufallen. (Vergl. Diffusfeldfrequenzgang, Abbildung 62). Im vorderen Bereich steigen die Höhen leicht an, wogegen sie für Schalleinfall von hinten leicht abfallen.

Der Öffnungswinkel der erzielten Richtcharakteristik beträgt bei der Version ohne Trennscheibe ca. 70° und bei der Version mit Trennscheibe etwa 55 Grad, wobei sich die Polardiagramme bei hohen Frequenzen zu einer Form ähnlich der Nierencharakteristik verändern. Bei der vorderen Mikrofonposition liegen die Achswinkel bei 45 und 40 Grad. Insgesamt ergibt sich eine leichte, aber gleichmäßige Richtwirkung nach vorn (Vergl. Abbildung 63). Die maximale Schalllaufzeit unter 30 Grad vertikaler Einfallrichtung ergibt einen wirksamen Kapselabstand von 14cm für die vordere Mikrofonposition und 17cm mit Trennscheibe. Für die hintere Mikrofonposition ergeben sich 19cm und 26cm mit Trennscheibe.

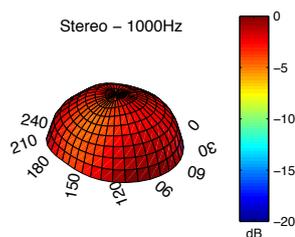


Abbildung 63: Richtplot 1kHz, Ei + OSS Position hinten

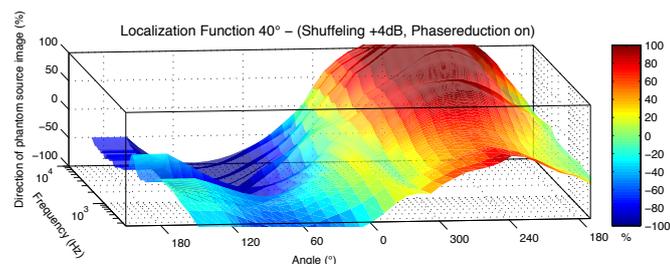


Abbildung 64: Abbildungsfunktion des Grenzflächeneis mit OSS-Scheibe

Die Pegeldifferenz zwischen den Kanälen steigt dabei gleichmäßig zu den hohen Frequenzen hin an. In der Version mit OSS Scheibe ist der Verlauf der Laufzeitdifferenz linearisiert. Dadurch erreicht das Mikrophon bereits ohne nachträgliche Signalverarbeitung eine gleichmäßige Abbildungsfunktion (Vergl. Abbildung 64).

7.5 Grenzflächen - Source

Das an der TU-Graz entwickelte Trennkörpermikrophon "Source" von Franz Graf [15] soll als halbierte Version im Grenzflächenbetrieb getestet werden. Schon in der Diplomarbeit von Stefan Warum [39] werden Optimierungsmöglichkeiten und der Bedarf nach einer Entzerrung der Frequenzgänge für die Lautsprecherwiedergabe gezeigt. Eine zusätzliche Trennscheibe hat bei diesem Trennkörper geringen Einfluss auf die Frequenzgänge. Lediglich die horizontale Richtcharakteristik ist in den Mitten etwas gleichmäßiger. Dafür leidet, wie bei den restlichen Trennkörpern auch, die vertikale Richtcharakteristik um 3 kHz.



Abbildung 65: Grenzflächen - Source

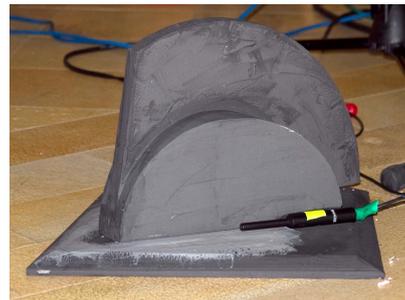


Abbildung 66: GF - Source + OSS

Der Diffusfeldfrequenzgang (Vergl. Abbildung 67) der Grenzflächenvariante von "Source" zeigt eine Überhöhung um 1 kHz. Die Höhen und die Bässe fallen etwas ab, wobei der Bassabfall in der Grenzflächenvariante im Vergleich zu den Ergebnissen von Warum [39] geringer ausfällt. Für frontalen Schalleinfall steigen die Höhen an, für rückwärtigen sinken sie ab. Dadurch zeigt die Gesamtrichtcharakteristik des Stereomikrophons in den Höhen nach vorn.

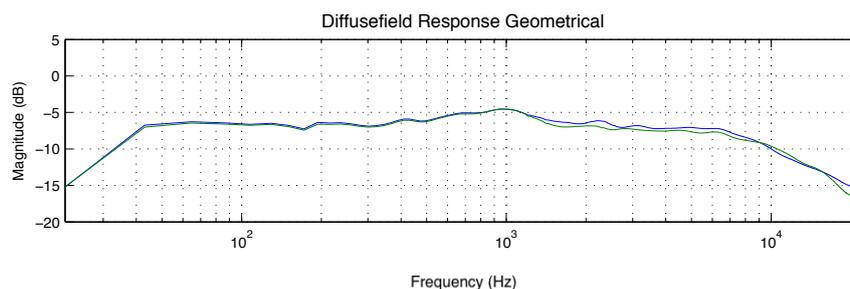


Abbildung 67: Diffusfeldfrequenzgang (aus Mittelung) - Grenzflächen Source

Aus den Messungen ergibt sich ein Öffnungswinkel der hochfrequenten Richtcharakteristik von 70° zusammen mit einer Wegdifferenz von maximal 17 cm. Gemessen jeweils für Schalleinfall unter 30° .

7.6 X1A - Ein Trennkörper nach dem Äquivalenzmodell

Bei diesem Trennkörper wird versucht, die Ergebnisse der Berechnungen umzusetzen und einen neuen Trennkörper zu entwerfen. Im vorderen Bereich handelt es sich um einen Keil, der sich nach oben hin verjüngt und dessen Spitze etwas abgeschnitten ist. Hinter den Mikrofonen wird der Keil breiter und geht in eine Halbkugel auf der Rückseite über (Vergl. Abbildung 68).



Abbildung 68: X1A - Ein Trennkörper nach dem Äquivalenzmodell

Der Gesamtfrequenzgang im Diffusfeld (Vergl. Abbildung 69) zeigt sich gleichmäßig, mit einem sanften, stärker werdenden Abfall in den Höhen. Durch die besser angepasste Grundplatte bei diesem Trennkörper mit gerader Kante im vorderen Bereich wird der durch die Positionierung der Mikrofonkapseln bedingte Einbruch im Frequenzgang etwa eine Oktave nach oben verschoben.

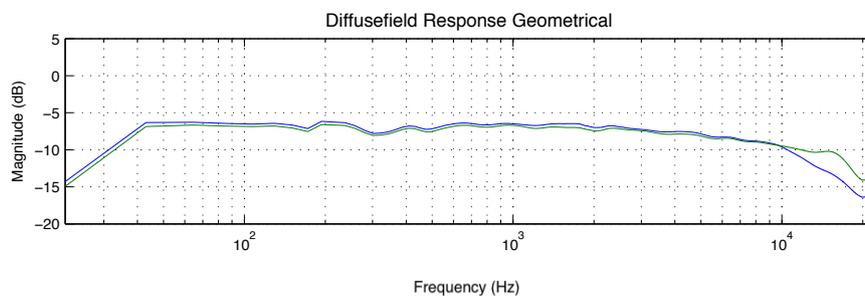


Abbildung 69: Diffusfeldfrequenzgang (aus Mittelung) des neuen Trennkörpers

Der Frequenzgang von hinten fällt ab wenigen hundert Herz zu den Höhen hin gleichmäßig ab. Für Schalleinfall von oben wird der Frequenzgang welliger. Ein Einbruch bei 3,7 kHz wird bei nahe stehenden Musikern die Präsenz etwas abschwächen. Aus den Messergebnissen geht hervor, dass die realen Winkel und Laufzeiten für Schalleinfall unter vertikal 30° etwas kleiner ausfallen als geplant. Es ergab sich ein Öffnungswinkel von je 50 Grad (geplant waren 54°) und eine maximale Wegdifferenz von 26cm für die

Variante mit integrierter Trennscheibe. Somit errechnet sich ein Aufnahmewinkel von etwa 94° statt den geplanten 120 Grad. Für Schalleinfall unter 60 Grad entsprechen die gemessenen Werte mit 101,6 % aber recht genau der Hörereignisrichtung, die nach Sengpiel für eine Abbildung in einem Lautsprecher nötig ist.

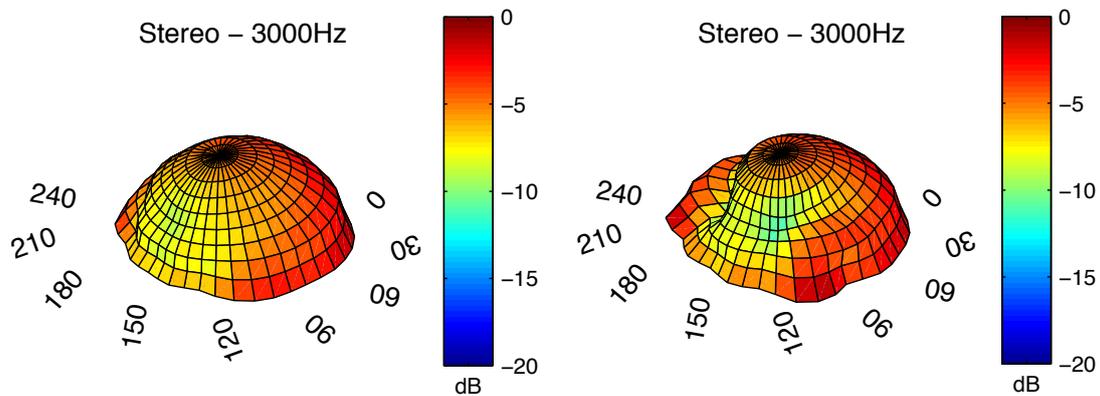


Abbildung 70: links: 3D-Polardiagramm für 3kHz - X1A - Gesamtsystem, rechts: Selbes Diagramm für den Trennkörper mit OSS-Scheibe

Die Richtwirkung des neuen Trennkörpers erreicht bei Frequenzen oberhalb 3kHz fast nierenförmiges Aussehen. In der Variante mit OSS-Scheibe werden die Richtcharakteristika zerklüfteter, auch wenn die Auswirkungen verglichen mit den anderen Trennkörpern geringer sind (Vergl. Abbildung 70).

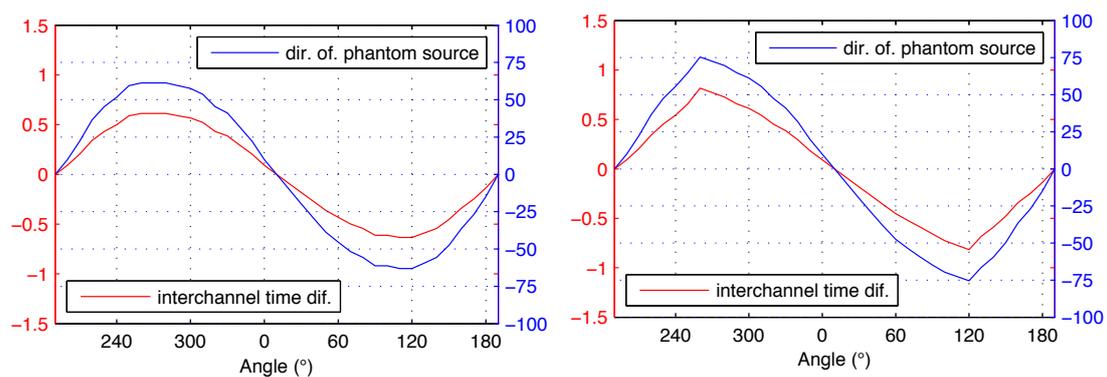


Abbildung 71: Laufzeitdifferenz in ms (rot) und daraus resultierende Hörereignisrichtung nach Sengpiel in Prozent (blau) - X1A links: ohne Trennscheibe, rechts: mit Trennscheibe

Vorteile in der Version mit OSS-Scheibe sind ein linearer Verlauf der Abbildungsfunktion, was vor allem auf das veränderte Laufzeitverhalten zurückzuführen ist (Vergl. Abbildung 71).

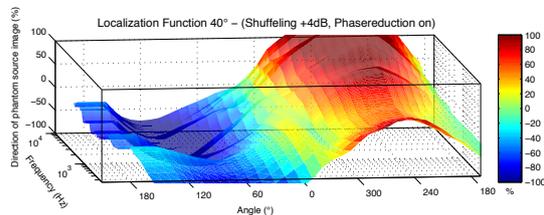


Abbildung 72: Abbildungsfunktion - X1A mit Trennscheibe

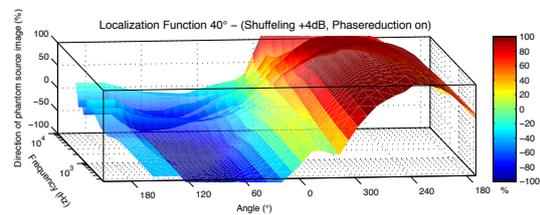


Abbildung 73: Abbildungsfunktion - Quasi-ORTF auf der Grenzfläche

Die Abbildungsfunktion des Trennkörpers mit Trennscheibe (Vergl. Abbildung 72) ist somit die gleichmäßigste, die für einen Trennkörper mit Kugeln gemessen wurde. Ein im Vergleich dazu gemessenes Grenzflächen - ORTF mit 2 Nierenkapseln (Vergl. Abbildung 73) bietet zwar im Bassbereich eine gleichmäßigere Abbildungsbreite, da die Pegeldifferenz konstant ist, jedoch ist der winkelabhängige Verlauf der Hörereignisrichtung weniger gleichmäßig.

7.7 X1P - Vereinfachte Version des Trennkörpers nach dem Äquivalenzmodell

Der Trennkörper des vorigen Kapitels wird mit weniger Elementen vereinfacht aufgebaut. Der vordere Teil des Trennkörpers ist aus einem fertigen Styroporei abgeschnitten, der hintere kugelförmige Teil blieb gleich (Vergl. Abbildung 75).

Es wird eine Variante mit vergleichbaren Dimensionen und unter der Annahme, dass es ausreicht, 50 % Hörereignisrichtung durch die Laufzeit- und 50 % Hörereignisrichtung durch die Intensitätsstereophonie zu erzielen, eine verkleinerte Variante getestet.

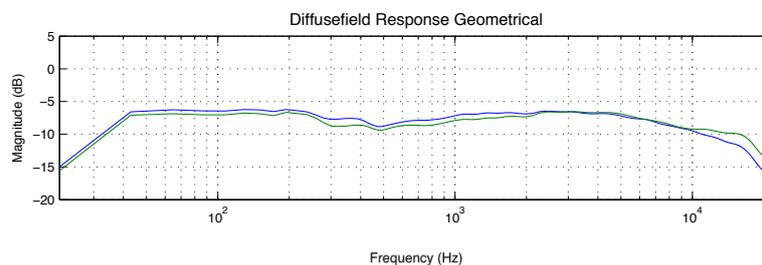


Abbildung 74: Diffusfeldfrequenzgang (aus Mittelung) der großen Variante mit Trennscheibe

Der Diffusfeldfrequenzgang (Vergl. Abbildung 74) dieser Anordnung zeigt im Mittenbereich einen Einbruch bei etwa bei 800 Hz. Bei der Variante mit OSS-Scheibe ist dieser etwas stärker ausgeprägt und reicht tiefer, bei der kleinen Variante etwas weniger stark und höher. Alle Varianten zeigen Welligkeiten im Frequenzgang, die bei der mit OSS-Scheibe am stärksten ausgeprägt sind. Prinzipiell verhalten sich die einzelnen Frequenzgänge in den Höhen ähnlich wie beim X1A, sind jedoch von starken Welligkeiten im mittleren Frequenzbereich und einem weniger ausgeglichenen Verlauf in den Höhen geprägt. Dies ist die scharfkantigen Übergänge in der Nähe der Mikrofonkapsel zurückzuführen, die Kantenreflexionen auslösen.

Die Richtwirkung der großen Variante ist vergleichbar mit X1A, die verkleinerte Variante richtet erst bei sehr hohen Frequenzen.

Die Pegeldifferenz zwischen den Kapseln ist selbst bei komplett seitlichem Schalleinfall unter 1kHz sehr gering (Vergl. Abbildung 76), wodurch die Möglichkeit einer späteren Entzerrung des Seitensignals in Frage gestellt wird.

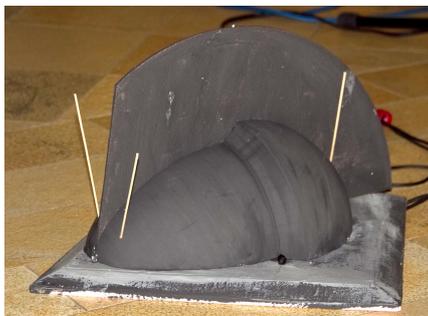


Abbildung 75: Vereinfachte Version des neuen Trennkörpers: Große Variante mit Trennscheibe

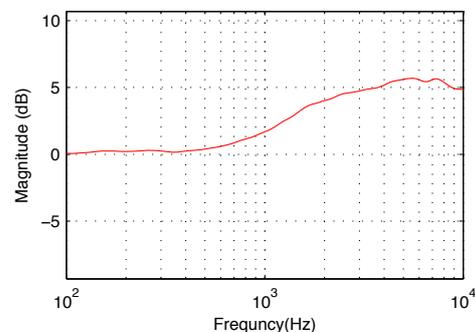


Abbildung 76: Pegeldifferenz zwischen den Kanälen für die kleine Variante bei seitlichem Schalleinfall

7.8 Zusätzliche Messreihen & Messfehler

Da jede Messung mit der Referenzmessung kalibriert wird, hat die Referenzmessung eine entscheidende Bedeutung. Insbesondere, wenn die Wellenlänge in die Größenordnung der Mikrophondimension kommt, entstehen Welligkeiten und Einbrüche in den Frequenzgängen, die, wenn das zu messende Mikrofon später nicht genau gleiche Abmessung hat oder leicht in der Position verschoben ist, bei etwas anderen Frequenzen zu liegen kommen. In der ersten Messreihe fiel bereits auf, dass mit einem 1/2 Zoll Messmikrofon im Grenzflächenbetrieb keine sinnvollen Messungen im oberen Frequenzbereich gemacht werden können. Im Zuge der Messungen im Hochspannungssaal werden deshalb verschiedene Möglichkeiten der Referenzmessung und verschiedene Referenzmikrophone verglichen.

7.8.1 Verschiedene Membrangrößen

Es waren für die Messung 3 verschieden große Messmikros verfügbar. Zunächst wird für die Referenzmessung dasselbe Mikrofon untersucht, das in den Trennkörpern verwendet wird (Vergl. Abbildung 77).

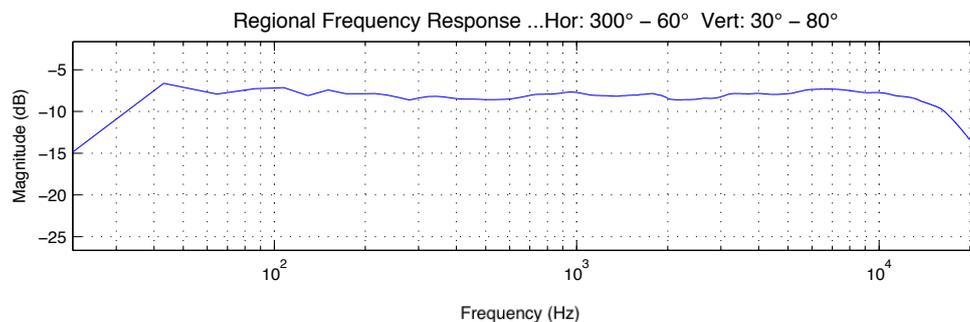


Abbildung 77: vorderer Frequenzgang des MM1 auf einer Styroporgrundplatte, verglichen mit dem 1/4 Zoll Mikrofon in der Grenzfläche

Auffällig ist, dass für Schalleinfall von oben die Kantenreflexionen der, wegen des Mikrophonehäuses, nötigen Grundplatte besonders stark auffallen.

Bei einem 1/2 Zoll Mess-Mikrofon von Bruel & Kjaer fällt, bedingt durch die Kapselgröße, der Frequenzgang im Grenzflächenbetrieb schon ab 5 kHz merklich ab. Für Schalleinfall von oben zeigt sich bei knapp 12 kHz ein Notch-artiger Einbruch (Vergl. Abbildung 78).

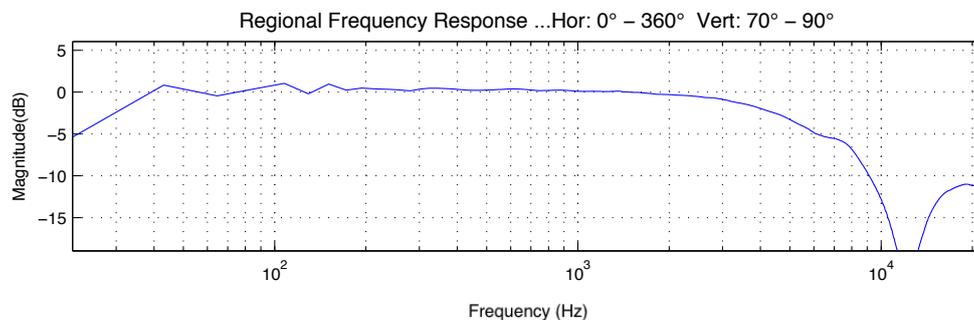


Abbildung 78: Frequenzgang des 1/2 Zoll Messmikrophons für Schalleinfall von oben, kalibriert mit dem 1/4 Zoll Messmikrofon in der Grenzfläche

7.8.2 Montagearten

Es wird ein 1/4 Zoll Mikrofon von Bruel & Kjaer verwendet. Liegend auf dem Drehteller entsteht im frontalen Bereich und im Diffusfeld eine leichter Höhenanstieg oberhalb

10 kHz, wohingegen für Schalleinfall von oben die Höhen oberhalb 13 kHz abfallen (Vergl. Abbildung 79).

Eine Montage in der Grenzfläche, von unten durch ein Loch im Drehteller, erzeugt die linearsten Messergebnisse und entspricht auch in der Theorie der bestmöglichen Position. Mit dieser Messung werden die Messungen kalibriert.

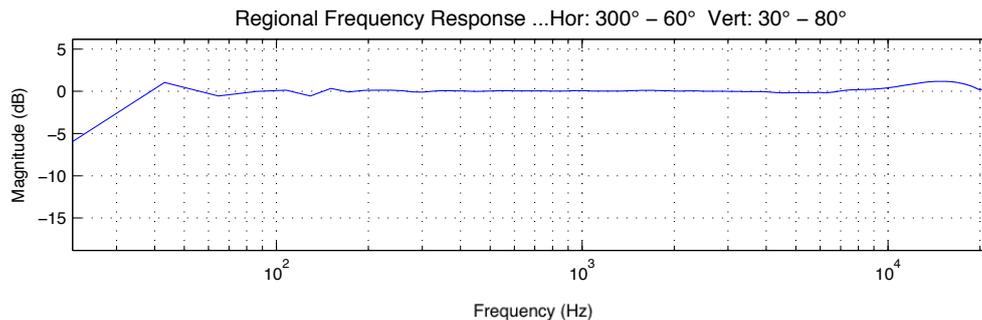


Abbildung 79: Frequenzgangsabweichung des 1/4 Zoll Messmikrophons bei frontalem Schalleinfall liegend auf dem Drehteller, verglichen mit demselben Mikrophon plan im Mittelloch des Tellers integriert

7.8.3 Randbereiche

In Abbildung 79 sieht man merkbliche Unterschiede im Frequenzgang oberhalb 10 kHz. Vor allem für frontalen Schalleinfall unter 0° und Schalleinfall von oben weichen die Messungen von der Ideallinie ab. Für frontalen Schalleinfall werden die Höhen zwischen 10 und 20 kHz nochmals um etwa 1-2 dB angehoben. Für Schalleinfall von oben fallen sie ab. Dieser Effekt tritt auch bei den Trennkörpermessungen auf, da hier die Mikrophone auf dem Drehteller liegen und somit einen rechten Winkel zur Referenzkapsel bilden.

7.8.4 Begrenzte Genauigkeit im tieffrequenten Bereich

Um im Bassbereich eine ausreichende Frequenzauflösung zu erhalten, wird hier mit längeren Fenstern gearbeitet, dadurch gehen allerdings die Reflexion zum Teil in die Messungen ein. Es fällt ein kleiner Sprung im Frequenzbereich zwischen 100 und 200 Hz, um ca. 1 dB auf, der wohl ein Messfehler ist und sich durch die Messungen hindurchzieht. Unterhalb von ca. 150 Hz fällt zudem der Pegel des verwendeten Tropfenlautsprechers schnell ab, so dass die Messungen unter 100 Hz im Störgeräuschpegel versinken.

7.9 Testaufnahmen

Da die Hochspannungshalle für begrenzte (Mess-)Zeit benutzt werden kann, können nicht alle Prototypen vermessen werden. Über Testaufnahmen werden die Trennkörper vorsortiert. Auch kann der Eindruck einer Aufnahme die Messergebnisse bestätigen oder in Frage stellen.

Aufgenommen wurde ein kleiner Chor in einer modernen Kirche. Dabei ist die Wahl des Aufnahmeorts und des Aufnahmezeitpunkts eher durch den anstehenden Messtermin geprägt. Die Kirche ist klein und stark ungleichmäßig bedämpft. Somit ist schon der Klang in der Kirche nicht besonders gut, entsprechend können die Aufnahmen höchstens durch reale Abbildung überzeugen. Testpersonen die die Aufnahmesituation nicht erlebt hatten, kommen deshalb nicht in Frage.



Abbildung 80: Ensemble und Aufnahmeort der Testaufnahmen

Es wird lediglich bewertet, ob verschiedene Kriterien erfüllt werden oder nicht. Zusätzlich wird die mittlere Korrelation der Aufnahme betrachtet. Zum Vergleich werden Aufnahmen mit gewöhnlichen Mikrofonierungstechniken im unbegrenzten Schallfeld gemacht. Somit wird versucht, durch AB-Vergleich zwischen Grenzfächen-Trennkörper-Aufnahme und Vergleichsaufnahme, die Einflüsse der Interpretation der Künstler möglichst gering zu halten. In Tabelle 11 sind die Ergebnisse für die Trennkörper aufgeführt, die auch in der Gesamtwertung die vorderen Plätze erreicht haben.

Außer bei der Korrelation wird eine 5-stufige Skala zwischen -1 (schlecht) und 1 (gut) verwendet. Beim Mittenloch wird das Vorhandensein bewertet. Beim ersten Durchgang werden 2 Ergebnisse unterschieden: Gut genug für die Messung oder nicht.

Die Testaufnahmen der Trennkörper, die in der Messung gut abschneiden, werden mit den gewonnenen Daten entzerrt und ein weiteres Mal angehört. Zusätzlich zur Entzerrung wird der Anteil des Seitensignals (Width) dem Höreindruck entsprechend angepasst. Nachdem die Abbildungsbreite im ersten Hörtest teilweise ungenügend war, wird die Basisbreite bei den entzerrten Trennkörpern durchgängig verringert. Für die Entzerrung werden die Werte aus Tabelle 12 verwendet.

Typ	X1A + OSS	Ei 30cm hinten	GF-Source	X1A	Ei 30cm + OSS hinten	X2P 50%	X1P + OSS	Ei 30cm vorn	GF – Source + OSS	Ei 30cm + OSS vorn	X1P
Eindruck	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1
Mittenloch	0	0	0,5	0	0,5	0	0	0	1	0	0
Korrelation	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,4	0,1	0,35	0,2	0,35	0,2
Abbildung	0	1	0,5	0,5	0	1	0,5	0,5	0	0,5	1
Natürlichkeit	1	1	0	0	0,5	1	0	1	0	1	0
Räumlichkeit	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0
Tiefe	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0
Klang	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hinten wahrnehmbar	1	0	1	1	0,5	1	1	1	0	1	1
Platz:	2	1	3	4	3	2	3	1	5	1	3

Tabelle 11: Vergleich einiger Testaufnahmen vor der Entzerrung

Typ	X1A + OSS	Ei 30cm hinten	GF-Source	X1A	Ei 30cm + OSS hinten	X2P 50%	X1P + OSS	Ei 30cm vorn	GF – Source + OSS	Ei 30cm + OSS vorn	X1P
Standard Shuffeling	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Width	-0,3	-0,34	-0,4	-0,25	-0,3	-0,18	-0,5	-0,25	-0,3	-0,21	-0,4
Entzerrkurve	frontal	diffus	frontal	frontal	mittel	frontal	frontal	mittel	mittel	mittel	frontal

Tabelle 12: Einstellungen des Entzerrtools für die Testaufnahmen

Beim 2. Hörtest werden die Trennkörper in 4 Gruppen unterteilt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 13.

Erfreulicherweise schneidet der in dieser Arbeit konstruierte Trennkörper (X1A), sowie Source von Franz Graf [15] bei den Testaufnahmen und den Messungen gut ab. Die Eiform als Trennkörper überzeugte ebenso in diesem Test und bei der Messung. Überrascht hat die verkleinerte Version des berechneten Trennkörpers (X1P50). Sie zeigt zwar keine sehr überzeugenden Messergebnisse, schneidet aber im Hörtest vor allem nach der Entzerrung dennoch gut ab.

7.10 Ergebnisse

Aus den Messergebnissen kann ermittelt werden, welchen Anteil an der Hörereignisrichtung durch die verschiedenen Stereophoniearten erzeugt wird. Der Anteil der simulierten Räumlichkeit kann mit der Messung schwer kontrolliert werden. Rückschlüsse können aus den richtungsabhängigen Frequenzgängen gezogen werden. Hier sind die

Typ	X1A + OSS	Ei 30cm hinten	GF-Source	X1A	Ei 30cm + OSS hinten	X2P 50%	X1P + OSS	Ei 30cm vorn	GF – Source + OSS	Ei 30cm + OSS vorn	X1P
Eindruck	1	1	0	-1	-0,5	0	-1	-1	-1	-1	-1
Mittenloch	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0
Abbildung	1	1	0,5	0	0,5	1	0	0	0,5	1	-1
Natürlichkeit	0	1	0	-1	-1	0,5	0	-0,5	0	0	0
Räumlichkeit	0,5	1	0	0,5	1	0	0	0	0	0	0
Tiefe	1	1	0	0,5	0	1	0	0	1	0	1
Klang	0	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	-1	-1
Platz:	1	1	3	4	4	2	4	4	4	4	4

Tabelle 13: Vergleich einiger Testaufnahmen nach der Entzerrung

Testaufnahmen ein Vorteil. Bei manchen Trennkörpern ist z.B. wahrnehmbar, wenn eine Ansage an den Chor von hinten kommt, bei anderen nicht.

7.10.1 Anteil der Intensitätsstereophonie

Aus den Polardiagrammen wird die Richtcharakteristik bei hohen Frequenzen entnommen. Mithilfe dieser und dem ebenfalls aus den Polardiagrammen ersichtlichen Öffnungswinkel kann berechnet werden, welche Hörereignisrichtung durch den Pegelunterschied in den Kanälen erreicht wird. (Vergleich Tabelle 14)

Gerade bei den Mikrofonen mit OSS - Scheibe schwankt der Öffnungswinkel mit der Frequenz. Dies verursacht einfallswinkelabhängige Reflexionen an der Scheibe. Die Abweichung beträgt hier bis zu 20° für die Mikrophone mit Scheibe und lag ohne diese bei 5 Grad.

	X1A 100 + OSS	Ei 30cm hinten	Source	X1A 100	Ei 30cm hinten + OSS	X1P 50%	GF – ORTF
Öffnungswinkel	50 °	70 °	70 °	60 °	60 °	60 °	55 °
Tendenz der Richtcharakteristik der Einzelkapsel	Niere	breite Niere	Niere	Niere	breite Niere	Niere	Niere
Pegeldifferenz bei 60° (in dB)	8	6,7	11,6	9,8	5,9	9,8	10,8
Hörereignisrichtung 60°	59%	52%	78%	69%	46%	69%	74%
Pegeldifferenz bei 90° (in dB)	12,8	8,7	17,8	15,4	7,9	15,4	20
Hörereignisrichtung bei 90°	83%	63%	99%	92%	59%	92%	100%

Tabelle 14: Berechnete Hörereignisrichtung aufgrund der Pegeldifferenzen durch den abgelesenen Öffnungswinkel und die angenäherte Richtcharakteristik unter 30° Vertikalwinkel

Der berechnete Öffnungswinkel von 54° wird von X1A und von X1P50% Näherungsweise erreicht. Die anderen Trennkörper haben etwas größere Öffnungswinkel, allerdings auch eher breitere Richtcharakteristika.

Die durch Pegelunterschiede innerhalb eines Einfallswinkels von $\pm 60^\circ$ erreichbaren Hörereignisrichtungen liegen bei den Trennkörpern zwischen 52 und 78 % .

7.10.2 Anteil der Laufzeitstereophonie

Auch hier werden zwei Werte unterschieden, einmal die erreichbare Laufzeitdifferenz im Aufnahmebereich und einmal die maximale Laufzeitdifferenz. Dabei ist die Laufzeitdifferenz im Aufnahmebereich für die Abbildung der Schallquelle entscheidend, wenn man von richtiger Mikrophonaufstellung ausgeht. Die maximale Laufzeitdifferenz hat dennoch einen Einfluss auf die Räumlichkeit der Aufnahme. Sie wirkt in der Regel für seitlichen Schalleinfall.

Beim ursprünglich angenommenen Aufnahmebereich von 120 Grad und einem vertikalen Einfallswinkel von 30 Grad liegen alle „großen“ Trennkörper bei maximal etwa 40% Hörereignisrichtung durch Laufzeitdifferenzen. Dies entspricht etwa dem Wert eines zum Vergleich herangezogenes ORTF. Die Maximalwerte differieren stärker und liegen in einem Bereich von 32 bis 71 %. Erwartungsgemäß erreichen hier die Trennkörper mit zusätzlicher OSS-Scheibe die größeren Maximalwerte. (Vergl. Tabelle 15)

	X1A 100 + OSS	Ei 30cm hinten	Source	X1A 100	Ei 30cm hinten + OSS	X1P 50%	GF – ORTF
$\Delta t@60^\circ$	0,4 ms	0,4 ms	0,35 ms	0,4 ms	0,4 ms	0,25 ms	0,45 ms
Hörereignisrichtung 60°	42%	42%	38%	42%	42%	27%	48%
Δt_{max}	0,75 ms	0,55 ms	0,5 ms	0,6 ms	0,75 ms	0,3 ms	0,6 ms
ΔL	26 cm	19 cm	17 cm	21 cm	26 cm	10 cm	21 cm
Hörereignisrichtung bei 90°	71%	56%	52%	60%	71%	32%	60%

Tabelle 15: Berechnete Hörereignisrichtung aufgrund der Laufzeitdifferenz zwischen den Kanälen unter 30° Vertikalwinkel

7.10.3 Hörereignisrichtung durch Laufzeit- und Pegelstereophonie

Um die Gesamthörereignisrichtung zu erhalten, muss man die erreichten Werte durch Laufzeit- und Pegelstereophonie addieren. Sengpiel begrenzt in seinen Unterlagen den Wertebereich auf 100 % . Es ist aber auch nützlich, den Gesamtwert ungekürzt zu betrachten. Es fällt auf, dass die gut bewerteten Trennkörper die 100 % Gesamthörereignisrichtung auf $\pm 15\%$ genau erreichen, die Prototypen X1A+OSS (102 %) und Ei hinten (94 %) am genauesten. Sie halten somit den Aufnahmebereich, von dem bei

	X1A 100 + OSS	Ei 30cm hin- ten	Source	X1A 100	Ei 30cm hin- ten + OSS	X1P 50%	GF – ORTF
Pegelanteil der Hörereignisrichtung bei 60°	59%	52%	78%	69%	46%	69%	74%
Laufzeitanteil der Hörereignisrichtung bei 60°	42%	42%	38%	42%	42%	27%	48%
Gesamte Hörereignisrichtung bei 60°	101%	94%	116%	111%	88%	96%	122%
maximale Hörereignisrichtung	154%	119%	151%	152%	130%	125%	160%

Tabelle 16: Berechnete Gesamthörereignisrichtung der Trennkörper - Grenzflächen - Stereomikrophone unter 30° Vertikalwinkel

den Testaufnahmen ausgegangen wird, ein. Die Gesamtergebnisse für die Hörereignisrichtung enthält Tabelle 16.

Innerhalb des Aufnahmebereichs haben die guten Prototypen etwa ein Verhältnis von 4:6 zwischen der Hörereignisrichtung durch Laufzeitstereophonie und der Hörereignisrichtung durch Pegelstereophonie. Ausserhalb steigt bei allen sowohl die Laufzeit- als auch die Pegeldifferenz weiter an. Bei den bestbewerteten Trennkörpern liegt der Anteil noch nahe bei 1:1, meist steigt der Anteil der Pegeldifferenz stärker.

7.10.4 weitere Abbildungseigenschaften

Die Messungen zeigen auch den Verlauf der Abbildungsfunktion über die Frequenz und über den Winkel. Beim Einfallswinkel fällt auf, dass die Trennkörper mit integrierter Scheibe einen gleichmäßigeren Verlauf zeigen. Reine Laufzeitmikrophone ohne Trennkörper zeigen hier einen etwa sinusförmigen Verlauf von Laufzeitdifferenz und Hörereignisrichtung. Außer den Trennkörpern mit Scheibe zeigt auch „Source“ einen linearen Verlauf der Abbildungsfunktion über den Winkel.

Ein weiterer Punkt für die Simulation der Räumlichkeit sind die richtungsabhängigen Frequenzgänge. Alle gut bewerteten Prototypen zeigen einen leichten Anstieg zu hohen Frequenzen für Schalleinfall von vorn und einen leichten Abfall für hohe Frequenzen von hinten.

Der Aufnahmebereich in Vertikalrichtung muss den Direktschall bei der gewählten Mikrophonentfernung komplett erfassen. Er bestimmt, wie nahe sich ein Solist

dem Mikrofon nähren kann, ohne dass der Klang unausgewogen wird. Mit den guten Trennkörpern kann ein Vertikalwinkel von wenigstens 45° erreicht werden (Vergl. Tabelle 17).

	X1A 100 + OSS	Ei 30cm hinten	Source	X1A 100	Ei 30cm hinten + OSS	X1P 50%	GF – ORTF
Aufnahmewinkel des entsprechenden Äquivalenzmikrophons	94°	118°	102°	118°	100°	146°	92°
Winkelabhängigkeit der Abbildungsfunktion	lin	sin	lin	sin	lin		sin
vertikaler Aufnahmebereich	45°	60°	50°	45°	60°	45°	40°

Tabelle 17: Berechnete Aufnahmewinkel unter 30° Vertikalwinkel und vertikaler Aufnahmebereich der Trennkörper

Aus den berechneten Werten für Laufweg und Öffnungswinkel, sowie der Charakteristik der fiktiven gerichteten Kapseln lässt sich mit dem Image Assistenten wieder der Aufnahmewinkel eines entsprechenden Äquivalenzmikrophons berechnen (Vergl. Tabelle 17). Dabei erreichen die Eiform und X1A ohne Scheibe gut die vorgesehenen 120° Grad. Der kleine Trennkörper X1P50% hat einen größeren Aufnahmewinkel von 146° , wohingegen alle anderen Aufnahmewinkel kleiner sind.

7.10.5 Entzerrbarkeit und subjektiver Klang

Will man die Mikrophone mit den Filtern eines Mischpults oder mit einer analogen Entzerrschaltung linearisieren, sind komplizierte Filterverläufe schwerer realisierbar. Hierauf beruht die Angabe „analog“ oder „digital“ in Tabelle 18.

Bei der subjektiven Einstellung der Parameter des Entzerrtools spielt der Frequenzgang eine entscheidende Rolle. Es besteht die Möglichkeit, den Diffusfeldfrequenzgang, den Frequenzgang im frontalen Aufnahmebereich oder einen gemittelten Frequenzgang zu entzerren. Dabei bevorzugt der Autor bei den verschiedenen Trennkörpern verschiedene Entzerrungen (Vergl. Tabelle 18).

Auch eine Entzerrung der spektralen Differenz ist möglich. Die Entzerrung des Seitensignals wird vom Autor in allen Fällen gegenüber dem nicht entzerrten Signal bevorzugt. Einerseits wird die Räumlichkeit, vor allem die Tiefenstaffelung verbessert, zum anderen wird ein angenehmerer Klangeindruck erreicht. Oft wird ein zusätzliches Standard-Shuffling positiv empfunden.

Die Korrelation der Kanäle ist durch den Anstieg der tiefen Spektraldifferenzen geringer. Bei der Optimierung der räumlichen Abbildung der Testaufnahmen mit dem Entzerrtool nach Gehör wird der Anteil des Seitensignals so verändert, dass im Nachhinein die Korrelation bei allen Aufnahmen einen ähnlichen Wert erreicht. Dieser entspricht etwa den Untersuchungen von Theile [38], in welchen er für diffuse Schallsignale einen

	X1A 100 + OSS	Ei 30cm hinten	Source	X1A 100	Ei 30cm hinten + OSS	X1P 50%
Entzerrbarkeit	analog	analog	digital	analog	analog	digital
Width – Einstellung	0,7	0,5	0,6	0,75	0,7	0,8
Verwendete Entzerr- kurve	Frontal	Diffus	Frontal	Frontal	Mittel	Frontal

Tabelle 18: Entzerrbarkeit der Grenzflächentrennkörpermikrophone und verwendete Entzerrung bei den Testaufnahmen

optimalen Korrelationswert von 0,3 bis 0,4 angibt, um eine Ortung der Lautsprecher zu vermeiden.

7.10.6 Zusammenfassung

Bei den Testaufnahmen werden X1A + OSS und der eiförmige Trennkörper gut bewertet. Es wird zwar ein unterschiedlicher Charakter der Räumlichkeit festgestellt, jedoch zeigen beide Trennkörper eine ausgewogene Abbildung. Messtechnisch entspricht X1A+OSS etwas besser den Zielvorstellungen. Source kann bei den Messwerten großteils mithalten, gewinnt aber subjektiv weniger durch die Entzerrung. Sie ist durch die ausgeprägten Frequenzgänge komplexer und somit nur digital ohne großen Aufwand durchführbar. X1A und das Ei mit Trennscheibe erreichen subjektiv weniger gute Ergebnisse, obwohl die Lokalisationsmessdaten den Erwartungen entsprechen. X1P50% erreicht bei den Testaufnahmen dasselbe Ergebnis wie Source, jedoch entsprechen die Messdaten nicht den Erwartungen. Durch die stärkere Gewichtung der Messdaten gegenüber den Testaufnahmen erhält er im Vergleich den 6. Platz. Alle verbleibenden Trennkörper erreichen weniger gute Ergebnisse.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Nach ausgiebiger Literaturrecherche und Vorversuchen wird ein System zur Messung und Untersuchung von Trennkörper-Stereomikrophonen entwickelt und getestet. Damit können die Mikrophone 3-dimensional vermessen werden. Aus den gewonnenen Impulsantworten lassen sich richtungsabhängige Frequenzgänge, Polardiagramme und Diagramme zur Stereoabbildung erzeugen. Ein Tool zur Entzerrung von Trennkörperaufnahmen wird realisiert. Hiermit kann der Amplitudenfrequenzgang des Mikrophons und der Amplitudendifferenzfrequenzgang verbessert werden.

Mit den dadurch geschaffenen Messmöglichkeiten wird zunächst die Eignung von normalen Studiomikrophonen als Grenzflächenmikrofon und als Trennkörper - Grenzflächen - Stereomikrofon untersucht. Es ergibt sich, dass gewöhnliche Kleinmembranmikrophone eingeschränkt als Grenzflächenmikrofon verwendbar sind und sich in meist nicht als Kapsel für ein TKGFSM eignen.

Probleme sind durch die Richtwirkung der Instrumente bei hohen Frequenzen zu erwarten, um so stärker, je unterschiedlicher die Instrumente sind, die in einem Ensemble spielen und je näher das Mikrofon am Ensemble steht. Bei geschickter Aufstellung und homogenen Ensembles können sie mit einem einfachen Filter ausgeglichen werden. Dies schränkt die Möglichkeiten für schnelle und einfache Probemitschnitte von Musikern ein, da ein Tontechniker für Aufnahme und Nachbearbeitung nötig ist.

Die Untersuchung der praktischen Aspekte und der Anwendbarkeit von TKGFSM für Musikaufnahmen zeigt einige Einschränkungen, welche die Anwendbarkeit des Verfahrens begrenzen. Besonders Aufnahmen mit anwesendem Publikum oder von Ensembles mit Dirigent sind lediglich in Ausnahmefällen möglich. Eine sinnvolle Anwendung ist die Deckenmontage in niedrigen Räumen, die so für die Aufnahme virtuell vergrößert werden.

Zur Untersuchung der Unterschiede zwischen einem Trennkörperstereomikrofon und einem Grenzflächen-Trennkörperstereomikrofon werden einige Trennkörper in verschiedenen Größen aufgebaut und messtechnisch einmal als „halbierter Grenzflächen-trennkörper“ und im unbegrenzten Schallfeld unter herkömmlicher Aufstellung verglichen. Es ergibt sich, dass die Art der Aufstellung keine markanten Unterschiede auf die Abbildungseigenschaften des Trennkörpers hat. Somit können vorhandene Erkenntnisse der Trennkörperstereophonie großteils auf die Grenzflächen-Trennkörperstereophonie übertragen werden.

Zur Optimierung eines Trennkörpers für die Grenzflächenaufnahme werden Berechnungen, basierend auf Laufzeit und Intensitätsstereophonie, durchgeführt und zusätzlich psychoakustische Erkenntnisse herangezogen. Anhand der ermittelten Optimierungskriterien, werden verschiedene Prototypen von Trennkörper - Grenzflächen -

Stereomikrofonen konstruiert und nach einer Vorauswahl durch Testaufnahmen messtechnisch untersucht.

Der berechnete Prototyp bringt einige Vorteile.

Es zeigt sich aber auch, dass eine weitere Optimierung der Prototypen möglich ist. Speziell sollte auf eher abgerundete Formgebung geachtet werden, da dadurch einerseits Kantenreflexionen minimiert werden, andererseits ein weicherer Übergang in den Staudruckbereich erfolgt. Außerdem sind solche Körper unauffälliger und werden von Publikum und Musikern eher akzeptiert.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Entzerrung von Trennkörperaufnahmen sinnvoll ist, auch wenn sich Trennkörper konstruieren lassen, die ohne Entzerrung bereits hochwertige Aufnahmen ermöglichen. Je kleiner der Trennkörper, bzw. je größer die verwendeten Kapseln sind, um so wichtiger wird eine Entzerrung der Aufnahmen im Frequenzgang sowie in der Spektraldifferenz. Speziell die Lautsprecherwiedergabe profitiert von der Entzerrung.

Artefakte, wie sie bei gängigen Abmessungen von Trennkörpern zwangsweise entstehen und dadurch entstehende ungenügende Abbildungseigenschaften bei breitbandigen Signalquellen können verringert werden.

Letztlich beschränken sich die gewonnen Erkenntnisse und die Entzerrmöglichkeiten nicht auf Grenzflächenmikrophone sondern können gleichermaßen bei herkömmlichen Trennkörpern im unbegrenzten Schallfeld Anwendung finden.

8.1 Weiterführende Arbeiten

Neben den beschriebenen Anwendungsmöglichkeiten sind einige weitere denkbar. Im Rahmen einer Diplomarbeit kann ein kleiner Teil eines komplexen Themas beantwortet werden. Hier sollen deshalb einige mögliche Themen für weiterführende Arbeiten und erweiterte Anwendungsbereiche vorgeschlagen werden:

- Integration in das Trennkörpermikrophon sowie Integration des Trennkörpermikrophons

Durch die Möglichkeit der Integration der kompletten Entzerr- und Aufnahmeelektronik in den Innenraum des Trennkörpers, können kompakte und Aufnahmegeräte realisiert werden. Da neuere Aufnahmegeräte oft auf Speicherkarten aufnehmen und mechanische Bauteile gänzlich entfallen, stellt dies akustisch kein Problem mehr da. Durch Batteriebetrieb können sämtliche Kabel entfallen.

Auch die Integration des TKGFSMs als Festinstallation in die Decke von Aufführungssälen oder Tonstudios stellt eine Möglichkeit dar.

- Surround und Mehrkanalanwendungen

Insbesondere die Erweiterbarkeit für Surround und sonstige Mehrkanalanwendungen ist interessantes Thema, was aber in einer eigenen Arbeit abgehandelt werden muss. Einerseits könnten mehrere Druckempfänger in einen geeigneten Trennkörper integriert werden, was aber bei gebräuchlichen Abmessungen einigen Aufwand an Signalverarbeitung für eine ausreichende Kanaltrennung mit sich bringt. Andererseits gibt es die Möglichkeit mittels zusätzlicher Druckgradientenempfänger mit Achtercharakteristik eine Matrizierung vorzunehmen.

Die Anwendung von zusätzlichen Druckgradientenempfängern zur Veränderung der Richtcharakteristik, kann auch bei Stereoanwendung interessant sein. So könnte man relativ leicht, bei ein und demselben Trennkörper die Gesamtrichtwirkung und den Aufnahmebereich verändern.

- Hörversuch zur Lokalisation und zur Linearität der Abbildung

Es wurden während der Messung der Prototypen bereits Aufnahmen von Sprache, Noise-Bursts und Impulsantworten in 15° Schritten und 4 Abständen für nachfolgende Hörversuche angefertigt. Mit einem Hörversuch ist es möglich, die gemessenen Abbildungsfunktionen und Aufnahmebereiche zu verifizieren, sowie Aussagen über die Wirkung der „simulierten“ Anteile der räumlichen Abbildung zu machen.

- Akzeptanz von Trennkörpermikrofonen

Im Zuge der Aufnahmen könnten Umfragen bei Musikern und Publikum sowie bei Tonschaffenden zur Akzeptanz und optischen Auffälligkeit durchgeführt werden. Die Ergebnisse geben Aufschluss, in welche Richtung eine weitere Optimierung überhaupt möglich oder sinnvoll ist.⁶

- Signalverarbeitung

Mit dem Entzerrtool wird die Signalverarbeitung für Trennkörpermikrophone in dieser Arbeit schon begonnen. Ein weiterer Schritt ist die Übertragung der Entzerrung in den analogen Bereich, um ein Trennkörpermikrophon, z.B. vergleichbar mit dem Kugelflächenmikrophon von Schöps zu bauen, was ein „fertiges“ Stereosignal an seinen Ausgängen liefert.

- Verwendung anderer Kapseln als reiner Druckempfänger mit Trennkörpern

Die Verwendbarkeit anderer Kapseln statt Druckempfängern und die damit entstehenden Vor- und Nachteile können überprüft werden. Dadurch ergeben sich allerdings komplett andere Anforderungen an den Trennkörper und die Montage, weshalb in dieser Arbeit lediglich die prinzipielle Eignung von Druckgradientenempfängern mit Nierencharakteristik als Grenzflächenmikrophon untersucht wird.

Die Optimierung von Arrays aus kleinen Mikrofonkapseln für die Trennkörper und Grenzflächenanwendung ist ein interessantes Thema. Es kann überprüft werden, ob mit anderen Formen als einer geraden Linie noch ein besseres Ergebnis erreicht wird. Auch kann versucht werden, einzelne Kapseln frequenz- und ortsabhängig zu gewichten.

⁶Eine erste Umfrage wurde inzwischen durchgeführt. Abgerundete und einfache Formen werden besser bewertet als komplizierte oder kantige.

A Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] ANDREWS, DAVID M.; WAHRENBROCK KENNETH A.: *The use of pressure zone microphones in theater sound reinforcement and recording*. AES, 1980.
- [2] BECKMANN, B.: *Grenzflächenmikrofone mit Druck- und Druckgradientencharakteristik*. DAGA, 1984.
- [3] BILLINGSLEY, MICHAEL: *Simulated Binaural Recording System*. Patent US 4658932, 02 1986.
- [4] BILLINGSLEY, MICHAEL: *an improved stereo microphone array for popular music recording*. AES, 1989.
- [5] BLAUERT, JENS: *Ein neuartiges Präsenzfilter*. Fernseh und Kinotechnik, (3):75–78, 1970.
- [6] BORÉ, GERHART; PEUS, STEPHAN: *Mikrophone - Arbeitsweise und Ausführungsbeispiele*. Neuman, 1999.
- [7] BRAUN, DIETER; HUDELMAYER, CHRISTOPH: *Vier verschiedene Verfahren zur Trennkörperstereophonie*. DAGA, 1980.
- [8] BRUCK, JERRY: *The Boundary-Layer Mid/Side (M/S) Microphone*. AES, 1985.
- [9] BULLOCK, JOHN D.; WOODARD, ALAN P.: *Performance characteristics of unidirectional Transducers near reflective surfaces*. AES, 1984.
- [10] CROWN: *SASS-P MK2 datasheet*. Web, 2006.
- [11] DEFOSSEZ, ANDRÉ L.G.: *Stereophonic Pickup System Using Baffled Pressure Microphones*. AES, 1986.
- [12] DICKREITER, MICHAEL: *Handbuch der Tonstudioteknik 1/2*. Saur, 1997.
- [13] GERZON, MICHAEL A.: *Applications of Blumlein Shuffling to Stereo Microphone Techniques*. AES, 42, June 1994.
- [14] GRABER, GERHARD; GRAF, FRANZ; GAGGEL WOLFGANG: *Hörvergleich von alternativen binauralen Aufnahmesystemen mit einem Kunstkopfsystem*. DAGA, 2000.

- [15] GRAF, FRANZ: *Entwicklung eines Aufnahmesystems für psychoakustische Analysen*. Diplomarbeit, 1999.
- [16] GRAF, FRANZ; RÖPKE, PETER; PFLÜGER MARTIN; GRABER GERHARD: *Aufnahmesystem für psychoakustische Analysen - Vergleich Kunstkopf vs. Alternativkonzepte*. 2007.
- [17] GULDENSCHUH, MARKUS: *Messung und Untersuchung der Einflüsse der Head-Torso-Winkel auf die Außenohrübertragungsfunktion*. Projektarbeit IEM, 2008.
- [18] HOSIDEN: *Guide for electret condensor Microphones*. Homepage, 2008.
- [19] JECKLIN, JÜRIG: *A Different Way to Record Classical Music*. AES, 1981.
- [20] JECKLIN, JÜRIG: *Theorie der Tontechnik - Mikrofone*. Skript, 08 2002.
- [21] LECHNER, THOMAS: *Klangeigenschaften und Richtungsabbildung von Stereo-Mikrofonanordnungen mit Druckempfängern*. VDT, 1991.
- [22] LIPSHITZ, STANLEY P.; VANDERKOOY, JOHN: *The acoustical Behavior of Pressure-Responding-Microphones Positioned on Rigid Boundaries - A Review and Critique*. AES, 1981.
- [23] LIPSHITZ, STANLEY P.: *Stereo Microphone Techniques: Are the Purists wrong?* AES, 1985.
- [24] MAJDAK, PIOTR; BALAZS, PETER; LABACK BERNHARD: *Multiple Exponential Sweep Method for Fast Measurement of Head-Related Transfer Functions* Multiple Exponential Sweep Method for Fast Measurement of Head-Related Transfer Functions* Multiple Exponential Sweep Method for Fast Measurement of Head-Related Transfer Funktions**. AES, 2007.
- [25] MÜLLER, BERNHARD: *Ein neuer Typ von Grenzflächenmikrofon*. AES, 1990.
- [26] NEUMANN-GMBH: *Neumann - Homepage*. Webpage, 2007.
- [27] PRZYBILLA, THEODOR; SCHMIDT, WERNER: *Erfahrungsbericht über den Einsatz von herkömmlichen Studiomikrofonen als Boden- oder Grenzflächenmikrofone*. VDT, 1984.
- [28] SCHNEIDER, MARTIN: *MS-Stereophonie, Praktische Erfahrungen und Anregungen*. VDT, 1996.
- [29] SCHÖPSGMBH: *Schöps Homepage*. <http://www.schoeps.de>, 10 2007.

- [30] SENGPIEL, E.: *Gleichungen für die Pegeldifferenz- und Laufzeitdifferenz-Lokalisationskurve*. Sengpielaudio.com, sengpielaudio.com, 1995.
- [31] SENGPIEL, EBERHARD: *Hörereignisrichtung b1 in Abhängigkeit von der Interchannel-Pegeldifferenz*. Sengpielaudio.com, 1994.
- [32] SENGPIEL, EBERHARD: *Ständige Verbesserung der Lautsprecher-Stereophonie-Aufnahmen*. pdf, 05 1994.
- [33] SENGPIEL, EBERHARD: *Theoriegrundlagen: Intensitätsstereophonie*. Sengpielaudio.com, 1995.
- [34] SENGPIEL, EBERHARD: *Untere Grenzfrequenz beim Grenzflächenmikrofon*. Sengpielaudio.com, 2005.
- [35] SENGPIEL, EBERHARD: *Sengpiel Audio Homepage*. <http://sengpielaudio.com/>, 01 2008.
- [36] SENGPIEL, EBERHARD: *Frequenzabhängige Hörereignisrichtung bei Stereo-Lautsprecherlokalisierung*. Sengpielaudio.com, 2009.
- [37] THEILE, GÜNTHER: *Das Kugelflächenmikrofon*, 1986.
- [38] THEILE, GÜNTHER: *Multichannel Natural Music Recording Based on Psychoacoustic Principles*. AES, 5156, 2001.
- [39] WARUM, STEFAN: *Messung von Außenohrübertragungsfunktionen und direktionalen Raumimpulsantworten als Basis der Auralisation realer Räume*. Diplomarbeit, 2003.
- [40] WIKIPEDIA: *Wikipedia*. <http://www.wikipedia.org>, 2008.
- [41] WITTEK, HELMUT; THEILE, GÜNTHER: *Hauptmikrofon.de / Image Assistent*. <http://www.hauptmikrofon.de/>, 2007.
- [42] WITTEK, HELMUT: *Lokalisationskurven online - Image Assistent, Dokumentation über Prinzip, rechnerische Herkunft und Anwendungen*. www.hauptmikrofon.de, 06 2001.
- [43] WUTTKE, JÖRG: *Zwei Jahre Kugelflächenmikrofon*. Schoeps, 1992.

B Messsystem

In diesem Kapitel wird der Aufbau und die Funktion des für diese Arbeit verwendeten Messaufbaus und des Messprogramms beschrieben.



Abbildung 81: Messraum mit Kugelflächenmikrofon „Fred“

Die Multiple Exponential Sweep Method bietet einen signifikanten Vorteil bei der Geschwindigkeit der Messung, da durch sich zeitlich überlappende Sweeps mehrere Messpunkte quasi simultan gemessen werden können. Je nach Qualität des Messraums (insbesondere der Nachhallzeit) und Anforderungen an die Messung lässt sich dadurch die Messzeit verkürzen.

Die Messung nach der Multiple Exponential Sweep Method ist der Kern des Messprogramms. Dabei ist diese in Anlehnung an das AES-Paper von Piotr Majdak, Peter Balazs und Bernhard Laback [24] implementiert.

Durch die Anordnung der Quellen (Lautsprecher) im 10° Raster ist die Auflösung im vertikalen Bereich (Medianebene) vorgegeben. Der horizontale Bereich wird mittels eines steuerbaren Drehtellers abgefahren. Auflösungen ab 1° sind möglich. Für die Vermessung eines Stereomikrophons im unbegrenzten Schallfeld im 10° Grad Raster werden 540 Messpunkte verwendet und von jedem die Impulsantwort für jeden Kanal berechnet. Somit entstehen 1080 Impulsantworten. Hierfür werden unter realen Bedingungen an der Universität ca. 20 Minuten benötigt, in welchen das Messprogramm weitgehend automatisch abläuft. Durch die Möglichkeit der schnellen Messung können viele Mikrophone und Trennkörper messtechnisch erfasst werden.

Die Software ist in 2 Teile gegliedert:

Die Messsoftware, ist in Pure Data (PD)⁷ realisiert. Sie steuert und überwacht den Messablauf, berechnet Eingangs- und Ausgangssignale sowie die Faltungen und speichert die Impulsantworten für jeden Messpunkt ab. Zur Funktion wird ein leistungsfähiger Linux-Rechner mit mehrkanaliger Audio Hardware benötigt.

Zur Auswertung der Messergebnisse sind Matlab⁸-Skripte vorhanden. Diese übernehmen alle nicht zeitkritischen Berechnungen und die Darstellung und Speicherung der Messergebnisse.

Die Rahmenbedingungen für die Messung müssen vorher abgeschätzt werden. Die Nachhallzeit und der Störabstand sind problematisch. Die Messzeit hat sich durch die MESM um mehr als einen Faktor 4 verkürzen lassen. Nachteilig ist der hohe Hardware-Aufwand und die lange Implementierungszeit.

B.1 Messaufbau

Für die Vertikale stehen 15 Lautsprecher (Vergl. Abbildung 81) zur Verfügung, mit denen im unbegrenzten Schallfeld der Bereich von 40° bis 180° abgedeckt wird. Unterhalb von 40° gibt es aufgrund fehlender Montagemöglichkeiten keine Lautsprecher.

Für die Grenzflächenmessungen wird eine schallharte, runde Platte mit 1,9 m Durchmesser auf den Drehteller geschraubt. Die Höhe der Oberfläche der Platte entspricht der Mitte des 0° Lautsprechers. Somit kann mittels 10 Lautsprechern für den Grenzflächenfall der gesamte Bereich von 0° bis 90° abgedeckt werden.

Durchmesser	Beschreibung	f_λ	$f_{\lambda/2}$
[cm]		[kHz]	[kHz]
2,54	1 Zoll	13,6	6,8
1,27	1/2 Zoll	27,1	13,6
0,64	1/4 Zoll	54,2	27,1
0,6	Electret-Kapsel typischer Durchmesser	57,3	28,7
0,8	viele Messmikrophone mit XLR- Anschluss	43	21,5
2,2	typ. Kleinmembran Studiomikrofon	15,6	7,8

Tabelle 19: Mikrophondurchmesser und Frequenzen der passenden Wellenlängen

Zur Kalibrierung wird am IEM ein 1/2 Zoll Mikrofon von G.R.A.S. verwendet. Mit diesem werden vor Beginn eines Messtages die Pegel der Lautsprecher aneinander angeglichen und dann eine Messung durchgeführt, die später als Referenz dient. Dabei stellt

⁷Pure Data (PD) – Open-Source Programmiersprache mit grafischer Oberfläche, die sich gut zur Programmierung von Echtzeitanwendungen im Audiobereich eignet. www.pd.iem.at

⁸Matlab – Programmierumgebung für technische Berechnungen - <http://www.mathworks.de/products/matlab/>

sich heraus, dass es im Falle der Grenzflächenmessung erstrebenswert ist, ein kleineres Referenzmikrofon zu verwenden, da eine 1/2 Zoll Kapsel oberhalb ca. 10 kHz bereits Frequenzgangsfehler erzeugt, wenn sie auf einer Grenzfläche liegt. Deutliche Frequenzgangsabweichungen ergeben sich ab $\lambda/2$. Die entsprechenden Mikrophondurchmesser kann man Tabelle 19 entnehmen. Die Frequenzgangseinbrüche in den durchgeführten Messungen einiger Einzelmikrofone findet man in Tabelle 20. Auch im unbegrenzten Schallfeld ist die Abschattung im Bereich hinter dem Referenzmikrofon messbar, deshalb wird für die Kalibrierung der vordere Bereich (Mittelung über die ersten 30 Grad Horizontal) verwendet.

Mikro	Frequenz [kHz]	λ [cm]	$\lambda/2$ [cm]	Durchmesser [cm]
Grass Referenz 1/2 Zoll	13,5	2,55	1,27	1,27
Neumann KM184	8	4,3	2,15	2,2
Oktava MK 12	7,5	4,59	2,29	2,2
HKFM 2xElektret	10	3,44	1,72	1,2
HKFM 1xElektret	19	1,81	0,91	0,6

Tabelle 20: Gemessene Einbrüche im Frequenzgang bei Mikrofonen auf der Grenzfläche und Schalleinfall parallel zur Membran

Abbildung 82 zeigt den Aufbau für die Grenzflächenmessung.

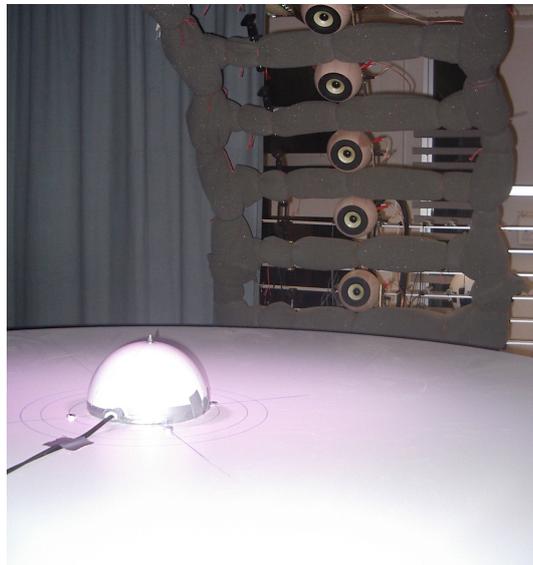


Abbildung 82: Grenzflächenmessung eines Halbkugelmikrophones am IEM

B.2 Messung und Ablaufsteuerung mit PD

Die Ablaufsteuerung und Messung wird komplett vom PD – Patch `start_msm.pd` (Vergl. Abbildung 83) gestartet und bedient. Dieser ist in großen Teilen dynamisch programmiert und somit flexibel anwendbar für Impulsantwortmessungen von bis zu 64 Inputs und Outputs.

Außer der Ablaufsteuerung und der Generierung und Auswertung der Messsignale übernimmt dieser Patch die Überwachung der Messung und die Ansteuerung des Drehtellers, um einen weitgehend automatischen Messablauf zu gewährleisten. Es wird z.B. kontrolliert, ob die eingegebenen Startparameter im richtigen Bereich liegen und ob der Umgebungsgeräuschpegel ausreichend gering ist, um eine neue Messung zu starten.

B.3 Equipment

- Rechner: AMD 4200, 64 bit, 2 GB RAM, Debian Linux 2.6.22
- Pure Data mit den Librarys `libfftw`, `iemmatrix`, `zexy`
- Wandler: RME ADI8 Pro, Behringer ADA8000, RME ADI-648
- Verstärker: APART PA4060
- Lautsprecher: Tropfenlautsprechern, IEM-Entwicklung mit Visaton Chassis
- Referenzmikrofon: G.R.A.S 26AK (Sn. 35398) mit Power Module 12AA (Sn. 25466)
- Drehteller: Outline ET250-3D
- Reflexionsarmer Raum ca. 3,6m x 3,6m x 3,2m (L x B x H)

Die korrekten Positionen der Lautsprecher sind in der Tabelle in Abbildung 84 angegeben.

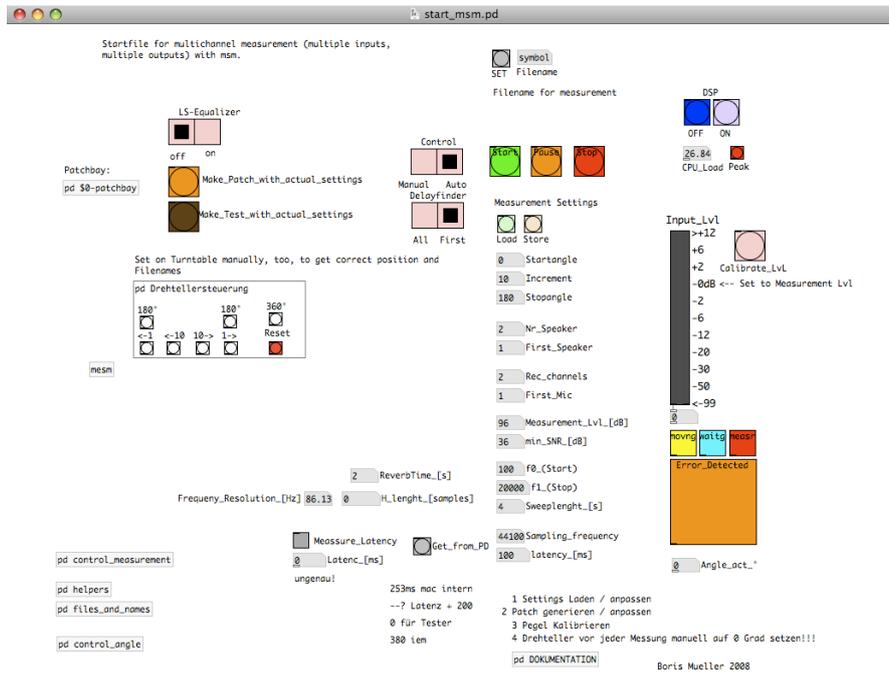


Abbildung 83: Messoberfläche in PD - start msm.pd

Lautspr.	Winkel
1	-41,3°
2	-33,9°
3	-25,3°
4	-17,3°
5	-8,3°
6	0°
7	9,2°
8	18°
9	27,5°
10	37,1°
11	48,1°
12	58,2°
13	69,2°
14	79,6°
15	90,1°



Abbildung 84: Reale Winkel der Lautsprecher (am IEM)

[17]

Abbildung 85: Messaufbau der zweiten Messreihe im Hochspannungslabor

B.3.1 Messreihe im Hochspannungslabor

Für die Messung der Prototypen für den neuen Grenzflächentrennkörper wird ein neuer Messaufbau erstellt (Vergl. Abbildung 85), der die Winkel und Abstände genauer einhält. Es werden dieselben Lautsprecher und Verstärker verwendet. Da nur Grenzflächenmikrophone untersucht werden sollen, wird der Drehteller mit der Platte für die Grenzflächenmessung am Boden aufgebaut. Da Abstand zwischen Platte und Boden gering ist, steht der ganze Boden als Grenzfläche für tiefe Frequenzen zu Verfügung. Der Frequenzbereich der Messung wird durch die Lautsprecher und den Störpegel begrenzt und beginnt unterhalb 150 Hz. Das Messmikrophon wird durch ein 1/4 Zoll Mikrophon von Brüel & Kjaer ersetzt, was in den Mittelpunkt des Drehtellers bündig eingelassen ist. Somit kann eine gültige Referenzmessung bis über 20kHz erstellt werden.

Die neue Halterung der Lautsprecher hat eine Winkelabweichung von weniger als einem halben Grad und der Abstand der Lautsprecher wird genauer als 2,5cm eingehalten. Der Aufbau auf dem Boden erleichtert das Positionieren der Mikrophone, so dass auch hier die Genauigkeit verbessert werden kann.

Der ganze Aufbau wird im „Tesla-Labor“ des Instituts für Hochspannungstechnik aufgebaut. Dieses besteht aus einer großen Halle mit akustisch bedämpften Wänden, in der normalerweise Hochspannungsversuche durchgeführt werden.

Durch die höhere mögliche Messauflösung werden Effekte der Kantenreflexion am Drehteller sichtbar. Um dennoch im tieffrequenten Bereich Aussagen machen zu können, wird die Impulsantwort in unterschiedlichen Frequenzbereichen auf unterschiedliche Längen gekürzt.

B.4 Datenblätter

Exemplarische Datenblätter einiger Mikrophone finden sich im Kapitel C, der Rest in elektronischer Form auf der CD.

Auf der ersten Seite findet man die Frequenzgangmessungen, gemittelt für verschiedene Raumbereiche.

Auf der zweiten Seite sind die Polardiagramme für 4 Frequenzen und verschiedene Schalleinfallswinkel dargestellt. Es sind auch Polardiagramme für die vertikale Ansicht dargestellt. Weitere Diagramme zeigen das Verhalten des Gesamtsystems aus beiden Mikrophonkapseln.

Die dritte Seite zeigt die 3-dimensionalen Richtdiagramme für 4 Frequenzen. Auch hier wird die Messung für einen Kanal und für beide Kanäle dargestellt.

Auf Seite 4 finden sich Messungen zur Stereoabbildung und Kontrollmessungen. Es werden Pegel- und Laufzeitdifferenzen der beiden Kanäle dargestellt sowie die Hörereignisrichtung und die Abbildungsfunktion. Anhand der gemittelten Impulsantwort und der Kreuzkorrelation der Kanäle können Messfehler schnell erkannt werden.

C Messungen - exemplarische Datenblätter

C.1 X1A + OSS

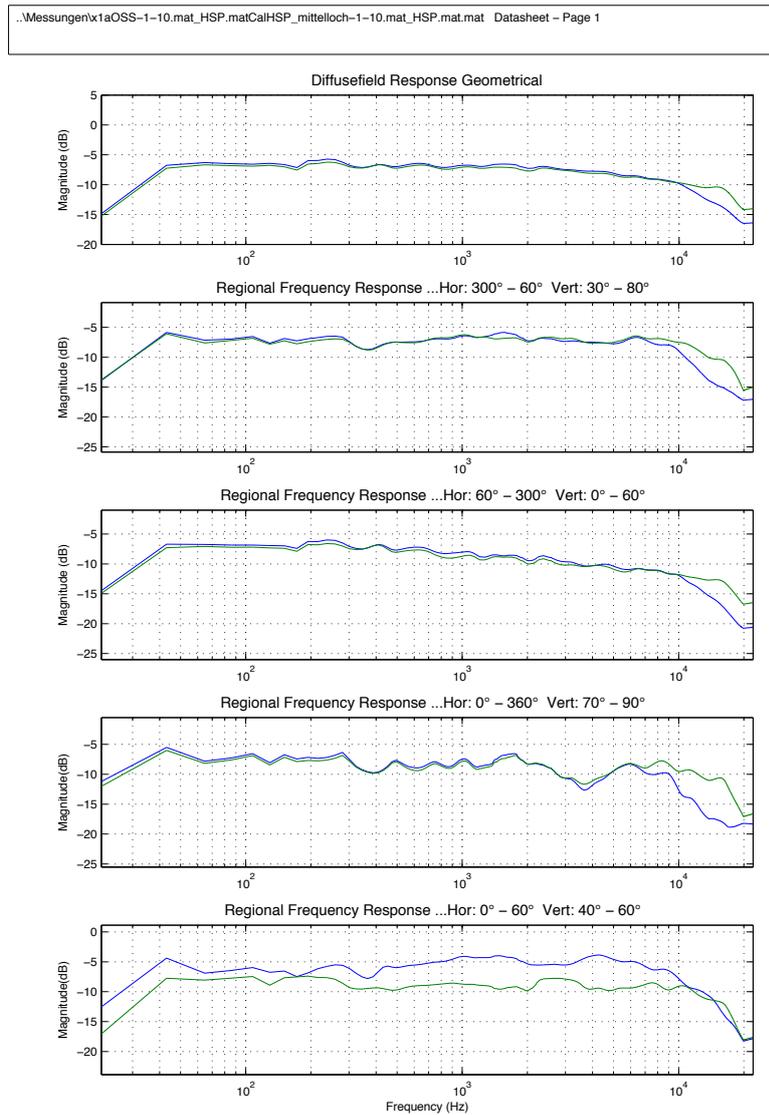


Abbildung 86: Datenblatt: berechneter Trennkörper X1A mit OSS-Scheibe - Seite1

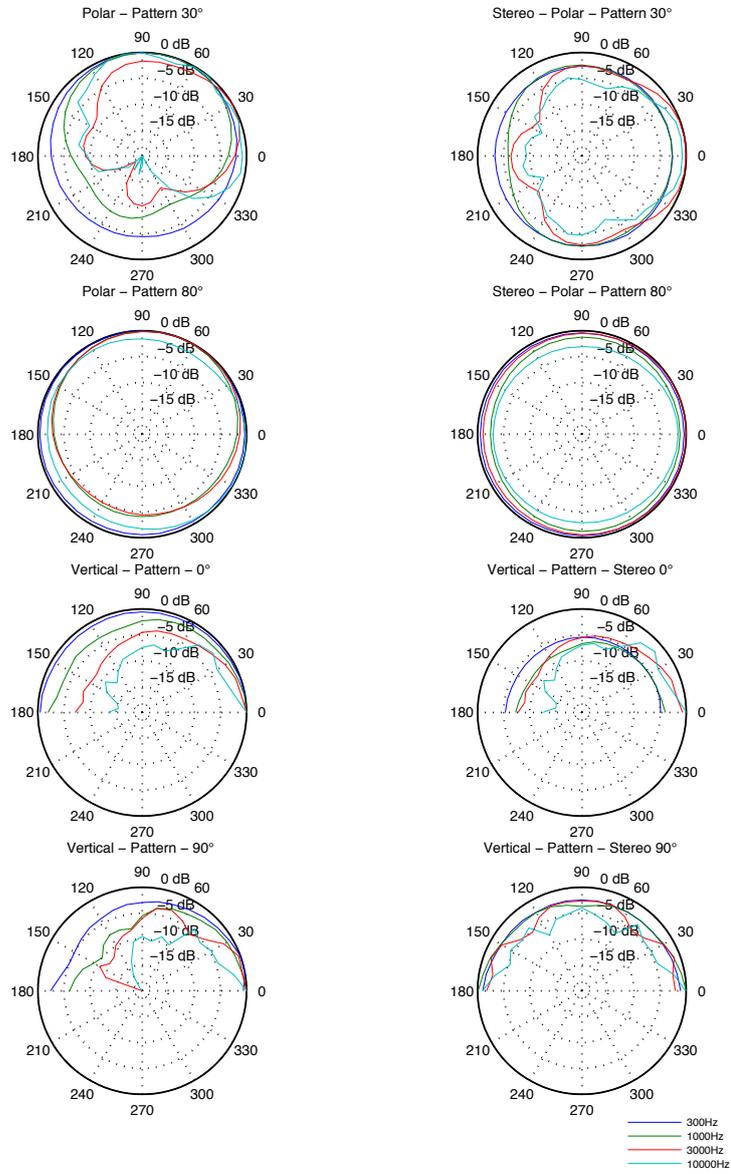


Abbildung 87: Datenblatt: berechneter Trennkörper X1A mit OSS-Scheibe - Seite2

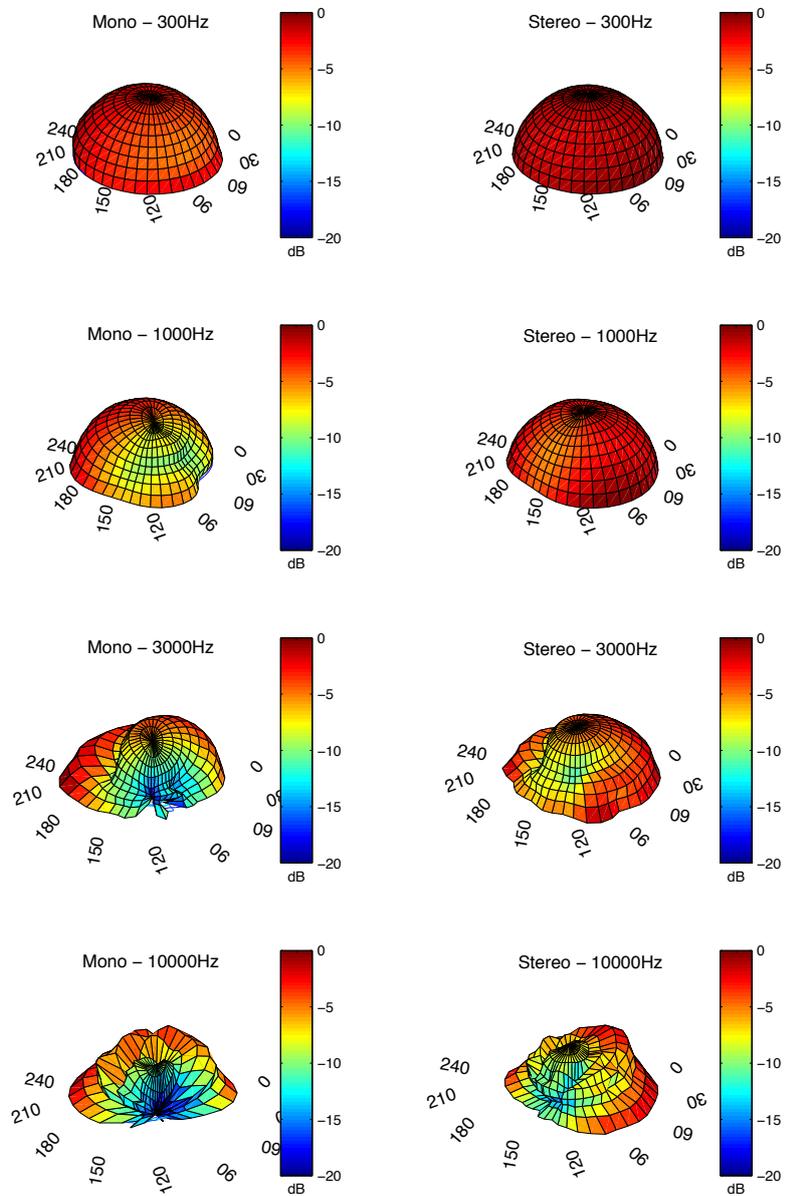


Abbildung 88: Datenblatt: berechneter Trennkörper X1A mit OSS-Scheibe - Seite3

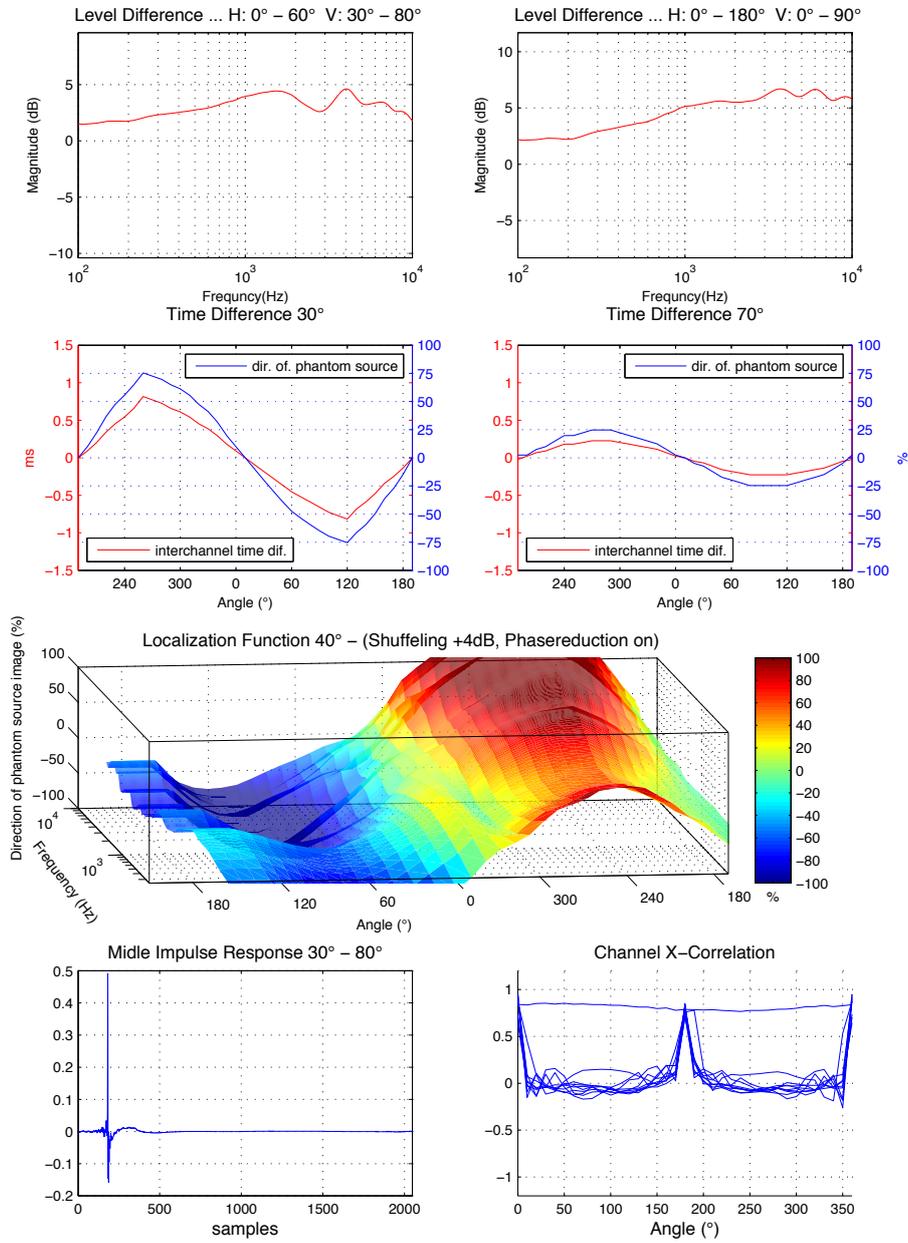


Abbildung 89: Datenblatt: berechneter Trennkörper X1A mit OSS-Scheibe - Seite4

C.2 Ei hinten

..\Messungen\leigross-Mic34-1-10.mat_HSP.mat\CalHSP_mittelloch-1-10.mat_HSP.mat.mat Datasheet - Page 1

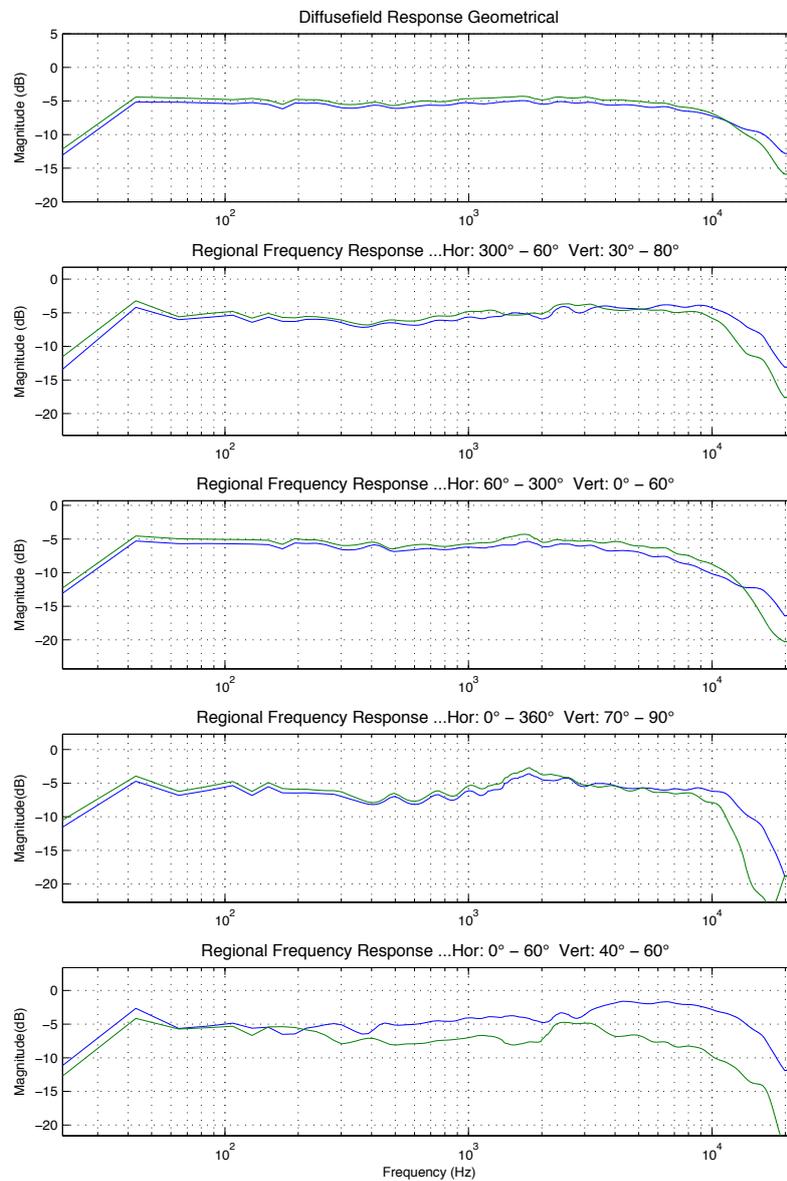


Abbildung 90: Datenblatt: Ei als Trennkörper, hintere Mikrofonposition - Seite1

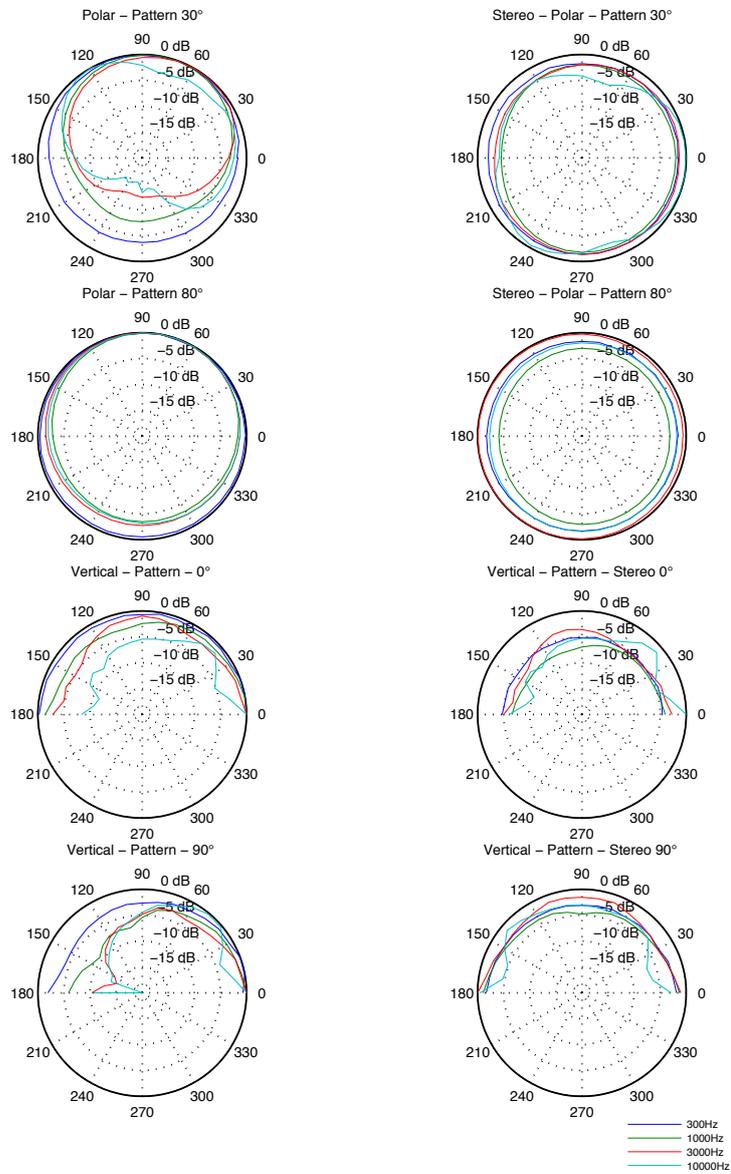


Abbildung 91: Datenblatt: Ei als Trennkörper, hintere Mikrofonposition - Seite2

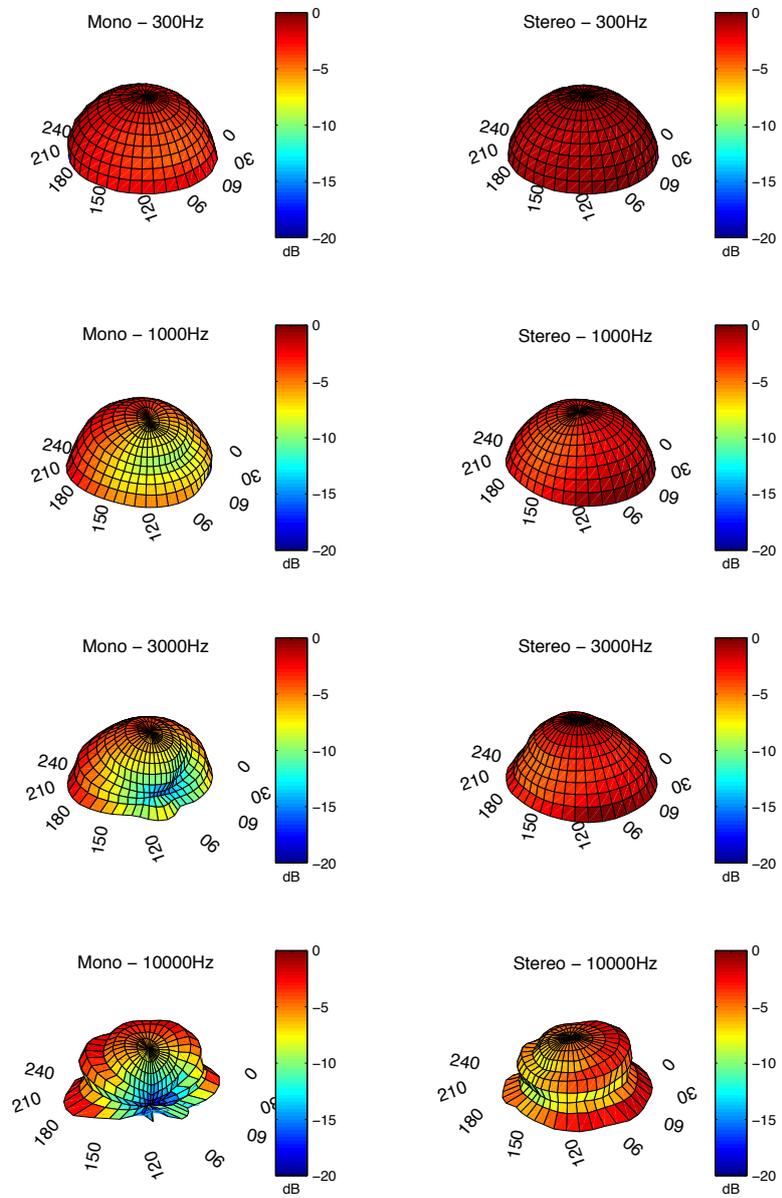


Abbildung 92: Datenblatt: Ei als Trennkörper, hintere Mikrofonposition - Seite3

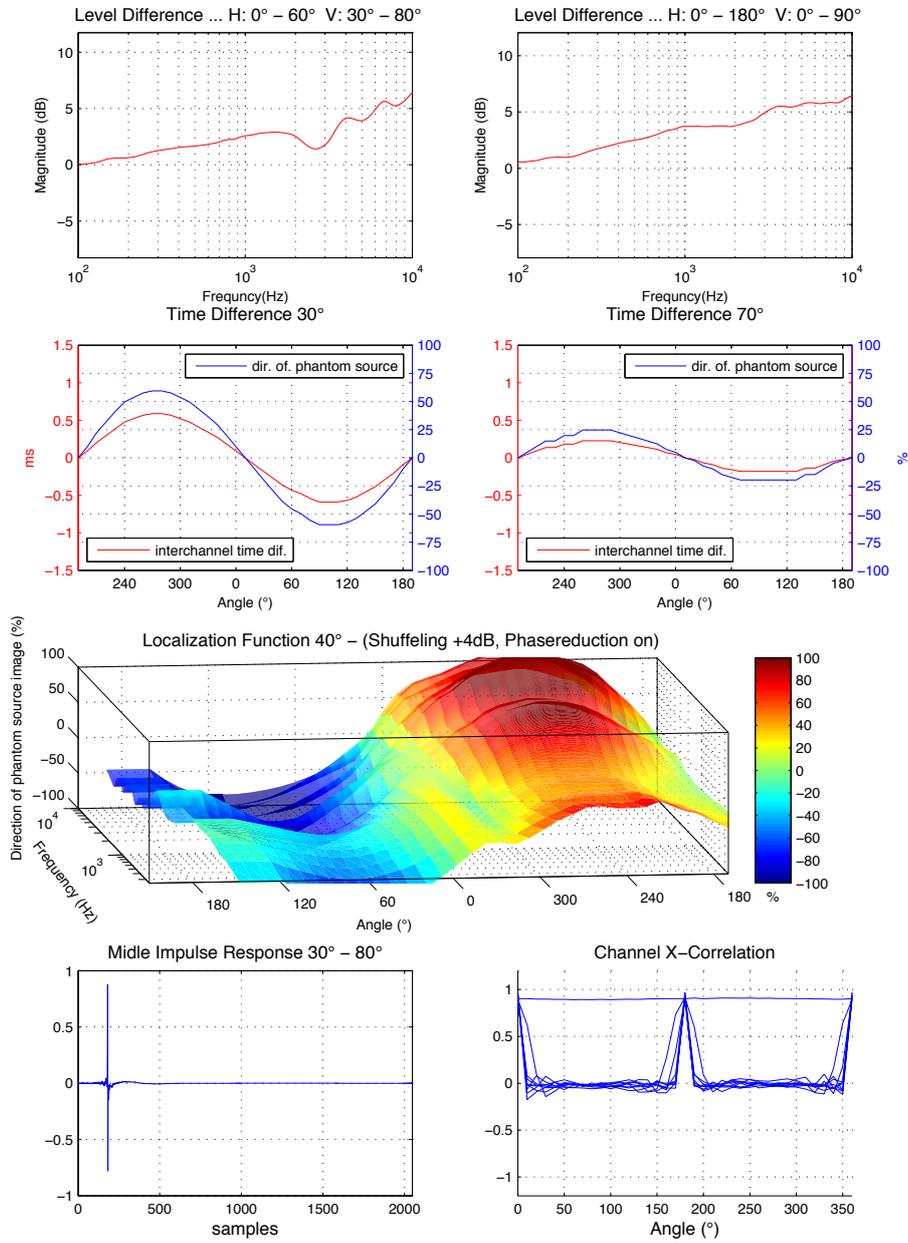


Abbildung 93: Datenblatt: Ei als Trennkörper, hintere Mikrofonposition - Seite4

C.3 Source

..Messungen\source-1-10.mat_HSP.mat\CalHSP_mittelloch-1-10.mat_HSP.mat.mat Datasheet – Page 1

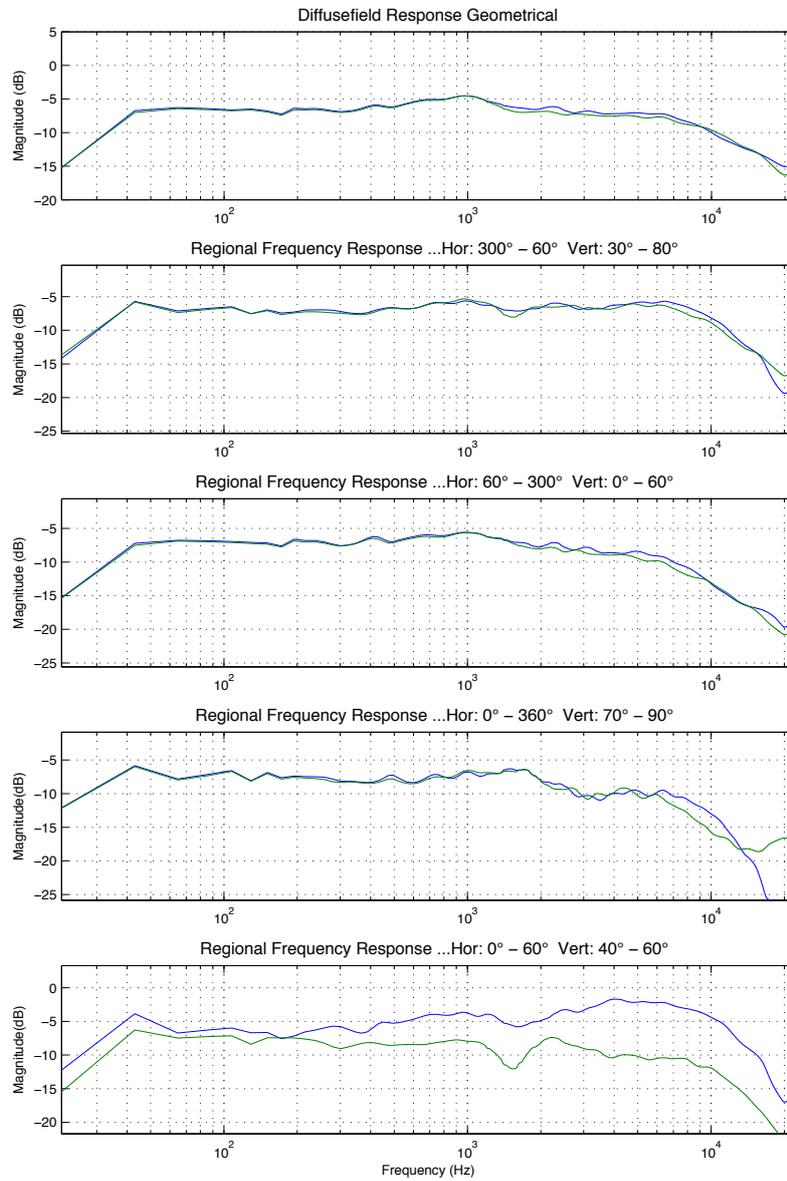


Abbildung 94: Datenblatt: Grenzflächen-SOURCE - Seite1

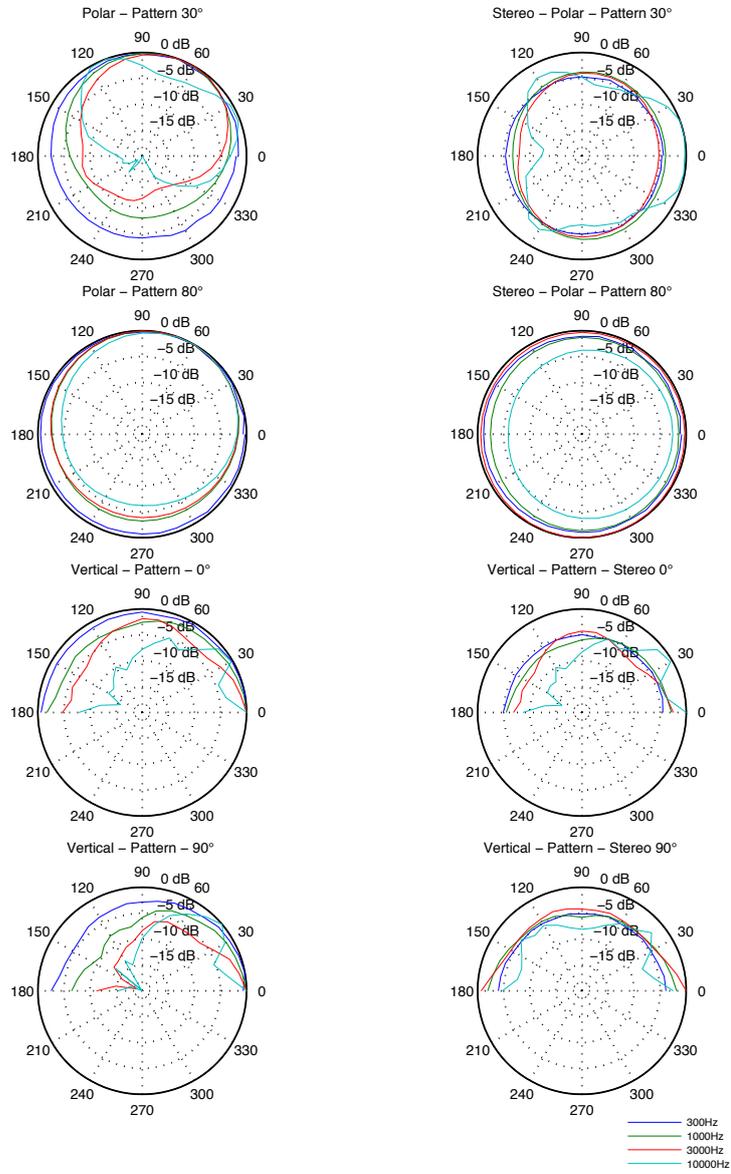


Abbildung 95: Datenblatt: Grenzflächen-SOURCE - Seite2

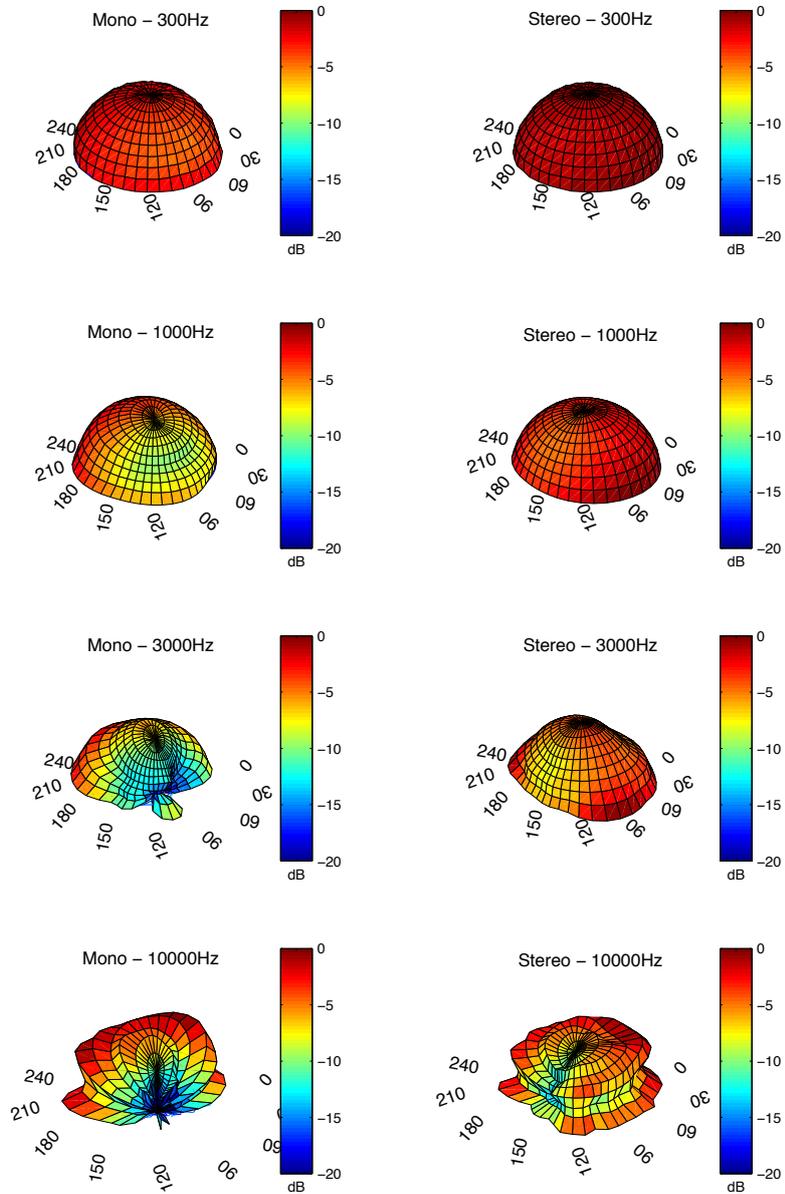


Abbildung 96: Datenblatt: Grenzflächen-SOURCE - Seite3

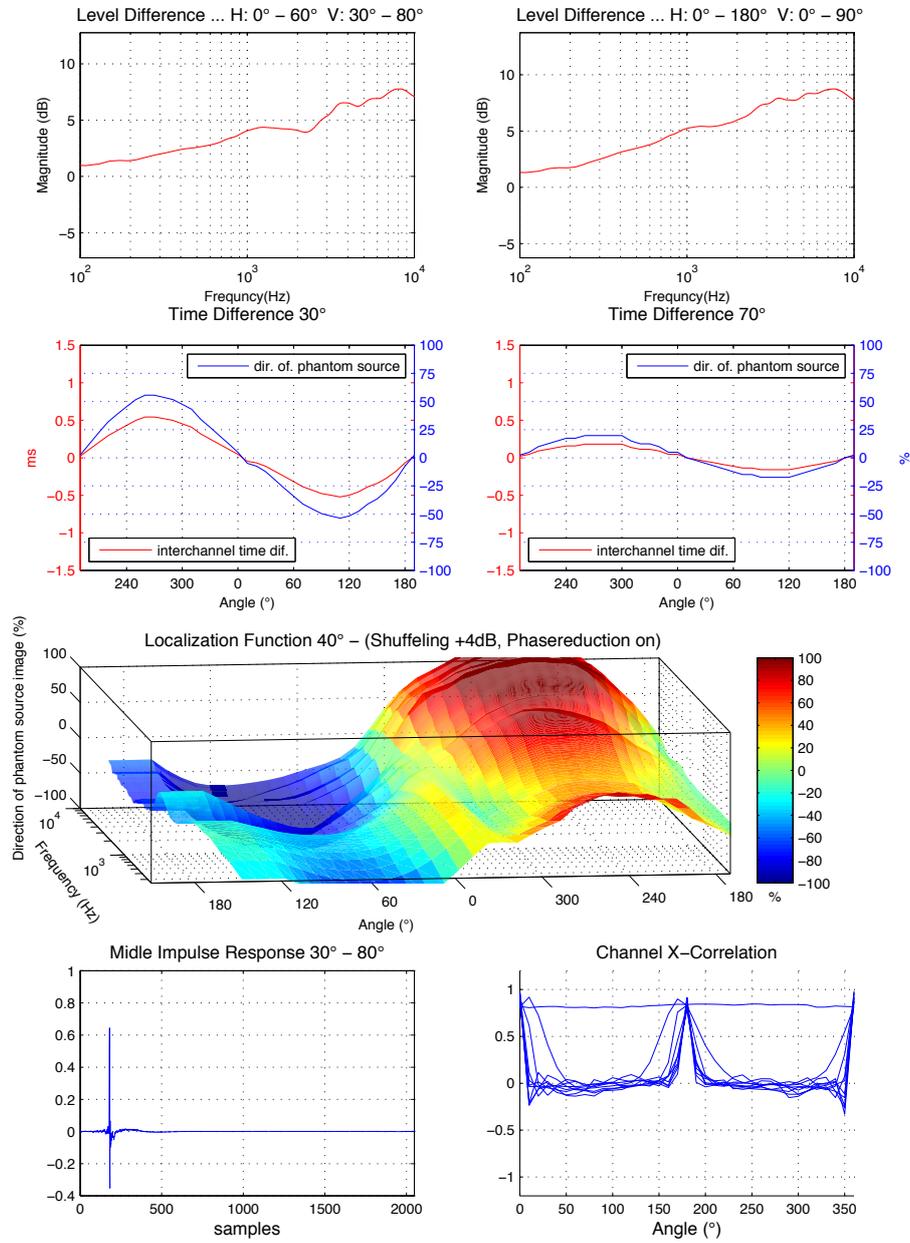


Abbildung 97: Datenblatt: Grenzflächen-SOURCE - Seite4

D CD - Rom

Auf der beigelegten CD findet man neben dieser Arbeit in elektronischer Form, vor allem die Messdaten und die Messsoftware sowie Fotos und Aufnahmen der Trennkörper.

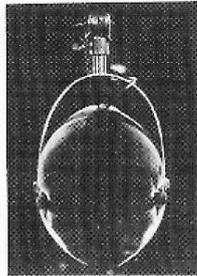
E Photos

Photos der Aufnahmen und Messungen sowie der Trennkörper finden sich auf der CD.



Abbildung 98: Ein Photo

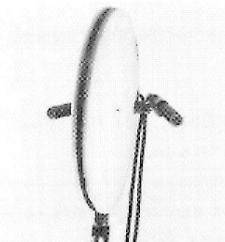
E.1 Trennkörpermikrophone



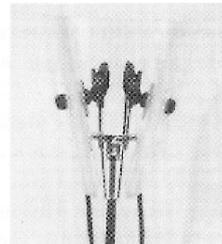
"tête Charlin" (3) 1954



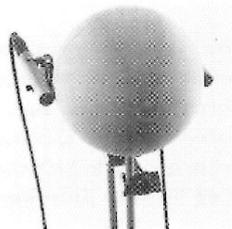
Schoeps-Laborprodukt 1955



OSS (Jecklin) (4) 1980



"Clara" 1985
(Prof. Peters) (5) *



Geller (7) 1990



KFM 6 1990
(Dr. Theile, Schoeps) (8, 9)

Abbildung 99: Verschiedene Trennkörpersysteme
[43]