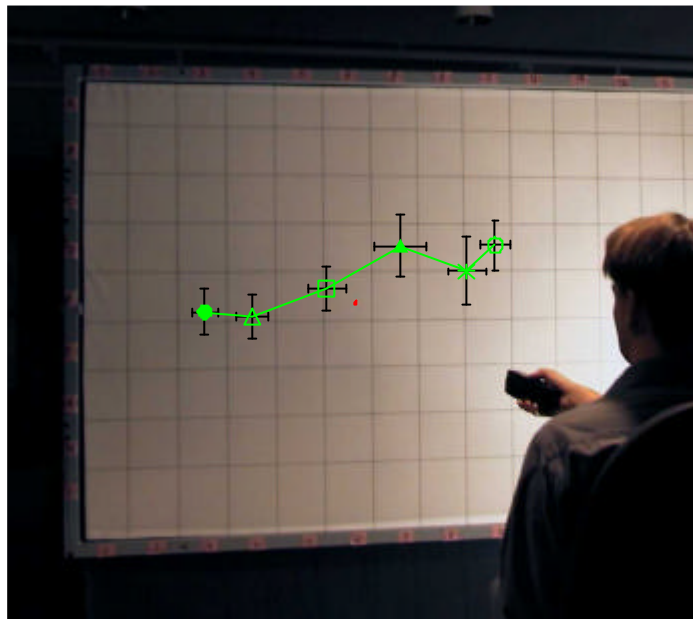


DIPLOMARBEIT

Helmut Wittek

Dezember 2000



Untersuchungen zur Richtungsabbildung mit L-C-R Hauptmikrofonen

Institut für Rundfunktechnik

Fachhochschule Düsseldorf
Studiengang Ton- und Bildtechnik

Betreuung:

Dr. Günther Theile (IRT)
Prof. Dr. Dieter Braun (FH)

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	5
1. PSYCHOAKUSTISCHE GRUNDLAGEN	6
1.1. Lokalisation im natürlichen Schallfeld	7
1.2. Prezedenzeffekt.....	9
1.3. Summenlokalisation.....	9
1.4. Assoziationsmodell	10
1.4.1. Prinzip	10
1.4.2. Ortsassoziationsstufe	10
1.4.3. Gestaltassoziationsstufe	11
1.4.4. Grenzen der Lokalisationsreizselektion.....	12
2. DIE PHANTOMSCHALLQUELLE.....	14
2.1. Einleitung	15
2.2. Verschiedene Parameter einer Phantomschallquelle.....	15
2.2.1. Entstehung.....	15
2.2.2. Abbildungsschärfe	17
2.2.3. Elevation	18
2.2.4. Klangfarbe.....	19
2.2.5. „dreikanaliges Klangbild“.....	21
2.3. Auslenkung der Phantomschallquelle	23
2.3.1. Auslenkungsrelevanter Vergleich Zweikanal-Mehrkanal in Bezug auf die Bildung frontaler Phantomschallquellen.....	23
2.3.2. Auslenkung durch Pegeldifferenz ΔL	24
2.3.3. Auslenkung durch Laufzeitdifferenz Δt	26
2.3.4. Kombination Pegel- und Laufzeitdifferenz.....	29
2.3.5. Vergrößerung der Hörzone, Stabilität der Abbildung.....	29
2.4. Vorversuche zum Klangcharakter einer Phantomschallquelle	34
2.4.1. Klangrelevanter Vergleich Zweikanal-Mehrkanal in Bezug auf die Bildung frontaler Phantomschallquellen	34
2.4.2. Verkleinerung des Öffnungswinkels, Klangfarbe: Vorversuch 2A.....	35
2.4.3. Verkleinerung des Öffnungswinkels, Lokalisationsschärfe: Vorversuch 2B	42
2.4.4. Beteiligung aller drei LS („dreikanaliges Klangbild“), Vorversuch 3.....	45
2.4.5. Zusammenfassung.....	52
3. RECHNERISCHE LOKALISATIONSKURVEN	53
3.1. Einleitung	54
3.2. Rechnerische Herkunft.....	56

3.2.1. Errechnen der Pegel- und Zeitdifferenzen: $\Delta t, \Delta L = f_1(\alpha)$	56
3.2.2. Näherungsfunktion $\phi = f_2(\Delta t, \Delta L)$	60
3.2.3. Öffnungswinkel und graphische Darstellung.....	64
3.3. Feststellen der Gültigkeit der rechnerischen Voraussage	67
3.4. „Optimale“ Lokalisationskurve	67
3.5. Beispiele Zweikanal.....	69
3.6. Beispiele Dreikanal.....	71
4. AUFNAHMETECHNIKEN FÜR STEREO UND SURROUND.....	74
4.1. Grundtechniken der stereofonen Abbildung	75
4.1.1. Intensitätsstereofonie	75
4.1.2. Laufzeitstereofonie	76
4.1.3. Äquivalenzstereofonie	78
4.2. Das Hauptmikrofon als Aufnahmeverfahren für 5.1-Surround-Wiedergabe?.....	80
4.2.1. Das Hauptmikrofon in Zweikanal-Erfahrungen	81
4.2.2. Das Hauptmikrofon bei Mehrkanalaufnahmen:.....	82
4.3. Vergleich zweikanaliger Hauptmikrofonverfahren.....	84
4.4. Vergleich unterschiedlicher Hauptmikrofonverfahren für 3/2-Stereo.....	86
4.4.1. INA – „Ideale Nieren-Anordnung“	86
4.4.2. OCT – „Optimized Cardioid Triangle“, Optimierung beim Übersprechpegel.....	87
4.4.3. Zwei unabhängige Zweikanal-Hauptmikrofone	88
4.4.4. Surroundverfahren mit Kugelflächenmikrofon.....	88
4.4.5. Vorschläge von Williams.....	89
4.4.6. Polymikrofonie, „Decca-Tree“	89
5. ÜBERBLICK ÜBER DIE DURCHFÜHRUNG DES HÖRVERSUCHS: VERGLEICH VON STEREOFONIEANORDNUNGEN.....	90
5.1. Einleitung	91
5.2. Versuchsvorbereitungen.....	92
5.2.1. Gewinnung der Testsignale	92
5.2.2. Abhörraum	99
5.3. Versuchsaufbau.....	99
5.4. Auswahl der Versuchspersonen.....	102
6. HÖRVERSUCH TEIL 1: RICHTUNGSERMITTLUNG.....	103
6.1. Versuchsdurchführung	104
6.2. Versuchsauswertung	107
6.2.1. Meßpunkterfassung durch Meß-Skala	107
6.2.2. Statistische Berechnungen	110

6.2.3. Auswahl der Versuchspersonen, bzw. Versuchsdaten.....	110
6.3. Darstellung der Ergebnisse - Übersicht	111
6.3.1. Experimentelle Lokalisationskurven – mittlere Hörposition, Vergleich mit Theorie	112
6.3.2. Experimentelle Lokalisationskurven – seitliche Hörposition.....	115
6.3.3. Elevation, zweidimensionale Darstellungen der gemessenen Phantomschallquellen	117
6.3.4. Streuungen: Standardabweichungen der gemessenen Daten.....	119
6.4. Interpretation der Ergebnisse.....	121
6.4.1. Vergleich der experimentell ermittelten Lokalisationskurven mit den rechnerisch ermittelten Lokalisationskurven.....	121
6.4.2. Verlauf der experimentell ermittelten Lokalisationskurven, Hörposition Mitte	121
6.4.3. Verlauf der experimentell ermittelten Lokalisationskurven, Hörposition Seite	123
6.4.4. Elevation	123
6.4.5. Streuung	124
7. HÖRVERSUCH TEIL 2 : ABBILDUNGSSCHÄRFE.....	125
7.1. Versuchsdurchführung	126
7.1.1. Begriffsklärung	126
7.1.2. Vergleichstest.....	126
7.1.3. Testsignale	128
7.2. Versuchsauswertung	129
7.2.1. allgemein.....	129
7.2.2. Statistik	129
7.3. Darstellung der Ergebnisse	130
7.3.1. Abbildungsschärfe – mittlere Sitzposition.....	130
7.3.2. Abbildungsschärfe – seitliche Sitzposition.....	130
7.4. Interpretation der Ergebnisse.....	131
8. HÖRVERSUCH TEIL 3 : KLANGFARBE.....	133
8.1. Versuchsdurchführung	134
8.1.1. Begriffsklärung	134
8.1.2. Versuchsablauf.....	134
8.1.3. Testsignale	134
8.2. Versuchsauswertung – siehe Kapitel 7.2.	136
8.3. Darstellung der Ergebnisse	136
8.3.1. Klangfarbe – mittlere Sitzposition.....	136
8.3.2. Klangfarbe – seitliche Sitzposition.....	136
8.4. Interpretation der Ergebnisse.....	137
9. ANHANG.....	139
9.1. Vorversuch 1	139

9.1.1. Versuchsvorbereitungen.....	139
9.1.2. Versuchsdurchführung.....	139
9.1.3. Versuchsauswertung	139
9.1.4. Darstellung der Versuchsergebnisse	140
9.1.5. Interpretation der Versuchsergebnisse	141
9.2. Begriffsklärungen.....	142
9.3. Formelzeichen.....	147
9.4. Meßdaten der Testsignale für den Hörversuch.....	148
ZUSAMMENFASSUNG.....	148
LITERATURVERZEICHNIS	152
DANKSAGUNG	154

Abbildung Deckblatt: Foto aus Kapitel 6: Hörversuch Ortsermittlung der Phantomschallquellen, Fotomontage mit Versuchsergebnissen Abb. 6.17.

Vorwort

Die Richtungsabbildung zwischen den drei vorderen Lautsprechern einer 3/2-Stereo-Anordnung ist das Thema der vorliegenden Arbeit.

Dabei wird speziell auf einige konkrete Aspekte eingegangen, die mit diesem umfangreichen und komplexen Thema zusammenhängen:

- a) Verlauf der Abbildung in Theorie (Kap.3) und Praxis (Kap.6)
- b) Stabilität der Abbildung (Kap. 2.3.5. und Kap.6)
- c) Einfluß der neu entstandenen Verhältnisse durch Hinzufügen des Center-Lautsprechers auf Klangfarbe und Lokalisationsschärfe (Kap.2, Kap.7 und Kap.8)

Diese Arbeit behandelt somit die gegenüber der 2/0-Stereofonie entstandene neue Situation bei 3/2-Stereo durch das Vorliegen des Center-Lautsprechers. Dieser hat, bei entsprechender Bestückung, gewichtigen Einfluß nicht nur auf die Art und die Qualität der Lokalisation, sondern er greift auch wesentlich in den Charakter des Klangbilds ein.

Es sind dabei je nach Bestückung positive wie negative Einflüsse festzustellen, die hier allgemein und unabhängig von der jeweiligen Situation beleuchtet werden sollen. Maßstab für die Eigenschaften des entstehenden Klangbilds soll die konventionelle 2/0-Stereofonie sein, die Erfüllung der gestiegenen Ansprüche an Lokalisation in 3/2-Stereo wird kritisch hinterfragt.

Diese Thematik verlangt bei der Suche nach neuen Erkenntnissen nach konkreten Fragestellungen und überschaubaren Betätigungsfeldern.

So wurde versucht, die spezielle Art der Abbildung mit L-C-R-Hauptmikrofonen zu untersuchen, ohne dabei den Bogen fürs ganze zu verlieren. „L-C-R-Hauptmikrofon“ steht dabei als Oberbegriff für Mikrofonsysteme, die nach den bekannten Gesetzen Abbildung zwischen den vorderen drei Lautsprechern einer 3/2-Stereo-Anordnung erzeugen.

Der Vergleich unterschiedlicher Systeme dieser Art, im speziellen INA3 und OCT, mit konventioneller Zweikanaltechnik (ORTF) gibt Aufschluß über die neu entstandenen Möglichkeiten und Probleme.

Diese Arbeit stellt die Beschreitung eines Pfads bei der Suche nach „optimaler“ Abbildung dar. Sie versucht, einige interessante Aspekte zu beleuchten und läßt auf Konsequenzen für die Mehrkanal-Mikrofonierung schließen. Die praktische Relevanz ihrer Ergebnisse muß die Aufnahmepraxis im konkreten Fall bestimmen.

Kapitel 1

Psychoakustische Grundlagen

1.1. Lokalisation im natürlichen Schallfeld

1.2. Prezedenzeffekt

1.3. Summenlokalisation

1.4. Assoziationsmodell

1.4.1. Prinzip

1.4.2. Ortsassoziationsstufe

1.4.3. Gestaltassoziationsstufe

1.4.4. Grenzen der Lokalisationsreiztrennung

1.1. Lokalisation im natürlichen Schallfeld

Unter Lokalisation versteht man nach Blauert [Blauert 1974] ein

„Zuordnungsgesetz (...) zwischen dem Ort eines Hörereignisses (...) und einem bestimmten Merkmal (...) eines Schallereignisses oder eines anderen, mit dem Hörereignis korrelierten Ereignisses.“

„Dabei entsteht das Hörereignis außerhalb des Kopfes im Gegensatz zur Lateralisation.“
[Theile 1980]

Die Lokalisation beruht auf dem Vorhandensein von speziellen, einer bestimmten Hörereignisrichtung eigenen Merkmalen. Diese sind die

- Freifeldübertragungsfunktion des äußeren Ohrs: Der Einfluß von Außenohr, Kopf und Rumpf bei der spektralen Bewertung eines Hörereignisses
- interaurale Übertragungsfunktion: Der spektrale Unterschied zwischen den Ohrsignalen

Das heißt, das Gehör zieht zur Lokalisation sowohl die Qualität eines einzelnen Ohrsignals als auch die Differenz zwischen den beiden Ohrsignalen heran.

Dabei sind innerhalb der interauralen Übertragungsfunktion zwei spezielle Merkmale vorhanden, die für das Richtungshören in der Horizontalebene entscheidend sind:

- a) interaurale Zeitdifferenzen (ITD = interaural time difference)
Laufzeitunterschiede zwischen den beiden Ohren
- b) interaurale Pegeldifferenzen (IAD = interaural amplitude difference)
Unterschiede der beiden Ohrsignale oder deren Anteile bezüglich ihres mittleren Schalldruckpegels

Diese beiden Funktionen bestimmen nach bestimmten Regeln die Richtung eines Hörereignisses in der Horizontalebene. Dabei treten a) und b) allerdings nie getrennt auf, so daß eine getrennte Auswertung einen unnatürlichen Fall darstellt. Bei solchen Auswertungen erzielt man nicht die Ergebnisse, die eine Messung im natürlichen Schallfeld ergeben würde. Außerdem treten im natürlichen Schallfeld weder reine Töne noch unnatürliche Signaldifferenzen auf.

zu a) interaurale Zeitdifferenzen:

Die größte interaurale Laufzeitdifferenz im natürlichen Schallfeld ist ungefähr 630 μ s. Das entspricht der Laufzeitdifferenz eines Signals genau in der Richtung der Hörachse, also der Verbindung beider Ohren. Der Phasenunterschied, den eine bestimmte Schallwelle dadurch erfährt, ist abhängig von der jeweiligen Wellenlänge. Das Gehör wertet bei reinen Tönen die Laufzeit zwischen zwei gleichen Flanken beider Ohrsignale aus. Es entscheidet sich dabei immer für die der Median-Ebene nähere Hörereignisrichtung, also den geringeren Laufzeitunterschied zwischen zwei gleichen Signalflanken. Diese Auswertung stimmt nur bei Signalen der Wellenlänge

$$\frac{l_{\min}}{2} > 21\text{cm} \Rightarrow \frac{T}{2} > 630\mu\text{s} \Rightarrow f < 800\text{ Hz}$$

Bei reinen Tönen über 800 Hz sinkt der Grad der Auslenkung in Abhängigkeit von der Zeitdifferenz ab, bis bei Frequenzen ab 1600 Hz keine Auslenkung durch interaurale Zeitdifferenzen mehr feststellbar ist.

Werden allerdings nicht reine Töne, sondern breitbandigere Testsignale verwendet, so stellt man fest, daß auch über 1600 Hz noch unveränderte Auslenkung besteht. Es werden nun die Signalhüllkurven zur Auswertung herangezogen, also das entstehende Signal nach Gleichrichtung und Tiefpaßfilterung.

zu b) interaurale Pegeldifferenzen:

Die größte interaurale Pegeldifferenz im natürlichen Schallfeld ist frequenzabhängig.

Bei tiefen Frequenzen sind die interauralen Pegeldifferenzen sehr klein, die Signale erfahren durch Beugung keine Intensitätsminderung. Mit steigender Frequenz wachsen die interauralen Pegeldifferenzen auf bis zu etwa 16 dB an, die Signalanteile solcher Frequenzen erfahren durch Kopf und Ohrmuschel deutliche Unterschiede.

Der Grad der Auslenkung in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz reiner Töne ist maximal für Frequenzen um 2 kHz. Er sinkt etwas für höhere und tiefere Frequenzen.

Die entscheidenden Merkmale, die zum Richtungshören im freien Schallfeld herangezogen werden, sind je nach Frequenz unterschiedlich gewichtet:

- interaurale Zeitdifferenzen der Trägerfrequenz bis 1,6 kHz
- interaurale Hüllkurvenverschiebungen ab etwa 500 Hz
- interaurale Pegeldifferenzen bei allen Frequenzen (existieren allerdings im natürlichen Schallfeld erst bei höheren Frequenzen)

1.2. Prezedenzeffekt

Weiteren gewichtigen Einfluß auf die Wahrnehmung der Hörereignisrichtung hat der Prezedenzeffekt (früher: Haas-Effekt, Gesetz der ersten Wellenfront).

Der Prezedenzeffekt bewirkt, daß zeitlich zuvorkommende Signale gegenüber zeitlich nacheilenden bevorzugt werden, auch wenn jene einen höheren Pegel haben.

Die Eigenschaften des wahrgenommenen Signals gleichen allerdings nicht denen des ohne nacheilender „Reflektion“ dargebotenen Signals.

Der Prezedenzeffekt ist signalabhängig wirksam ab einer Laufzeitdifferenz von etwa 2,0 ms. Ab dieser Differenz ändert sich bei Vergrößerung der Differenz kaum etwas in Bezug auf die Wahrnehmung des Testsignals. Erst bei Eintreten des Echoeffekts (signalabhängig ab ca. 20ms) ist wieder eine Veränderung der Wahrnehmung bemerkbar.

Der Prezedenzeffekt wird auch in der Lautsprecherstereofonie zur Richtungs-darstellung von Klangkörpern benutzt.

1.3. Summenlokalisierung

Die Theorie der Summenlokalisierung sagen aus, daß die Signale der Lautsprecher sich an den Ohren jeweils genau so addieren, daß die *resultierenden* Ohrsignale schließlich den Ohrsignalen bei Beschallung durch eine reale Schallquelle am Ort der Phantomschallquelle gleichen.

Dies ist jedoch, wie Theile [Theile 1980] in seinen Einwänden zur Summenlokalisierungstheorie aussagt, nur bei schmalbandigen Signalen der Fall. Ist das Signal genügend breitbandig, ist keine Korrelation der Ohrsignale in diesen beiden Fällen mehr zu erkennen. Somit ist für die Gesetze der Stereofonie, wo hauptsächlich hinreichend breitbandige Signale vorkommen, die Summenlokalisierungstheorie nicht anwendbar.

Das Summieren von Lautsprechersignalen und das daraus folgende Entstehen von Kammfiltereffekten ist jedoch trotzdem in gewissen Fällen möglich. (→Kap. 1.4.4.)

1.4. Assoziationsmodell

1.4.1. Prinzip

Theile entwickelte 1978 das sog. Assoziationsmodell [Theile 1980], mit dem die psychoakustischen Eigenschaften des menschlichen Gehörs bei der Lokalisation insbesondere im überlagerten Schallfeld erklärt werden sollten.

Es beruht auf der Hypothese, daß Assoziationsvorgänge ein Grundprinzip bei der Lokalisation bestimmter Signale darstellen. So sind, getrennt voneinander, zwei Mustererkennungsstufen vorhanden, die unterschiedliche Aufgaben wahrnehmen.

Die *ortsbestimmende* Assoziationsstufe versucht, bestimmte Signalanteile des Gehörten als Lokalisationsreiz zu deuten, das heißt, sie vergleicht es mit erlernten Mustern, die jeweils durch Erfahrung einem bestimmten Schallquellenort zugeordnet sind.

Die *gestaltbestimmende* Assoziationsstufe kann nun unabhängig von der räumlichen Information des Signals die inhaltliche Auswertung des Lokalisationsreizes übernehmen.

Vorraussetzung für die erfolgreiche Diskrimination der Lokalisationsreize ist hinreichende Breitbandigkeit der Signale und ausreichend vorhandene Unterschiede zwischen mehreren, gleichzeitig vorhandenen Signalen.

Andernfalls findet ein gleitender Übergang zur Summenlokalisierung (→ Kap.1.3.) statt.

1.4.2. Ortsassoziationsstufe

Ein Lokalisationsreiz kommt nur zustande, wenn *genügend breitbandige* Ohrsignale sich einem einzigen Hörereignisort zuordnen lassen. Die Unterscheidung der Hörereignisorte im Mustervorrat erfolgt durch die bekannten interauralen Merkmale wie Laufzeitunterschied und spektralen Zusammensetzungen. Dabei kann sowohl auf gespeicherte Merkmale bestimmter Hörereignispositionen zurückgegriffen werden als auch eine Kombination mit anderen spezifischen Systemen wie Seh- und Gefühlssinn eingegangen werden.

Die Ortsassoziationsstufe diskriminiert bei erfolgtem Lokalisationsreiz daraufhin die für einen Schallquellenort charakteristischen Signalanteile (Lokalisationsreizselektion).

Das erfolgt mit einem steuerbaren Filter, das spektral invers zur Wirkung des Außenohrs in der erkannten Hörereignisrichtung arbeitet. So ist die

Ortsassoziationsstufe auch in der Lage, verschiedene Signale voneinander zu trennen, z.B. um einen anderen Lokalisationsreiz gleichzeitig zu verarbeiten

Nun liegen die „von der Wirkung des Außenohrs und der binauralen Gestalt des menschlichen Gehörs befreien“ Signale vor und können der Gestaltassoziationsstufe weitergegeben werden.

Die Lokalisationsreizselektion ist allerdings nur wirksam, wenn dem Gehör genug unterschiedliche Informationen über die verschiedenen Schallquellenpositionen vorliegen.

Andernfalls setzt sie zunehmend aus und es entsteht eine normale Überlagerung der Anteile der verschiedenen Schallquellen an den Ohren, also Summenlokalisierung mit der dazugehörigen, meßbaren Verfärbung durch Kammfiltereffekte.

1.4.3. Gestaltassoziationsstufe

Die gestaltbestimmende Assoziationsstufe kann unabhängig von der räumlichen Information des Signals die inhaltliche Auswertung des Lokalisationsreizes übernehmen. Dabei wird wieder mit gespeicherten Mustern verglichen.

Es können verschiedene Kombinationen eintreten:

- d) zwei Signale unterschiedlicher Ortsbestimmtheit ergeben dieselbe Gestalt:
 - a1) die Signale sind hinreichend ähnlich: Die Signale verschmelzen zu einer gemeinsamen, mittleren räumlichen Information
 - a2) ein Signal ist wesentlich lauter und/oder eilt dem anderen erheblich voraus: Das eine Signal erhält gegenüber dem anderen ein stärkeres Gewicht, das andere wird weitestgehend ausgeblendet (*Lokalisationsreizdominanz*)
- e) zwei Signale gleicher Ortsbestimmtheit ergeben unterschiedliche Gestalt: Die unterschiedlichen Signale werden, entsprechend ihrer Gestalt, getrennt voneinander wahrgenommen.

Das ergibt für die Lautsprecherstereofonie folgende Konsequenzen:

- Mehrere unterschiedliche Schallquellenorte (Lautsprecher) rufen mehrere Lokalisationsreize hervor. Zur Verschmelzung kommt es, wenn die Signale hinreichend ähnlich sind, das heißt, sich nur durch kleine Laufzeit- oder

Pegeldifferenzen unterscheiden. Die entstehende fiktive Schallquelle heißt Phantomschallquelle.

- Wird es z.B. durch Kunstkopfsignale mit Crosstalk Canceller erreicht, daß nur ein Lokalisationsreiz entsteht, so ist die fiktive Schallquelle eine Ersatzschallquelle (oder auch virtuelle Schallquelle)
- Es kommt nicht zur Kammfilterwirkung bei der Überlagerung zweier gleicher Lautsprecher-signale, wenn die Lautsprecher-signale einzeln diskriminiert werden können.
- Durch die Mittelwertbildung des Schallquellenorts bei der Verschmelzung zweier Lokalisationsreize entsteht der Phantomschallquellenort in der selben spektralen Zusammensetzung wie der Mittelwert der beiden getrennten Signale. Dieser stimmt nicht mit der spektralen Zusammensetzung der Realschallquelle an diesem Ort überein. → Elevation (Kapitel 2.2.3. und 6.3.3.)

Das Assoziationsmodell liefert auch eine Interpretation des *Prezedenz-Effekts* als „Gesetz des dominierenden Lokalisationsreizes“. In diesem Fall werden zwei Lokalisationsreize derselben Gestalt zugeordnet und es entsteht nur ein Hörereignis.

1.4.4. Grenzen der Lokalisationsreizselektion

Lokalisationsreizselektion ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche Richtungsdiskrimination und daraus folgend richtige Gestalterkennung. Das heißt auch, sie ist Voraussetzung für das Ausblenden von Kammfiltereffekten und für richtige Entfernungswahrnehmung.

Bei gestörter Lokalisationsreizselektion geschieht ein gleitender Übergang zur Summenlokalisierung, das heißt mehr und mehr werden die tatsächlichen, nicht interpretierten, aus überlagerten Signalen bestehenden Ohrsignale wahrgenommen.

Vorraussetzungen für ungestörte Lokalisationsreizselektion sind:

- die den Schallquellenpositionen zugeordneten Laufzeit- und Pegeldifferenzen, die sich an einem Ohr überlagern, dürfen nicht unter eine bestimmte Schwelle sinken
- das Signal muß ausreichend breitbandig sein
- Lokalisationsreizselektion ist bei Signalanteilen unterhalb etwa 500 Hz nicht mehr möglich

→ Konsequenzen für die Lautsprecherstereofonie:

Die Trennung der Lokalisationsreize wird zunehmend schwerer bei

- geringerem Öffnungswinkel der Lautsprecherbasis
- seitlicher Verschiebung der Basismitte

Diese Faktoren wären beim 3/2-Standard gegenüber der 2/0-Anordnung erfüllt. Inwiefern das zu einer Beeinträchtigung des Hörereignisses führen kann, wird in Kapitel 2 und 8 untersucht.

Kapitel 2

Die Phantomschallquelle

2.1. Einleitung

2.2. Verschiedene Parameter einer Phantomschallquelle

2.2.1. Entstehung

2.2.2. Abbildungsschärfe

2.2.3. Elevation

2.2.4. Klangfarbe

2.2.5. „dreikanaliges Klangbild“/ „Mehrfachabbildungen“

2.3. Auslenkung der Phantomschallquelle

2.3.1. Auslenkungsrelevanter Vergleich Zweikanal-Mehrkanal in Bezug auf die Bildung frontaler Phantomschallquellen

2.3.2. Auslenkung durch Pegeldifferenz ΔL

2.3.3. Auslenkung durch Laufzeitdifferenz Δt

2.3.4. Kombination Pegel- und Laufzeitdifferenz

2.3.5. Vergrößerung der Hörzone, Stabilität der Abbildung

2.4. Vorversuche zum Klangcharakter einer Phantomschallquelle

2.4.1. Klangrelevanter Vergleich Zweikanal-Mehrkanal in Bezug auf die Bildung frontaler Phantomschallquellen

2.4.2. Verkleinerung des Öffnungswinkels, Klangfarbe, Vorversuch 2A

2.4.3. Verkleinerung des Öffnungswinkels, Lokalisationsschärfe, Vorversuch 2B

2.4.4. Beteiligung aller 3 Lautsprecher („dreikanaliges Klangbild“), Vorversuch 3

2.4.5. Zusammenfassung

2.1. Einleitung

Die Phantomschallquelle, deren Eigenschaften von vielen Parameter beeinflusst wird, ist Gegenstand der Untersuchungen dieses Kapitels.

Dabei wird auf die beiden wesentlichen Eigenschaften einer Phantomschallquelle eingegangen: *Charakter* und *Ort*.

Abschnitt 2.2. gibt eine Sammlung einiger mit dem Phänomen Phantomschallquelle zusammenhängenden Parameter.

Abschnitt 2.3. behandelt den Ort der erzeugten Phantomschallquelle.

In Abschnitt 2.4. wird näher auf Vorversuche zum Klangcharakter der Phantomschallquelle eingegangen.

2.2. Verschiedene Parameter einer Phantomschallquelle

2.2.1. Entstehung

„Eine Phantomschallquelle entsteht, wenn mehrere Schallereignisse einem gemeinsamen Hörereignis zugeordnet sind, so daß Hörereignisort und Schallquellenorte nicht übereinstimmen.“ [Theile 1980]

Dabei kommt „der Hörereignisort als Folge von wenigstens zwei Lokalisationsreizen zustande“.[Theile 1984]

Die fiktive Schallquelle kommt zustande, indem zwei oder mehrere Lokalisationsreize derselben Gestalt zugeordnet werden. Es kommt zur Verschmelzung und dadurch entsteht ein von den Pegel- und Laufzeitdifferenzen der Lokalisationsreize abhängiger gemeinsamer Hörereignisort.

Die Gesetze der Reizverschmelzung bzw. Reizdominanz bestimmen die Auslenkung der Phantomschallquelle bzw. die Unterdrückung eines der Signale. (→ Kap. 1.4.)

Die Klangfarbe der Phantomschallquelle und weitere direkt mit der Phantomschallquelle verbundene Eigenschaften wie Ausdehnung, Abbildungsschärfe und Entfernungseindruck sowie Stabilität hängen in hohem Maße von der Art der Entstehung der Phantomschallquelle ab. Durch unterschiedliche Arten erzeugte Phantomschallquellen am selben Ort können große Unterschiede aufweisen.

Bei einer 3/2-Stereo-Anordnung läßt sich beispielsweise auf folgende Arten eine Phantomschallquelle bei etwa $-7,5^\circ$ erzeugen:

Basis	Art der Signaldifferenz(-en)	Signaldifferenz(-en)
L-R	Pegelunterschied	$\Delta L(L/R) = 3 \text{ dB}$; $\Delta t(L/R) = 0$;
L-R	Laufzeitunterschied	$\Delta L(L/R) = 0 \text{ dB}$; $\Delta t(L/R) = -0,2 \text{ ms}$;
L-R	komb. Pegel- und Laufzeitunterschiede	$\Delta L(L/R) = 1,5 \text{ dB}$; $\Delta t(L/R) = -0,1 \text{ ms}$;
L-C	Pegelunterschied	$\Delta L(L/C) = -6 \text{ dB}$; $\Delta t(L/C) = 0$;
L-C	Laufzeitunterschied	$\Delta L(L/C) = 0 \text{ dB}$; $\Delta t(L/C) = 0,4 \text{ ms}$;
L-C	komb. Pegel- und Laufzeitunterschiede	$\Delta L(L/C) = -3 \text{ dB}$; $\Delta t(L/C) = 0,2 \text{ ms}$;
L-C-R	komb. Pegel- und Laufzeitunterschiede	$\Delta L(L/C) = -3 \text{ dB}$; $\Delta t(L/C) = 0,2 \text{ ms}$; $\Delta L(C/R) = 6 \text{ dB}$; $\Delta t(C/R) = 1,0 \text{ ms}$;
L-C-R	komb. Pegel- und Laufzeitunterschiede	$\Delta L(L/R) = 1,5 \text{ dB}$; $\Delta t(L/R) = -0,1 \text{ ms}$; $\Delta L(L/C) = 9 \text{ dB}$; $\Delta t(L/C) = -1,0 \text{ ms}$;
...

Tabelle 2.1.: theoretische Aufstellung der möglichen Signaldifferenzen für die Entstehung einer Phantomschallquelle bei $-7,5^\circ$ (\rightarrow Kap. 2.3.)

Diese auf verschiedene Art erzeugten Phantomschallquellen am selben Ort zeigen große Unterschiede bezüglich ihrer Eigenschaften.

Kapitel 2.4. weist einige Vergleiche zwischen der Bildung einer (Phantom-) Schallquelle durch 1, 2 oder 3 Lautsprecher auf.

Die Wahl der Entstehungsart der Phantomschallquellen hängt wesentlich von der Intention des Tonmeisters ab. So kann eine mittels Panoramapotiometer erzeugte, also nur durch Pegeldifferenzen ausgelenkte Phantomschallquelle hohe Abbildungsschärfe bieten. Dies wird erwünscht, wenn der Klang eines Stützmikrofons als dominantes Signal mit hoher Abbildungsschärfe in den Vordergrund gerückt werden soll.

Eine andere Möglichkeit ist eine „natürliche“ Einbindung von Stützmikrofonen in den Klang eines Hauptmikrofons. In [Wöhr et al. 1988] wird dafür eine Kombination aus gleichsinnig wirkenden Pegel- und Laufzeitdifferenzen empfohlen.

Ein Stützsinal kann weiterhin mit noch aufwendigeren Mitteln bearbeitet werden, um bestimmte Ziele zu verfolgen.

Zu Verfügung stehen zum Beispiel:

- Laufzeitpanning
- Kombiniertes Pegel- und Laufzeitpanning
- Hinzufügen von spektralen Merkmalen, z.B. auf Basis von KFM- oder HRTF-Funktionen
- Hinzufügen von Reflexionen, Hall
- etc.

2.2.2. Abbildungsschärfe

Die **Abbildungsschärfe** einer Phantomschallquelle bezeichnet die Präzision, mit der eine Phantomschallquelle wahrgenommen werden kann. Die Bezeichnung Abbildungsschärfe ist die einer Abbildung zwischen Lautsprechern zugeordnete Lokalisationsschärfe. Ihr Optimum wird durch die Wiedergabe in einem einzelnen Lautsprecher erreicht. Die Abbildungsschärfe ist sowohl von der Art der Entstehung einer Phantomschallquelle und dem Testsignal als auch der Wiedergabeeinrichtung [Ripka 1987] abhängig.

Die Abbildungsschärfe kennzeichnet die räumliche Auflösung einer Aufnahme. Sie ist wesentlich mitverantwortlich dafür, wie gut z.B. der Aufnahmeparameter „räumliche Durchhörbarkeit“ gestaltet werden kann.

Die Abbildungsschärfe wird im allgemeinen auf zwei Arten gemessen. Zum einen können geübte Hörer direkt nach diesem Parameter befragt werden, zum anderen kann auch die Streuung der Richtungsangaben aller Versuchsteilnehmer Rückschlüsse auf die Abbildungsschärfe ermöglichen.

Die Abbildungsschärfe ist unter anderem wesentlich abhängig von

- der Art des Signals
- der Art der Erzeugung der Phantomschallquelle (→ Kap.2, 7)
- der Abhörposition (→ Kap.7)

So ist bekannt, daß gilt:

- bei durch Pegeldifferenzen erzeugten Phantomschallquellen nimmt die Abbildungsschärfe mit wachsendem ΔL zu. Bei großen ΔL erfolgt Ortung nur in einem Lautsprecher mit der Abbildungsschärfe eines einzelnen Lautsprechers

- bei durch Laufzeitdifferenzen erzeugten Phantomschallquellen nimmt die Abbildungsschärfe mit wachsendem Δt ab. Größere Werte für Δt ergeben unscharfe Abbildung. Bei großen Δt ab etwa 2 ms wirkt der Prezedenz-Effekt und der verzögerte Lautsprecher wird nicht mehr geortet. Die Ausdehnung der Phantomschallquelle ist allerdings erhöht gegenüber dem einzelnen Lautsprecher.
- Bei **kombinierten** Pegel- und Laufzeitdifferenzen kann die Abbildungsschärfe erhöht werden, da für dieselbe Auslenkung gegenüber der rein laufzeitbasierten Auslenkung weniger große Δt benötigt werden. Durch wachsendes ΔL kann auch der Verlust der Abbildungsschärfe für größere Auslenkungen verringert werden. In [Theile 1984] wird erhöhte Abbildungsschärfe bei gleichsinnig kombinierter Auslenkung mit der Parallelität zu Lokalisationseigenschaften des menschlichen Gehörs im natürlichen Schallfeld begründet. (z.B. Kugelfläche)

Wie an den Ergebnissen von Untersuchungen an der McGillUniversity [Martin et al. 1999] zu sehen ist, gelten ähnliche Bedingungen auch bei der Lokalisation zwischen zwei benachbarten Lautsprechern nach der 3/2-Stereoanordnung.

Die Urteilsunsicherheit, gemessen als Streuung der von den Testpersonen angegebenen Orte ist für die laufzeitbasierten Phantomschallquellen höher als für die pegelbasierten.

Siehe Abbildungen in Kapitel 2.3..

2.2.3. Elevation

Elevation bezeichnet die vertikale Winkelabweichung der wahrgenommenen Phantomschallquellenposition aus der Horizontalebene der Lautsprecher.

Eine Elevation der Phantomschallquelle ergibt sich durch die seitliche Anordnung der Lautsprecher. Sie „resultiert aus den spektralen Merkmalen der Lokalisationsreize“. „Das wirksame Spektrum für die Elevation ist nicht das *resultierende* Spektrum der Ohrsignale, sondern das *mittlere* Spektrum der beiden Ohrsignale, die die Lautsprechersignale einzeln erzeugen.“ [Theile 1980]

Das bedeutet, daß bei einer Verkleinerung des Öffnungswinkels einer Lautsprecherbasis auch die Elevation kleiner werden muß, da der Abstand Lautsprecher - Phantomschallquelle abnimmt. Durch eine Mischung zwischen Phantom- und Realschallquelle verringert sich die Elevation in entsprechendem Maße, wie aus den Ergebnissen des Hauptversuchs abzuleiten sein könnte.(→Kap. 6.3.3.)

Elevation ist allerdings nicht der einzige Ortsunterschied zwischen verschiedenen erzeugten Phantomschallquellen derselben Auslenkung. Es wird manchmal wesentlich deutlicher eine Änderung des *Entfernungseindrucks* wahrgenommen, das heißt die Phantomschallquelle wandert nicht nur nach oben, sondern verschiebt sich auch nach vorne oder hinten.

2.2.4. Klangfarbe

In den Untersuchungen der McGillUniversity [Martin et al. 1999] wird neben den Ergebnissen von Lokalisationshörtests für die 3/2-Stereo-Aufstellung auch von neuen Phänomenen berichtet: So sind Klangverfärbungen in Folge von Kammfiltereffekten bei den verkleinerten Basen L-C, C-R wahrnehmbar, was wiederum zu Nachteilen bei laufzeitbasierter Phantomschallquellenbildung führt.

Als Grund wird die größere Wahrnehmbarkeit von Kammfiltereffekten wegen der fehlenden Abschattung des Center-Lautsprechers an den Ohren angegeben.

Diese Beobachtungen konnten auch in eigenen Hörerfahrungen gemacht werden, und starke Abweichungen der Klangfarbe mögen auch die Wahrnehmung des Hörereignisorts beeinträchtigen.

So stellte z.B. Gernemann in [Gernemann 1999] bei Hörversuchen fest, daß die Auslenkung innerhalb der seitlichen Lautsprecherbasen unsymmetrisch verläuft. Auch die Ergebnisse der McGillUniversity sind im Bereich kleiner Laufzeitdifferenzen leicht abweichend zum äußeren Lautsprecher gezogen.

Gerade die Variation kleiner Laufzeitdifferenzen zwischen zwei kohärenten Signalen auf zwei benachbarten Lautsprechern erzeugt starke Klangfarbenschwankungen. Dieser Effekt ist bei Zweikanalaufstellung nicht in diesem Maße feststellbar. (→ Kap. 2.4)

Ebenfalls erheblichen Einfluß auf die Klangfarbe hat der Effekt eines „dreikanaligen Klangbilds“ (Phänomene bei einer durch die die wesentliche Beteiligung dreier Schallquellen entstehenden Phantomschallquelle → nächstes Kapitel 2.2.5.).

Gerzon empfiehlt in seinen „Panpot Laws for Multispeaker Stereo“ [Gerzon 1992,1] ein bestimmtes Panning-Verfahren für die drei vorderen Lautsprecher, bei dem maximale „Consistence“ erreicht wird, das heißt möglichst genaue Übereinstimmung der durch die verschiedenen Lokalisationsmechanismen wahrgenommenen Hörereignisrichtungen (Schnelle- und Energielokalisationsvektor, siehe [Gerzon 1992,2]). Allerdings geschieht

dies auf Kosten der Stabilität der Abbildung und möglicherweise auch der Klangfarbe, da nun immer alle drei Lautsprecher an der Abbildung beteiligt sind.

Das Assoziationsmodell gibt keine Antworten auf die Frage nach dem entstehenden *Charakter* der Phantomschallquelle. Lokalisationsreizdominanz kann unterschiedliche Ursachen haben, und es ergeben sich auch völlig verschiedene Eigenschaften.

Das wahrgenommene Spektrum der Phantomschallquelle entsteht nach dem Assoziationsmodell aus dem mittlere Spektrum der beteiligten Lokalisationsreize. Das gibt aber noch keine Antwort auf verschiedene Eigenschaften der Phantomschallquelle wie Änderung des Entfernungseindrucks, Wirkung von Kammfiltereffekten, Änderung der Ausdehnung, Änderung der Lokalisationsschärfe, Wahrnehmung von verzögerten Signalen, etc. .

Eine Erklärung für manche klangverändernde Effekte könnte sein, daß durch ungenügende oder teilweise schlechte Lokalisationsreizselektion (→Assoziationsmodell Kap.1.4.) zunehmend Summenlokalisierung an dessen Stelle tritt und damit Kammfiltereffekte und Klangverfärbungen auftreten und die Wahrnehmung der Entfernung beeinträchtigt wird.

Senden zwei Lautsprecher das selbe Signal zum selben Zeitpunkt aus, treffen die beiden Lautsprechersignale zu unterschiedlichen Zeitpunkten an einem Ohr des Hörers an. Dies liegt daran, daß sich jeweils ein einziges Ohr nicht genau am Eckpunkt des gleichseitigen Dreiecks am optimalen Hörort befindet, sondern jeweils weiter links oder rechts. (Man misst dazu den Abstand der Korrelationsmaxima beim Signal weißes Rauschen)

Durch diese Laufzeitdifferenz erhält das Gehör die Möglichkeit, zwischen den verschiedenen durch die Lautsprechersignale ausgelösten Lokalisationsreizen zu unterscheiden. Die Laufzeitdifferenz zwischen dem Eintreffen der beiden Lautsprechersignale an *einem* Ohr beträgt bei Standard-Zweikanalaufstellung etwa 260 μ s. (Das Signal des linken Lautsprechers kommt am linken Ohr 260 μ s früher als das des rechten Lautsprechers.)

Durch zwei Effekte wird nun diese Laufzeitdifferenz gemindert:

- **Verkleinerung des Öffnungswinkels der Lautsprecherbasis**
- **Verschiebung des Basismittelpunkts nach außen**

Daraus resultiert eine Abnahme der Laufzeitdifferenz auf etwa $130\mu\text{s}$:

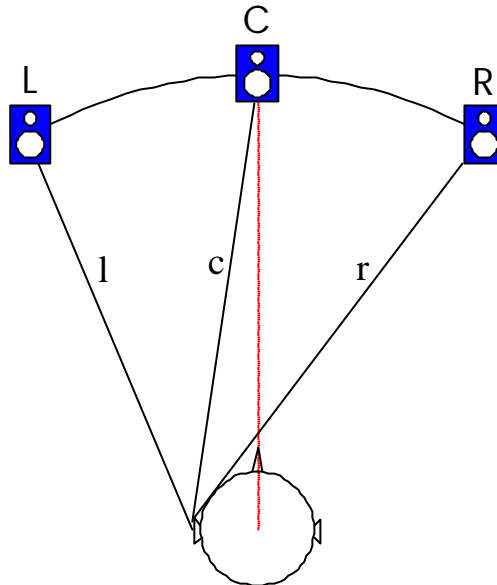


Abbildung 2.1.: Laufwege der verschiedenen Lautsprechersignale

Theile [Theile 1980] gibt die „Verwischungsschwelle“, das heißt eine Grenze, bei der Lokalisationsreize nicht mehr gut genug getrennt werden können, mit etwa $200\mu\text{s}$ an.

Die in den Basen L-C und C-R an einem Ohr auftretenden Laufzeitdifferenzen von etwa $130\mu\text{s}$ wären somit bereits deutlich unter dieser Schwelle. Außerdem sinkt auch der andere zur Trennung benutzte Effekt, nämlich der Unterschied in Pegel und spektraler Zusammensetzung.

Diese rechnerischen Angaben sind in ihrer Größenordnung unabhängig (!) von der gewählten Basisbreite L-R.

Folge wäre durch die zunehmend gestörte Lokalisationsreiztrennung die Zunahme von Summenlokalisierung mit wahrnehmbaren Kammfiltereffekten.

2.2.5. „dreikanaliges Klangbild“

Im 2/0-Stereo-Standard wird eine Phantomschallquelle immer nur durch die Beteiligung zweier Lautsprecher gebildet. Durch den Mehrkanalstandard kann nun eine Phantomschallquelle auch durch mehr als zwei Lautsprecher erzeugt werden.

Diese Entstehungsweise ist allerdings mit Problemen verbunden. Es liegt nun mehr als eine Lautsprecherbasis vor, in der Abbildung erfolgt. Die damit verbundenen „*Mehrfachabbildungen*“ können (ähnlich dem „Clifton-Effekt“) beim Zuschalten eines der Lautsprecher separat wahrgenommen werden. Danach verschmelzen sie schnell zu einem einheitlichen Hörereignis, das in seiner Ausbreitung zunimmt und dessen Abbildungsschärfe sinkt.

Durch im Verlauf dieser Arbeit an einigen Punkten zitierte Effekte wie unvollständige Lokalisationsreizelektion und Entstehung von Kammfiltern wird auch die Wahrnehmung der Klangfarbe beeinträchtigt. (→ Vorversuch 3, Kap.2.4.4.)

Durch die Übertragung eines Signals auf allen drei vorderen Kanälen wird auch die Stabilität einer Abbildung wesentlich vermindert. Durch die Verschiebung der Hörposition in Richtung eines Lautsprechers, wird dieser, auch wenn er eigentlich nicht an der Abbildung beteiligt ist, zunehmend dominant. Diese Verzerrung des Lautsprechersignals tritt schon bei relativ kleinen Bewegungen aus dem „sweet spot“ auf. (→ Kap.2.3.5.)

Einen besseren Ausdruck für diese „Mehrfachabbildungen“ stellt die Bezeichnung „*dreikanaliges Klangbild*“ [Griesinger 2000] dar. Dieser Begriff bezeichnet die Entstehung einer Phantomschallquelle durch die wesentliche Beteiligung aller drei vorderen Lautsprecher. Er steht für alle damit verbundenen Beeinträchtigungen in Bezug auf Klangfarbe, Abbildungsschärfe, Entfernungseindruck, Stabilität etc. .

Ein wesentlicher Teil der theoretischen und experimentellen Ermittlungen dieser Arbeit widmet sich diesem Phänomen.

Ein „dreikanaliges Klangbild“ entsteht bei einer dreikanaligen Mikrofonanordnung durch *Übersprechen* auf das an der Abbildung nicht beteiligte Mikrofon. Wird z.B. Abbildung zwischen L und C gewünscht, so ist der Pegel des Kanals R in diesem Fall der unerwünschte Übersprechpegel. (zum Vergleich zweier Mikrofonanordnungen in diesem Punkt siehe Kap.4.4.2)

2.3. Auslenkung der Phantomschallquelle

2.3.1. Auslenkungsrelevanter Vergleich Zweikanal-Mehrkanal in Bezug auf die Bildung frontaler Phantomschallquellen

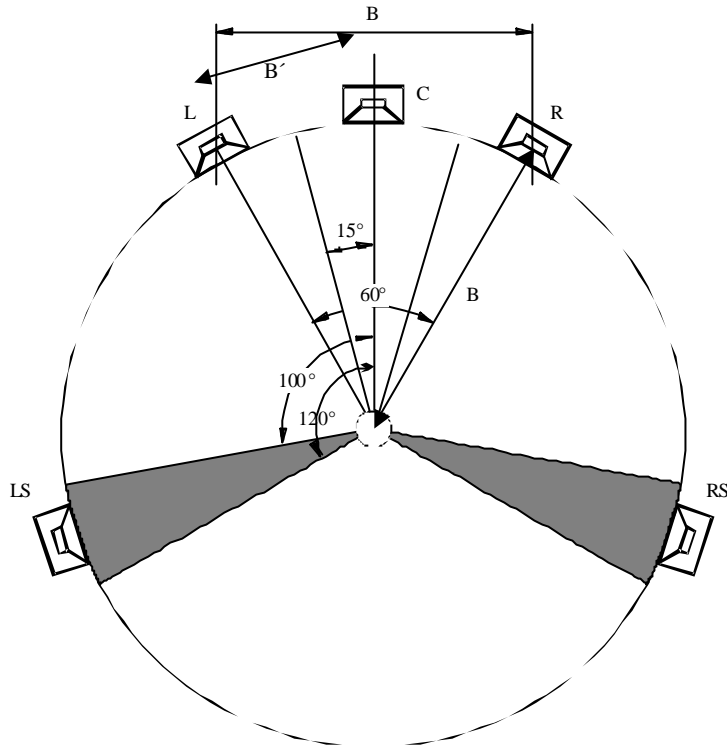


Abbildung 2.2.: 3/2-Stereo-Standard nach SSF-Empfehlung 001[SSF 1998]

	2-Kanal	5-Kanal
Öffnungswinkel der frontalen Lautsprecherbasen	60°	30°
absolute Auslenkung / DL	2,2°/ dB	1,1°/ dB
relative Auslenkung (100% = volle Auslenkung)	entspricht 7,3 % /dB	
absolute Auslenkung / Dt	3,8°/ 0,1 ms	1,9°/ 0,1 ms
relative Auslenkung	entspricht 12,7 % / 0,1ms	

Tabelle 2.3.: Vergleich Anordnung 2/0 mit 3/2 in Bezug auf frontale Phantomschallquellen, Erläuterung der Werte in diesem Abschnitt

2.3.2. Auslenkung durch Pegeldifferenz ΔL

2.3.2.1. Zweikanal, Basis L-R:

Es gelten die bekannten Beziehungen zwischen Pegeldifferenz und Grad der Auslenkung der Phantomschallquelle. So sind etwa 6,5 dB nötig, um 50% Auslenkung zu erreichen (zur Definition der relativen Auslenkung ϕ bezogen auf den halben Öffnungswinkel siehe Kap.9.2.), das entspricht etwa einer Auslenkung von **7,3% /dB** oder bei Standard-Öffnungswinkel von 60°: **2,2° /dB**. Ab etwa 18 dB ist das Signal nur noch im lauterem Lautsprecher zu orten.

Auslenkung der Phantomschallquelle durch Pegeldifferenzen

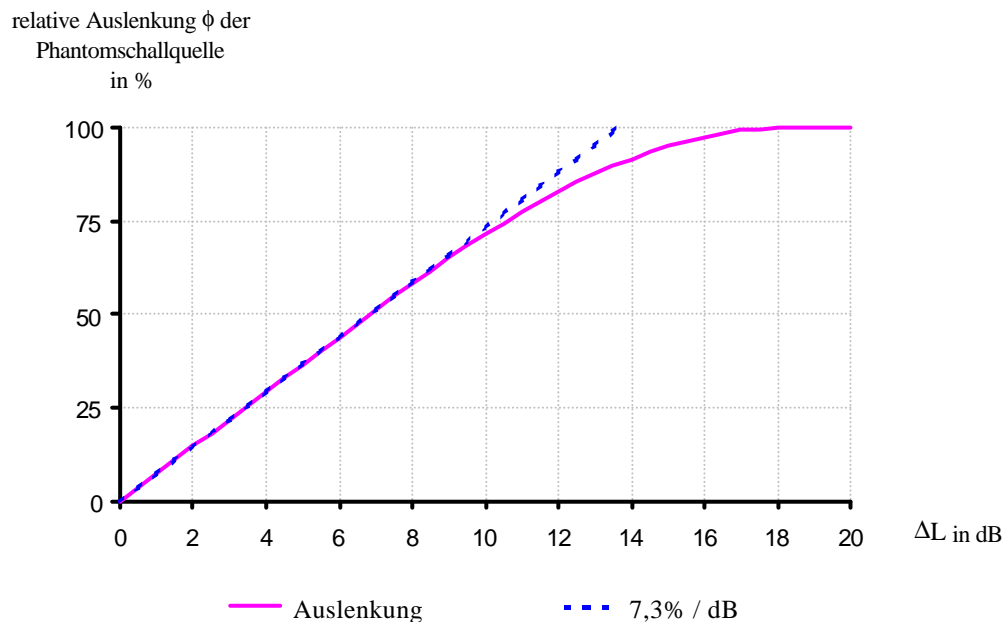


Abbildung 2.3.: relative Auslenkung ϕ in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz ΔL , eigene Grafik

Die Abbildungsqualität ist bei durch Pegeldifferenz gepanteten Signalen sehr gut, die Abbildungsschärfe steigt etwas bei größer werdender Auslenkung aus der Mitte. Der Hörereignischarakter bleibt sehr ähnlich im Bereich von Auslenkungen $\leq 20^\circ$, unterscheidet sich aber vom Klang eines einzelnen Lautsprechers. Untersuchungen dazu [Silzle 1990] ergaben, daß Klangfarbe, Lokalisationsschärfe und Höhenwahrnehmung einer Phantomschallquelle gegenüber der Realschallquelle verändert sind. Dies führt zu ungleicher Qualität der Abbildung von Klangquellen von der linken bis zur rechten Grenze der Phantomschallquellenebene.

2.3.2.2. Mehrkanal (frontale Ebene): L-C, C-R

Nun findet Abbildung in zwei seitlich verschobenen Lautsprecherbasen statt.

Es gibt einige Arbeiten, die sich damit beschäftigt haben, z.B. [Theile, Plenge 1976]. Danach ändert sich bei einer Verschiebung der Lautsprecherbasis bis wenigstens 30° aus der Medianebene nur kaum etwas bezüglich des Grads der Auslenkung in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz.

Eigene Voruntersuchungen bestätigen dies. Es wurden die bereits von Theile [Theile 2000] angegebenen Ergebnisse ermittelt (linearer Verlauf bei kleinen ΔL mit $1,1^\circ / \text{dB}$, das entspricht denselben $7,3\% / \text{dB}$ der Zweikanal-Anordnung).

Die Untersuchungen der McGillUniversity [Martin et al. 1999] bestätigen dies ebenfalls:

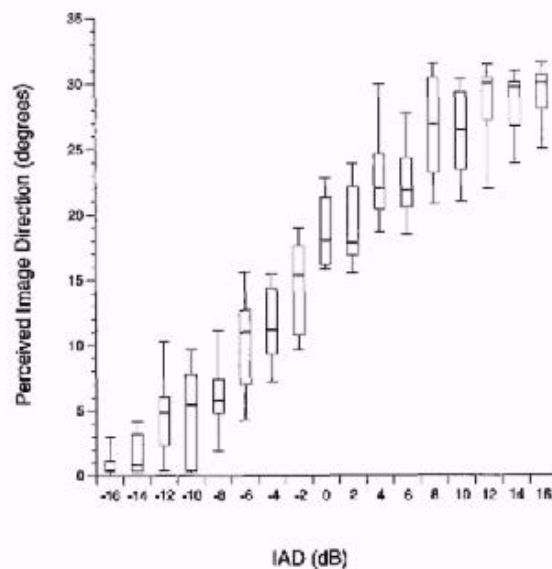


Figure 4 : Perceived direction to phantom image vs. interchannel amplitude difference.
Front pair of adjacent loudspeakers

*Abbildung 2.4.: Auslenkung durch Pegeldifferenz, Basis L-C und C-R,
Zitat aus [Martin et. al 1999]*

Auch durch Änderung der Basisbreite ändern sich die Verhältnisse nicht. [Theile 1980]

2.3.3. Auslenkung durch Laufzeitdifferenz D_t

2.3.3.1. Zweikanal, Basis L-R:

Wird eine Phantomschallquelle durch Laufzeitdifferenzen erzeugt, so gelten bei normaler Zwei-Kanal-Anordnung die allgemein bekannten Beziehungen zwischen Laufzeitdifferenz und Grad der Auslenkung der Phantomschallquelle. Bis zu 0,4 ms Laufzeitdifferenz verläuft die Abbildungskurve linear, bei weiterer Vergrößerung der Verzögerung ändert sich eher Klangfarbe und Ausdehnung und Charakter als der Phantomschallquellenort. Bei eigenen Vorversuchen (\rightarrow Anhang 9.1. Vorversuch 1a) ergab sich ein Wert von **12,7%/ 0,1ms** oder bei Zweikanal-Öffnungswinkel von 60° : **3,8/ 0,1 ms**, das heißt 50% Auslenkung bei ca. 0,4 ms Laufzeitdifferenz. Das liegt etwa im Bereich früherer Untersuchungen.

(Theile: 0,34 ms [Theile 2000], Gernemann (Knack-Signale): 0,24 ms [Gernemann 1999], Sengpiel (Musik): 0,48 ms [Sengpiel 2000], hohe Übereinstimmung mit den Williams-Kurven [Williams 1987] (siehe Kap.3))

Volle Auslenkung bei erheblichen Klangverfärbungen ist schon ab etwa 1,0 ms erreicht, der Charakter des Hörereignisses ändert sich jedoch noch wesentlich bei weiterer Vergrößerung der Laufzeitdifferenz bis 2,0 ms, ab dann ist der Präzedenz-Effekt voll wirksam.

L - R : Auslenkung durch Laufzeitdifferenz

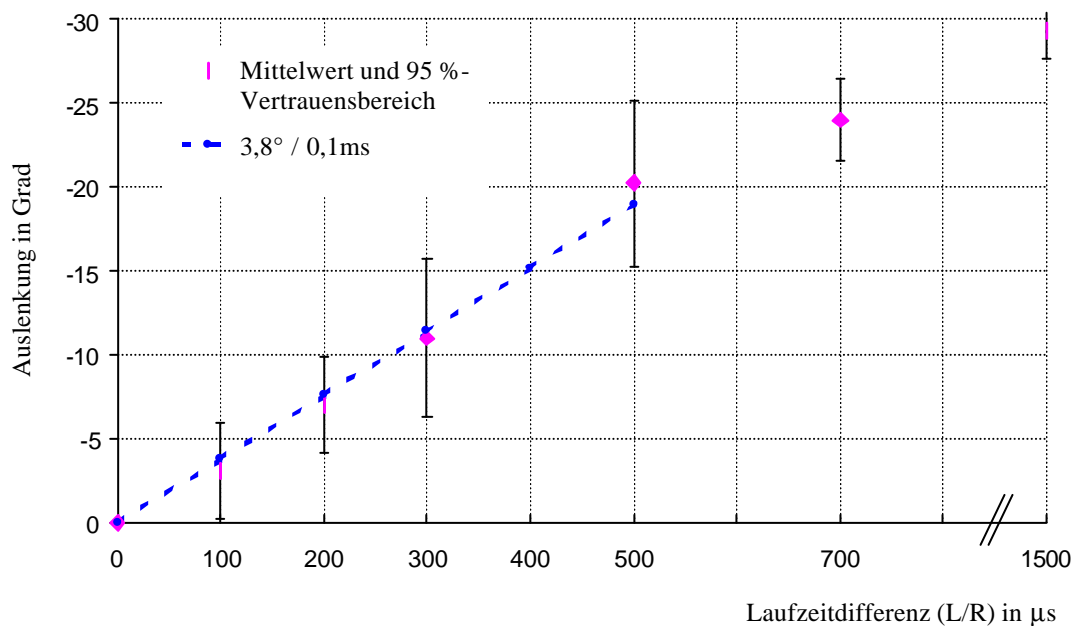


Abbildung 2.5.: Auslenkung in Abhängigkeit von der Laufzeitdifferenz D_t , Basis L-R, Vorversuch 1a

Auslenkung der Phantomschallquelle durch Laufzeitdifferenzen

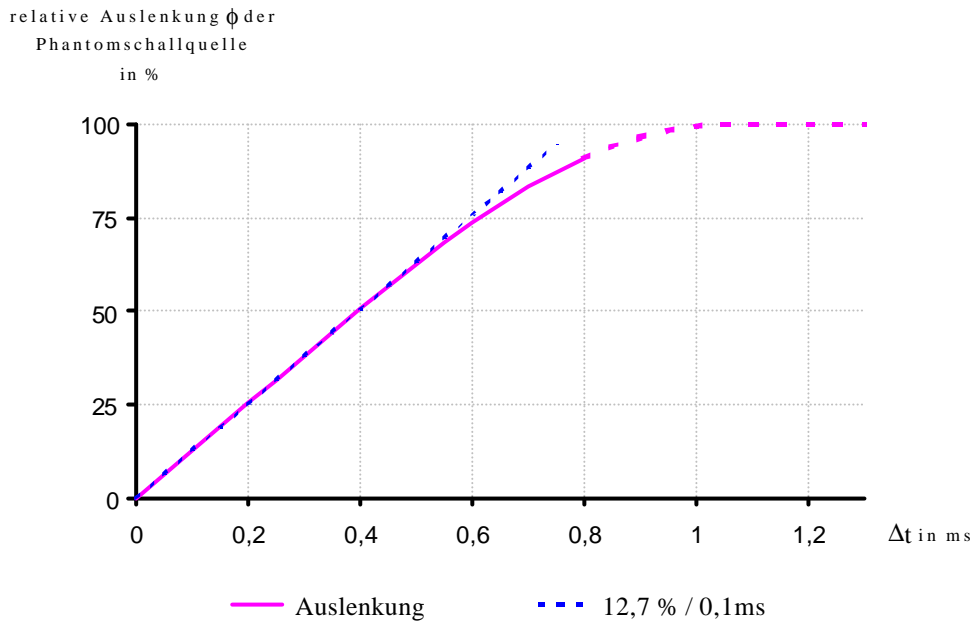


Abbildung 2.6.: relative Auslenkung ϕ in Abhängigkeit von der Laufzeitdifferenz D , gestrichelter violetter Bereich: Anstieg von Unschärfe und Klangverfärbung

Die Abbildungsqualität, bezogen auf die Abbildungsschärfe der Phantomschallquelle, ist bei Laufzeitstereofonie deutlich geringer als bei Intensitätsstereofonie. Sie sinkt mit größer werdenden Laufzeitdifferenzen. Bei Vergrößerung der Laufzeitdifferenz bei maximaler Auslenkung sind deutliche Klangverfärbungen und Abbildungsunschärfe festzustellen.

2.3.3.2. Mehrkanal, Basis L-C, C-R:

Die Ermittlung der nötigen Laufzeitdifferenz zur Erzeugung einer Phantomschallquelle zwischen den seitlichen Lautsprecherbasen L-C, C-R bei mehrkanaliger Anordnung wurde ebenfalls im Vorversuch durchgeführt. (→ Anhang 9.1. Vorversuch 1b)

Die Ergebnisse für Zweikanal-Laufzeitstereofonie sind, wie schon oben genannt, im bekannten Rahmen gewesen. Auch für die Mehrkanal-Anordnung waren der Grad der Auslenkung und die Größe der Werte für Ortung in nur einem Lautsprecher nahe an den für die Zweikanal-Anordnung bekannten Werten (Abbildung 2.8.). Bei einer Lautsprecherbasis von jeweils $\pm 15^\circ$ wurde eine Auslenkung von ca. **1,9°/ 0,1ms** festgestellt, gültig bis zu einer Verzögerung von 0,4 ms. Dies entspricht, wie in der großen Basis, einem Verhältnis von 12,7%/ 0,1 ms. Volle Auslenkung wird ebenso, verbunden mit geringer Lokalisationsschärfe, bereits ab etwa 1,0 ms erreicht.

Asymmetrien in Bezug auf den Grad der Auslenkung wie in [Gernemann 1999] konnten nicht festgestellt werden, es traten aber Asymmetrien in Bezug auf Veränderungen des Klangcharakters auf.

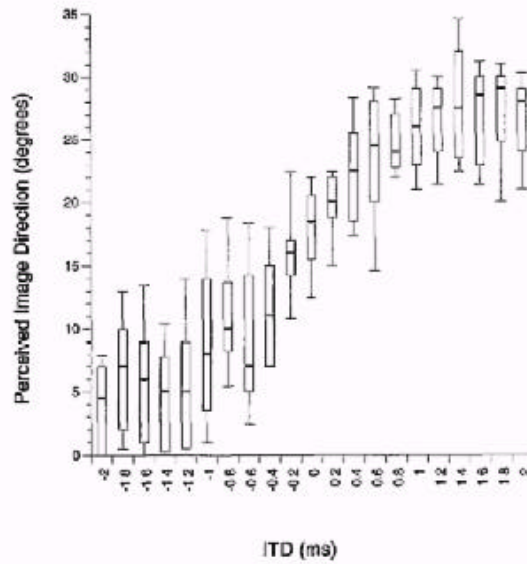


Figure 5 : Perceived direction to phantom image vs. interchannel time difference. Front pair of adjacent loudspeakers

Abbildung 2.7.: Auslenkung durch Laufzeitdifferenz, Basis L-C und C-R, Zitat aus [Martin et. al 1999]

L - C : Auslenkung durch Laufzeitdifferenz

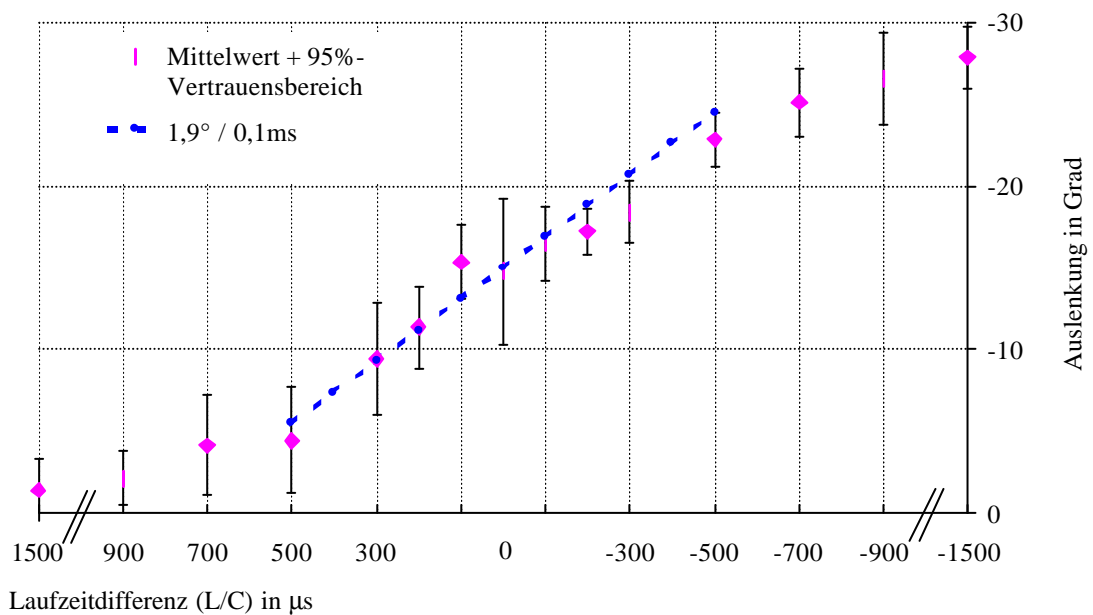


Abbildung 2.8.: Auslenkung durch Laufzeitdifferenz, Basis L-C, Vorversuch 1b

2.3.4. Kombination Pegel- und Laufzeitdifferenz

Bei Äquivalenzmikrofonen, d.h. Mikrofonkombinationen, die Pegel- und Laufzeitdifferenzen erzeugen, sind verschiedene Vorteile anzutreffen. Diese sind zum Beispiel gleichzeitige Optimierung von Lokalisationseigenschaften und Eigenschaften zur Abbildung der Räumlichkeit.

Theile schreibt: $\phi(\Delta L, \Delta t) = \phi(\Delta L) + \phi(\Delta t)$ [Theile 1984].

Das heißt, die Wirkungen von Pegel- und Laufzeitdifferenzen addieren sich, Pegel- und Laufzeitdifferenzen sind auf gleiche Art an der Auslenkung beteiligt. Dies ist im linearen Bereich bei Gesamtauslenkungen bis 50% gültig. Der Verfasser nimmt an, daß sich darüber hinaus nicht die einzeln resultierenden Auslenkungsgrade addieren (das ergäbe auch Werte über 100%), sondern daß die ineinandergerechneten Pegel- und Laufzeitdifferenzen (Umrechnungsfaktor ca. $58\mu\text{s}/\text{dB}$) denselben Verlauf haben wie die rein pegel- oder laufzeitbasierten Lokalisationskurven. Das bedeutet, daß nach einem linearen Bereich wiederum allmählich Sättigung eintritt. Diese Annahme wird in Kapitel 3 erläutert und wurde auch zur rechnerischen Ermittlung der Lokalisationskurven verwendet. (→Kap.3)

Nach Williams [Williams 2000] ist der auch zur rechnerischen Ermittlung der Lokalisationskurven verwendete lineare Zusammenhang von Pegel- und Laufzeitdifferenzen wohl nicht allgemeingültig. Bei gewissen Kombinationen besteht angeblich ein davon abweichender nichtlinearer Zusammenhang, das heißt eine relativ stärkere Wirkung jeweils einer der Signaldifferenzarten.

Positive Einflüsse auf die Abbildungsschärfe durch gleichartige Kombination der Signaldifferenzarten ergeben sich nach [Theile 1984]. (siehe Kap.2.2.2.)

Bei ungleichartigen Kombinationen von Pegel- und Laufzeitdifferenzen gleichen sich die gegenseitigen Wirkungen in gewissen Grenzen (jeweils kleine Werte) aus, allerdings verkleinert sich die Abbildungsschärfe erheblich.

2.3.5. Vergrößerung der Hörzone, Stabilität der Abbildung

Durch die Hinzunahme des Center-Lautsprechers kann die optimale Hörzone („sweet spot“) vergrößert werden.

Dies wurde in [Rebscher 1989] nachgewiesen.

Dieser Effekt entsteht durch die Verringerung des Fehlers, der bei Hörpositionen abseits des „sweet spots“ auftritt, wo Phantomschallquellen verzerrt abgebildet werden.

Der maximale Fehler, bei Zweikanalaufstellung $\leq 30^\circ$, kann bei geeigneter Phantomschallquellenbildung durch Beteiligung nur zweier benachbarter Lautsprecher auf $\leq 15^\circ$ gesenkt werden. Dadurch entsteht auch an abweichenden Hörpositionen noch ein Klangbild, das geprägt ist durch mindestens zwei unterschiedliche Schallquellen.

Bei Hörpositionen, die weniger von der optimalen Position abweichen, ist auch die Verzerrung des Klangbilds geringer.

Im Hauptversuch wurde ein Sitzplatz gewählt, der um $d = 50 \text{ cm}$ von der optimalen Sitzposition seitlich verschoben war.

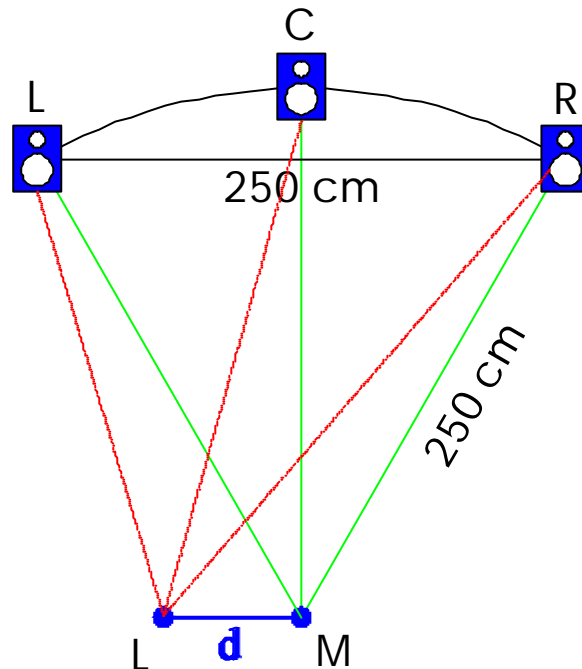


Abbildung 2.9.: an seitlich verschobener Sitzposition auftretende Signalwege

Abhängig von der Sitz-(Hör-)position treten unterschiedliche Verzerrungen in Pegel und Laufzeit auf.

In der folgenden Tabelle können diese Verzerrungen, abhängig von der seitlichen Verschiebung d der Hörposition nach links, abgelesen werden. Die Werte entstammen einer theoretischen Rechnung, basierend auf abweichenden Laufzeiten (Schallgeschwindigkeit $c=340\text{m/s}$) und einer Pegelverzerrung durch verschiedene Abstände nach dem $1/r$ -Gesetz.

Die Basis L-R beträgt 250cm.

1. Pegel:

Aufgetragen sind die am seitlich um d nach links verschobenen Sitzplatz auftretenden Pegel. Sie sind relativ zu den an der mittleren Sitzposition auftretenden Pegeln gerechnet: $\Delta L = L_{\text{Seite}} - L_{\text{Mitte}}$

d	$\Delta L(L)$	$\Delta L(C)$	$\Delta L(R)$	DL(L/C)	DL(C/R)	DL(L/R)
cm	dB	dB	dB	dB	dB	dB
0	0	0	0	0	0	0
50	0,76	-0,17	-0,93	0,93	0,76	1,69
100	1,19	-0,64	-1,93	1,84	1,29	3,12

Tabelle 2.3.: Pegelverzerrungen durch Verschiebung der Hörposition um d nach links

2. Laufzeit:

Aufgetragen sind die am seitlich um d nach links verschobenen Sitzplatz auftretenden Laufzeiten: Sie sind relativ zu den an der mittleren Sitzposition auftretenden Laufzeiten gerechnet: $\Delta t = t_{\text{Seite}} - t_{\text{Mitte}}$

d	$\Delta t(L)$	$\Delta t(C)$	$\Delta t(R)$	Dt(L/C)	Dt(C/R)	Dt(L/R)
cm	ms	ms	ms	ms	ms	ms
0	0	0	0	0	0	0
50	-0,61	0,15	0,83	-0,76	-0,69	-1,45
100	-0,94	0,57	1,83	-1,51	-1,26	-2,77

Tabelle 2.4.: Laufzeitverzerrungen durch Verschiebung der Hörposition um d nach links

Aus diesen theoretischen Betrachtungen wird klar:

- die durch den nicht-optimalen Sitzplatz auftretenden Verzerrungen sind schon bei einer Abweichung von 50 cm wesentlich
- die durch Laufzeitverschiebungen ausgelösten Verzerrungen wiegen wesentlich schwerer als die durch veränderte Pegel ausgelösten – ist die seitliche Verschiebung z.B. 50 cm beträgt die Pegelverzerrung innerhalb der Basis L-C nur ca. 1 dB, die Laufzeitverzerrung aber bereits fast 0,8 ms.

- Die Verzerrungen innerhalb der kleinen Basen L-C oder C-R sind kleiner als die innerhalb der großen Basis L-R.

Daraus läßt sich folgern:

- **Wird Abbildung zwischen den zwei kleinen Basen L-C und C-R erzeugt, kann im Vergleich zur großen Basis L-R wesentlich mehr Stabilität erreicht werden.**

Außerdem kann untersucht werden:

Welche Art der Auslenkung ist stabiler: Laufzeit- oder Pegelauslenkung?

Theoretische Betrachtungen ergeben hier: Die auf die Signale einwirkenden Pegel- und Laufzeitverschiebungen durch abweichende Sitzpositionen bewirken eine im mittleren Aufnahmebereich *gleichartige* Verzerrung der Abbildung. Das heißt, an diesen Punkten verhält sich Laufzeitstereofonie genauso (un-)stabil wie Intensitätsstereofonie. Allerdings kann aus den Werten der Tabellen 2.3. und 2.4. abgelesen werden:

Soll bei größeren Abweichungen („größer“ heißt in dem Fall: >10cm !!) noch Abbildung im gesamten Bereich zwischen den Lautsprechern stattfinden, das heißt soll der entferntere Lautsprecher noch lokalisiert werden, kann dies nur auf zwei Arten erreicht werden:

- durch Anwendung von Pegeldifferenzen → der nähere Lautsprecher hat kaum Pegel → der entferntere Lautsprecher wird lokalisiert
- durch Anwendung genügend großer Laufzeitdifferenzen (Groß-AB) → die beteiligten Laufzeitdifferenzen sind genug groß, um nicht von der Laufzeitverschiebung nivelliert zu werden. Allerdings ergeben sich hier weitere Konsequenzen:

Stabilität laufzeitbasierter Hauptmikrofone:

Bei Hauptmikrofonarten, die hauptsächlich laufzeitbasiert sind und bei denen Ortung fast ausschließlich durch den Prezedenz-Effekt erreicht wird, ist der Bereich, in dem mehr als nur einer der Front-Lautsprecher ortbar ist, abhängig vom Abstand der verwendeten Mikrofone.

Bei einer seitlichen Verschiebung um 50 cm und einer Basisbreite von 250 cm treten laut obiger Tabelle innerhalb der Basis L-C Laufzeitverzerrungen von 0,76 ms auf.

Durch genügend große Abstände der Mikrofone im Aufnahmebereich kann verhindert werden, daß diese Abweichungen wesentliche Verzerrungen zur Folge haben. Durch eine Groß-AB-Mikrofonierung mit Abständen von ca. 2m liegen Laufzeitdifferenzen von bis zu 6 ms vor, die von der angesprochenen Verzerrung nicht nivelliert werden.

Somit ist der Präzedenz-Effekt weiterhin zur Sicherung der Stabilität wirksam.

Allerdings findet auf diese Weise so gut wie keine Lokalisation zwischen den Lautsprechern statt. Damit existiert auch kein Aufnahmewinkel einer solchen Anordnung, da nur drei stabile Richtungen erzeugt werden, nämlich die drei Lautsprecher L, C und R. Diese drei Richtungen bleiben auch außerhalb des „Sweet spots“ stabil.

Einige Mikrofonierungsarten erzeugen nach diesem Prinzip Stabilität. („Decca-Tree“ oder ähnliche Verfahren)

Einfluß des Übersprechens auf die Stabilität:

Bei Beteiligung von mehr als zwei benachbarten Lautsprechern an der Bildung einer Phantomschallquelle, also Übersprechen auf den dritten Lautsprecher verringert sich der positive Effekt der Stabilität, was dazu führt, daß wiederum nur eine kleinere „sweet area“ entsteht. (→ Kap.2.2.5)

Bei Annäherung des Hörers an einen der Lautsprecher wird das Signal dieses Lautsprechers aufgrund der sich verändernden Pegel- und Zeitverhältnisse zunehmend dominant und beeinflußt die Lokalisation. (→ Kap.6.3.2.)

Bei Einbeziehung der hinteren Lautsprecher in die Abbildung, das heißt Übertragung korrelierter Signale auch in den seitlichen und der hinteren Basis, treten noch mehr dieser Problemfälle auf [Williams, Vortrag auf 21.Tonmeistertagung, Hannover].

Dieser Übersprech-Effekt entsteht bei dreikanaligen Hauptmikrofonen durch ungenügende Trennung der verschiedenen stereofonen Teilzonen L-C, C-R. (→ Kap. 6, Kap. 2.2.5)

2.4. Vorversuche zum Klangcharakter einer Phantomschallquelle

2.4.1. Klangrelevanter Vergleich Zweikanal-Mehrkanal in Bezug auf die Bildung frontaler Phantomschallquellen

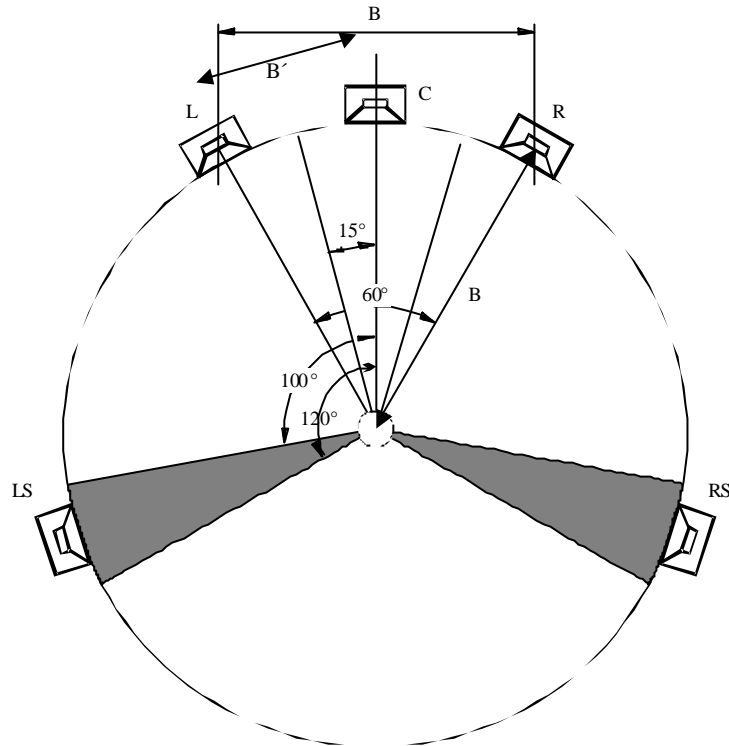


Abbildung 2.10.: 3/2-Stereo-Standard nach SSF-Empfehlung SSF 001 [SSF 1998]

	2-Kanal	5-Kanal
Anzahl der Front-Lautsprecher	2 (L, R)	3 (L, C, R)
vordere Lautsprecherbasen	L-R	L-C, C-R, L-R
Basisgröße(n)	B	$B' = \text{ca. } B/2$
Abstand Hörer-Lautsprecherbasis	B	$\text{ca. } 2 \cdot B'$
Öffnungswinkel der LS-Basen	60°	30°
Position der Basismittelpunkte	0°	15°, -15°

Tabelle 2.5.: Vergleich Anordnung 2/0 mit 3/2 in Bezug auf frontale Phantomschallquellen

Diese Unterschiede zwischen der 2/0- und der 3/2-Stereo-Anordnung im vorderen Bereich verursachen bestimmte Unterschiede im Klangcharakter der erzeugten Phantomschallquellen.

Um die verantwortlichen Parameter für klangrelevante Phänomene zu diskriminieren, wurden folgende Überlegungen durchgeführt:

- Verändert sich das Klangbild von Phantomschallquellen, wenn der Öffnungswinkel einer Lautsprecherbasis verkleinert wird?
- Verändert sich das Klangbild von Phantomschallquellen, wenn sie durch drei überlagerte Signalquellen (Lautsprecher) statt durch zwei erzeugt werden?

2.4.2. Verkleinerung des Öffnungswinkels, Klangfarbe: Vorversuch 2A

Die Größe des Öffnungswinkels der Lautsprecherbasis hat einen entscheidenden Einfluß auf den Klangcharakter der entstehenden Phantomschallquelle. Dabei sind sowohl Klangfarbe als auch Ausdehnung, Lokalisationsschärfe und Entfernungseindruck der Phantomschallquelle abhängig vom Öffnungswinkel.

In [Silzle 1990] wird untersucht, welcher Unterschied zwischen der Realschallquelle (einzelner Lautsprecher) und der Phantomschallquelle besteht. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede in Klangfarbe und Lokalisationsschärfe. Dabei wurde allerdings kein Zusammenhang zwischen der Veränderung dieser Eigenschaften und der Größe des Öffnungswinkels gesucht.

Dieser Zusammenhang ist auch schwer herzustellen. Der Grund dafür liegt darin, daß sich Phantomschallquellen generell sehr deutlich von Realschallquellen unterscheiden, so daß eine Abstufung in unterschiedliche Grade der Veränderung schwer fällt.

Im Vorversuch wurden deshalb die unterschiedlich erzeugten Phantomschallquellen direkt miteinander verglichen:

- Vorversuch 2A, Teil 1: Beurteilung der Klangfarbe im Vergleich:
- Phantomschallquellen innerhalb Basis L-R
 - Phantomschallquellen innerhalb Basis L-C
 - Realschallquellen: einzelne Lautsprecher

Außerdem wurde im Vorversuch ermittelt, wie sehr sich die verschiedenen Phantomschallquellen *derselben* Entstehungsart untereinander klanglich unterscheiden. Es wurden zwei Phantomschallquellen leicht unterschiedlicher Auslenkung verglichen:

Vorversuch 2A, Teil 2: Beurteilung von Klangfarbenänderungen innerhalb einer bestimmten Basis

2.4.2.1. Testsignale

An fünf verschiedenen Abbildungsorten wurden (Phantom-)Schallquellen erzeugt:

-30°	-22,5°	-15°	-7,5°	0°
→ im Lautsprecher L		→ genau zwischen Lautsprechern L und C		→ im Lautsprecher C

Diese Auslenkungen wurden auf unterschiedliche Arten bewirkt:

- Realschallquelle → 1 einzelner Lautsprecher
- Phantomschallquelle zwischen L und R → 2 Lautsprecher, Öffnungswinkel 60°
- Phantomschallquelle zwischen L und C → 2 Lautsprecher, Öffnungswinkel 30°

Als Testsequenz wurde ein Satz einer weiblichen Sprecherin benutzt. Er entstammt einer Aufnahme aus dem reflektionsarmen Raum, Länge ca. 15sec, TEST-CD SQAM [EBU 1988], MONO

Die Phantomschallquellen wurden mit kombinierten Pegel- und Laufzeitdifferenzen aus der Mittelposition zwischen den Lautsprechern ausgelenkt. Folgende Pegel- und Laufzeitverhältnisse lagen vor:

Auslenkung aus der Medianebene (Grad)	L - R		L - C	
	DL(L/R)	Dt(L/R)	DL(L/C)	Dt(L/C)
0°	0 dB	0 ms	-6 dB	0,5 ms
-7,5°	1,5 dB	-0,1 ms	-3 dB	0,2 ms
-15°	3 dB	-0,2 ms	0 dB	0 ms
-22,5°	4,5 dB	-0,3 ms	3 dB	-0,2 ms
-30°	6 dB	-0,5 ms	6 dB	-0,5 ms

Tabelle 2.6.: Pegel- und Laufzeitverhältnisse für Vorversuch 2A

Somit wurden Signaldifferenzen verwendet, die sich in normalen Stereophonieanordnungen wiederfinden lassen können. Bei voller Auslenkung ist der Pegel des nicht mehr georteten Lautsprechers mit -6 dB immer noch deutlich an der Entstehung des Charakters der Phantomschallquelle beteiligt.

2.4.2.2. Versuchsaufbau

Die Versuchsperson befindet sich am optimalen Hörort bei 3/2-Stereo-Aufstellung. Der Kopf ist frei beweglich.

Mittels dreier Tasten eines MIDI-Fußpedals (Abbildung 5.7.) kann geräuschfrei und selbstgesteuert zwischen den verschiedenen Klangquellen umgeschaltet werden.

Der Lautsprecheraufbau ist durch das Anbringen einer klangneutralen, dünnen Papierwand und geeigneter Beleuchtung für die Testpersonen nicht sichtbar.

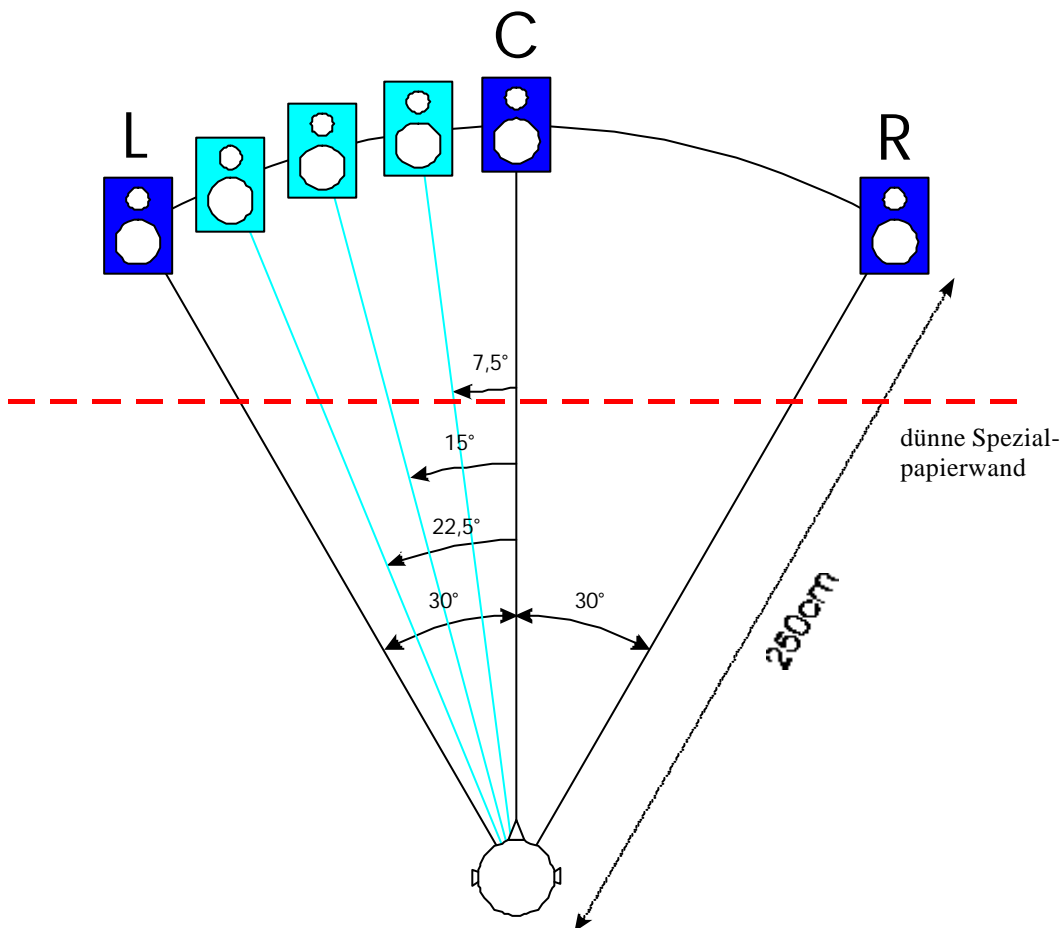


Abbildung 2.11.: Versuchsaufbau für Vorversuche 2 und 3

2.4.2.3. Versuchsdurchführung

Teil 1:

Es kann frei umgeschaltet werden zwischen allen drei Darbietungsarten:

A	Referenz	B
<i>L-R</i>	<i>einzelner Lautsprecher</i>	<i>L-C</i>

Dabei ist für die Versuchspersonen nicht ersichtlich, welche Anordnung den Tasten A, B oder Referenz zugeordnet ist. Ebenfalls nicht bekannt ist, welche Art von Anordnungen überhaupt am Vorversuch beteiligt sind.

Gefragt wird nach der *Ähnlichkeit zur Referenz in Bezug auf die Klangfarbe*.

Mit Hilfe einer 7-stufigen Skala kann beurteilt werden, welche der 2 zu beurteilenden Darbietungsarten der Referenz ähnlicher ist:

A deutlich ähnlicher	A ähnlicher	A etwas ähnlicher	A=B 0	B etwas ähnlicher	B ähnlicher	B deutlich ähnlicher
-3	-2	-1	0	1	2	3

Teil 2:

Es kann frei umgeschaltet werden zwischen zwei durch eine bestimmte Darbietungsart erzeugten Auslenkungen. (Es werden z.B. die Phantomschallquellen bei 0° und $-7,5^\circ$, beide erzeugt durch die große Basis L-R, angeboten)

Dabei ist wiederum den Versuchspersonen nicht bekannt, welche Anordnungen präsentiert werden.

Gefragt ist wiederum nach der Änderung der Klangfarbe.

Es zuerst die Abweichungen zwischen den Signalen bei -15° und $-7,5^\circ$ ermittelt und dann die Abweichungen zwischen den Signalen bei $-7,5^\circ$ und 0° .

Mit einer 5-stufigen Skala kann beurteilt werden, wie groß der hörbare Unterschied zwischen den beiden Beispielen ist:

Ein Klangfarbenunterschied ist ...

nicht wahrnehmbar	leicht wahrnehmbar	wahrnehmbar	deutlich wahrnehmbar	sehr deutlich wahrnehmbar
1	2	3	4	5

Es nahmen 8 Testpersonen am Vorversuch teil.

2.4.2.4. Versuchsauswertung

Ermittlung der statistischen Größen:

Darstellung der Median- und Quartilwerte:

Aufgrund der geringen Anzahl der Testpersonen wurde bei diesem Vorversuch diese statistische Methode angewandt, die einzelnen Ausreißern kein zu großes Gewicht verleiht. Die Bewertung der einzelnen Versuchsinhalte erfolgte teilweise in großem individuellem Spielraum.

[Bortz 1977]: „(...) ein Wert, von dem alle übrigen Werte im Durchschnitt am wenigsten abweichen. Diese Eigenschaft hat der Median-Wert. (...) Ist uns jedoch nur daran gelegen, daß (...) große Schätzfehler möglichst vermieden werden sollten, müssen wir einen Wert finden, bei dem größere Abweichungen stärker bestraft werden als kleinere Abweichungen. (...) Der Wert (...) ist das arithmetische Mittel.“

Der Median ist derjenige Wert in der nach der Größe der Einzelwerte sortierten Reihe, der die Reihe halbiert.

Das erste Quartil Q_1 ist die Maßzahl, die am Ende des ersten Viertels in der nach Größe sortierten Reihe steht. Das dritte Quartil Q_3 ist die Maßzahl am Ende des dritten Viertels der Reihe. (nach [Sachs 1973])

2.4.2.5. Darstellung der Ergebnisse

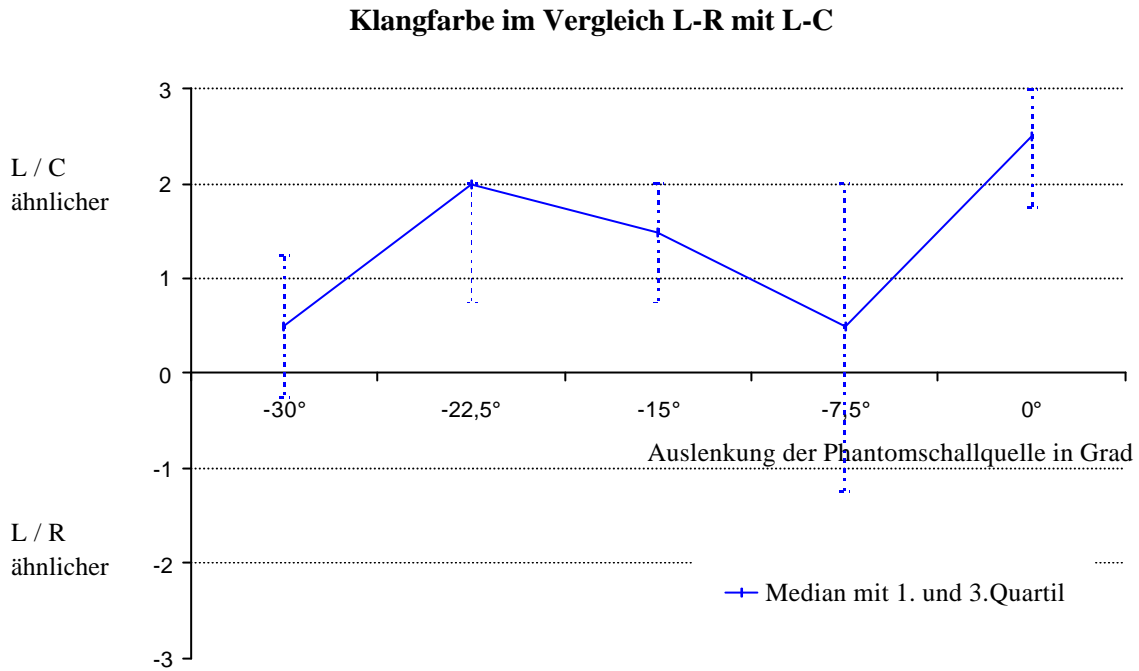


Abbildung 2.12.: Ergebnisse Vorversuch 2A, Teil 1: Vergleich von zwei verschieden erzeugten Phantomschallquellen am selben Ort mit einem einzelnen Lautsprecher als Referenz

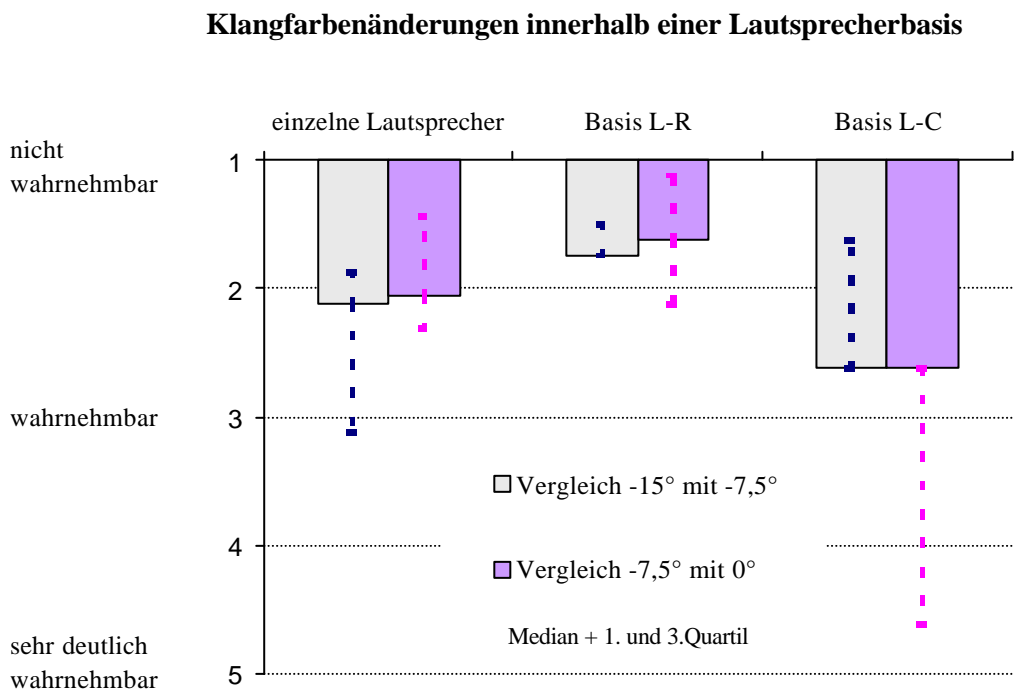


Abbildung 2.13.: Ergebnisse Vorversuch 2A, Teil 2: Vergleich von auf die selbe Weise erzeugten (Phantom-)Schallquellen an zwei unterschiedlichen Orten

2.4.2.6. Interpretation der Ergebnisse

Teil 1:

Beim Vergleich der **Klangfarbe** der verschieden erzeugten Phantomschallquellen fällt auf: In allen Fällen werden die durch die kleine Basis L/C erzeugten Phantomschallquellen der Referenz (einzelner Lautsprecher) ähnlicher befunden als die durch die große Basis erzeugten Phantomschallquellen.

Bei -30° Auslenkung (Abbildung im Lautsprecher L) wird durch die nahezu gleichen Signalverhältnisse aller Wiedergabearten (rechter bzw. mittlerer Lautsprecher leiser und verzögert) naturgemäß kaum ein Unterschied wahrgenommen.

Bei 0° Auslenkung (Abbildung im Lautsprecher C) wird naturgemäß die größte Ähnlichkeit zwischen der kleinen Basis und dem Einzellautsprecher empfunden, da ebenfalls kaum ein Unterschied zwischen den beiden Wiedergabearten besteht.

Dazwischen wird der kleinen Basis unterschiedlich deutlich größere Ähnlichkeit beschieden. Auffallend ist der relativ kleine Wert bei $-7,5^\circ$, verbunden mit großer Urteilsunsicherheit und Abweichung der verschiedenen Testpersonen: Hier wird angegeben, daß keine der beiden Wiedergabearten ausreichend Ähnlichkeit erreicht, also auch die kleine Basis deutliche Abweichung von der Referenz zeigt.

Außerdem schneidet die große Basis L/R zunehmend schlechter ab, wenn die Laufzeitdifferenzen zunehmen. Deutlich zu sehen ist der Unterschied zwischen den Werten bei $-7,5^\circ$ und $-22,5^\circ$.

Teil 2:

Der Vergleich der zwei Signale der *gleichen* Wiedergabeart zeigt folgendes Bild: Während zwischen den beiden benachbarten Phantomschallquellen der 60° -Basis sogar weniger Klangfarbenunterschied als zwischen den einzelnen Lautsprechern an diesen Orten empfunden wird, unterscheiden sich die benachbarten Phantomschallquellen der 30° -Basis deutlicher.

Der Grund ist zum einen darin zu sehen, daß für die gleiche Auslenkung bei kleinerem Öffnungswinkel größere Signaldifferenzen zwischen den Lautsprechern benötigt werden. Somit ist der Unterschied zwischen zwei benachbarten Phantomschallquellen in Bezug auf ihre Signaldifferenzen größer.

Andererseits fällt aber auch auf, daß innerhalb der kleinen Basis schon bei minimal veränderten Verzögerungen zwischen den Lautsprechern deutliche Klangfarbenunterschiede wahrnehmbar sind.

Hier wird möglicherweise ein Nachteil der verkleinerten Basis deutlich:

Wie in Kapitel 2.2.4. *Klangfarbe* besprochen, machen sich möglicherweise Wirkungen von Kammfiltereffekten deutlicher bemerkbar, die sich in ihrer Art je nach Verzögerung stark unterscheiden.

2.4.3. Verkleinerung des Öffnungswinkels, Lokalisationsschärfe: Vorversuch 2B

2.4.3.1. *Testsignale, Versuchsaufbau und Versuchsauswertung wie 2.4.2.*

2.4.3.2. *Versuchsdurchführung*

Es kann wieder mittels MIDI-Fußpedal frei zwischen den Klangquellen umgeschaltet werden. Die Zuordnung der verschiedenen Quellen zu den Tasten ist der Testperson nicht bekannt.

In **Teil 1** wird die Phantomschallquelle der kleinen Basis L/C mit dem einzelnen Lautsprecher verglichen.

A	B
einzelner Lautsprecher	Basis L/C

In **Teil 2** wird die Phantomschallquelle der großen Basis L/R mit der Phantomschallquelle der kleinen Basis L/C verglichen.

A	B
Basis L/R	Basis L/C

Die Testperson kann in einer 7-stufigen Skala angeben, bei welchem der beiden dargebotenen Klangbeispiele die Lokalisationsschärfe höher/größer ist:

Lokalisationsschärfe bei ...

A	A	A	A=B	B	B	B
viel größer	größer	etwas größer		etwas größer	größer	viel größer
-3	-2	-1	0	1	2	3

2.4.3.3. Darstellung der Ergebnisse

Lokalisationsschärfe im Vergleich L-C mit individuellem Lautsprecher

höhere Lokalisationsschärfe bei:

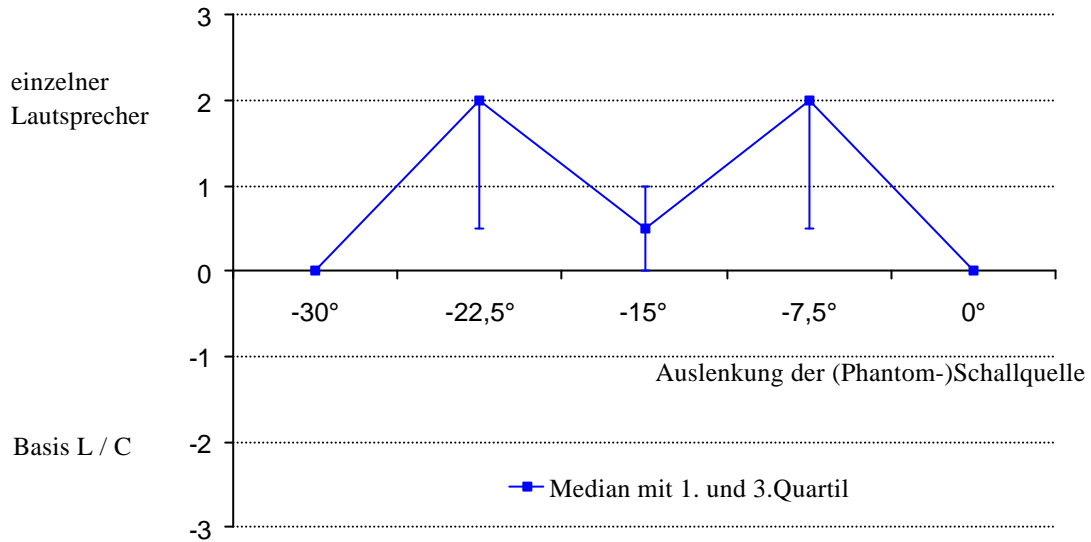


Abbildung 2.14.: Vorversuch 2B, Teil 1: Vergleich von zwei unterschiedlich erzeugten (Phantom-)Schallquellen am selben Ort

Lokalisationsschärfe im Vergleich L-C mit L-R

höhere Lokalisationsschärfe bei:

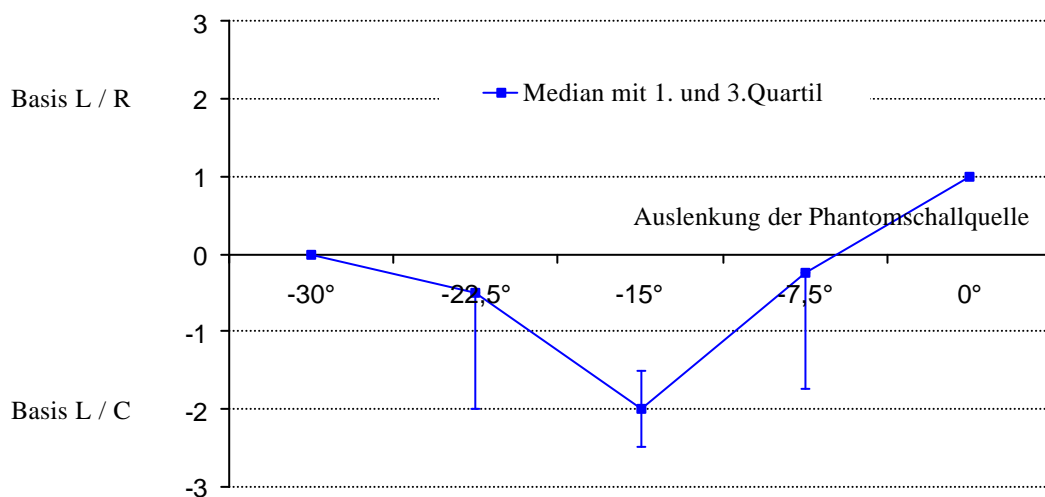


Abbildung 2.15.: Vorversuch 2B, Teil 2: Vergleich von zwei unterschiedlich erzeugten Phantomschallquellen am selben Ort

2.4.3.4. Interpretation der Ergebnisse

Beim Vergleich der **Lokalisationsschärfe** zwischen den unterschiedlichen Wiedergabearten ist bekannt:

- Die Lokalisationsschärfe verkleinert sich bei Erhöhung der Laufzeitdifferenz zwischen den Lautsprechern
- Bei nur kleinen Auslenkungen aus der Basismitte ist somit eine größere Lokalisationsschärfe zu erwarten.
- Durch einen kleineren Öffnungswinkel sind auch die Ausdehnungen der Hörereignisse erwartungsgemäß kleiner, also steigt damit die Lokalisationsschärfe

Teil 1:

Diese bekannten Effekte sind auch im Vergleich 30°-Basis mit Einzellautsprechern zu bemerken:

Bei 0° und -30° sind naturgemäß aufgrund der ähnlichen Signalverhältnisse keine Unterschiede zu erwarten. In der Mitte der kleinen Basis, das heißt bei -15° ist durch den Einzellautsprecher nur eine leichte Verbesserung festgestellt worden. Das ist ein Hinweis darauf, daß ohne die Existenz von Laufzeitdifferenzen (gültig nur für optimale Hörposition) eine Phantomschallquelle sehr hohe Abbildungsschärfe erreichen kann.

Die zwei anderen Phantomschallquellenpositionen (-7,5°, -22,5°) geben dann auch ein anderes Bild wieder: Hier existieren Laufzeitdifferenzen zwischen den Lautsprechern → durch den einzelnen Lautsprecher wird eine deutliche Verbesserung der Lokalisationsschärfe erreicht.

Teil 2:

Im Vergleich der 30°-Basis mit der 60°-Basis kann nun eine den bekannten Voraussetzungen und im vorigen Vergleich beobachteten Ergebnissen entsprechende Situation vorgefunden werden:

bei -30° (im Lautsprecher L) sind die Signalverhältnisse nahezu identisch → kein Unterschied

bei -22,5° sind die Laufzeitdifferenzen der kleinen Basis etwas kleiner → höhere Lokalisationsschärfe

bei -15° bestehen bei der kleinen Basis keine Signaldifferenzen → deutlich höhere Lokalisationsschärfe

bei $-7,5^\circ$ sind die Laufzeitdifferenzen der kleinen Basis höher \rightarrow kaum Verbesserung der Lokalisationsschärfe mehr, positiver Effekt der kleineren Basis sinkt

bei 0° (im Lautsprecher C) bestehen keine Signaldifferenzen zwischen den Lautsprechern der großen Basis, die kleine Basis erzeugt diese Phantomschallquelle mit noch erheblichem Pegel und mit Verzögerung auf dem äußeren Lautsprecher \rightarrow Ergebnis zeigt keine Verbesserung durch den Center-Lautsprecher. Dieses Ergebnis spricht für die störende Wirkung dieses Restsignals auf dem äußeren Lautsprecher, da das Ergebnis des vorhergehenden Versuchsteils bei 15° bei vergleichbarer Situation, aber ohne dieses Restsignal eine leichte Verbesserung durch den einzelnen Lautsprecher zeigt. Auch in [Silzle 1990] war dies so festgestellt worden.

2.4.4. Beteiligung aller drei LS („dreikanaliges Klangbild“), Vorversuch 3

In diesem Vorversuch soll untersucht werden, innerhalb welcher Grenzen ein „dreikanaliges Klangbild“ störend für die Wahrnehmung der Klangfarbe sein wird.

Dabei soll ermittelt werden, welche Pegel und Laufzeiten des Übersprechsignals auf dem dritten (bzw. bei Abbildung im Center auf beiden) Kanal zur wahrnehmbaren Beeinträchtigung der Klangfarbe führt.

2.4.4.1. Testsignale

Der Grad der Änderung der Klangfarbe bei Übermittlung eines Signals durch drei statt zwei Lautsprecher ist stark abhängig vom Testsignal. Bei eigenen Untersuchungen wurde festgestellt, daß gerade Testsignale mit tieffrequenten Signalanteilen besonders auffällige Veränderungen zeigten. Außerdem ist bei menschlicher Sprache bekanntermaßen sehr deutlich eine Klangfarbenänderung zu bemerken. Deshalb wurde als Testsignal ein Satz eines männlichen Sprechers in englischer Sprache gewählt, der mit sonorer und klangvoller Stimme gesprochen wurde. [Denon Professional CD, PG-6013-15, MONO]

Es existieren noch wesentlich kritischere Signale in Bezug auf die Ermittlung von Veränderungen der Klangfarbe, wie z.B. weißes Rauschen, Applaus, Orchester mit Chor (MONO), usw. .

Die Wahl des Testsignals fiel allerdings so aus, daß keine unnatürlichen Situationen erschaffen, sondern für die tonmeisterliche Praxis relevante Signale überprüft wurden.

Es wurde ein Phantomschallquellenort links ($\Phi = -9^\circ$) vom mittleren Lautsprecher gewählt. Das hat mehrere Gründe:

- Der linke Lautsprecher hat noch deutlichen Anteil an der Abbildung der Phantomschallquelle
- Bei Hauptmikrofonsystemen ist gerade in der Mitte der Phantomschallquellenebene mit dem größten Anteil des 3.Lautsprechers zu rechnen (siehe Kap.2.2.5.)

Folgende Signalverhältnisse galten konstant während beider Teile 1 **und** 2:

$DL(L/C) = -2\text{dB}$, $Dt(L/C) = 0,2\text{ ms}$ \rightarrow Auslenkung der Phantomschallquelle = -9°

Teil 1:

Die Phantomschallquelle (L/C) wurde mit einem Signal auf dem rechten Lautsprecher ergänzt, das nach folgenden Signalverhältnissen bestimmt wurde. Der Pegel des rechten Lautsprechers wird relativ zum Summenleistungspegel der beiden anderen Lautsprecher angegeben.

Versuchs-Nummer	$\Delta t (R/C)$	$DL (R/(L+C))$
1	0,43 ms	-18 dB
2	„	-16 dB
3	„	-14 dB
4	„	-12 dB
5	„	-10 dB
6	„	-8 dB
7	„	-6 dB

Tabelle 2.7.: Testsignale für Vorversuch 3, Teil 1

Teil 2:

Die Phantomschallquelle (L/C) wurde mit einem 3.Signal auf dem rechten Lautsprecher ergänzt, das nach folgenden Signalverhältnissen bestimmt wurde:

Versuchs-Nummer	Δt (R/C)	ΔL (R/(L+C))
8	0,00 ms	-8 dB
9	0,20 ms	-8 dB
10 (= Nr.6)	0,43 ms	-8 dB
11	0,66 ms	-8 dB
12	0,88 ms	-8 dB
13	1,11 ms	-8 dB
14	2,20 ms	-8 dB
15	4,20 ms	-8 dB

Tabelle 2.8.: Testsignale für Vorversuch 3, Teil 2

In **Teil 3** wird nur der Center mit einem konstanten Signal beschickt: Die (gleichen) Signale auf dem linken und rechten Lautsprecher wurden nach folgenden Signalverhältnissen bestimmt. Angegeben ist der Summenleistungspegel der beiden äußeren Lautsprecher im Verhältnis zum mittleren Lautsprecher.

Versuchs-Nummer	Δt (L/C) = Δt (R/C)	DL ((L+R)/C)
16	0,43 ms	-13 dB
17	„	-11 dB
18	„	-9 dB
19	„	-7 dB
20	„	-5 dB
21	„	-3 dB

Tabelle 2.9.: Testsignale für Vorversuch 3, Teil 3

In allen drei Versuchsteilen wurde der Summenleistungspegel aller drei Lautsprecher konstant gehalten, indem nach einfacher Rechnung die Pegel für jedes Testbeispiel neu ermittelt und verhältnisgetreu angeglichen wurden.

2.4.4.2. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau entsprach den Bedingungen, die schon im vorhergegangenen Vorversuch galten (Kap. 2.4.2.2.). Diesmal waren allerdings keine einzelnen Referenz-Lautsprecher beteiligt.

Die Umschaltung zwischen den jeweiligen Phantomschallquellen erfolgte wiederum geräuschlos und selbstgesteuert mittels MIDI-Fußpedal.

2.4.4.3. Versuchsdurchführung

Im Selbstversuch wurde zunächst der Einfluß der zusätzlich wiedergegebenen Signale auf die *Auslenkung* der Phantomschallquelle beurteilt.

Daraufhin wurde der Vorversuch mehrmals von zwei Testpersonen durchgeführt.

Da auch der Verfasser daran beteiligt war und da die Bewertung unabhängig von der Kenntnis der jeweiligen Beispiele stattfinden sollte, wurden alle 21 Testbeispiele in jeweils zufälliger Reihenfolge von einer dritten Person ausgewählt.

Gefragt war nun nur nach der Änderung der Klangfarbe beim Umschalten zwischen den beiden alternativen Klangbeispielen.

Beispiel 1	Beispiel 2
L/C	L/C/R
C	L/C/R

Es kam eine 5-stufige Skala zur Anwendung:

Klangfarben-Unterschied zwischen den beiden dargebotenen Beispielen ist ...

nicht wahrnehmbar	leicht wahrnehmbar	wahrnehmbar	deutlich wahrnehmbar	sehr deutlich wahrnehmbar
1	2	3	4	5

2.4.4.4. Versuchsauswertung

Es galten wiederum dieselben Bedingungen wie in Kap. 2.4.2.4. .

2.4.4.5. Darstellung der Ergebnisse

Wahrnehmbarkeit von Klangfarbenveränderungen bei Zuschaltung des dritten Lautsprechers (R) - Parameter: Pegel R, $Dt(R/C)=0,43$ ms

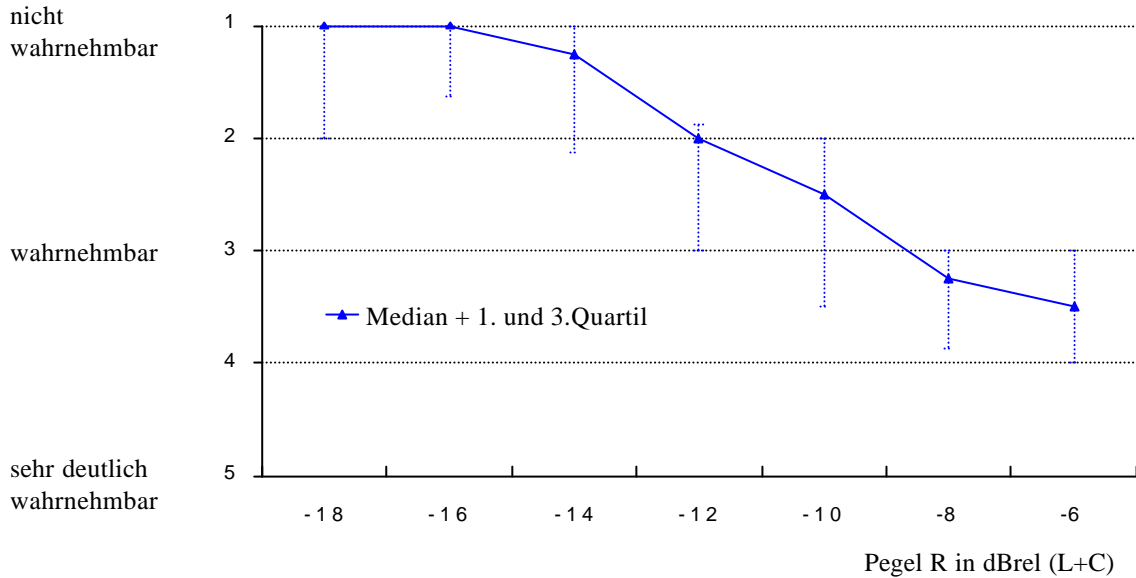


Abbildung 2.16.: Vorversuch 3, Teil 1: Vergleich der Phantomschallquelle (L/C) mit der Phantomschallquelle (L/C/R)

Wahrnehmbarkeit von Klangfarbenveränderungen bei Zuschaltung des dritten Lautsprechers (R) - Parameter: $Dt(R/C)$, $DL(R/(L+C))=-8$ dB

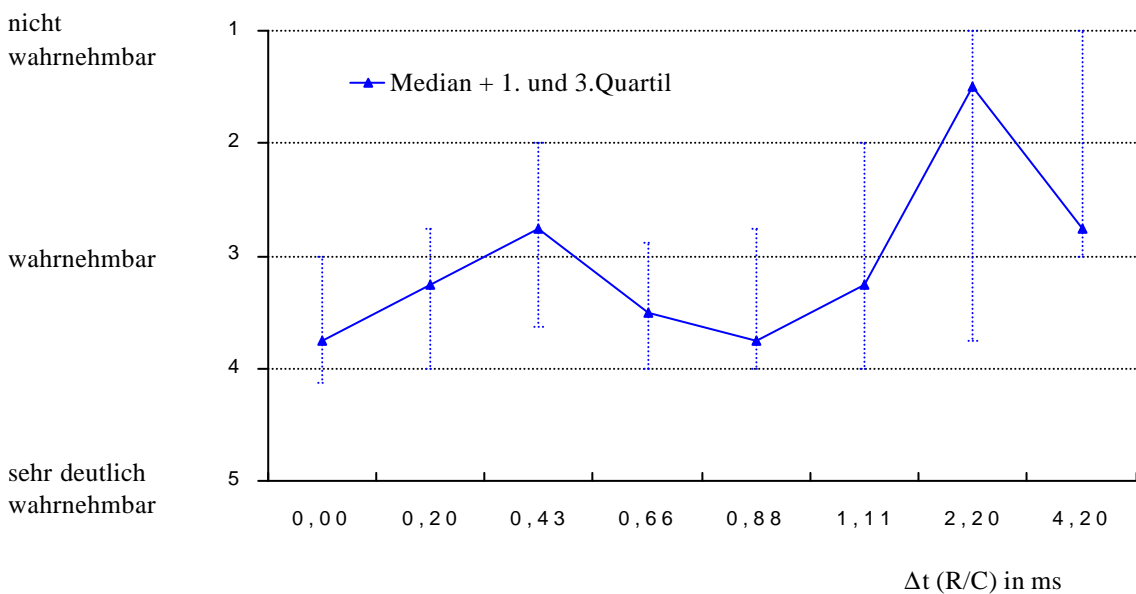


Abbildung 2.17.: Vorversuch 3, Teil 2: Vergleich der Phantomschallquelle (L/C) mit der Phantomschallquelle (L/C/R)

Wahrnehmbarkeit von Klangfarbenveränderungen bei Zuschaltung der Lautsprecher L und R - Parameter: Pegel L+R, $\Delta t(L,R/C) = 0,43$ ms

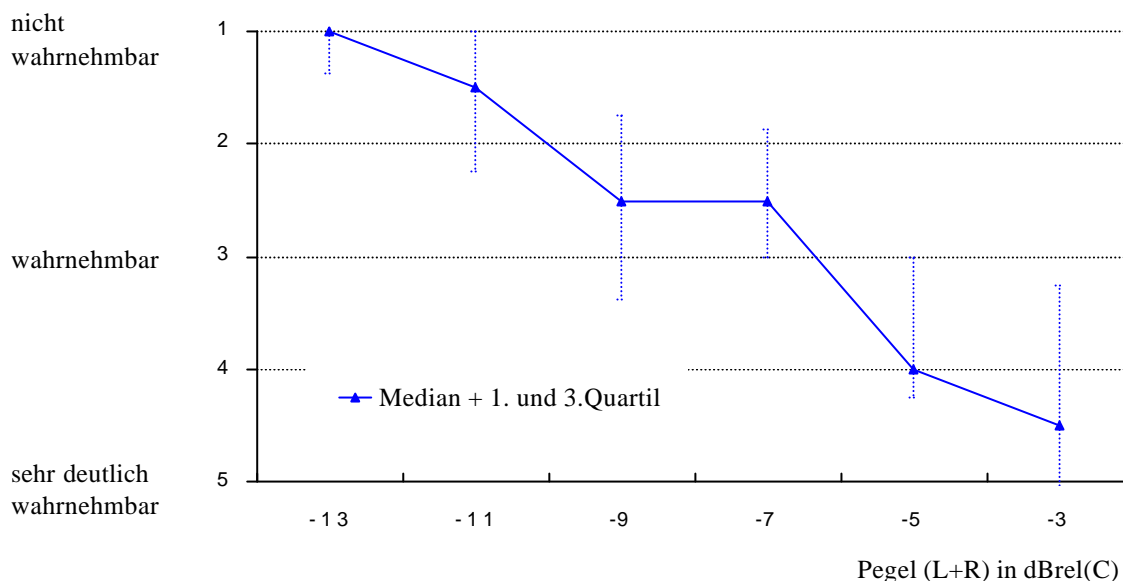


Abbildung 2.18.: Vorversuch 3, Teil 3: Vergleich der Realschallquelle (C) mit der Phantomschallquelle (L/C/R)

2.4.4.6. Interpretation der Ergebnisse

In **Teil 1** wurde ermittelt, ab welchem Pegel des rechten Lautsprechers, der gegenüber dem mittleren um 0,43 ms verzögert ist, Veränderungen der Klangfarbe der Phantomschallquelle wahrnehmbar sind. Dabei stellte sich zunächst im Vorhinein heraus, daß bei dieser Verzögerung erst ab einem Pegel von -8dB Veränderungen des Hörereignisorts feststellbar sind. Die Klangfarbe zeigt allerdings schon bei Pegeln des rechten Lautsprechers von ca. -12 dB unter dem Pegel der beiden anderen Lautsprechers eine leicht wahrnehmbare Beeinträchtigung. Dabei wurde eine zunehmend auffällige Veränderung des Entfernungseindrucks ebenso wie Veränderungen der Klangfarbe bemerkt. Allgemein rückt das Hörereignis umso näher, je größer der Pegel des rechten Lautsprechers ist.

In **Teil 2** wurde ermittelt, bei welchen Verzögerungszeiten des rechten Lautsprechers ein besonders störender Einfluß des dritten Lautsprechers auf Hörereignisort und Klangfarbe der Phantomschallquelle eintritt. Es stellte sich im Vorhinein heraus, daß eine Veränderung des Hörereignisorts nur bei Verzögerungen $\Delta t(R/C) < 0,4$ ms bewirkt wird.

Die Veränderung der Klangfarbe wurde wie folgt beurteilt:

Der ermittelte Wert bei einer Verzögerungszeit von 0,43 ms entspricht ungefähr dem in Teil 1 mit den selben Signalverhältnissen ermittelten Wert bei der Pegeldifferenz $\Delta L(R/C) = -8\text{dB}$. (Nr.10 = Nr.6, zweimal dargeboten)

Bei Verringerung der Laufzeit des rechten Lautsprechers wird nun die erhöhte Beeinflussung nicht nur des Hörereignisorts, sondern auch der Klangfarbe deutlich. Es wird außerdem eine deutliche Verschiebung des Hörereignisses nach vorne wahrgenommen.

Bei Erhöhung der Verzögerung über 0,5 ms hinaus ändert sich der Hörereignisort nicht, allerdings sind Veränderungen des Klangcharakters weiterhin hörbar. Es hängt aber wohl hauptsächlich von der Art des Testsignals ab, bei welchen Verzögerungen die beginnenden Kammfiltereffekte am störendsten erscheinen. Mit zunehmender Verzögerung ist außerdem ein erhöhtes Maß an wahrgenommener Räumlichkeit zu beobachten, das Hörereignis rutscht eher nach hinten.

In **Teil 3** des Vorversuchs wurden die Lautsprecher L und R mit jeweils gleichem Pegel und konstanter Verzögerung gemeinsam mit dem mittleren Lautsprecher dargeboten.

Eine Verschiebung des Hörereignisorts kann nicht auftreten, allerdings sind durch die Zuschaltung der beiden Lautsprecher wiederum Veränderungen des Klangcharakters und der Ausdehnung wahrnehmbar. Am störendsten erschien allerdings nicht die größere Ausdehnung des Hörereignisses, sondern eher die Änderung des Entfernungseindruck der Phantomschallquelle. Mit zunehmendem Pegel auf den seitlichen Lautsprechern rückte das Hörereignis nach vorne und verfärbte sich der Klang. Eine Veränderung des Klangcharakters war schon bei einem Pegel der beiden Lautsprecher ab ca. -9 dB unter dem des mittleren Lautsprechers wahrnehmbar.

Bei einigen Hauptmikrofonsystemen könnten die wahrnehmbaren Veränderungen der Klangfarbe zu Problemen führen, da der Pegel des dritten Lautsprechers, bzw. bei Wiedergabe im Center der Pegel der beiden äußeren Kanäle genug groß sind, um wahrnehmbare Klangfarbenveränderungen zu bewirken. (→ Kap. 8)

2.4.5. Zusammenfassung

In den Vorversuchen 2 und 3 wurde untersucht, welche Veränderungen das Hinzufügen des Center-Lautsprechers für die Parameter Lokalisationsschärfe und Klangfarbe bringt.

Der Center-Lautsprecher, der Verbesserungen für die Stabilität einer Abbildung bringen soll, kann auch in Bezug auf diese beiden Parameter die Qualität eines Klangbilds positiv beeinflussen (Vorversuche 2A und 2B, Abb. 2.12. und 2.15.).

Allerdings zeigen die Vorversuche, daß dies nur innerhalb gewisser Bereiche gilt und daß nicht grundsätzlich von einer Verbesserung durch das Hinzufügen dieses dritten Lautsprechers gesprochen werden kann. So besteht bei Darstellung einer Phantomschallquelle durch Einsatz dreier frontaler Lautsprecher immer noch ein deutlicher Unterschied zur Realschallquelle in Bezug auf Klangfarbe (Vorversuch 2A, Abb. 2.12.) und Lokalisationsschärfe (Vorversuch 2B, Abb. 2.14.). Außerdem findet Abbildung innerhalb der Phantomschallquellenebene in unterschiedlicher Qualität statt (Vorversuch 2A, Abb.2.13.).

Einen weiteren Punkt, der zur Vermeidung von Einbußen in Bezug auf diese beiden Parameter zu beachten ist, stellt die Entstehung eines „dreikanaligen Klangbilds“ dar. Die wesentliche Beteiligung aller drei Lautsprecher bei der Entstehung einer Phantomschallquelle erzeugt erhebliche Beeinträchtigungen der Klangfarbe. Es wurde untersucht, welche Voraussetzungen für die Beeinträchtigung der Klangfarbe gegeben sein müssen. Dabei wurden kritische Grenzen für Pegel und Laufzeit eines dritten, zusätzlichen Signals ermittelt (Vorversuch 3, Abb. 2.16., 2.17., 2.18.).

Kapitel 3

Rechnerische Lokalisationskurven

3.1. Einleitung

3.2. Rechnerische Herkunft

3.2.1. Errechnen der Pegel- und Zeitdifferenzen Δt , $\Delta L = f_1(\alpha)$

3.2.2. Näherungsfunktion $\phi = f_2(\Delta t, \Delta L)$

3.2.3. Öffnungswinkel und graphische Darstellung

3.3. Feststellen der Gültigkeit der rechnerischen Voraussage

3.4. „Optimale“ Lokalisationskurve

3.5. Beispiele Zweikanal

3.6. Beispiele Dreikanal

3.1. Einleitung

In diesem Kapitel wird beschrieben, auf welche Art und Weise die rechnerischen Lokalisationskurven erstellt wurden, die im Hörversuch mit den experimentellen Kurven verglichen wurden.

Die Umsetzung dieser schon im Jahr 1998 vom Verfasser entwickelten rechnerischen Methode geschah zunächst innerhalb einer Microsoft Excel-Tabelle mit zugehörigen Diagrammen.

Später wurde dieser Algorithmus in einem JAVA-Applet verwirklicht, der mit bedienerfreundlicher Oberfläche auch im Internet anwendbar ist.

(www.hauptmikrofon.de [Wittek 2000])

Da die Methode zur rechnerischen Ermittlung der Lokalisationskurven eine wichtige Hilfe bei den experimentellen Untersuchungen dieser Diplomarbeit darstellt, wird sie innerhalb dieser Arbeit noch einmal ausführlich erklärt.

Grundprinzip:

Nach den in Kapitel 2.3. besprochenen Gesetzen sind die horizontalen Positionen der Phantomschallquellen bei Hauptmikrofonanordnungen voraussagbar.

Mit den Parametern

- Mikrofoncharakteristika der beteiligten Mikrofone
- Hauptachsenwinkel der Mikrofone
- Mikrofonabstände
- Abstand der Schallquelle (Radius) und
- evtl. zusätzlicher Einflußnahme (Verzögerung, Pegelbeeinflussung)

lassen sich die Pegel- und Laufzeitdifferenzen zwischen den Mikrofonsignalen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Signals errechnen.

Diese entsprechen bei vorausgesetztem diskretem Routing auf die jeweiligen Lautsprecher (linkes Mikrofon auf L, mittleres auf C, rechts auf R) auch den Signaldifferenzen zwischen den Lautsprechern.

Mit den bekannten Abbildungsgesetzen sowie den standardisierten Öffnungswinkeln der Lautsprecher kann nun die Auslenkung einer Phantomschallquelle ermittelt werden, die durch diese Signaldifferenzen verursacht wird.

Es wird die Abbildung zwischen jeweils nur *zwei* benachbarten Lautsprechern betrachtet. Die Lautsprecherbasen, in denen Abbildung erfolgt, sind für

Zweikanal-Stereo: L-R

Mehrkanal: L-C, C-R.

Wie in Kapitel 2.4.(Vorversuch 3) besprochen, haben 3fach-Übertragungen kohärenter Signale wenigstens auf den Parameter horizontale Auslenkung keinen oder wenig Einfluß, wenn der Pegel des Übersprechens auf den dritten Kanal genug klein (-10dB) bei genügend großer Verzögerung ($>0,5\text{ms}$) ist.

Dies ist auch bei L-C-R-Hauptmikrofonensystemen mit 3 Nierenmikrofonen der Fall, wenn der Versatzwinkel und der Abstand der Nieren untereinander genug groß ist.

Dieser Fall sei bei allen Berechnungen vorausgesetzt.

Bei Mikrofonanordnungen, die aus Kugeln bestehen, wird allerdings, wenn ihr Abstand zueinander gering ist, auch die Auslenkung vermehrt durch die Beteiligung aller drei Lautsprecher bewirkt.

Abbildung in den Lautsprecherbasen L-LS, R-RS und LS-RS wird nicht errechnet, da sie auch für Sitzpositionen im „sweet spot“ instabil ist, da andere Lokalisationskurven gelten (siehe [Theile/Plenge 1976]) und da vom Verfasser erwartet wird, daß in diesen Bereichen andere Gesetze als die der Richtungsabbildung bei der Mikrofonaufstellung eine wichtigere Rolle spielen.

Gesetzmäßigkeiten zur optimalen Abbildung von Räumlichkeit und räumlicher Eingebundenheit stehen noch aus.

Nun müssen Funktionen festgesetzt werden, die den Zusammenhang zwischen Pegel- bzw. Laufzeitunterschieden der Lautsprechersignale und der Auslenkung der Phantomschallquelle beschreiben.

Voraussetzungen für die Lautsprecheranordnung sind Standard-Zweikanal-Anordnung im Stereodreieck, bzw. Standard-3/2-Anordnung nach SSF-001[SSF 1998].

Grundprinzip der Errechnung einer Lokalisationskurve einer Mikrofonanordnung ist also die mathematische Bestimmung des Zusammenhangs folgender Größen:

Signaldifferenzen: $\mathbf{Dt}, \mathbf{DL} = f_1(\mathbf{a})$ $\alpha =$ Einfallswinkel;

Auslenkung: $\mathbf{F} = f_2(\mathbf{Dt}, \mathbf{DL})$

Aus der Verknüpfung dieser beiden Funktionen entsteht die Lokalisationskurvenfunktion einer Mikrofonkonfiguration:

$$\mathbf{F} = f(\mathbf{a})$$

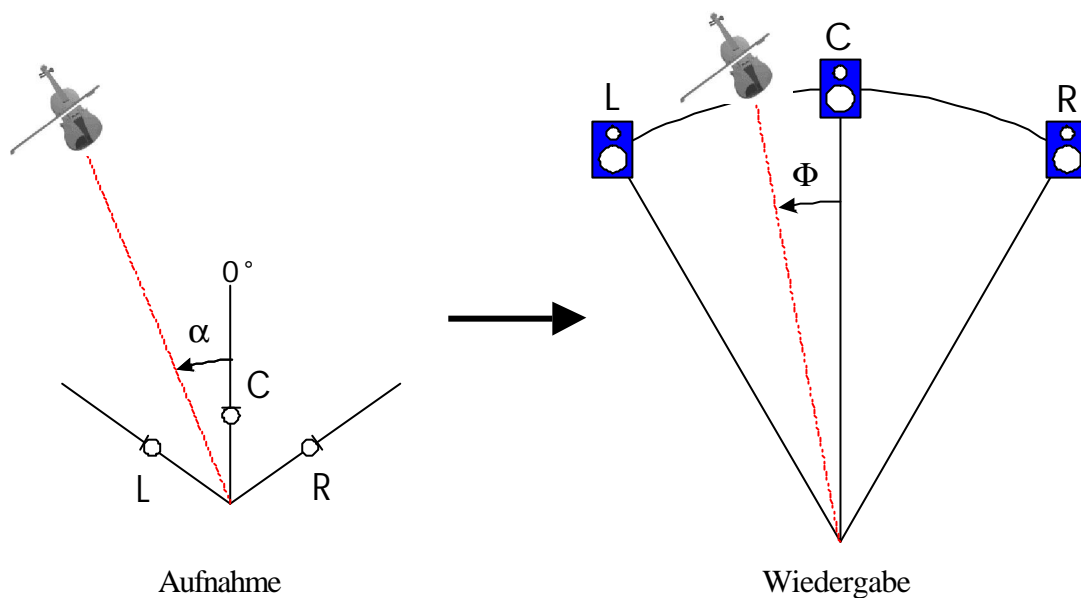


Abbildung 3.1.: Zusammenhang zwischen Einfallswinkel \mathbf{a} und Auslenkung \mathbf{F}

3.2. Rechnerische Herkunft

3.2.1. Errechnen der Pegel- und Zeitdifferenzen: $\mathbf{Dt}, \mathbf{DL} = f_1(\mathbf{a})$

Vorausgesetzt wird:

- Die Mikrofoncharakteristika für Kugel, breite Niere, Niere und Acht entsprechen dem mathematischen Ideal (siehe unten)

- Die Amplitude des Direktsignals einer Signalquelle im Abstand r vom Empfänger beträgt $A = r_0 \cdot \left(\frac{1}{r}\right) \cdot A_0$; ($1/r$ -Gesetz : Die durch die unterschiedlichen Abstände der Mikrofone zur Signalquelle auftretenden Pegeldifferenzen beim Direktsignal sind bei kleinen bis mittleren Entfernungen der Signalquelle erheblich. Da zur Lokalisation nur das Direktsignal ausgewertet wird, müssen diese Verzerrungen eingerechnet werden.)

Das Signal trifft wie folgt auf die Mikrofonanordnung:

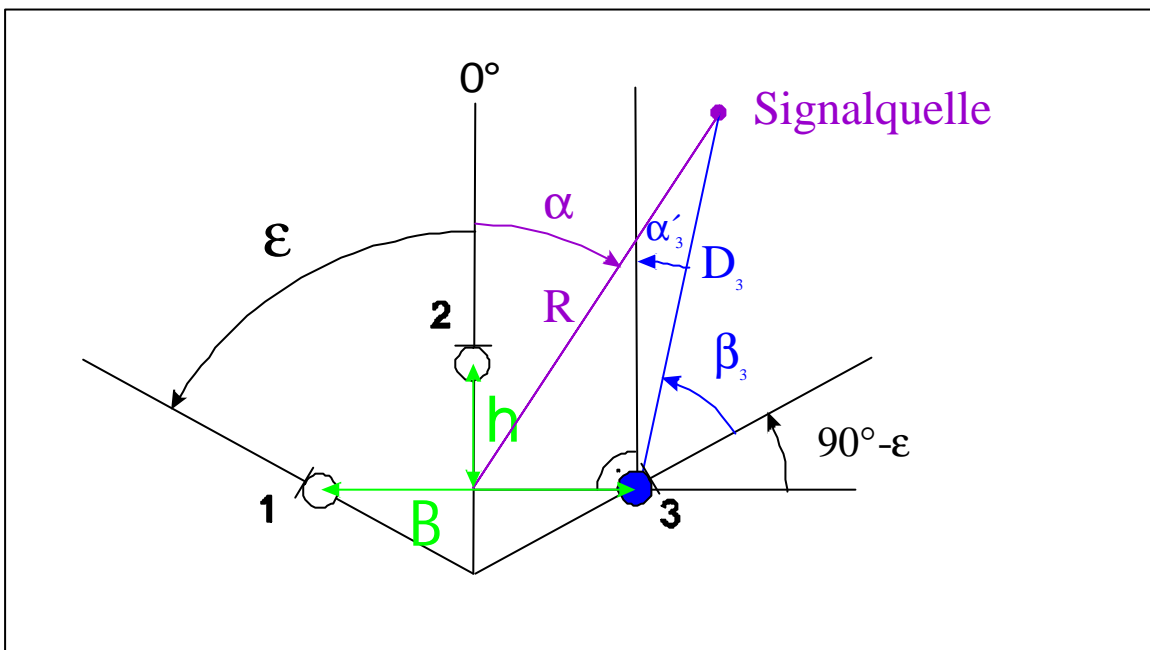


Abbildung 3.2.: Parameter einer Mikrofonanordnung mit Signalquelle

Gegebene Parameter der Mikrofonanordnung:

- Basis B
- Höhe h
- Hauptachsenwinkel ε
- Richtcharakteristika der Mikrofone 1, 2 und 3

Signalquellen-abhängige Größen:

- Einfallswinkel α
- Abstand R zur Mikrofonbasismitte

Der Abstand R der Signalquelle fließt nur wesentlich in die Berechnungen ein, wenn er nicht groß im Verhältnis zur Basis B und der Höhe h ist.

Mit einfachen mathematischen Mitteln lassen sich nun die verschiedenen Laufzeiten und Pegel berechnen. Dazu werden die Weglängen eines Signals aus der Entfernung R und dem Einfallswinkel α berechnet. Außerdem sind die abweichenden Eintreffwinkel α'_1 , α'_2 und α'_3 auf die Mikrofone von Bedeutung.

- Weglänge D_3 des Signals zum Mikrofon 3:

$$D_3 = \sqrt{R^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2 - R \cdot B \cdot \cos(90^\circ - \mathbf{a})}$$

- Laufzeit t_3 des Signals zum Mikrofon 3:

$$t_3 = \frac{D_3}{c} \text{ mit } c = \text{Schallgeschwindigkeit}$$

- Eintreffwinkel α'_3 des Signals auf Basissenkrechte durch Mikrofon 3:

$$\mathbf{a}'_3 = \arcsin \left(\frac{R \cdot \sin \mathbf{a} - \left(\frac{B}{2}\right)}{D_3} \right)$$

- Eintreffwinkel β_3 des Signals auf die Hauptachse des Mikrofons 3:

$$\mathbf{b}_3 = \mathbf{a}'_3 - \mathbf{e}$$

- vom Mikrofon verursachter Dämpfungsverlauf:

Richtcharakteristik Mikrofon	Amplitude A
Kugel	1
Breite Niere	$\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \cos \mathbf{b}$
Niere	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \mathbf{b}$
Acht	$\cos \mathbf{b}$

Tabelle 3.1.: zu verschiedenen Richtcharakteristika gehörende Dämpfungsfunktionen

Die Richtcharakteristik *Superniere* entsteht theoretisch durch Mischung

aus Niere und Acht nach der Funktion $A = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cos \mathbf{b}$.

Für die Auswertung im Computerprogramm wurden eine über alle Frequenzen gemittelte Dämpfungsfunktion nach Meßprotokollen der Firma Schoeps [Schoeps 2000] verwendet, da die gemessenen Daten teilweise deutlich von den theoretischen Werten abweichen.

- durch abweichende Entfernungen der Mikrofone zur Signalquelle verursachter

Einfluß auf die Amplitude: $A_3 = R_3 \cdot \left(\frac{1}{D_3} \right) \cdot A_3$; R und D: siehe Abbildung 3.2.

- vom Signal verursachter Pegel am Mikrofon 3:

$$L_3 = 20 \cdot \log_{10}(|A_3|)$$

Die Berechnungen für die Mikrofone 1 und 2 verlaufen entsprechend. Der Parameter h (Höhe) fließt in die Berechnungen der zum Mikrofon 2 gehörenden Werte ein.

Zur Auswertung wird nun gebildet:

Zweikanal:

- $\Delta L(L/R) = L_1 - L_3$
- $\Delta t(L/R) = t_1 - t_3$

Mehrkanal:

- $\Delta L(L/C) = L_1 - L_2$
- $\Delta L(C/R) = L_2 - L_3$
- $\Delta t(L/C) = t_1 - t_2$
- $\Delta t(C/R) = t_2 - t_3$

- Summenleistungspegel P aller beteiligten Mikrofone:

$$P = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + 10^{\frac{L_3}{10}} \right)$$

3.2.2. Näherungsfunktion $\mathbf{f} = f_2(\mathbf{Dt}, \mathbf{DL})$

Zur Ermittlung der Auslenkung in Abhängigkeit von den vorliegenden Signaldifferenzen Δt und ΔL wird nun eine Näherungsfunktion eingeführt, die zur rechnerischen Bestimmung verwendet wird.

Die mathematische Beziehung dieser Funktion lautet: $\phi = f(\Delta t, \Delta L)$;

Der Buchstabe \mathbf{f} drückt eine relative Auslenkung (in Prozent) aus, der Buchstabe \mathbf{F} eine absolute (in Grad).

Die Gesetzmäßigkeiten der Stereophonie und die Ergebnisse eigener Voruntersuchungen lassen schließen:

- bis zu einer Auslenkung von 50% (bei 60° Standard-Zweikanal-Öffnungswinkel sind das +/-15°) verhalten sich die Zusammenhänge von Pegel- bzw. Laufzeitdifferenzen zur Auslenkung linear.
- ab bestimmten Pegel- bzw. Laufzeitdifferenzen sind keine Änderungen der Auslenkung mehr feststellbar. Die Phantomschallquelle wird nur noch in einem Lautsprecher geortet.

Das ergibt einen aus mehreren Teilen zusammengesetzten Kurvenverlauf:

Pegeldifferenzen:

- 0 bis ca. 7 dB: linearer Zusammenhang zwischen Pegeldifferenzen und Auslenkung
- ca. 7 bis ca. 18 dB: Steigung der Kurve nimmt stetig ab → allmähliche „Sättigung“
- ab ca. 18 dB: Kurvenverlauf konstant, Auslenkung maximal

Als Steigung im linearen Verlauf wird die Beziehung 7,3% / dB verwendet. (Kap.2.3.) Da dieselben Auslenkungsgesetze natürlich in die andere Richtung auch gelten, ergibt sich ein symmetrischer Verlauf im negativen Bereich.

Abbildung 3.3. zeigt eine grafische Darstellung der ermittelten Zusammenhänge:

Auslenkung der Phantomschallquelle durch Pegeldifferenzen

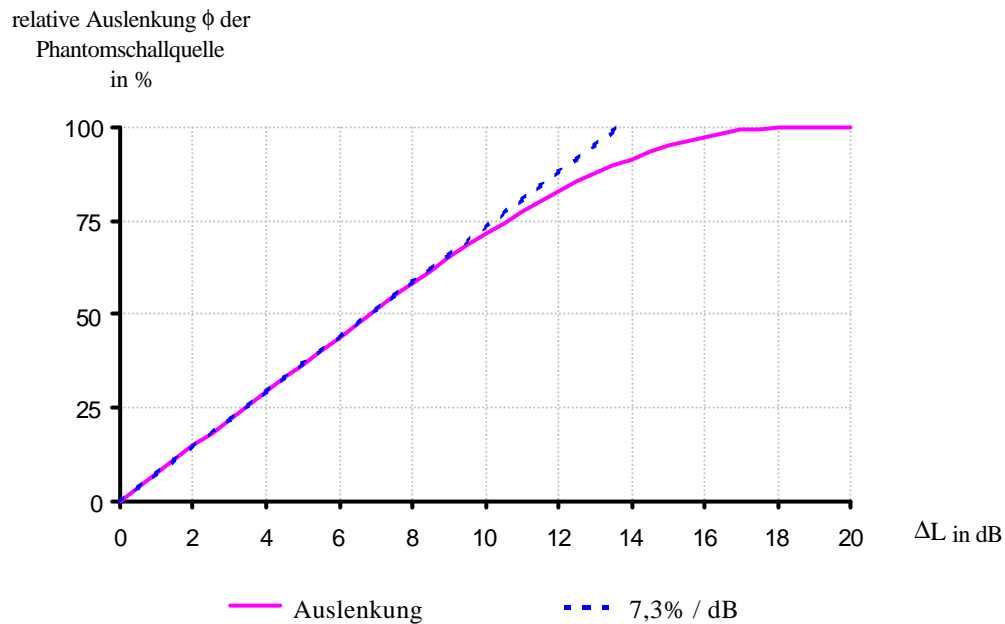


Abbildung 3.3.: Auslenkung ϕ in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz ΔL

Laufzeitdifferenzen:

- 0 bis ca. 0,4 ms: linearer Zusammenhang zwischen Laufzeitdifferenzen und Auslenkung
- ca. 0,4 bis ca. 1 ms: Steigung der Kurve nimmt stetig ab
- ab ca. 1 ms: Kurvenverlauf konstant, Auslenkung maximal

Als Steigung im linearen Verlauf wird die Beziehung 12,7 % / 0,1 ms verwendet (Kap.2.3.). Dieser Verlauf kann nur eine Näherung für durchschnittliche Signalarten darstellen, da eine laufzeitbezogene Auslenkung stark von Impulshaftigkeit und Frequenz des Signals abhängt.

Abbildung 3.4. zeigt eine grafische Darstellung obiger Zusammenhänge:

Auslenkung der Phantomschallquelle durch Laufzeitdifferenzen

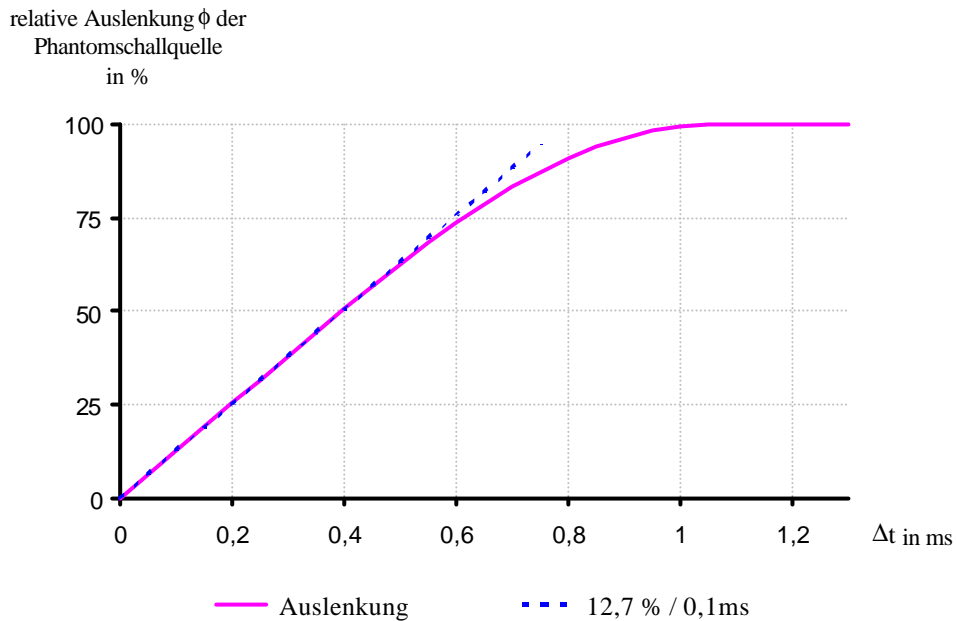


Abbildung 3.4.: Auslenkung \mathbf{f} in Abhängigkeit von der Laufzeitdifferenz \mathbf{D}

Kombinierte Pegel- und Laufzeitdifferenzen:

Da Pegel- und Zeitkurven kongruent verlaufen, läßt sich eine gemeinsame Näherungsfunktion für beide Zusammenhänge definieren.

Außerdem addieren sich im linearen Bereich nach Theile [Theile 1984] Pegel- und Laufzeitunterschiede gleichsinnig nach:

$$\phi(\Delta L, \Delta t) = \phi(\Delta L) + \phi(\Delta t);$$

Dazu ist es notwendig, die Laufzeitdifferenzen in entsprechende Pegeldifferenzen umzurechnen, was aufgrund der gleich verlaufenden Lokalisationskurven möglich ist.

Der resultierende Umrechnungsfaktor ist:

$$z = 17,3 \text{ dB / ms oder im Kehrwert } 1 / z = 58 \text{ } \mu\text{s / dB.}$$

→ Umrechnung Laufzeit- ↔ Pegeldifferenz: $\Delta t \cdot z = \Delta L$ mit $z = 17,3 \text{ dB/ms}$

Um diese Kombination von Pegel- und Laufzeitdifferenzen auch im nichtlinearen Bereich der Näherungsfunktion zu ermöglichen, wird nun festgesetzt:

- nur für Auslenkungen $\leq 50\%$ gilt: $\phi(\Delta L, \Delta t) = \phi(\Delta L) + \phi(\Delta t)$, da sonst auf der rechten Seite Werte über 100% entstehen
- dies wird verhindert, indem die Näherungsfunktion auf die Summe der Signaldifferenzen angewendet wird: $\Delta_{ges} = \Delta L + z \cdot (\Delta t)$

Diese Vorgehensweise bedeutet z.B., daß eine Pegeldifferenz von 6,5 dB und eine Laufzeitdifferenz von 0,4ms alleine jeweils ca. 50% Auslenkung, gemeinsam aber nur ca. 92% Auslenkung zur Folge haben.

Zu beachten ist außerdem, daß die Addition der Wirkung von *gegensinnigen* Pegel- und Laufzeitdifferenzen anderen Gesetzen folgt. Bei kleineren Werten ist zwar ein Ausgleich dieser gegenseitigen Wirkungen möglich, dies ist aber verbunden mit einem Verlust an Abbildungsschärfe.

Nun kann die resultierende Gesamtdifferenz Δ_{ges} in eine Näherungsfunktion eingesetzt werden, die einen mit den beiden letzten Kurven (nur Pegel, nur Laufzeit) identischen Verlauf hat:

Näherungsfunktion für die Auslenkung der Phantomschallquelle

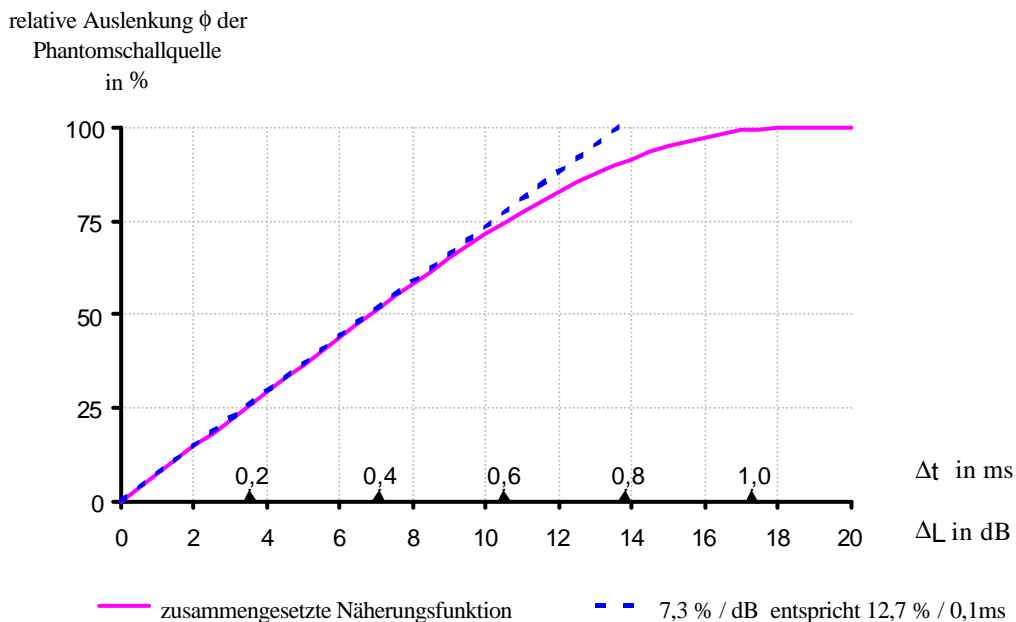


Abbildung 3.5.: Auslenkung \boldsymbol{f} in Abhängigkeit von Laufzeitdifferenz \boldsymbol{D} oder Pegeldifferenz \boldsymbol{DL}

Die 3-teilige Näherungsfunktion lautet mathematisch: (x entspricht $\Delta_{\text{ges}}/\text{dB}$)

Linearer Verlauf bis 50% Auslenkung:

$$|x| \leq 6 \cdot k: \quad f(x) = \frac{x}{12 \cdot k} \quad (= 7,3\% /\text{dB})$$

allmähliche Sättigung bis 100% Auslenkung:

$$6 \cdot k < |x| < 16 \cdot k: \quad f(x) = \frac{\text{sgn}(x)}{6000 \cdot k^3} \left[-|x^3| + 8 \cdot k \cdot x^2 + 512 \cdot k^2 \cdot |x| - 144 \cdot k^3 \right]$$

konstanter Verlauf ab 100% Auslenkung:

$$|x| \geq 16 \cdot k: \quad f(x) = \text{sgn}(x)$$

$$\text{mit } k = \frac{9}{8}.$$

sgn(x) ist die Signum-Funktion, liefert also das Vorzeichen des Arguments, mögliche Ergebnisse: 1 und -1.

An den Grenzen der Teile sind die Funktion $\phi(x)$ und deren Ableitung stetig. Die Entwicklung dieser Näherungsfunktion stammt von Dieter Wittek [private Mitteilung].

3.2.3. Öffnungswinkel und graphische Darstellung

Mit Hilfe dieser Näherungsfunktion kann nun der Abbildungsverlauf in Form der Lokalisationskurve einer bestimmten Stereophonieanordnung angegeben werden.

Dazu müssen die relativen Auslenkungsgrade ϕ in die absoluten Auslenkungen Φ umgerechnet werden.

In Kapitel 2 wurde festgestellt, daß die Gesetze der Auslenkung einer Phantomschallquelle in Übereinstimmung mit dem Assoziationsmodell [Theile 1980] für beliebige Basisgrößen gelten. Somit können nun beliebige Öffnungswinkel Ω zur Ermittlung der absoluten Auslenkungen verwendet werden:

$$\text{Umrechnung relative Auslenkung } f \rightarrow \text{absolute Auslenkung } \mathbf{F}: \quad \Phi = \left(\frac{\Omega}{2}\right) \cdot f$$

mit Öffnungswinkel Ω und prozentualem Grad der Auslenkung ϕ

$$\text{(z.B. } \Phi = \left(\frac{60^\circ}{2}\right) \cdot 50\% = 15^\circ \rightarrow 50\% \text{ Auslenkung bei normaler Stereobasis)}$$

Die Öffnungswinkel der beiden Lautsprecherbasen L/C und C/R bei Standard-3/2-Stereo-Anordnung betragen 30° . Zur Ermittlung der relativ zur Mittelachse definierten Auslenkung innerhalb dieser beiden Lautsprecherbasen (siehe Abbildung 9.4.) müssen die jeweiligen Auslenkungen korrigiert werden, da die Basismittelpunkte nun bei $\pm 15^\circ$ liegen:

$$\Phi(L/C) = \Phi - 15^\circ$$

$$\Phi(C/R) = \Phi + 15^\circ$$

Nun können die jeweiligen Auslenkungen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Signals ausgegeben werden. Die entstehende Lokalisationskurve beschreibt damit den theoretischen Abbildungsverlauf einer Stereophonieanordnung.

Ein Beispiel zeigt Abbildung 3.5.: dreikanaliges Mikrofon OCT 70(→ Kap.4.4.2.)

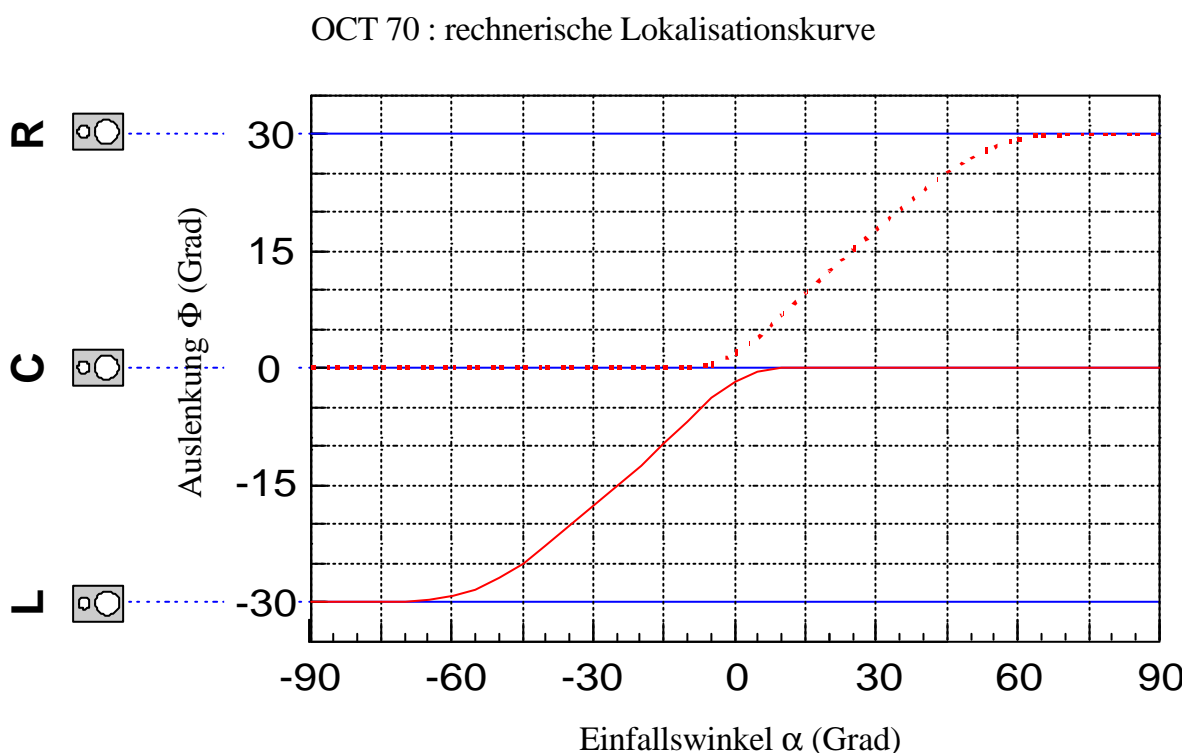


Abbildung 3.5.: rechnerische Lokalisationskurven am Beispiel OCT 70 (siehe Kap 4.4.2.)

Zusätzlich können folgende Daten ausgewertet und dargestellt werden:

- die einzelnen Komponenten Pegel- und Laufzeitdifferenz (Abbildung 3.6) (wichtig für die Erkennung von Gegensinnigkeiten oder zur Abschätzung der Stabilität aufgrund der Anteile von Pegel- oder Laufzeitdifferenzen!)

- der Summenleistungspegel aller beteiligten Mikrofone (Abbildung 3.7.) (bei ungleichmäßigem Verlauf werden bestimmte Bereiche bevorzugt oder benachteiligt)

Vorstellbar ist auch die grafische Darstellung des Pegels des jeweils an der Abbildung nicht beteiligten Kanals, als des Übersprechpegels. Allerdings sollte für eine solche Darstellung mehr über die Wirkung konkreter Pegel in Abhängigkeit von der jeweiligen Laufzeit bekannt sein.

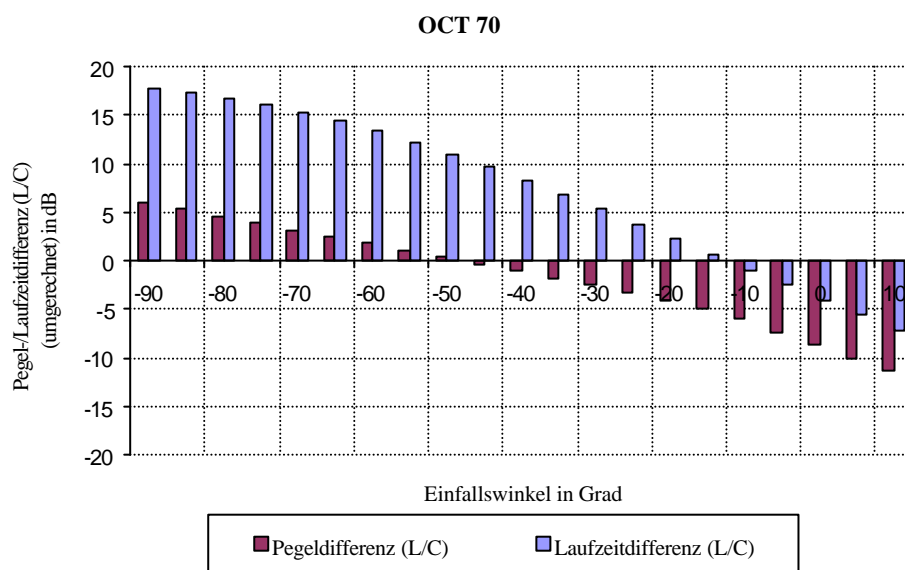


Abbildung 3.6.: Darstellung der Einzelkomponenten Pegel- und Laufzeitdifferenz am Beispiel OCT 70

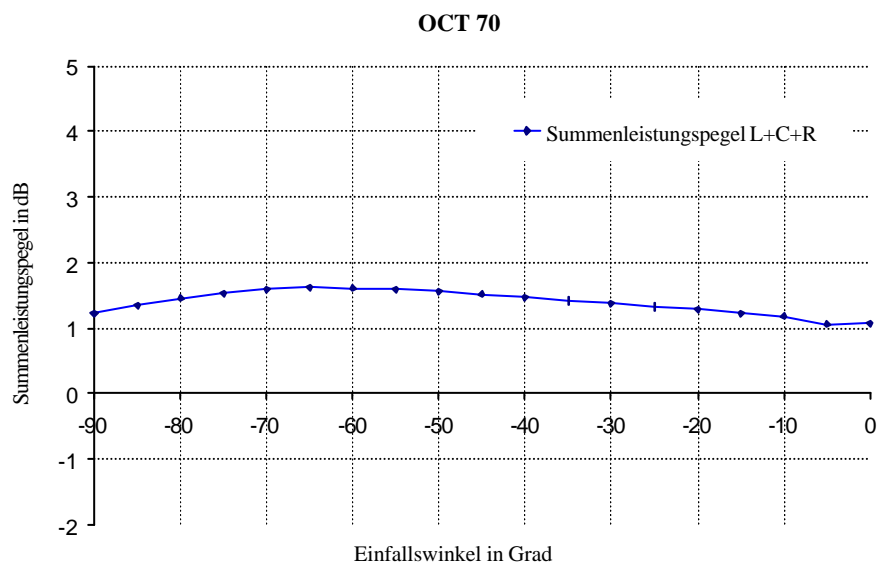


Abbildung 3.7.: Darstellung des Summenleistungspegels aller drei Kanäle am Beispiel OCT 70

3.3. Feststellen der Gültigkeit der rechnerischen Voraussage

Anhand einiger eigener Voruntersuchungen und der Ergebnisse aus dem Hörversuch (→ Kap.6) kann die Gültigkeit der errechneten Näherungswerte bestätigt werden.

Die Meßwerte des Zweikanalmikrofons zeigen sehr gute Übereinstimmung, die der dreikanaligen Mikrofone unterschiedlich gute Übereinstimmung. Dabei ist allerdings der *qualitative* Verlauf der Lokalisationskurve entscheidend, den die rechnerische Voraussage in jedem Fall bieten kann. Eventuelle quantitative Abweichungen wie z.B. bei den Messungen des dreikanaligen Mikrofons INA3 könnten ein Indiz für eventuelle Unsymmetrien der Lokalisation in den vorderen, kleinen Basen der Mehrkanalanordnung darstellen, die wiederum bei anderen, vergleichbaren Mikrofonanordnungen nicht entdeckt werden konnten.

3.4. „Optimale“ Lokalisationskurve

Eine „optimale“ Lokalisationskurve müßte folgende Eigenschaften haben:

- möglichst linearer Verlauf, d.h. „naturgetreue“, maßstabsgerechte Abbildung
 - kein auffälliger Center, d.h. keine Abbildung größerer Bereiche im Center-Kanal
 - keine Verzerrung der Aufnahmeverhältnisse, sog. „winkellineare“ Abbildung
- möglichst konsistenter Zusammenhang zwischen Pegel- und Laufzeitdifferenz, d.h. immer dasselbe Vorzeichen der beiden Parameter, keine gegensinnigen Verläufe
- möglichst ausgeglichener Verlauf des Summenleistungspegels

zusätzlich bei Drei-Kanal-Mikrofonen:

- möglichst geringes Übersprechen auf das nicht beteiligte Mikrofon, also z.B. geringer Pegel des rechten Kanals bei Abbildung im linken Sektor

Anhand der Abweichungen von diesen optimalen Bedingungen können bestimmte Fehler und Schwächen einer Abbildung abgelesen werden.

Beispiele dazu in den Abschnitten 3.5. und 3.6..

Optimaler Verlauf der Lokalisationskurve: lineare, maßstabsgerechte Abbildung

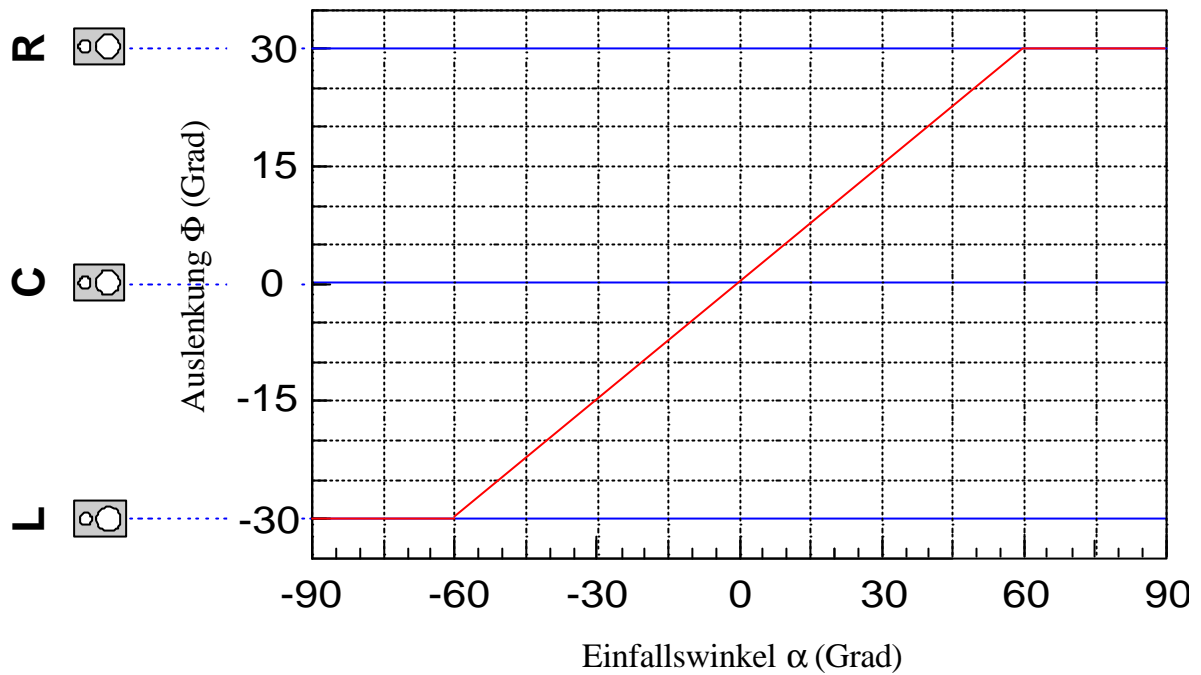


Abbildung 3.8.: Verlauf einer „optimalen“ Lokalisationskurve für einen Aufnahmebereich von ca. 120°

Keine Aussage können die Kurven zu folgenden Aspekten treffen:

- Räumlichkeit
- Klangfarbe
- Abbildungsschärfe (nur indirekt)
- Raum-/Direktschall-Verhältnis
- frequenzabhängiges Abbildungsverhalten
- Stabilität (nur indirekt)

3.5. Beispiele Zweikanal

3.5.1. ORTF (2 Nierenmikrofone, Mikrofonbasis: 17,5 cm, Hauptachsenwinkel: $\pm 55^\circ$)

ORTF ($\epsilon = \pm 55^\circ$, L-R = 17,5cm): rechnerische Lokalisationskurve

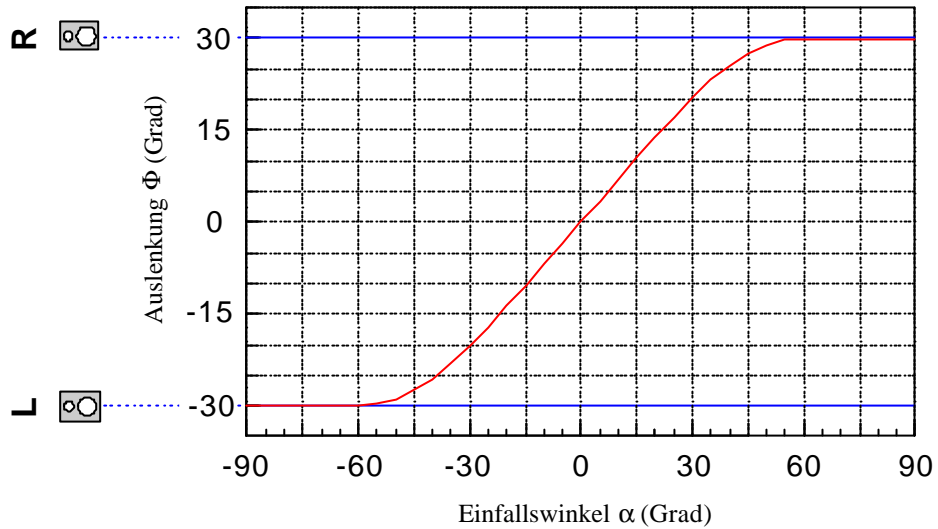


Abbildung 3.9.: ORTF: rechnerische Lokalisationskurve

Aufnahmebereich: ca. 90°

Verlauf: sehr ausgewogen, recht linear innerhalb von ca. 70% des Aufnahmebereichs, leichte Abflachung der Abbildungskurve an den Rändern des Aufnahmebereichs durch Beteiligung von Laufzeitdifferenzen

3.5.2. XY – koinzident (2 Nierenmikrofone, Mikrofonbasis = 0, Hauptachsenwinkel = $\pm 45^\circ$)

XY ($\epsilon = 45^\circ$, L-R = 0): rechnerische Lokalisationskurve

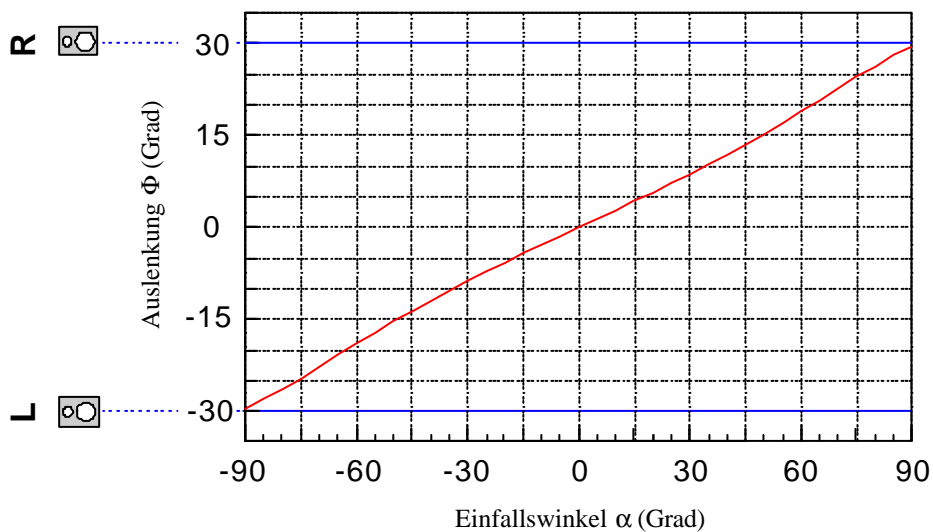


Abbildung 3.10.: XY (45°): rechnerische Lokalisationskurve

Aufnahmebereich: 180°

Verlauf: sehr linear, leicht S-förmig geschwungen, das heißt ein eher mittiger Abbildungsverlauf, Pegeldifferenz bei $\pm 90^\circ$ gute 16dB.

3.5.3. ab– 40 cm (2 Kugelmikrofone, Mikrofonbasis = 40 cm)

ab (Kugeln, L-R= 40cm): rechnerische Lokalisationskurve

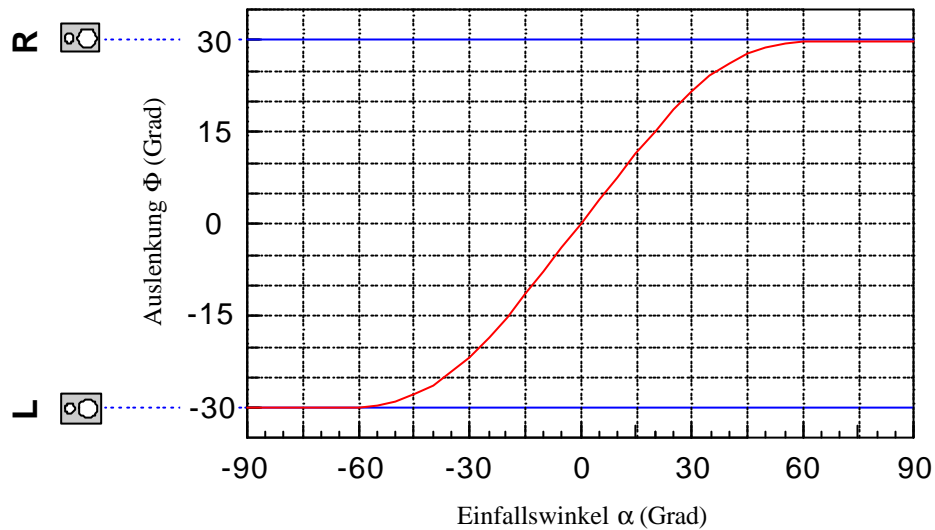


Abbildung 3.11.: ab 40cm: rechnerische Lokalisationskurve

Aufnahmebereich: ca. 90°

Verlauf: deutlich nach außen abflachend \rightarrow in der Mitte werden nur verhältnismäßig kleinere Bereiche des Aufnahmebereichs abgebildet

3.6. Beispiele Dreikanal

3.6.1. OCT 50 – Aufbau siehe Kapitel 4.4.2.

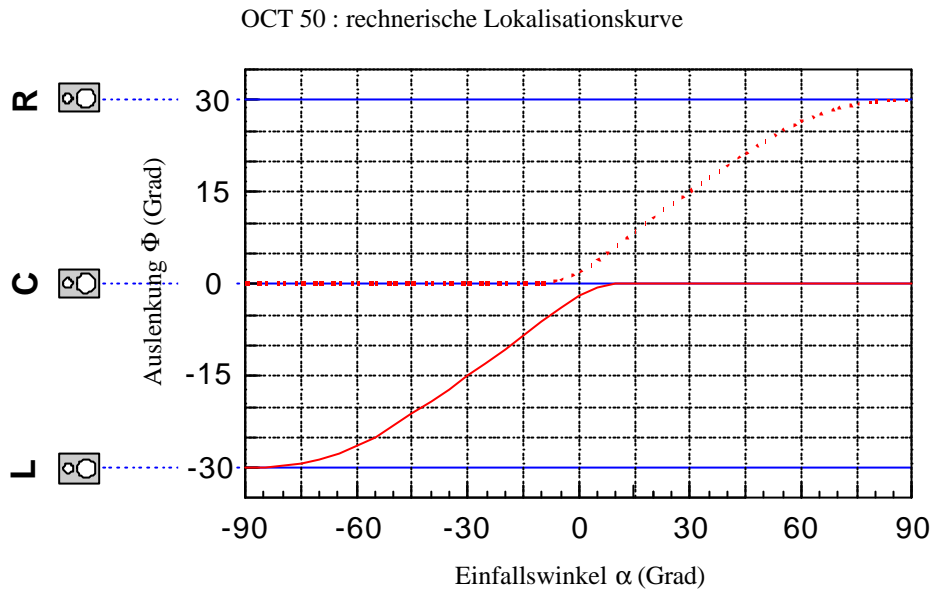


Abbildung 3.12.: OCT 50: rechnerische Lokalisationskurve

Aufnahmebereich: ca. 150°

Verlauf: ausgewogen

Nachteil: Signaldifferenzen gegensinnig im Bereich 30° - 40° Einfallswinkel

3.6.2. OCT 70 – Aufbau siehe Kapitel 4.4.2.

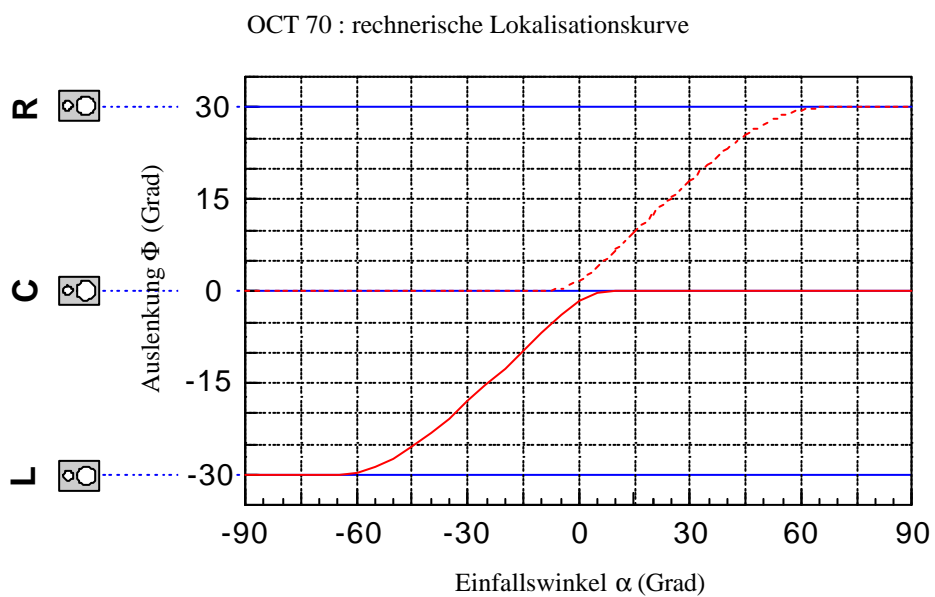


Abbildung 3.13.: OCT 70: rechnerische Lokalisationskurve

Aufnahmebereich: ca. 120°

Verlauf: ausgewogen

Nachteil: Signaldifferenzen gegensinnig im Bereich 30° - 45° Einfallswinkel

3.6.3. „approach by Williams“ – 1 (aus [Williams 2000])

Aufbau: (ähnlich INA3 siehe Kap. 4.4.1.)

3 Nierenmikrofone

Mikrofonbasis L-R = 100,1 cm

Höhe = 22,81 cm

Hauptachsenwinkel = $\pm 75^\circ$

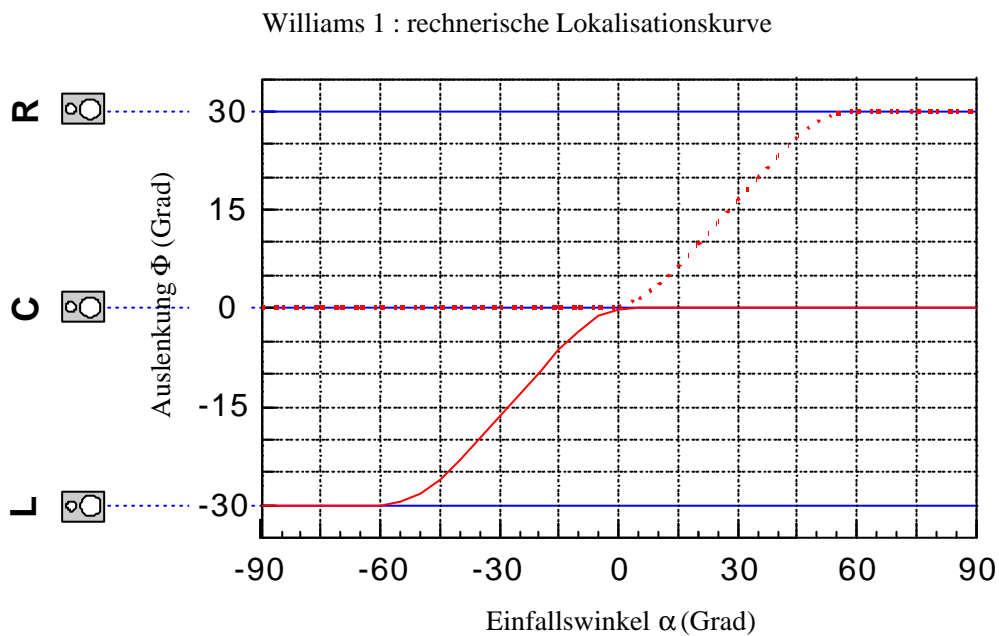


Abbildung 3.14.: „approach by Williams“ - 1: rechnerische Lokalisationskurve

Aufnahmebereich: ca. 110°

Verlauf: etwas mittig

Nachteile: Übersprechpegel des nicht an der Abbildung beteiligten Mikrofons erheblich, erheblicher Anteil von Laufzeitdifferenzen \rightarrow geringe Stabilität

3.6.4. INA3 / „approach by Williams“ – 2 (Aufbau siehe Kap. 4.4.1.)

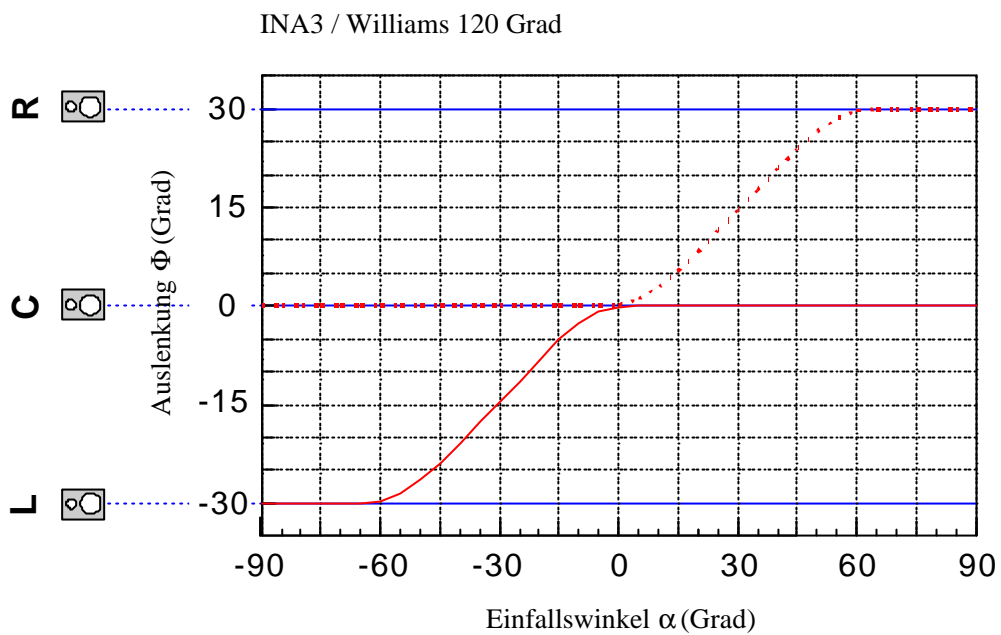


Abbildung 3.15.: INA3 / „approach by Williams“ - 2: rechnerische Lokalisationskurve

Aufnahmebereich: ca. 120 Grad

Verlauf: mittig

Nachteil: Übersprechpegel des nicht an der Abbildung beteiligten Mikrofons erheblich, erheblicher Anteil von Laufzeitdifferenzen \rightarrow geringe Stabilität (\rightarrow Kap. 6.3.2.)

Kapitel 4

Aufnahmetechniken für Stereo und Surround

4.1. Grundtechniken der stereofonen Abbildung

4.1.1. Intensitätsstereofonie

4.1.2. Laufzeitstereofonie

4.1.3. Äquivalenzstereofonie

4.2. Das Hauptmikrofon als Aufnahmeverfahren für 5.1-Surround-Wiedergabe?

4.2.1. Das Hauptmikrofon in Zweikanal-Erfahrungen

4.2.2. Das Hauptmikrofon bei Mehrkanal-Aufnahmen

4.3. Vergleich zweikanaliger Hauptmikrofonverfahren

4.4. Vergleich unterschiedlicherer Hauptmikrofonverfahren für 3/2-Stereo

4.4.1. INA – „Ideale Nieren-Anordnung“

4.4.2. OCT – „Optimized Cardioid Triangle“ - Optimierung beim Übersprechpegel

4.4.3. Zwei unabhängige Zweikanal-Hauptmikrofone

4.4.4. Surroundverfahren mit Kugelflächenmikrofon

4.4.5. Vorschläge von Williams

4.4.6. Polymikrofonie, „Decca Tree“

Zunächst wird auf die Grundtechniken der Abbildung eingegangen, da sie Grundlage für die Thematik dieser Arbeit sind. Weitere Aspekte werden in 4.2. angesprochen.

4.1. Grundtechniken der stereofonen Abbildung

Mit den Gesetzen zur Auslenkung einer Phantomschallquelle können bei der Lautsprecherstereofonie Klangkörper auf unterschiedliche Weise in der Phantomschallquellenebene abgebildet werden.

Entscheidend bei allen Stereofoniearten ist die Gültigkeit des Prezedenz-Effekts. Somit wird nur die erste Wellenfront eines Signals zur Ausbildung einer Phantomschallquelle herangezogen. Reflexionen und Nachhall bestimmen Lautheit, Ausdehnung und Entfernung einer Phantomschallquelle, haben aber keinen Einfluß auf die Auslenkung der Phantomschallquelle.

Daher finden die theoretischen Gesetze (Kap.2) in der Stereofonie uneingeschränkte Gültigkeit.

Es existieren aufgrund der unterschiedlichen Möglichkeiten, Phantomschallquellen zu bilden, verschiedene Grundtechniken der stereofonen Abbildung. Diese haben sowohl in Zwei- als auch in Mehrkanaltechnik Gültigkeit:

4.1.1. Intensitätsstereofonie

Nach den bekannten Gesetzen können Phantomschallquellen durch Pegelunterschiede ausgelenkt werden.(→Kap. 2)

Entscheidend dabei sind die Schalldruckpegeldifferenzen, nicht die Intensitätsdifferenzen!

Diese Pegeldifferenzen lassen sich durch bestimmte Anordnungen zweier Mikrofone erzeugen. Da keine Laufzeitdifferenzen vorliegen sollen, befindet sich das Mikrofonpaar am selben Ort (koinzident). Der Winkel zwischen den beiden Mikrofonen und deren Richtcharakteristika bestimmen dabei die durch Schalleinfall aus einer bestimmten Richtung erzeugte Pegeldifferenz zwischen den beiden Kanälen. Es kann rechnerisch bestimmt werden, welche Abbildung in der Phantomschallquellenebene eine bestimmter Versatzwinkel zur Folge hat.

XY ($\varepsilon = 45^\circ$, L-R=0): rechnerische Lokalisationskurve

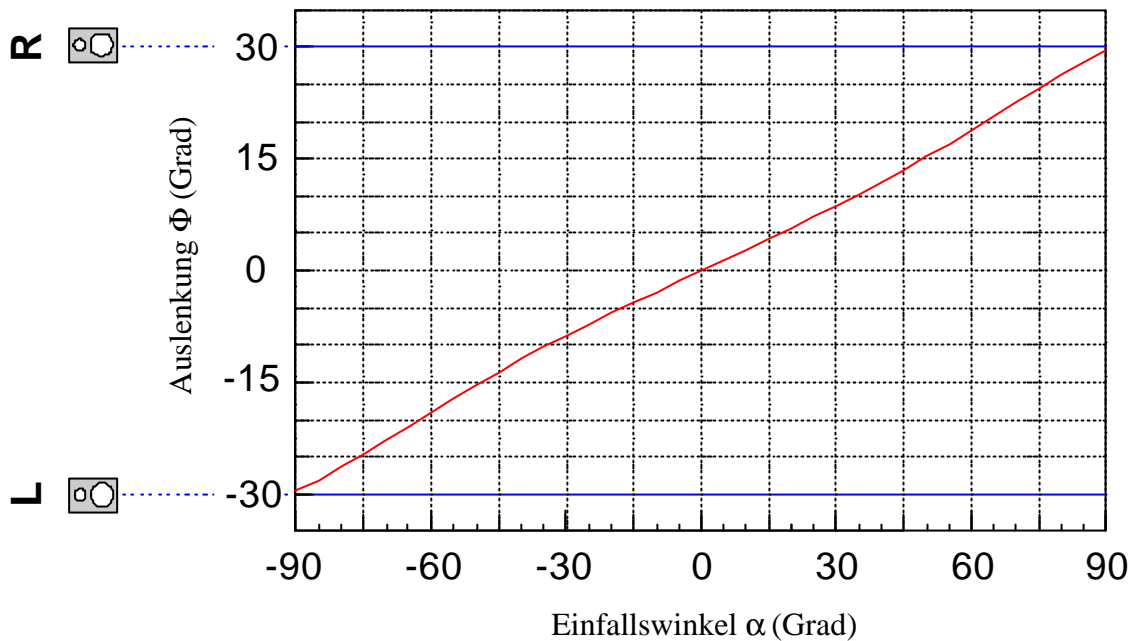


Abbildung 4.1.: Beispiel für eine Koinzidenzanordnung:
XY: 2 Nieren, Hauptachsenwinkel jeweils $\pm 45^\circ$, Abstand 0 cm

Die Staffelung der aus verschiedenen Richtungen eintreffenden Signale in der Phantomschallquellenebene ist aus der Lokalisationskurve ablesbar.

Kennzeichen der Lokalisationskurven koinzidenter Mikrofonanordnungen ist deren sehr linearer Verlauf. Die Abbildung ist somit sehr genau und maßstabgetreu, was auch die Erfahrungen der Tonmeister bestätigt.

Durch die koinzidente Anordnung ist allerdings die Korrelation zwischen den Kanälen maximal. Diese Tatsache verursacht ungenügende Erzeugung von Räumlichkeit und eine gewisse „Mittigkeit“ des Klangbilds.

Wie aus der Kurve abzulesen ist, findet ein leicht S-förmiger Verlauf statt. Dies verstärkt den Effekt der Mittigkeit noch.

4.1.2. Laufzeitstereofonie

Nach den bekannten Gesetzen können Phantomschallquellen auch durch Laufzeitunterschiede ausgelenkt werden. (→Kap. 2)

Laufzeitdifferenzen lassen sich erzeugen, indem ein gewisser Abstand zwischen zwei Mikrofonen vorliegt. Da keine Pegeldifferenzen vorliegen, haben beide Mikrofone die Richtcharakteristik Kugel oder der Versatzwinkel zweier gerichteter Mikrofone ist 0, so

daß Pegeldifferenzen vernachlässigbar sind (ab, AB). Der Abstand zwischen den beiden Mikrofonen bestimmt dabei die durch Schalleinfall aus einer bestimmten Richtung erzeugte Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Kanälen. Es kann rechnerisch bestimmt werden, welche Abbildung in der Phantomschallquelle ein bestimmter Abstand zur Folge hat:

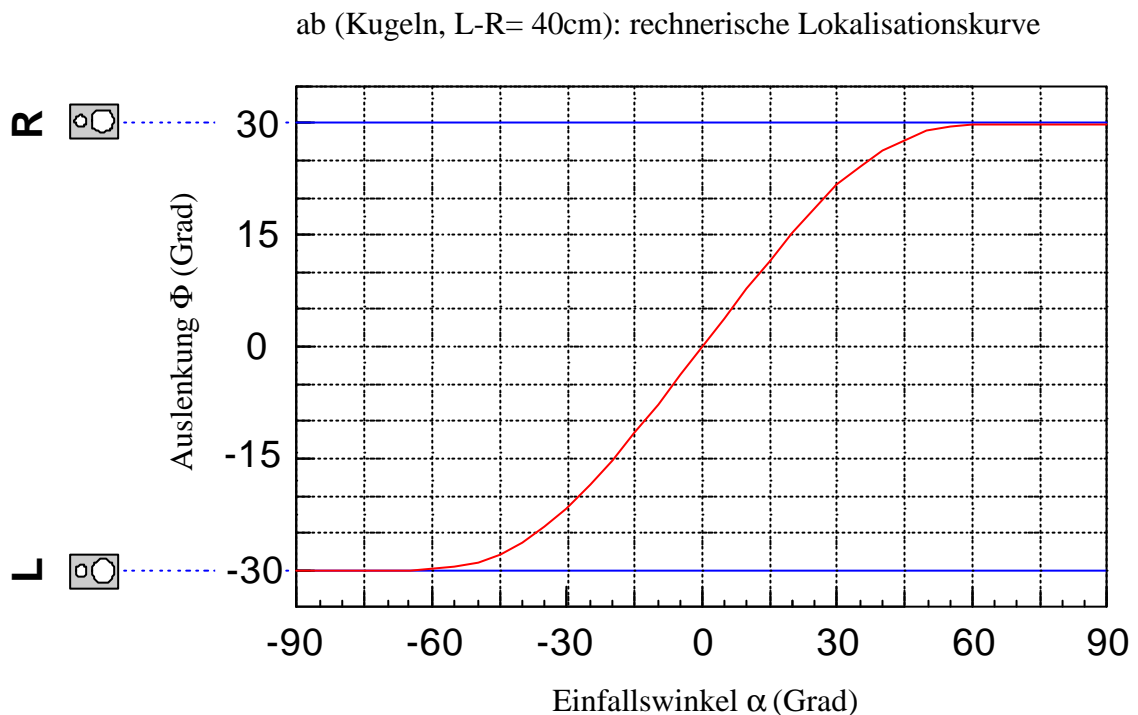


Abbildung 4.2.: Beispiel für eine ab-Anordnung ohne Vorliegen von Pegeldifferenzen:
ab: Abstand L-R= 40 cm, 2 Kugeln

Die Staffelung der aus verschiedenen Richtungen eintreffenden Signale in der Phantomschallquellenebene ist aus der Lokalisationskurve ablesbar.

Kennzeichen laufzeitorientierter Mikrofonanordnungen ist deren instabile, unscharfe Abbildung und bei größeren Abstände das Auftreten eines „Lochs in der Mitte“. Es entsteht durch die Häufung seitlich abgebildeter Phantomschallquellen im Vergleich zu denen, die in der Mitte abgebildet werden.

Die geschwungene Lokalisationskurve läßt schließen, daß in der Mitte einem bestimmten Bereich in der Phantomschallquellenebene ein kleinerer Bereich von Einfallswinkeln zugeordnet ist als an der Seite.

Die Abbildung der verschiedenen Klangquellen ist frequenz- und signalabhängig (impulshafte Signale verhalten sich anders als ruhende Klänge) und wird durch die rechnerischen Lokalisationskurve angenähert.

Laufzeitorientierte Verfahren sind bekannt für ihre Erzeugung einer gewissen Räumlichkeit – auch wenn sie nicht der Darstellung der Räumlichkeit entspricht, wie sie nach psychoakustischen Regeln stattfindet. (siehe Wuttke: Abb.4.5. und [Wuttke 2000])

4.1.3. Äquivalenzstereofonie

Phantomschallquellen können auch durch eine Kombination von Laufzeit- und Pegeldifferenzen gebildet werden. (→Kap. 2)

Dabei überlagern sich die Wirkungen von Laufzeit- und Pegeldifferenzen.

Diese kombinierten Signaldifferenzen lassen sich durch zwei Mikrofone erzeugen, die Richtwirkung, einen bestimmten Versatzwinkel und Abstand zueinander haben. Die Kombination dieser Parameter bestimmt dabei die durch Schalleinfall aus einer bestimmten Richtung erzeugten Signaldifferenzen zwischen den beiden Kanälen. Es kann rechnerisch bestimmt werden, welche Abbildung in der Phantomschallquelle ein bestimmter Abstand und ein bestimmter Hauptachsenwinkel sowie die gewählte Richtwirkung der Mikrofone zur Folge hat:

ORTF ($\epsilon = \pm 55^\circ$, L-R = 17,5cm): rechnerische Lokalisationskurve

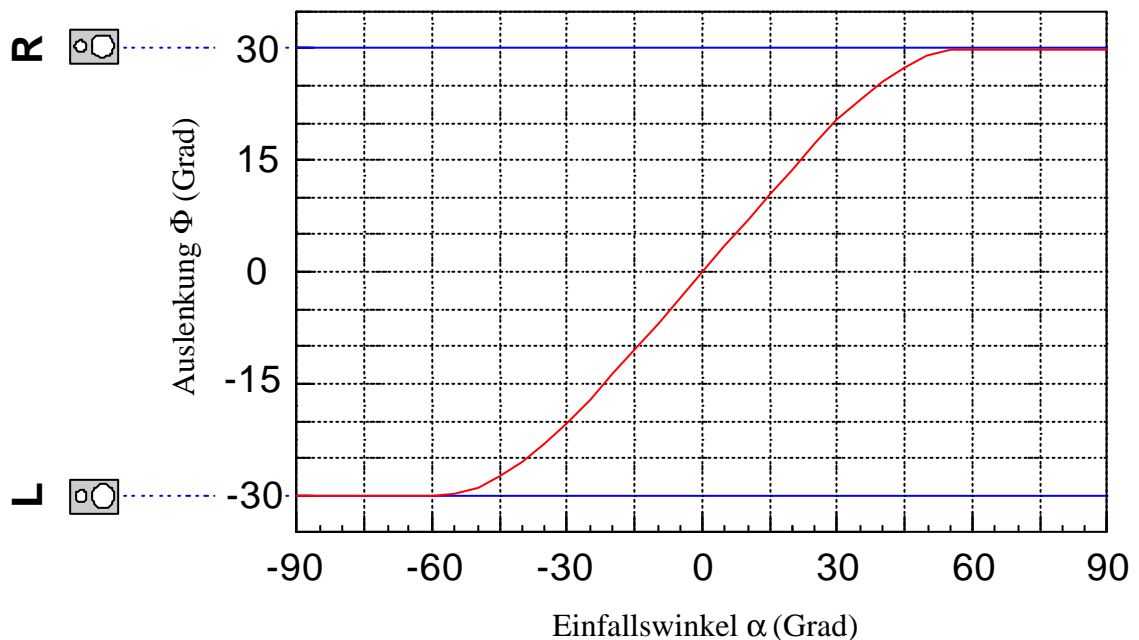


Abbildung 4.3.: Beispiel für Äquivalenz-Anordnung:
ORTF: 2 Nieren, Abstand L-R = 17,5 cm, Hauptachsenwinkel jeweils 55°

Diese kombinierten Verfahren stellen einen Kompromiß zwischen den pegel- und den laufzeitorientierten Verfahren dar. Sie können jeweils gute Eigenschaften der beiden Verfahren übernehmen – sie sind für gute Lokalisation sowie Erzeugung von Räumlichkeit geeignet. Die Lokalisationskurven zeigen einen ausgewogenen Abbildungsverlauf.

Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Konsistenz der Signaldifferenzen. Das bedeutet, Pegel- und Laufzeitdifferenzen sind beide zu gleichen Teilen (äquivalent) in der selben Richtung (gleichsinnig) an der Auslenkung der Phantomschallquelle beteiligt. Diese Eigenschaft, die Parallelität zu den Lokalisationseigenschaften des menschlichen Gehörs im natürlichen Schallfeld aufweist, hat nach Theile [Theile 1984] Vorteile z.B. in Bezug auf die Lokalisationsschärfe.

4.2. Das Hauptmikrofon als Aufnahmeverfahren für 5.1-Surround-Wiedergabe?

Bei der Betrachtung der Für und Wider der Hauptmikrofontechnik bei Mehrkanal-Aufnahmen kann wesentlich auf die Erfahrungen der Zweikanal-Stereofonie zurückgegriffen werden, bevor neue Erfahrungen eingebracht werden. Viele Aspekte behalten ihre Gültigkeit und können auch bei einer Abwägung im Mehrkanalbereich herangezogen werden.

Trotzdem existieren natürlich auch ganz neue Anforderungen an ein Mehrkanal-Hauptmikrofon.

So wird in diesem und dem nächsten Abschnitt zusammengefaßt, wo bisher und vielleicht in Zukunft die Vorteile einer Hauptmikrofontechnik liegen und welche Unterschiede sich ergeben. Dabei wird hauptsächlich die „klassische Hauptmikrofon“-Technik mit Abbildungs-optimierten Stereomikrofonen erörtert.

Im folgenden wird davon ausgegangen, daß ein Hauptmikrofon, das Abbildung zwischen den Lautsprechern erzeugt, bei 3/2-Stereo nur für die 3 vorderen Kanäle verwendet wird. Es ist wahrscheinlich wenig sinnvoll, Abbildung zwischen vorne und hinten bzw. zwischen den Surround-Lautsprechern zu beabsichtigen, da dies zum einen wieder einen sehr kleinen „sweet spot“ zur Folge hat, und zum anderen Lokalisation auf der Seite und hinten nur verbunden mit geringerer Lokalisationsschärfe möglich ist. Außerdem würde auf diese Weise möglicherweise der Parameter „Lokalisation“ gegenüber den anderen wichtigen Aspekten einer guten Aufnahme überbetont, z.B. räumliche Einbindung, Klangfarbe, usw. .

Was ist ein Hauptmikrofon?

Die Bezeichnung „Hauptmikrofon“ kann, entsprechend der Thematik dieser Arbeit, für Mikrofonanordnungen verwendet werden, die im Sinne entsprechend gewünschter Abbildungseigenschaften konfiguriert sind.

Der Bezeichnung „Hauptmikrofon“ genügen dabei auch Anordnungen, die nur die vorderen drei Kanäle speisen. Grund dafür ist eine ähnliche, wenn auch nicht identische Aufgabenstellung verglichen mit Zweikanal-Hauptmikrofonen und außerdem der grundsätzliche Unterschied zu Techniken, die ihr Hauptsignal nicht von einer Mikrofongruppe an einem Punkt beziehen.

Die Bezeichnung „Hauptmikrofon“ ist auch in Zweikanal-Produktionen äußerst vage definiert. Streng genommen sollte ein Hauptmikrofon das hauptsächlich verwendete Signal liefern, das heißt, sowohl das erste wie auch das stärkste Signal!

Stützen sind demnach zur Erhöhung der Lautheit in den Klang des Hauptmikrofons einzubinden, wenn streng nach dieser Definition vorgegangen würde.

Dies ist allerdings meistens nicht der Fall.

Die vorrangige Verwendung von ab-Anordnungen verschiedener Art macht eine Verwendung von unverzögerten Stützen zur Erhöhung der Abbildungsschärfe und Verteilung der Phantomschallquellen sinnvoll. Dabei wird das Stützsinal zum dominanten Signal, entscheidend für Ort und Klangfarbe der entstehenden Phantomschallquelle. Das bedeutet auch, daß die Lokalisationseigenschaften des „sogenannten“ Hauptmikrofons keine Rolle mehr spielen und Basisgrößen oder anderes aufgrund anderer Aspekte variiert werden können.

Auch die Verwendung von weit auseinanderstehenden Mikrofonen zur Errichtung stabiler (Phantom-)Schallquellen (durch Panning, bzw. diskretes Routing) wie z.B. beim „Decca-Tree“ stellt eigentlich definitiongemäß kein „klassisches“ Hauptmikrofon im Sinne der Errichtung optimaler Abbildung nach den bekannten Gesetzen der Stereophonie dar. Allerdings kann hier eher auf die Anwendung von Stützen verzichtet werden und dieses Mikrofon bildet weiterhin das Hauptsignal.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

Ein Hauptmikrofon hat die Aufgabe, das Hauptsignal zu liefern. Sollte dies nicht der Fall sein, gelten andere Voraussetzungen und es wäre dann eher von einem „Basismikrofon“ oder manchmal sogar „Raummikrofon“ zu sprechen.

4.2.1. Das Hauptmikrofon in Zweikanal-Erfahrungen

einige Vorteile einer **Hauptmikrofon-Technik**:

- Die Instrumente sind in ihre natürliche (=tatsächliche) Umgebung eingebunden
- Gute Tiefenstaffelung möglich, gute Durchhörbarkeit möglich
- balanciertes Klangbild ohne Eingriff möglich
- einfache Handhabung, wenig Aufwand trotz Notwendigkeit zur Optimierung des Standorts und der Parameter

einige Vorteile einer **stützenbasierten Technik**:

- Es kann immer in kleinen Abständen mikrofoniert werden, dadurch wird eine Änderung der Klangfarbe durch den Raumanteil vermieden (Griesinger: Abstand < Hallradius! [Griesinger, 2000,1])
- sehr flexible Möglichkeiten zur Variation des Charakters einer Aufnahme
- Unabhängigkeit von der Raumsituation, flexible Handhabung verschiedener Konzertsituationen (z.B. Besetzung)
- Unabhängigkeit von Gesetzen der stereofonen Abbildung und der Erzeugung optimaler Lokalisationskurven ermöglicht Optimierung anderer Aspekte (Stichwort: Variation der Basisbreite als ästhetisches Stilmittel)

Praktische Erfahrungen der Zweikanal-Stereofonie:

Das Hauptmikrofon hat seinen Einsatz hauptsächlich als

- ab, AB
- Kugelflächenmikrofon KFM
- ORTF (bzw. Quasi-ORTF, allgemein Äquivalenzmikrofon)

ab : gute Raumwiedergabe, gute Klangbalance, schlechte Lokalisation

KFM: gute Raumwiedergabe, gute Lokalisation, nicht flexibel bzgl. Aufnahmewinkel

ORTF: gute Lokalisation, Raum-/Direktanteil-Verhältnis an gewünschter Position meist zu klein, Klangnachteile, weil keine Verwendung von Druckempfängern

(→ Kap. 4.3.: Vergleich von Hauptmikrofonarten Zweikanal, [Wuttke 2000]: Abb.4.5.)

4.2.2. Das Hauptmikrofon bei Mehrkanalaufnahmen:

Die schwierige Entscheidung der Aufnahmetechnik bei einer Mehrkanalproduktion erfolgt nach der Abwägung vieler Aspekte. Das 3/2-Stereo-Format bereitet viele kreative Möglichkeiten zur Umsetzung eines Klangideals, setzt aber auch Grenzen und Unwägbarkeiten. Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht auf die vielfältigen Lösungsansätze eingegangen, sondern in Bezug auf die Thematik der Diplomarbeit nur kurz die Verwendung eines im Sinne der Erzielung optimaler Abbildung konfiguriertes Stereomikrofon erörtert.

Bei der Frage nach der Verwendung eines solchen „klassischen“ Hauptmikrofons für eine Mehrkanal-Produktion kann man folgende Argumente auf der Pro-Seite sammeln:

Vorteile der Hauptmikrofontechnik:

- Instrumente sind in tatsächliche Umgebung eingebunden:
Gerade bei einer nun möglichen genaueren Simulation des tatsächlichen Ereignisses durch Mehrkanaltechnik spielt dieser Aspekt eine wichtige Rolle.
- gute Tiefenstaffelung ohne zusätzliches Processing möglich:
Tiefenstaffelung entsteht gerade durch die Einbindung der Klangquellen in ihre tatsächliche Umgebung, durch die „naturgetreue“ Übertragung der tatsächlichen Verhältnisse der frühen Reflexionen
- balanciertes Klangbild ohne Eingriff möglich:
Die Betonung liegt auf „möglich“. Nicht immer sind alle Klangkörper von einem Punkt aus optimal abzudecken. Doch oft ist es nur mit unvergleichbarem Aufwand mit stützenbasierter Technik möglich, Balance zwischen allen beteiligten Klangquellen herzustellen, bzw. homogenen Klang zu übertragen. (z.B. Streicher im Sinfonieorchester: 12 beteiligte 1.Violinen mischen sich im Raum zu homogenem Klang, der auch durch mehr als 2 Einzelstützen nur mäßig zu simulieren ist)
- einfache Handhabung:
Auch bei Mehrkanalhauptmikrofonen existieren bereits kompakte Bauweisen für die drei Frontkanäle (z.B. OCT von Schoeps).

Unterschied zur Mikrofonierung im Zweikanalbereich:

Nun sind die Abstände des Hauptmikrofons zum Klangkörper kleiner, da der Raumanteil nicht mehr über die Frontkanäle übertragen werden muß. Das heißt, der Aufnahmewinkel wird im allgemeinen im Mehrkanalbereich größer als bei einer Zweikanalaufnahme. Das hat enorme Auswirkungen auf die Ausbildung der Klangfarbe der Klangquellen. Der Einfluß des Raums auf den Klang ist erheblich vermindert. Bei Äquivalenzmikrofonen wie ORTF hat dieser Aspekt in der Zweikanaltechnik oft zu einem negativen Urteil geführt, weil der Abstand, der eingehalten werden mußte, um das Raum-/Direktschall-Verhältnis zu optimieren, für die Optimierung der Klangfarbe zu groß war. So konnten die Vorteile der Äquivalenzmikrofone nicht genutzt werden. Nun ist der Abstand verringert, der Raumanteil kann verringert werden und die Klangfarbe bleibt von der Raumwirkung unbeeindruckt. (siehe Abbildung 4.4.) Das Problem bleibt, daß oft nicht alle Klangquellen zu einem Punkt den selben geringen Abstand haben können.

→ Damit wäre der Einsatz von Äquivalenzmikrofonen als Hauptmikrofon sinnvoller geworden, der beliebte Einsatz von Hauptmikrofonen wie ab und ähnlichem bei Zweikanalproduktionen muß nicht zu ebenso bevorzugten Mehrkanalmethoden führen. Ob dieser Punkt ausschlaggebend für die Wahl des Hauptmikrofons sein kann, muß allerdings die Erfahrung zeigen.

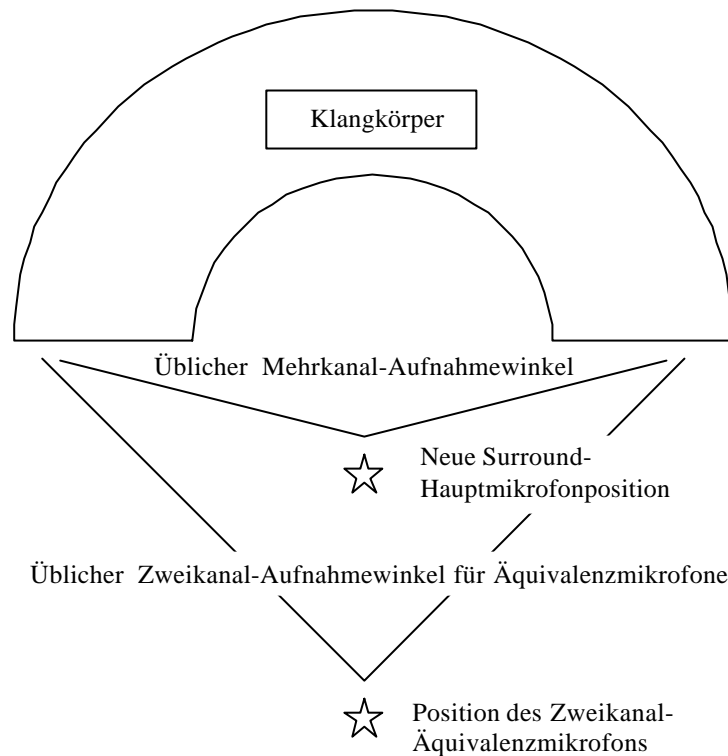


Abbildung 4.4.: schematischer Unterschied der Aufstellung von Äquivalenz-Anordnungen in Zweikanal und Mehrkanal-Aufnahmen

4.3. Vergleich zweikanaliger Hauptmikrofonverfahren

Alle Hauptmikrofonarten basieren auf den Grundtechniken der stereofonen Abbildung, das heißt es existieren, auf unterschiedliche Weise erzeugt, Pegel- und/oder Laufzeitdifferenzen.

Die Erfahrungen aus der Zweikanaltechnik lehren unterschiedliche Eigenschaften der verschiedenen Hauptmikrofonarten. Diese Eigenschaften lassen sich zum Teil auch aus den Lokalisationskurven ablesen bzw. theoretisch begründen. (siehe Kapitel 3.6.)

In der folgenden Auflistung von Jörg Wuttke (Abbildung 4.5.) findet sich eine Übersicht über verschiedene stereofone Techniken.

Zur näheren Auseinandersetzung siehe [Wuttke 2000].


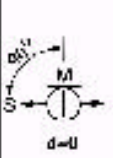

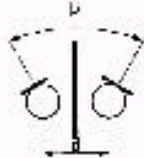
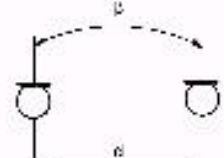
Stereo-Art	Intensitätsstereofonie		kleine Laufzeit + Intensitätsdifferenz	Trennkörperstereofonie	Laufzeitstereofonie
Name	XY	MS	z.B. ORTF	z.B. Jecklin-Scheibe	AB
					
Kapselabstand d	0cm meist übereinander		5cm - 30cm voneinander abhängig	abhängig vom Trennkörper	40cm - 80cm oder mehr
Winkel zwischen den Hauptachsen der Kapseln	45° - 180°	90°	0° - 180°	typisch 20°	0° - 90°
Akustisches Arbeitsprinzip des Mikrofons	Druckgradienten-Empfänger z.B. Niere (SCHOEPS MK 4)			meist Druck-Empfänger (Kugeln)* (z.B. SCHOEPS MK 2 S)	
Klangbild	sauber, oft hell oder brillant			voluminös, besonders gute Tiefenwiedergabe bei Verwendung von Kondensator-Kugelmikrofonen	
Räumlichkeit	räumliche Tiefe oft wenig ausgeprägt	ausgewogen	gut	sehr gut	
Lokalisation (Ortung)	bei richtiger Winklereinstellung sehr gut, aber meist betonte Mittenortung	gut	ausreichend	verwaschen	
Bemerkungen	Grundsätzlich sollte die Anordnung der Mikrofone zueinander die Gesetzmäßigkeiten der richtigen Aufnahmegeometrie erfüllen (siehe Kapitel "Aufnahmegeometrie", Williams-Diagramme). Bei Trennkörperstereofonie ist die Williams-Theorie aber nicht anwendbar.			*Trennkörper- und Laufzeitstereofonie ist auch mit Druckgradienten-Empfängern möglich.	

Abbildung 4.5.: Zitat aus [Wuttke 2000]:
Aufstellung verschiedener Zweikanal-Stereo-Anordnungen

4.4. Vergleich unterschiedlicher Hauptmikrofonverfahren für 3/2-Stereo

Aufgrund der speziellen Auswahl der im Hörversuch verwendeten Hauptmikrofonarten wird im folgenden zunächst auf die Anordnungen OCT und INA im Detail eingegangen.

Außerdem sind noch weitere mögliche Anordnungen aufgeführt.

4.4.1. INA – „Ideale Nieren-Anordnung“

Das INA-Mikrofon, das je nach Zuordnung zu den 3 vorderen oder allen fünf Lautsprechern auch INA3 oder INA5 genannt wird, entstammt einer Diplomarbeit der FH Düsseldorf von Ulf Herrmann/ Volker Henkels [Herrmann/Henkels 1999]. Das Prinzip dieser Anordnung ist die Aufteilung in die stereofonen Teilzonen L-C, C-R.

Jedes der drei bzw. fünf Mikrofone wird diskret nur einem Lautsprecher zugeordnet.

In jeder der stereofonen Teilzonen wird durch eine symmetrische Äquivalenz-Anordnung aus zwei Nierenmikrofonen Abbildung erreicht. Aus den sog. Williams-Kurven [Williams 1987] wurde dabei der gewünschte Aufnahmewinkel abgelesen, der für jede der zwei Teilzonen resultiert. Durch die Festsetzung, daß der halbe Aufnahmewinkel auch dem Versatzwinkel zweier Mikrofone gleich, soll vermieden werden, daß sich die Aufnahmebereiche der beiden Mikrofonbasen überschneiden. Außerdem sorgt der Prezedenzeffekt dafür, daß das vom jeweils an der Abbildung nicht beteiligten Mikrofon aufgenommene Signal (Übersprechen) die Lokalisation wenigstens an der optimalen Hörposition unbeeinflusst läßt.

Zu den Nachteilen des auftretenden Übersprechens bei bestimmten Kombinationen siehe → Hauptversuch Kapitel 6, 7, 8

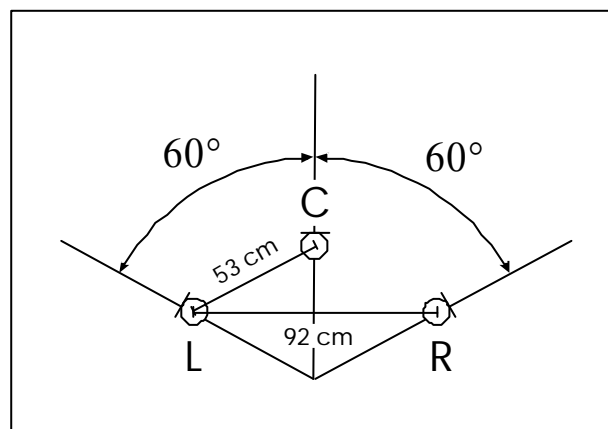


Abbildung 4.6.: Beispiel einer INA3-Anordnung: im Hörversuch verwendete Anordnung für eine Aufnahmebereich von 120°

4.4.2. OCT – „Optimized Cardioid Triangle“, Optimierung beim Übersprechpegel

Das OCT-Stereomikrofon wurde von Günther Theile [Theile 2000] entwickelt, um die Abbildungseigenschaften eines Hauptmikrofons für die drei vorderen Kanäle zu optimieren. Es basiert ebenso auf dem Prinzip, Abbildung in den zwei stereofonen Basen L-C, C-R zu bewirken. Dazu existieren 2 Mikrofonbasen, die unsymmetrisch aus je der mittleren Niere (C) und einer seitlichen Superniere (L_1 , R_1) bestehen.

Für die von den Supernierenmikrofonen nicht mehr aufgenommenen Frequenzbereiche unter 100 Hz sind tiefpassgefilterte Kugelmikrofone (L_2 , R_2) angebracht, die ebenso den Kanälen L und R zugemischt werden (können). Außerdem schlägt Theile vor, die Niere im Center durch einen Hochpassfilter bei 100 Hz von den schon L und R übertragenen tiefen Frequenzanteilen zu entledigen.

Jedes der fünf Mikrofone wird diskret nur einem Lautsprecher zugeordnet.

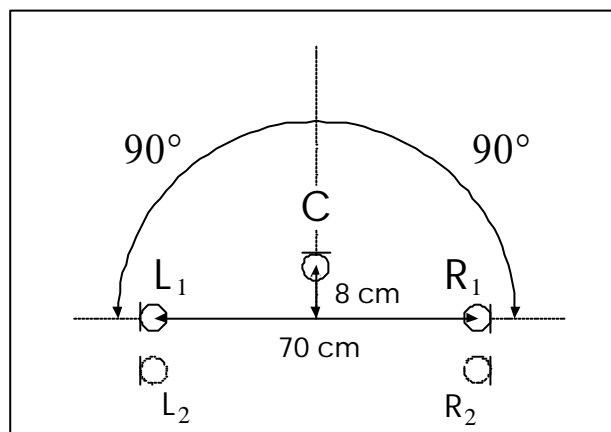


Abbildung 4.7.: Beispiel einer OCT-Anordnung: im Hörversuch verwendete Anordnung für einen Aufnahmebereich von 120°

Die OCT-Anordnung weist gegenüber der ähnlichen INA3-Anordnung folgende entscheidende Unterschiede auf:

- die Lokalisationskurve verläuft flacher, d.h. maßstabgerechter (→ Kap.6.3.1.)
- Übersprechen auf das an einer Abbildung eigentlich nicht beteiligte Mikrofon wird weitestgehend vermieden (rückwärtig angesprochene Supernieren haben hier ihr Minimum), dadurch Vorteile bei Abbildungsschärfe und Klangfarbe, außerdem stabileres Klangbild an nicht-optimalen Hörpositionen (siehe unten und → Kap.6.3.2. und 6.3.3.)
- Die Verwendung von Supernieren ermöglicht den verstärkten Einsatz von Pegeldifferenzen zur Auslenkung der Phantomschallquelle. Dies ergibt beim OCT-

Mikrofon größere Stabilität der im mittleren Bereich der Phantomschallquellenebene abgebildeten Klangquellen. (→ Kap. 6.3.2.)

Vergleich von Übersprechpegeln:

Ein Vergleich der Übersprechpegel des jeweils nicht an der Abbildung beteiligten Mikrofons macht den Unterschied zwischen den am Hörversuch beteiligten Mikrofonkonfigurationen OCT und INA3 in diesem Punkt deutlich:

Durch die Beteiligung von Supernieren, ausgerichtet im Hauptachsenwinkel 90° ist der Übersprechpegel bei der OCT-Anordnung minimal.

	Einfallswinkel	0°	-10°	-20°	-30°	-40°	-50°	-60°
Pegel R in dB (relativ L+C)	INA3	-4,4	-5,7	-7,0	-8,4	-10,0	-11,9	-14,0
	OCT	-9,2	-12,3	-15,4	<20	<20	-19,5	-15,8

Tabelle 4.1.: rechnerische Übersprechpegel des rechten Kanals in der linken Abbildungszone im Vergleich

4.4.3. Zwei unabhängige Zweikanal-Hauptmikrofone

Gernemann stellte in [Gernemann 1999] eine andere Möglichkeit vor, Abbildung zwischen den vorderen Lautsprechern im Sinne eines Hauptmikrofons zu erzeugen.

Er schlägt vor, zwei *getrennte* Stereomikrofonanordnungen für die linke und rechte Lautsprecherbasis der 3/2-Anordnung zu benutzen. Das heißt, der Center-Kanal wird sowohl vom rechten Mikrofon der linken Anordnung als auch vom linken Mikrofon der rechten Anordnung bestückt. Bei geeigneter Aufnahmesituation könnten die Probleme des Übersprechens dadurch vermieden werden.

Durch geeignete Aufstellung ließe sich nach Angaben von Gernemann auch das Auftreten eines störenden Kammfiltereffekts im Center-Kanal vermeiden.

4.4.4. Surroundverfahren mit Kugelflächenmikrofon

Jerry Bruck veröffentlichte 1997 [Bruck 1997] eine weitere Möglichkeit für ein Hauptmikrofon in 3/2-Stereo. Er benutzt dafür ein Kugelflächenmikrofon und zwei nach vorne gerichtete, direkt an den beiden Kugelmikrofonen angebrachte Mikrofone mit Achter-Charakteristik (KFM 360 von Schoeps). Jeweils ein Paar aus einer (Halb-) Kugel des Kugelflächenmikrofons und der benachbarten Acht ergibt ein MS-Paar, das

nach entsprechender Matrizierung auf die beiden Lautsprecher auf einer Seite geroutet wird.

Es ergibt sich also ein MS-stereofones Signal zwischen L und LS, bzw. zwischen R und RS. Zur Gewinnung des Center-Signals kann z.B. eine Matrizierung nach Gerzon angewendet werden.

4.4.5. Vorschläge von Williams

Williams erzeugt in [Williams 2000] rechnerisch eine Fülle von verschiedenen möglichen Anordnungen. Sie sind auf die Abdeckung der bestimmten Aufnahmebereiche optimiert. Er bezieht dabei die hinteren Lautsprecher in die Abbildung ein. Durch seine Vorschläge, im Gegensatz zum INA-Mikrofon auch unsymmetrische Mikrofonkombinationen sowie elektronische Manipulationen in Laufzeit und Pegel eines Mikrofons zuzulassen, sind die Anordnungen flexibel und könnten auch in Bezug auf das Auftreten von Übersprechen optimiert werden.

4.4.6. Polymikrofonie, „Decca-Tree“

Nach der Definition des Hauptmikrofons als Hauptsignal-spendende Anordnung kann auch eine Anordnung wie z.B. der „Decca-Tree“ als Hauptmikrofon angesehen werden.

Das Prinzip sind hier weit auseinanderstehende Mikrofone, meist mit Kugelcharakteristik. Hier wird Abbildung nicht durch das Beachten von Signaldifferenzen zwischen den verschiedenen Kanälen erreicht. Durch das Zuordnen der drei Mikrofone auf die drei vorderen Lautsprecher wird Stabilität erzeugt, indem die vorliegenden Laufzeit- (und oft auch Pegel-)differenzen weitaus größer sind als für Abbildung zwischen den Lautsprechern erforderlich. So sind auch an nicht optimalen Sitzpositionen die jeweiligen Signale dominant und es wird mehr als ein Lautsprecher wahrgenommen. Allerdings existiert auch am optimalen Hörort so gut wie keine konkrete Abbildung zwischen den Lautsprechern. Ohne Hinzufügen von Stütz- oder sonstigen Füllsignalen besteht das Stereobild nur aus zwei bis drei stabilen Schallquellen, nämlich den Lautsprechern.

Kapitel 5

Überblick über die Durchführung des Hörversuchs: Vergleich von Stereophonieanordnungen

5.1. Einleitung

5.2. Versuchsvorbereitungen

5.2.1. Gewinnung der Testsignale

5.2.1.1. Auswahl der Quellsignale

5.2.1.2. Beteiligte Mikrofonanordnungen und Gerätschaften

5.2.1.3. Aufbau für die Aufnahme im RAR

5.2.1.4. Bearbeitung der Testsignale

5.2.2. Abhörraum

5.3. Versuchsaufbau

5.4. Auswahl der Versuchspersonen

5.1. Einleitung

Drei Grundeigenschaften einer Phantomschallquelle, nämlich Ort, Abbildungsschärfe und Klangfarbe werden an zwei unterschiedlichen Hörpositionen untersucht.

Die Phantomschallquellen werden erzeugt durch Wiedergabe von Testsignalen auf den vorderen drei Lautsprechern einer 3/2-Stereo-Standardaufstellung nach ITU-R BS 775-1 [ITU 1992].

Die Testsignale entstammen Aufnahmen eines Quelllautsprechers im reflektionsarmen Raum durch verschiedene Hauptmikrofonanordnungen:

OCT 70cm siehe Kap. 4.4.2.

INA 53cm/60° siehe Kap. 4.4.2.

Quasi-ORTF 20cm/30° siehe Kap. 5.2.1.2.2.

Teilweise wurde auch die Anordnung OCT 50cm einbezogen.

Die ersten drei Anordnungen besitzen den selben Aufnahmewinkel von 120°.

Ziel der 3 Teile des Hörversuchs war, die Eigenschaften des Klangbilds zu untersuchen, das durch die verschiedenen Mikrofonanordnungen erzeugt wird.

Da die Forderung besteht, durch Hinzufügen des Center-Lautsprechers gegenüber der Zweikanal-Stereo-Anordnung mehr Stabilität zu erreichen, wurden die einzelnen Parameter nicht nur am optimalen Hörort, sondern auch an einer seitlich verschobenen Hörposition untersucht.

Der Hörversuch war aufgeteilt in 3 Teile.

Teil 1 beinhaltet die Ermittlung der Hörereignisrichtung mittels Angabe per Laserpointer. → Kapitel 6.

Teil 2 beinhaltet die Bewertung der Veränderung der Abbildungsschärfe im Vergleich Referenz – Beispiel. → Kapitel 7

Teil 3 beinhaltet die Bewertung der Veränderung der Klangfarbe im Vergleich Referenz – Beispiel. → Kapitel 8

Die Versuchsdauer der jeweiligen Teile hing vom selber gewählten Tempo der Versuchspersonen ab. Sie war im Durchschnitt pro Person für

- Teil 1: 10 min.
- Teil 2: 20 min.
- Teil 3: 15 min.

Nach Teil 2 war eine Pause nötig, um Ermüdungserscheinungen zu vermeiden.

Bei einigen Versuchspersonen war es auch möglich, Teil 3 erst am darauffolgenden Tag durchzuführen.

5.2. Versuchsvorbereitungen

5.2.1. Gewinnung der Testsignale

5.2.1.1. Auswahl der Quellsignale

Als Quellsignale dienten zwei kurze, trocken aufgenommene Sätze in deutscher Sprache, gesprochen von einer weiblichen Sprecherin und einem männlichen Sprecher. Sie entstammen der EBU-Test-CD SQAM [EBU 1988], die am IRT speziell zur Verwendung in Hörversuchen hergestellt wurde.

Diese Signale wurde zum einen ausgewählt, da man bei Sprache erfahrungsgemäß sehr sensibel gegenüber Änderungen der Klangfarbe reagiert. Zum anderen wird es gerade zur Ermittlung von Ort und Abbildungsschärfe als wichtig empfunden, ein Signal zu präsentieren, das zwar über Lautsprecher abgestrahlt wird, jedoch sonst einer realen Aufnahmesituation entspricht. Dazu war auch nötig, daß die Quellsignale ebenfalls im reflektionsarmen Raum produziert waren, um die Wiedergabe jeglicher Raumanteile durch den Lautsprecher zu verhindern.

Die männliche Stimme wurde gegenüber der weiblichen bei der Ermittlung der Klangfarbenunterschiede bevorzugt, da gerade die vorhandenen tiefen Spektralanteile der männlichen Stimme heikel gegenüber Klangfarbenänderungen sind.

Da auch mehrere andere Quellsignale aufgezeichnet wurden, konnten sich diese Vermutungen im Selbstversuch auch gut bestätigen lassen.

5.2.1.2. *Beteiligte Mikrofonanordnungen und Gerätschaften*

5.2.1.2.1. allgemein

Folgende Mikrofonanordnungen wurden verwendet:

- OCT 70 siehe Kapitel 4.4.2.
- OCT 50 siehe Kapitel 4.4.2.
- INA3 / Williams 53cm / 60° siehe Kapitel 4.4.1.
- Quasi-ORTF 20 cm / 30° siehe Kapitel 5.2.1.2.2.

Die beteiligten Mikrofone entstammen sämtlich einer Leihgabe der Firma Schoeps.

Es sind ausschließlich Mikrofone des Typs CCM, also Mikrofone in Kompaktbauweise.

Im speziellen waren folgende Typen beteiligt:

OCT: 1*Niere CCM 4, 2*Superniere CCM 41V, 2*Kugel CCM 2S

INA3: 3*Niere CCM 4

Quasi-ORTF: 2*Niere CCM 4

Als Gestänge für die OCT-Anordnungen wurden ein Prototyp, bzw. ein Versuchsmodell der Firma Schoeps verwendet.

Die Gestänge für die Anordnungen INA3 und Quasi-ORTF wurden aus variablen Stangensystemen des IRT zusammengestellt.

Sonstige beteiligte Gerätschaften:

- 8*Vorverstärkereinheit Neumann PMV 70
- Lautsprecher K&H O 108
- CD-Spieler Grundig CD-905
- Mischpult Mackie 1402-VLZ
- Digitaler Mehrspurrecorder Tascam DA 88

5.2.1.2.2. Quasi-ORTF 20cm / 30°

Diese Anordnung ist eine Äquivalenz-Anordnung nach Kapitel 4.1.3. .

Durch die Darstellung der rechnerischen Lokalisationskurve einer beliebigen Mikrofonkonfiguration (Kap.3) war es möglich, eine Konfiguration auszuwählen, die nicht an den Grenzen des Aufnahmebereichs, sondern im entscheidenden Bereich zwischen den Lautsprechern den Abbildungen der beiden beteiligten dreikanaligen Anordnungen entspricht.

Daraus ergaben sich folgende Werte:

2 Nierenmikrofone, Basis L-R: 20cm, Hauptachsenwinkel: 30°

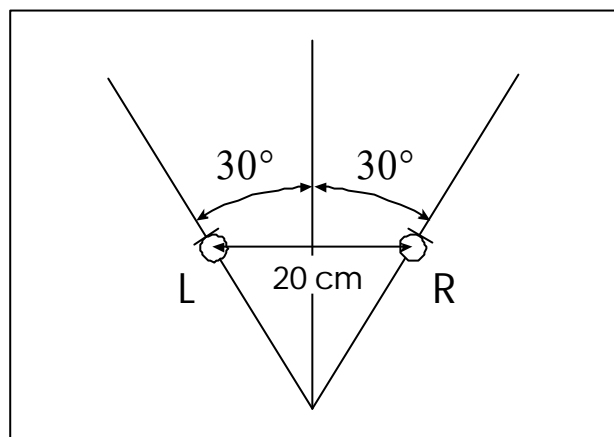


Abbildung 5.1.: schematischer Aufbau der im Hörversuch beteiligten Quasi-ORTF-Anordnung

Folgende rechnerische Lokalisationskurve ergibt sich aus einer solchen Anordnung:

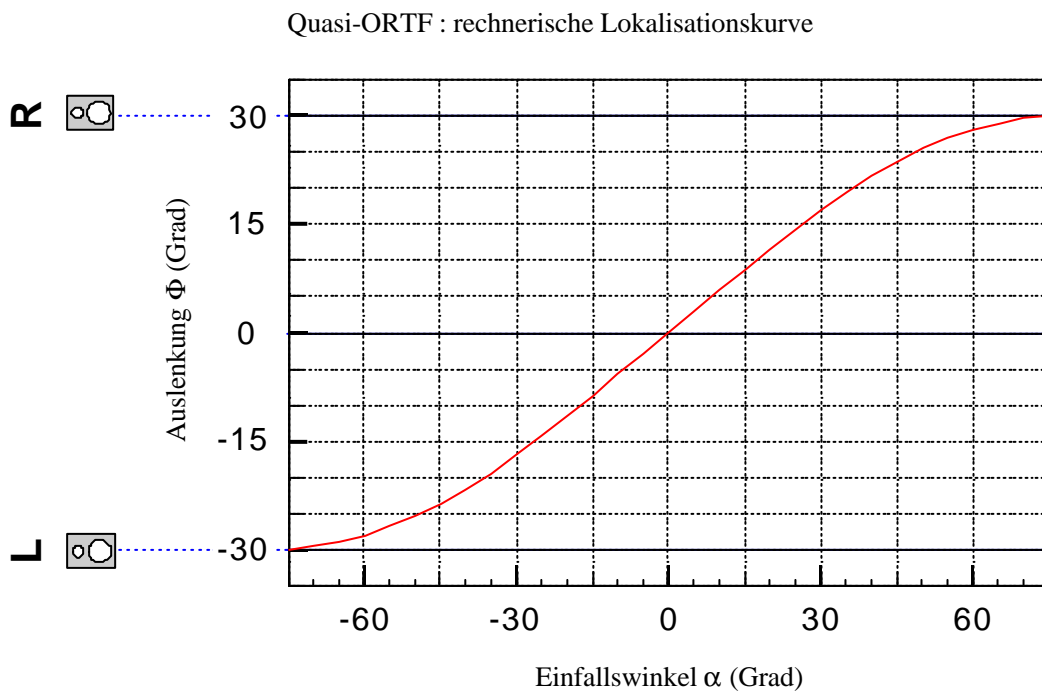


Abbildung 5.2.: rechnerische Lokalisationskurve der beteiligten Quasi-ORTF-Anordnung

Die Bezeichnung „Quasi“-ORTF weist darauf hin, daß nur eine einzige Äquivalenz-Anordnung den populären Namen ORTF trägt, nämlich eine Anordnung mit der Basis 17,5 cm und einem Hauptachsenwinkel von 55° (das entspricht einem Gesamt-Versatzwinkel von 110°).

5.2.1.3. Aufbau und Durchführung der Testsignal-Aufnahme im reflektionsarmen Raum

Die Quellsignale wurden über einen Lautsprecher im reflektionsarmen Raum des IRT abgestrahlt (Abbildung 5.3.). Der Lautsprecher war gespeist mit einem im Mischpult symmetrierten Signal eines CD-Spielers. Der Pegel des Lautsprechers blieb während aller Aufnahmen konstant.

In der Mitte des reflektionsarmen Raums im IRT existiert ein Computer-gesteuerter Drehteller, mit dem sich mit hoher Genauigkeit verschiedene Winkelpositionen einstellen lassen (Abbildung 5.4.). An diesem wurde das Stativ mit den jeweiligen Mikrofonanordnungen befestigt. In 250cm Entfernung war der Lautsprecher installiert, der das Quellsignal abstrahlte.

Die Höhe von Lautsprecher und Mikrofonanordnung war exakt gleich, deshalb konnten auch immer nur die Signale einer Anordnung zur selben Zeit aufgezeichnet werden.

Anfangs wurde am Drehteller die 0° -Position eingestellt, um die Mikrofonanordnungen exakt in die Richtung des Lautsprechers auszurichten. Daraufhin konnte der Teller mit dem Stativ in bestimmten Schritten gedreht werden um unterschiedliche Einfallrichtungen des Quellsignals zu simulieren.

Die Winkel wurden derart eingestellt, daß der Lautsprecher immer links von der Hauptachse der jeweiligen Anordnung lag. Nach der üblichen Norm sind deshalb alle Einfallswinkel mit negativem Vorzeichen versehen.

Die verschiedenen Mikrofonensignale wurden Mikrofonvorverstärkern zugeführt. Der Gain, also die Verstärkung war für alle Mikrofone gleich. Die verstärkten Signale kamen daraufhin zum digitalen Mehrspurrecorder, der auch die A/D-Wandlung ($F_s = 44,1$ kHz) vornahm.



Abbildung 5.3.: Aufbau für Testsignalgewinnung im reflektionsarmen Raum

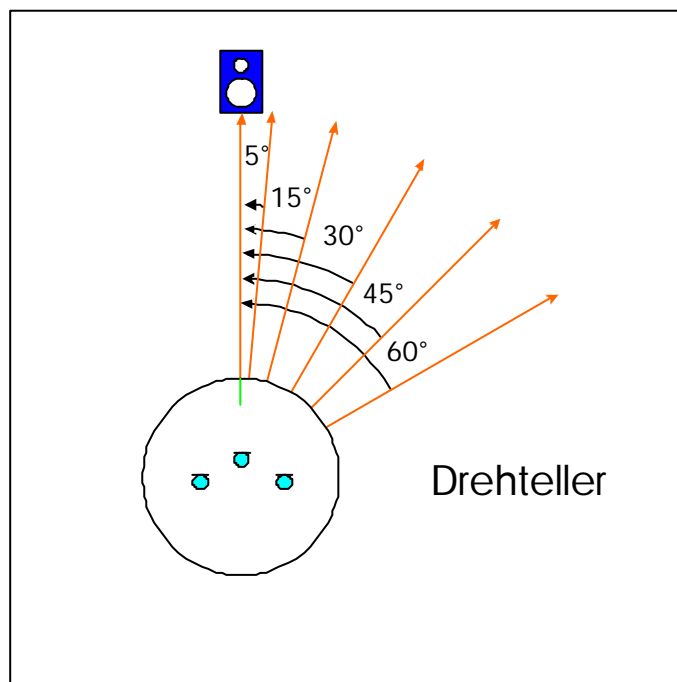


Abbildung 5.4.: schematischer Aufbau für Testsignalgewinnung im reflektionsarmen Raum

5.2.1.4. Bearbeitung der Testsignale

Folgende Testsignale wurden somit durch die Aufnahmen gewonnen:

Mikrofonanordnung	Einfallswinkel in Grad von der Mittelachse
OCT 70	0°
“ “	-5°
“ “	-15°
“ “	-30°
“ “	-45°
“ “	-60°
OCT 50	-0°
“ “	-5°
“ “	-15°
“ “	-30°
“ “	-45°
“ “	-60°
INA3	0°
“ “	-5°
“ “	-15°
“ “	-30°
“ “	-45°
“ “	-60°
Quasi-ORTF	0°
“ “	-5°
“ “	-15°
“ “	-30°
“ “	-45°
“ “	-60°

Tabelle 5.1.: Testsignale für Hörversuch

Die Testsignale wurden vom Mehrspurband in den Computer gespielt und mit dem digitalen Audioschnitt-Programm ProTools weiterbearbeitet.

Die Pegel- und Zeitverhältnisse aller Testsignale wurden ermittelt, in dem

- a) die Zeitversätze samplegenau am Computer abgemessen wurden und
- b) die Durchschnittspegel der einzelnen Mikrofonsignale mit dem Meßsystem Neutrik NC10 gemessen wurden.

Auf diese Weise konnten nicht nur Ungenauigkeiten bei der Aufnahme, etwa durch abweichende Verstärkungen der verschiedenen Vorverstärker ausgeschlossen werden, sondern es konnte auch der resultierende Gesamtpegel der gleichzeitig dargebotenen Mikrofonsignale nach leichter Rechnung ermittelt werden. Dabei wurde die Summe der Leistungspegel gebildet.

$$\text{Summenleistungspegel } P = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + 10^{\frac{L_3}{10}} \right)$$

mit L_1, L_2, L_3 : Mikrofonpegel

Für die exakte Auflistung der einzelnen Pegel- und Laufzeitbeziehungen der verwendeten Versuchssignale siehe Anhang 9.4. .

Somit konnten alle Testsignale auf den gleichen Gesamtpegel angeglichen werden, um abweichende Urteile über die verschiedenen Parameter nur aufgrund der Summenpegel auszuschließen. Dieses Vorgehen war notwendig, um auszuschließen, daß Beurteilungen durch unterschiedliche Lautstärken beeinflusst werden. Da die Parameter Abbildungsschärfe und Klangfarbe sehr sensibel gegenüber unterschiedlicher Anregung des Raumes bzw. Klangs des Lautsprechers sind, mußten sämtliche Tests in einer Lautstärke durchgeführt werden.

Allerdings ging aufgrund dieses Vorgehens natürlich eine Information verloren, die durchaus großen Einfluß auf die Thematik des Hörversuchs hat: die Pegelverhältnisse zwischen Signalen, die aus unterschiedlichen Einfallswinkeln auf dieselbe Mikrofonanordnung treffen. Da dieser Parameter eine wichtige Rolle spielt, wird theoretisch in Kapitel 6.4.2. darauf eingegangen.

Für die Hörversuche Teil 2 und 3 war der Vergleich zu einer Referenz nötig, die aus einem einzigen Lautsprecher abgestrahlt werden sollte.

Die Referenz wurde gewonnen, indem bei den 3 dreikanaligen Mikrofonanordnungen jeweils das Signal der mittleren Niere separiert wurde. Für die Quasi-ORTF-Anordnung mußte ebenfalls das Signal der (baugleichen) Niere des OCT-Systems angewendet werden.

Die Pegel der verschiedenen Referenzen mußten nun noch auf den Wert der Summenpegel der Testsignale angeglichen werden, um Lautstärkeveränderungen beim Umschalten zwischen Referenz und Beispiel zu vermeiden.

5.2.2. Abhörraum

Die Versuche fanden im Tonstudio AE 13 des IRT statt.

Der mit unterschiedlichen Absorbern bedämpfte Raum besitzt eine mittlere Nachhallzeit von $T_{60}=0,26s$. Die Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz entspricht dem Toleranzfeld nach EBU Tech. 3276 [Messungen IRT].

Der Störgeräuschpegel liegt unter der Normkurve NR10, EBU Tech. 3276.

Der Raum, der die Abmessungen $10,0m * 6,6m * 2,7m$ und das Volumen $177m^3$ aufweist, ist genug groß, um die vorderen Lautsprecher einer 3/2-Stereo-Anordnung nach ITU-R BS 775-1 [ITU 1992] mit einer Basis L-R von 250cm auszustatten. Die Lautsprecher haben dabei, um vor störenden Reflexionen gefeit zu sein, ausreichend Abstand von der angrenzenden Hinterwand. In eigenen vorhergehenden Versuchen wurde bei weniger großem Abstand eine leichte Rechtsverschiebung bei der Ortung von Phantomschallquellen bemerkt, die mit dieser Maßnahme korrigiert werden konnte.

5.3. Versuchsaufbau

Wie im Kapitel 5.1.1. *Abhörraum* erwähnt, waren im Tonstudio des IRT die vorderen drei Lautsprecher einer 3/2-Stereo-Standard-Aufstellung installiert. Zusätzliche Lautsprecher wurden an verschiedenen Orten hinzugefügt.

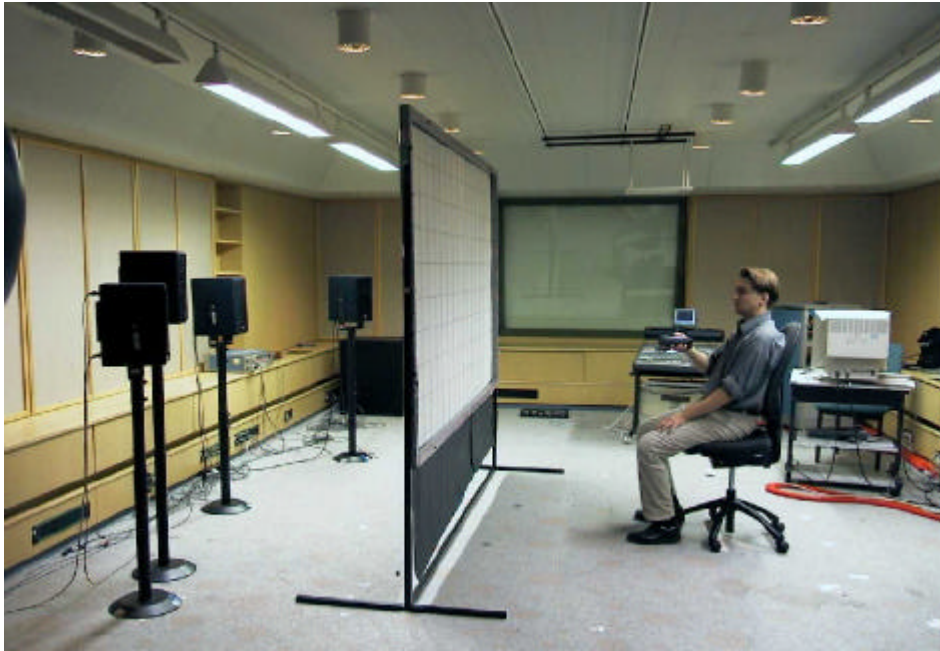


Abbildung 5.5.: Studio AE 13: Aufbau für Hörversuch Teil 1, Abstände wurden noch leicht verändert

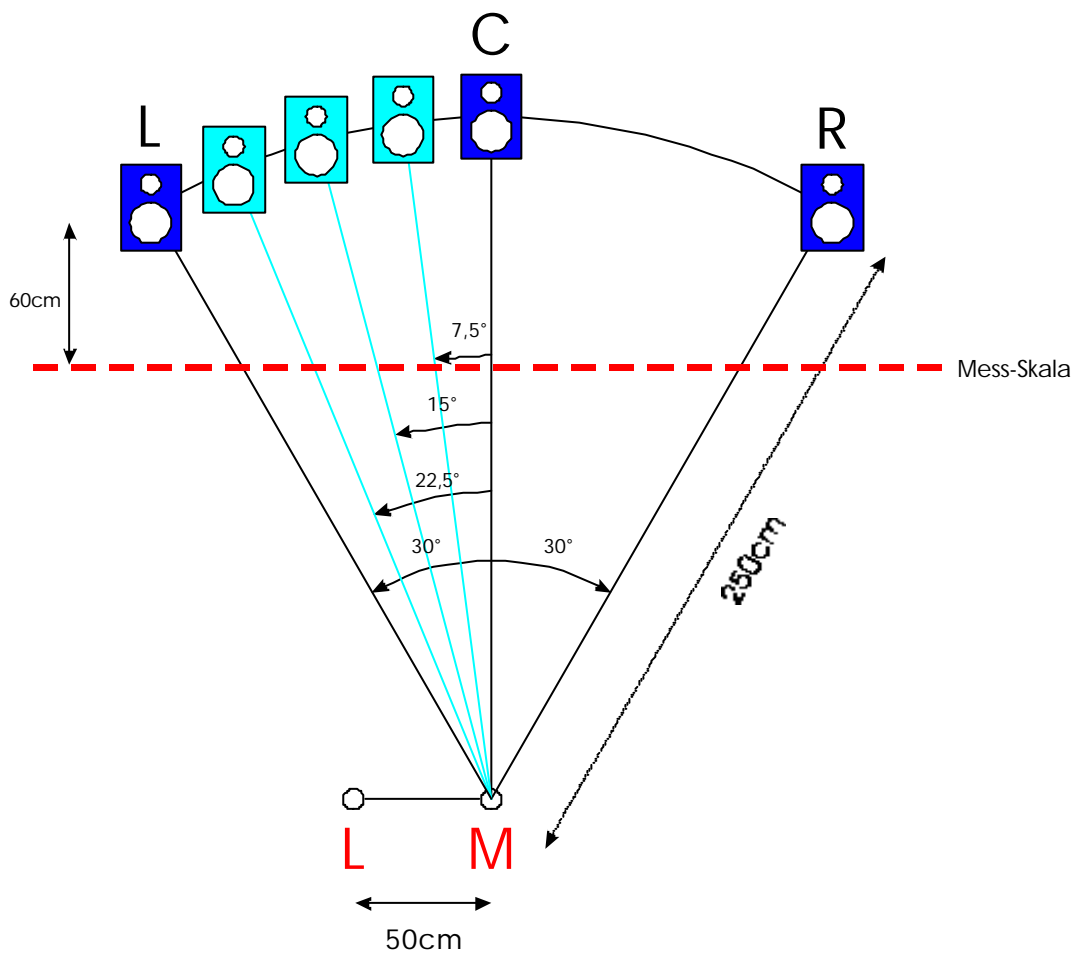


Abbildung 5.6.: Studio AE 13: schematischer Aufbau für Hörversuch mit Abmessungen

Zwischen Lautsprechern und Versuchsperson war eine klangdurchlässige Spezial-Leinwand installiert, die verhinderte, daß die Lautsprecher gesehen werden konnten.

Auf ihr war ein für Teil 1 nötiges Raster aus Bindfäden angebracht. Mit Hilfe dieses Rasters als Meß-Skala konnte leicht die wahrgenommene Hörereignisrichtung ermittelt werden. Durch die Existenz sowohl horizontaler wie auch vertikaler Koordinaten war nicht nur die seitliche Verschiebung der Phantomschallquelle meßbar, sondern auch deren Elevation. (siehe Kapitel 6)

Die Testsignale wurden direkt vom Computer aus dem Programm ProTools abgespielt.

Daraufhin durchliefen sie ein digitales Mischpult des Typs Yamaha 02R, worauf sie über Pegelsteller (Jünger) den jeweiligen Lautsprechern zugeführt wurden.

In Teil 2 und 3 des Hörversuchs mußte direkt zwischen Referenz und Beispiel umgeschaltet werden. Da dies möglichst einfach von der Versuchsperson selber geschehen sollte, um sehr genau auch kleine Veränderungen der Parameter zu evaluieren, fiel die Wahl auf die Verwendung eines Fußpedals mit verschiedenen Tasten. Die Tasten des Fußpedals können per MIDI-Signal am Mischpult die dazugehörigen Szenen anwählen. Es wurde so konfiguriert, daß eine Taste das Hören der Referenz ermöglichte, die andere das Anhören des Klangbeispiels zur Folge hatte. Das Umschalten geschah lautlos und, da die beiden alternativen Signale simultan liefen, konnten sie auf diese Weise komfortabel verglichen werden.



Abbildung 5.7.: Fußpedal für selbstgesteuertes, geräuschfreies Umschalten zwischen Testbeispiel und Referenz

Die Versuchspersonen sollten während des Hörversuchs zwei verschiedene Sitzpositionen einnehmen. Die mittlere Sitzposition war genau am optimalen Hörort im Stereodreieck, während die andere Sitzposition genau 50cm seitlich nach links verschoben war. Die Sitzpositionen waren durch Markierungen am Boden festgelegt.

Die Sitzhöhe der Versuchspersonen wurde so ausgeglichen, daß die Höhe ihrer Augen für alle Teilnehmer konstant war. Die Augenhöhe entsprach genau der Höhe der Hochtöner der verwendeten Lautsprecher (→ Abbildung 6.3.).

So konnte eine bei verschiedenen Testpersonen unterschiedliche optische Verzerrung durch das Raster vermieden werden und außerdem die Ohrhöhe aller Teilnehmer konstant eingerichtet werden.

5.4. Auswahl der Versuchspersonen

Die Inhalte des Hörversuchs, nämlich Ort, Abbildungsschärfe und Klangfarbe einer Phantomschallquelle sind komplexe Begriffe, die schwer für einen Laien zugänglich sind.

Auch bei der Ortsermittlung einer Phantomschallquelle ist Erfahrung beim Hören über Lautsprecher nötig, wie aus Ergebnissen einzelner Versuche mit ungeübten Versuchspersonen festgestellt wurde. Die anderen beiden Parameter sind sowohl von der Definition als auch von ihrer Wahrnehmung selber nur für geübte Tonleute zu beurteilen. Selbst die Tonmeister, die am Versuch teilnahmen, waren übereinstimmend der Meinung, daß sie nie in solcher Weise eine Phantomschallquelle beurteilt hatten und waren erstaunt über die erheblich auftretenden Unterschiede.

Folge daraus war die Beteiligung ausschließlich in dieser Richtung geübter Personen und außerdem ein ausführliches Training vor jedem der Versuchsteile, das sowohl den zu beurteilenden Parameter genau eingrenzte und außerdem eine durch erst allmähliche Gewöhnung auftretende abweichende Bewertung der ersten Beispiele ausschloß.

Auf diese Weise konnten sich die Versuchsteilnehmer auch auf das Spektrum der auftretenden Unterschiede vorbereiten und ihre Bewertung dementsprechend einrichten. Es wurden allerdings nicht explizit Extremwerte vorgeführt, die als Anker hätten verstanden werden können.

Die Anzahl der Testpersonen betrug 22.

Kapitel 6

Hörversuch Teil 1: Richtungsermittlung

6.1. Versuchsdurchführung

6.2. Versuchsauswertung

- 6.2.1. Meßpunkterfassung durch Meß-Skala
- 6.2.2. Statistische Berechnungen
- 6.2.3. Auswahl der Versuchspersonen, bzw. Versuchsdaten

6.3. Darstellung der Ergebnisse – Übersicht

- 6.3.1. Experimentelle Lokalisationskurven – mittlere Hörposition, Vergleich mit Theorie
- 6.3.1. Experimentelle Lokalisationskurven – seitliche Hörposition
- 6.3.1. Elevation, zweidimensionale Darstellungen der gemessenen Phantomschallquellen
- 6.3.1. Streuungen: Standardabweichungen der gemessenen Daten

6.4. Interpretation der Ergebnisse

- 6.4.1. Vergleich der experimentell ermittelten Lokalisationskurven mit den rechnerisch ermittelten Lokalisationskurven
- 6.4.2. Verlauf der experimentell ermittelten Lokalisationskurven, Hörposition Mitte
- 6.4.3. Verlauf der experimentell ermittelten Lokalisationskurven, Hörposition Seite
- 6.4.4. Elevation
- 6.4.5. Streuung

6.1. Versuchsdurchführung

In Teil 1 des Hörversuchs sollte die Phantomschallquellenrichtung ermittelt werden, die von den Versuchspersonen bei Wiedergabe der einzelnen Testsignale wahrgenommen wurde.

Schachbrett-Raster:

Zur komfortablen Bestimmung dieser Richtung wurde das auf der Leinwand angebrachte Raster herangezogen. Die Versuchspersonen konnten nun mit Hilfe eines Laserpointers einfach in die Richtung zeigen, aus der sie das Klangbeispiel zu hören glaubten. Dabei bestand durch die Darbietung des Beispiels in einer play-Schleife keine Zeitbeschränkung. Der Verfasser notierte daraufhin die genauen Koordinaten des Rasters. Auf diese Weise konnten sich die Versuchspersonen auf die Phantomschallquellen konzentrieren und die Versuchsdauer konnte gesenkt werden. Außerdem war so eine sehr genaue Ermittlung der Auslenkung in Höhe und Breite möglich.

Das Raster, das Birgit Rathbone für ihre Diplomarbeit am IRT erstellte, bestand in horizontaler wie in vertikaler Richtung aus jeweils etwa 15 cm großen Feldern, die durch Bindfäden abgegrenzt waren.

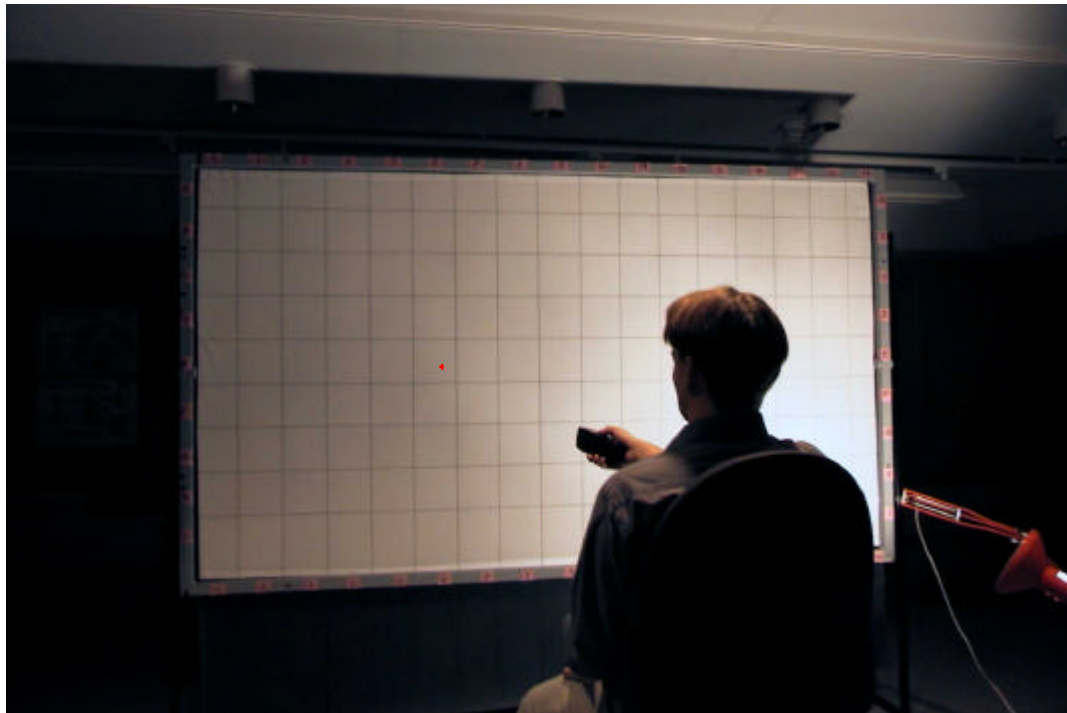


Abbildung 6.1.: Hörversuch Teil 1: Ermittlung der Hörereignisrichtung mittels Laserpointer

Die Versuchspersonen konnten ihren Kopf frei bewegen, waren aber angehalten, die Sitzposition nach vorne gerichtet beizubehalten. So konnte verhindert werden, daß die Versuchspersonen den Kopf von der jeweiligen Hörposition entfernten und sich der Phantomschallquelle durch generelle Drehung des Stuhls schon vor Beginn des Signals zuwandten.

Der Test bestand aus 48 Signalen, die hintereinander dargeboten wurden.

(→Tabelle 6.1., nächste Seite)

Die ersten 23 Signale sollten vom optimalen Hörort aus beurteilt werden.

Die restlichen 25 Signale waren vom seitlich verschobenen Hörort zu beurteilen.

In zufälliger Reihenfolge wurden in der mittleren Sitzposition die Signale Nr. 1-23 präsentiert: (Zur Testsignalgewinnung siehe Kap. 5.2.1.)

Daraufhin wurden in zufälliger Reihenfolge in der seitlichen Sitzposition die Signale Nr. 24-48 präsentiert:

(Dabei wurden die Signale aus Einfallswinkeln mit positiven Vorzeichen durch einfaches Vertauschen der beiden äußeren Kanäle der korrespondierenden Signale aus Einfallswinkeln mit negativen Vorzeichen erzeugt.)

Tabelle 6.1.: Testsignale für Hörversuch, Teil 1:

mittlere Hörposition			seitliche Hörposition		
Nr.	Mikrofonanordnung	Einfallswinkel in Grad von der Mittelachse	Nr.	Mikrofonanordnung	Einfallswinkel in Grad von der Mittelachse
1	OCT 70	0°	24	OCT 70	-60°
2	“ “	-5°	25	“ “	-30°
3	“ “	-15°	26	“ “	-15°
4	“ “	-30°	27	“ “	0°
5	“ “	-45°	28	“ “	15°
6	“ “	-60°	29	“ “	30°
7	OCT 50	-30°	30	“ “	60°
8	“ “	-45°	31	INA3	-60°
9	INA3	0°	32	“ “	-30°
10	“ “	-5°	33	“ “	-15°
11	“ “	-15°	34	“ “	0°
12	“ “	-30°	35	“ “	15°
13	“ “	-45°	36	“ “	30°
14	“ “	-60°	37	“ “	60°
15	Quasi-ORTF	0°	38	Quasi-ORTF	-60°
16	“ “	-5°	39	“ “	-30°
17	“ “	-15°	40	“ “	-15°
18	“ “	-30°	41	“ “	0°
19	“ “	-45°	42	“ “	15°
20	“ “	-60°	43	“ “	30°
			44	“ “	60°
21	einzelner Lautsprecher	Symmetrieachsenwinkel: -0°	45	einzelner Lautsprecher	Symmetrieachsenwinkel: -30°
22	“ “	Symmetrieachsenwinkel: -15°	46	“ “	Symmetrieachsenwinkel: -15°
23	“ “	Symmetrieachsenwinkel: -30°	47	“ “	Symmetrieachsenwinkel: 0°
			48	“ “	Symmetrieachsenwinkel: 30°

6.2. Versuchsauswertung

6.2.1. Meßpunkterfassung durch Meß-Skala

Das auf der Leinwand angebrachte Raster ermöglicht einen Rückschluß auf die wahrgenommen Hörereignisrichtung. Dabei ist der Winkel, um den eine bestimmte Phantomschallquelle aus den Hauptachsen ausgelenkt ist, durch direkte Rechnung aus den angegebenen Werten zu ermitteln.

Der für die Statistik verwendete Punkt, der für die Errechnung des jeweiligen horizontalen, bzw. vertikalen Winkels maßgeblich ist, befindet sich immer auf der Zylinderfläche, die definiert ist durch die Senkrechte durch Hörposition Mitte und den Radius B , also genau der Abstand der Lautsprecher zur Hörposition Mitte.

Hörposition Mitte:

→ horizontale Erfassung:

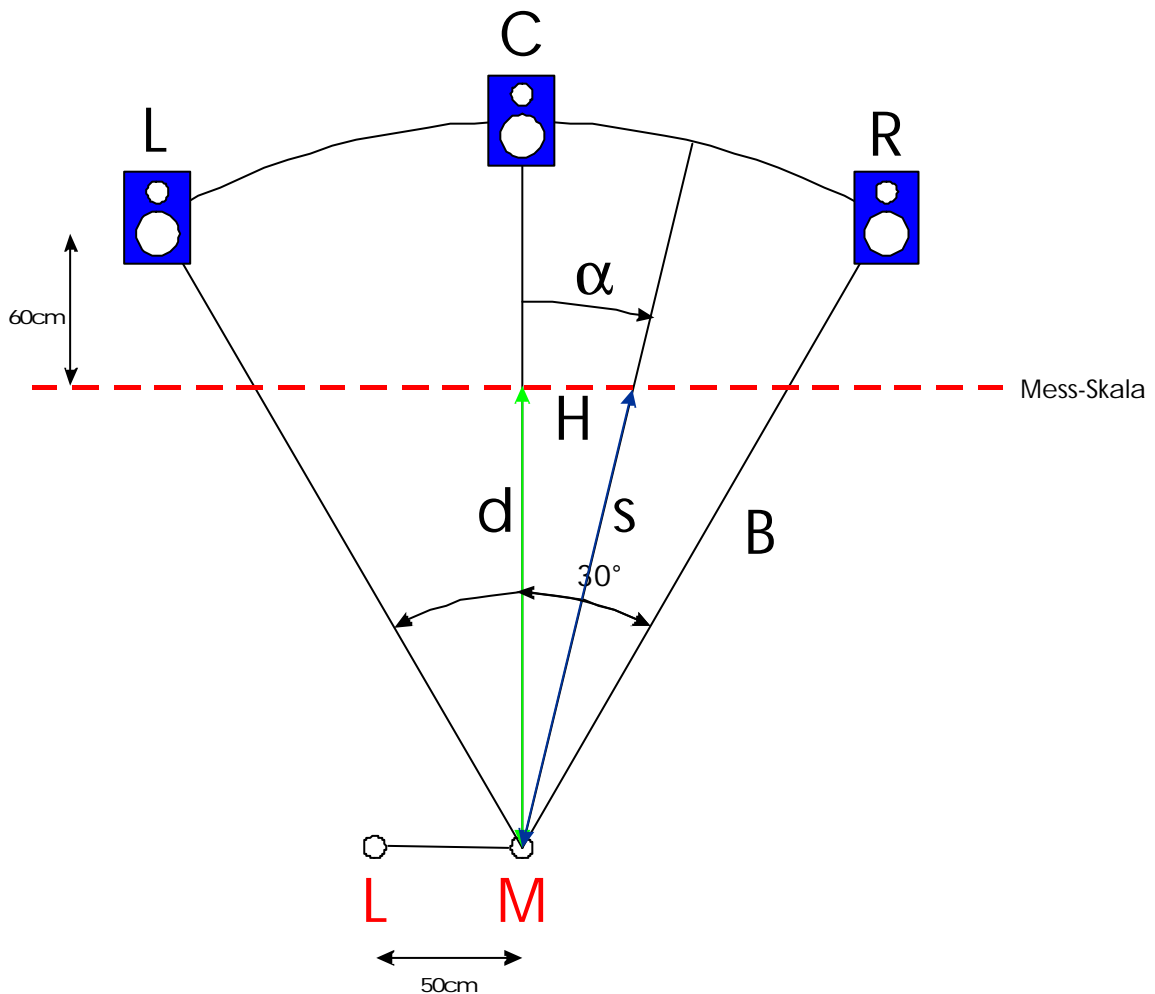


Abbildung 6.2.: schematischer Versuchsaufbau, horizontale Auswertung

$$\tan \mathbf{a} = \frac{H}{d}; \quad d = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} B\right) - 60 \text{ cm}$$

- mit α = horizontale Auslenkung der Phantomschallquelle
 H = horizontaler Abstand des Meßpunkts von der Mittelachse
 d = Abstand der Hörposition M zur Leinwand
 B = Basisgröße L-R = Abstand der Hörposition M zu allen Lautsprechern
 s = Verbindung zwischen Versuchsperson und Meßpunkt

→ vertikale Erfassung:

Bei jeder Versuchsperson wurde die Sitzhöhe so eingestellt, daß sich die Augen immer exakt in Höhe der Hochtöner der Lautsprecher befanden.

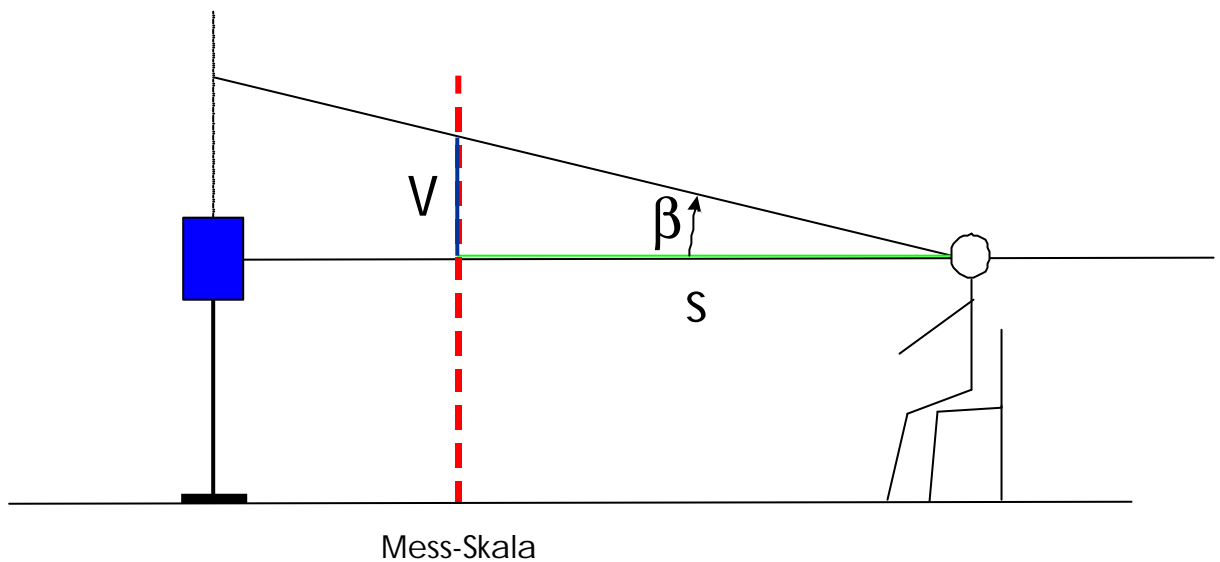


Abbildung 6.3.: schematischer Versuchsaufbau, vertikale Auswertung

$$\tan \mathbf{b} = \frac{V}{s}; \quad s = \sqrt{d^2 + H^2};$$

- mit V = vertikaler Abstand des Meßpunkts von der Augen-Lautsprecher-Höhe
 β = Elevation der Phantomschallquelle

Da im Hörversuch auch die einzelnen Lautsprecher als Testsignale vorlagen, konnte deren vertikale Position ermittelt werden. Diese gilt für die Elevation einer Phantomschallquelle als Nullpunkt.

Somit wurde für alle ermittelten V-Werte deren Differenz zum mittleren V-Wert der Lautsprecher für die Winkelberechnung herangezogen.

Hörposition Seite:

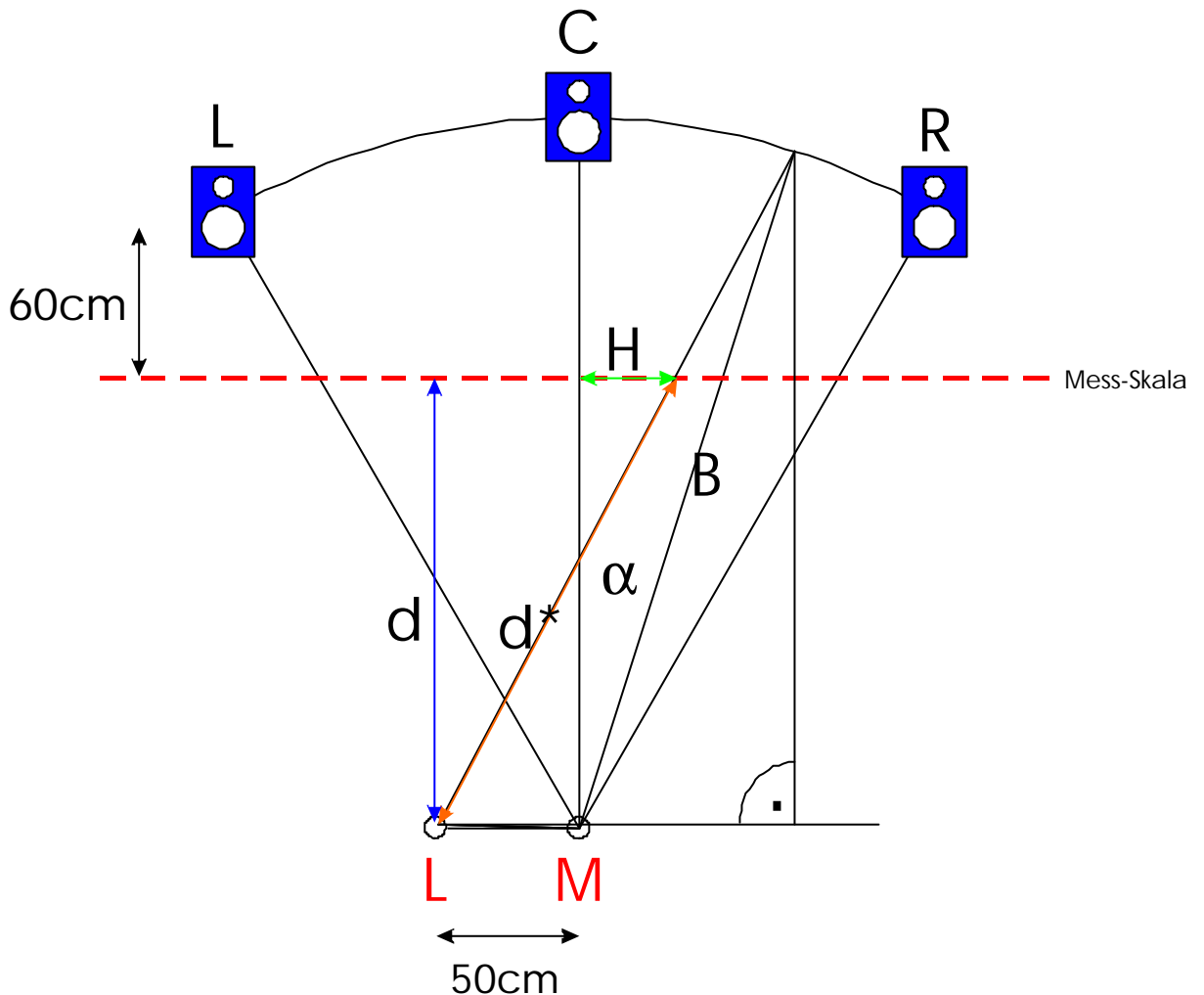


Abbildung 6.4.: seitliche Sitzposition: horizontale Auswertung

Auf diese Weise kann durch einfache Rechnung aus dem angegebenen Wert H der tatsächliche Winkel α bestimmt werden. Die genaue Rechnung wird hier aufgrund der eindeutigen Aussage der Grafik nicht angegeben.

Für die Berechnung des vertikalen Winkels aus seitlicher Hörposition wird in obiger Rechnung s durch d^* ersetzt.

Somit werden für die Winkelberechnungen die Meßpunkte erfaßt, die die Versuchsperson direkt in der Lautsprecherebene, sprich der Zylinderfläche wählen würde.

Die Datensätze der einzelnen Versuchspersonen liegen nun als Winkelangaben in Grad mit den besprochenen Eigenschaften vor.

6.2.2. Statistische Berechnungen

Folgende Werte werden aus den Versuchsdaten aller Testpersonen ermittelt:

- Mittelwert: $\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$;
- Standardabweichung $\mathbf{s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$;
- 95%-Vertrauensbereich des Mittelwerts $= [\bar{x} - \Delta x; \bar{x} + \Delta x]$ mit $\Delta x = \frac{1,96 \cdot \mathbf{s}}{\sqrt{n}}$;

mit x_i = Meßwert der i-ten Person, n = Anzahl der Versuchspersonen (=22)

6.2.3. Auswahl der Versuchspersonen, bzw. Versuchsdaten

Zur Ermittlung der Glaubwürdigkeit der Versuchspersonen wurde getestet, ob sich bestimmte Personen oft in ihrer Beurteilung weit neben dem Mittelwert befanden. Dies konnte ausgeschlossen werden. Höchstens 2 der 48 Werte pro Testperson zeigten eine Abweichung über der maximal zulässigen Abweichung, die definiert war mit:

$$f_{\max} = 3 \cdot \mathbf{s} ;$$

Insgesamt zeigten nur 6 der 1056 gesammelten Werte aller Versuchspersonen eine größere Abweichung als f_{\max} . Diese wurden zur Auswertung nicht herangezogen, und zwar sowohl in horizontaler wie auch vertikaler Richtung.

Die Anzahl der Testpersonen betrug 22.

6.3. Darstellung der Ergebnisse - Übersicht

6.3.1. Experimentelle Lokalisationskurven – mittlere Hörposition, Vergleich mit Theorie

6.3.1.1. Einzelne Lautsprechersignale L, HL, C

6.3.1.2. OCT 70

6.3.1.3. INA3

6.3.1.4. Quasi-ORTF

6.3.1.5. OCT 50

6.3.2. Experimentelle Lokalisationskurven – seitliche Hörposition

6.3.2.1. Einzelne Lautsprechersignale L, HL, C, R

6.3.2.2. OCT 70

6.3.2.3. INA3

6.3.2.4. Quasi-ORTF

6.3.3. Elevation, zweidimensionale Darstellungen der gemessenen Phantom-schallquellen

6.3.3.1. Einzelne Lautsprechersignale L, HL, C, R

6.3.3.2. OCT 70

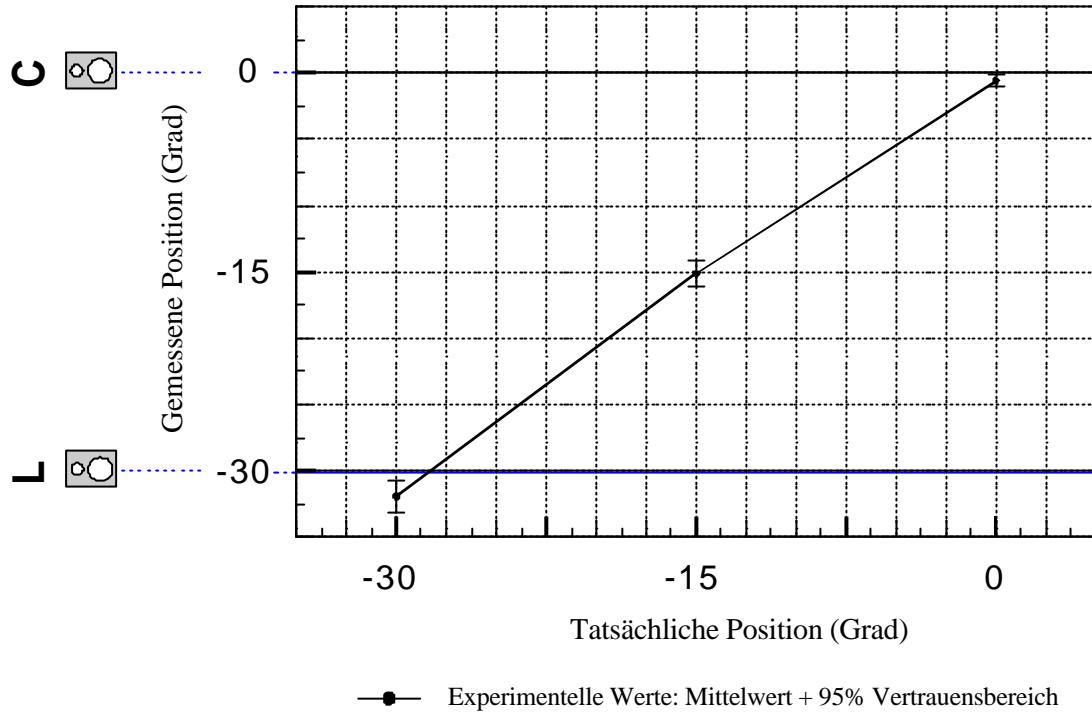
6.3.3.3. INA3

6.3.3.4. Quasi-ORTF

6.3.1. Experimentelle Lokalisationskurven – mittlere Hörposition, Vergleich mit Theorie

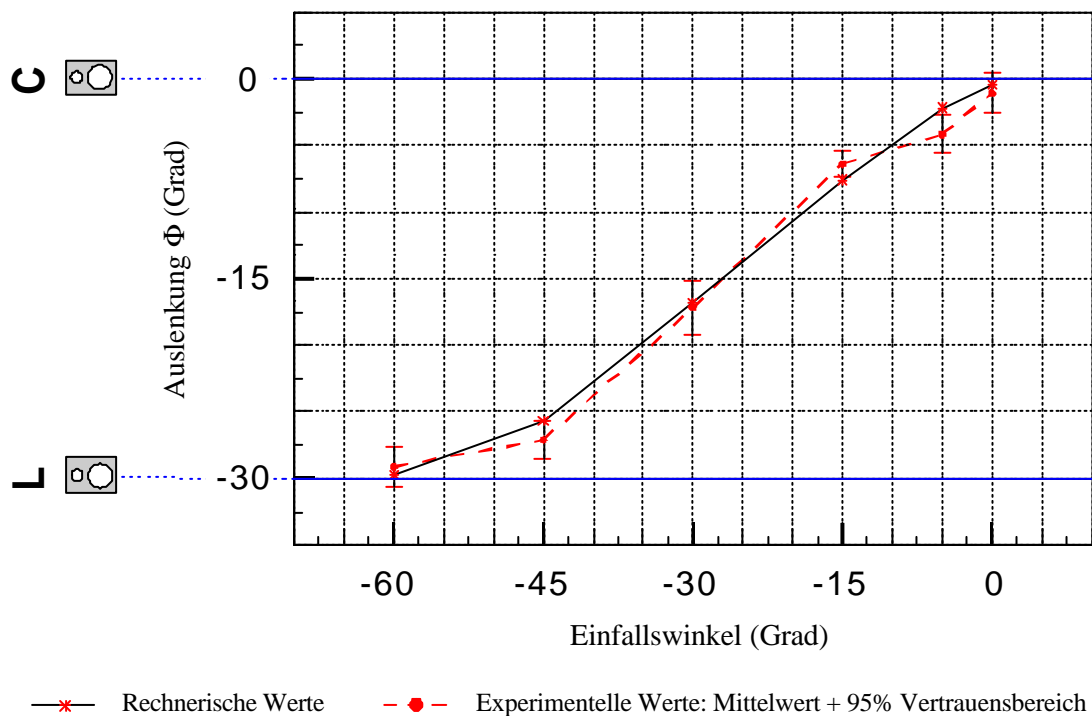
6.3.1.1. Einzelne Lautsprechersignale L, HL, C (Abbildung 6.5.)

Einzelne Lautsprecher L, HL, C



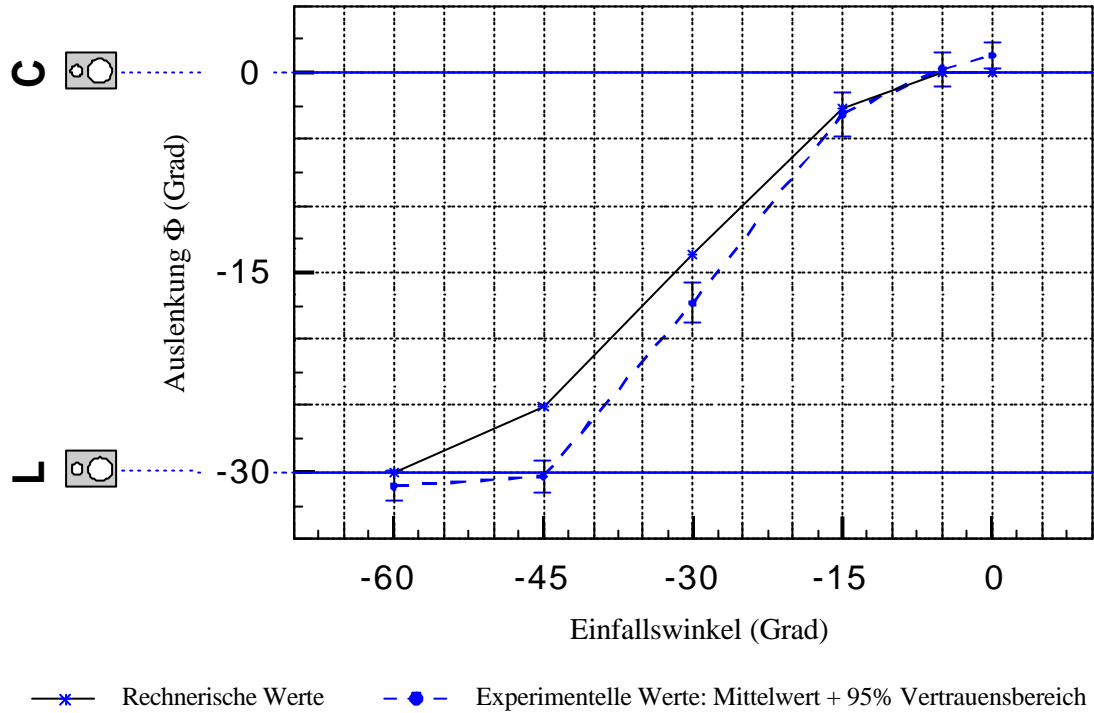
6.3.1.2. OCT 70 (Abbildung 6.6.)

OCT (120 Grad): Lokalisationskurven rechnerisch und experimentell



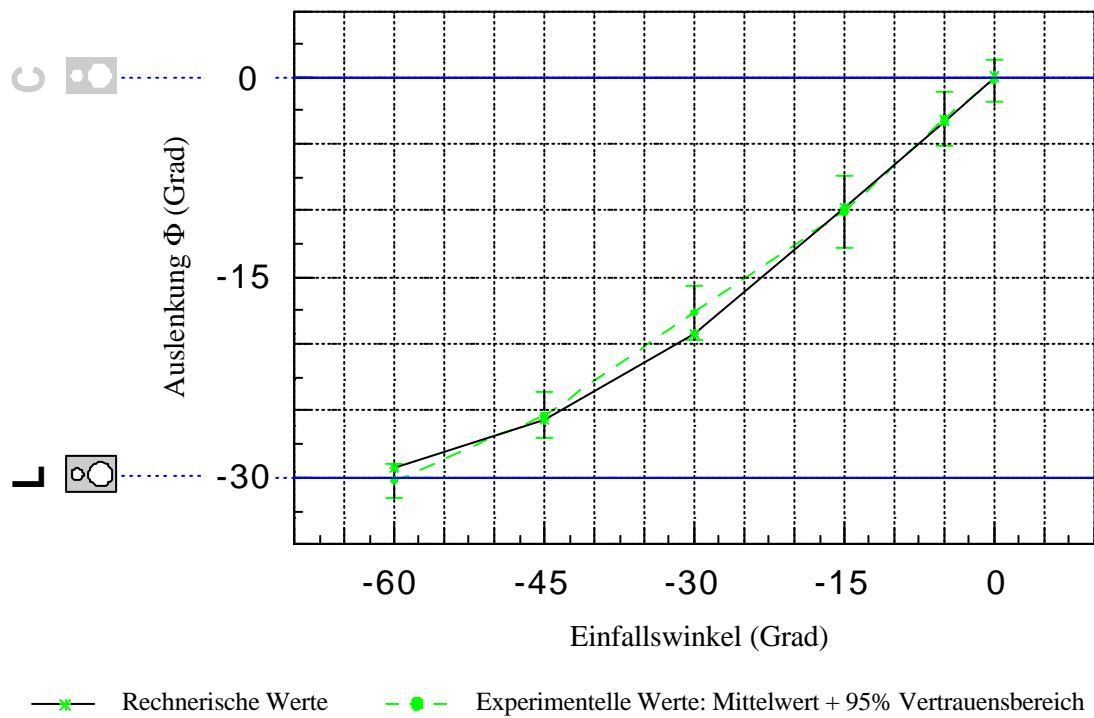
6.3.1.3. INA3 (Abbildung 6.7.)

INA3 (120 Grad): Lokalisationskurven rechnerisch und experimentell



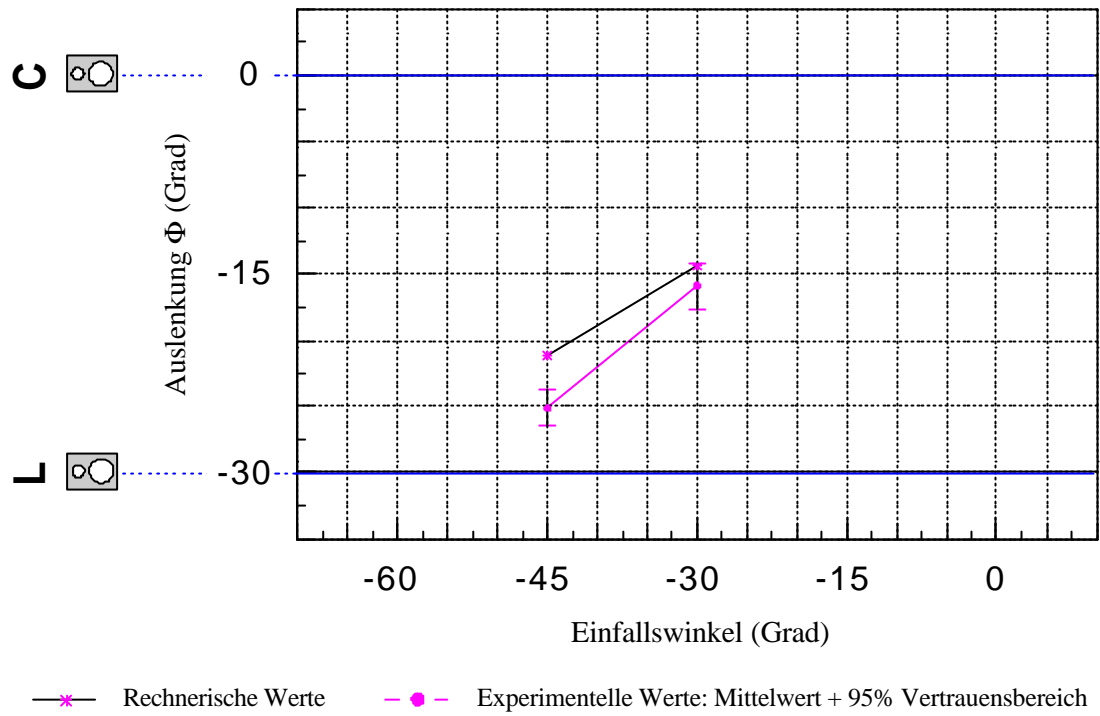
6.3.1.4. Quasi-ORTF (Abbildung 6.8.)

Quasi-ORTF (120 Grad): Lokalisationskurven rechnerisch und experimentell



6.3.1.5. OCT 50 (Abbildung 6.9.)

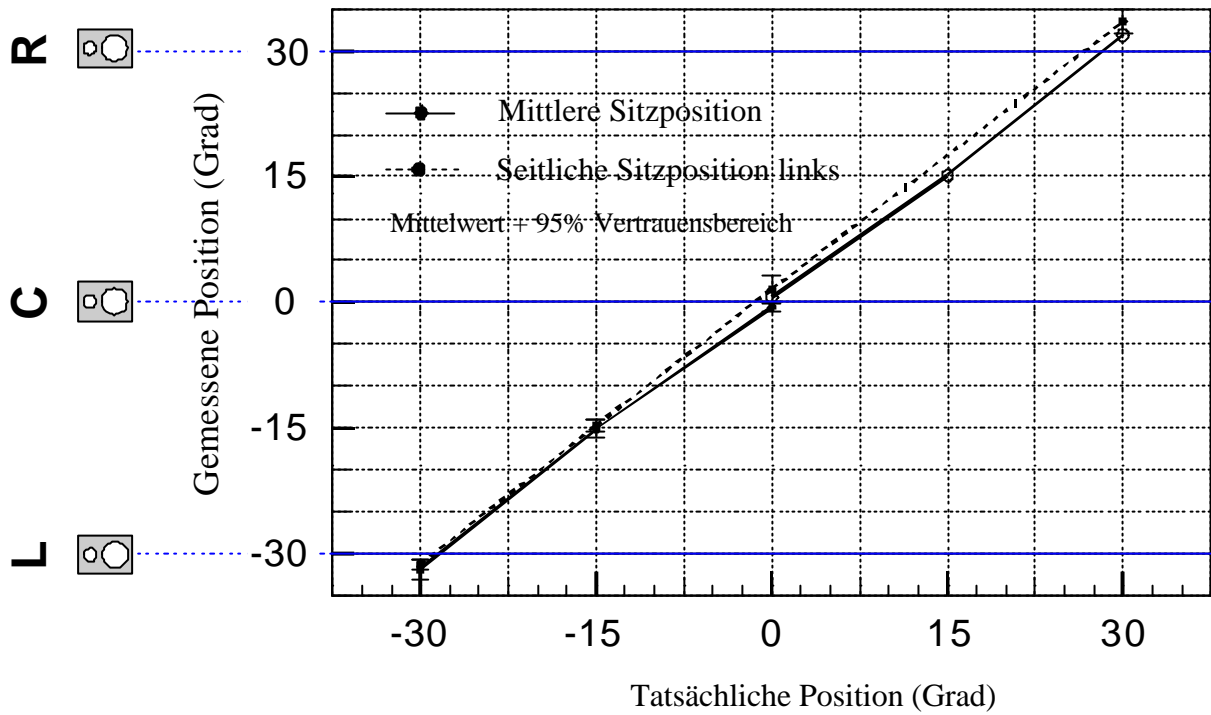
OCT 50(130 Grad): Lokalisationskurven rechnerisch und experimentell



6.3.2. Experimentelle Lokalisationskurven – seitliche Hörposition

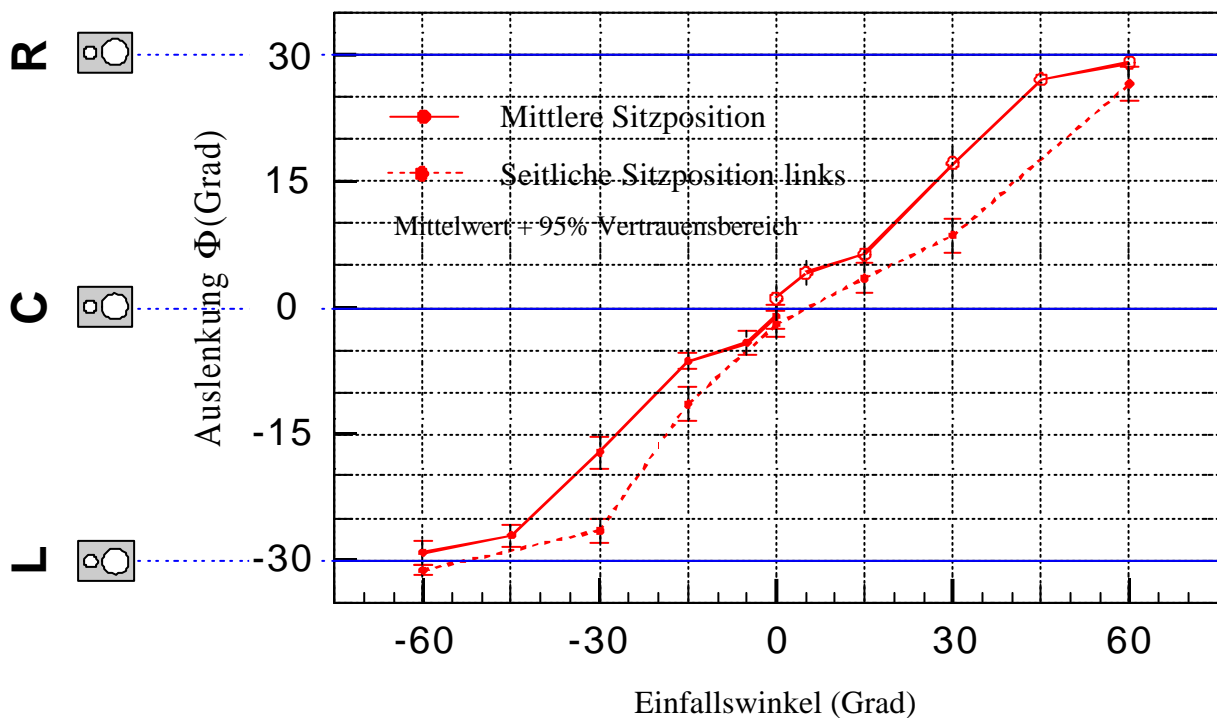
6.3.2.1. Einzelne Lautsprecher L, HL, C, R (Abbildung 6.10.)

Einzelne Lautsprecher: L, HL, C, R experimentell (Sitzposition M und L)



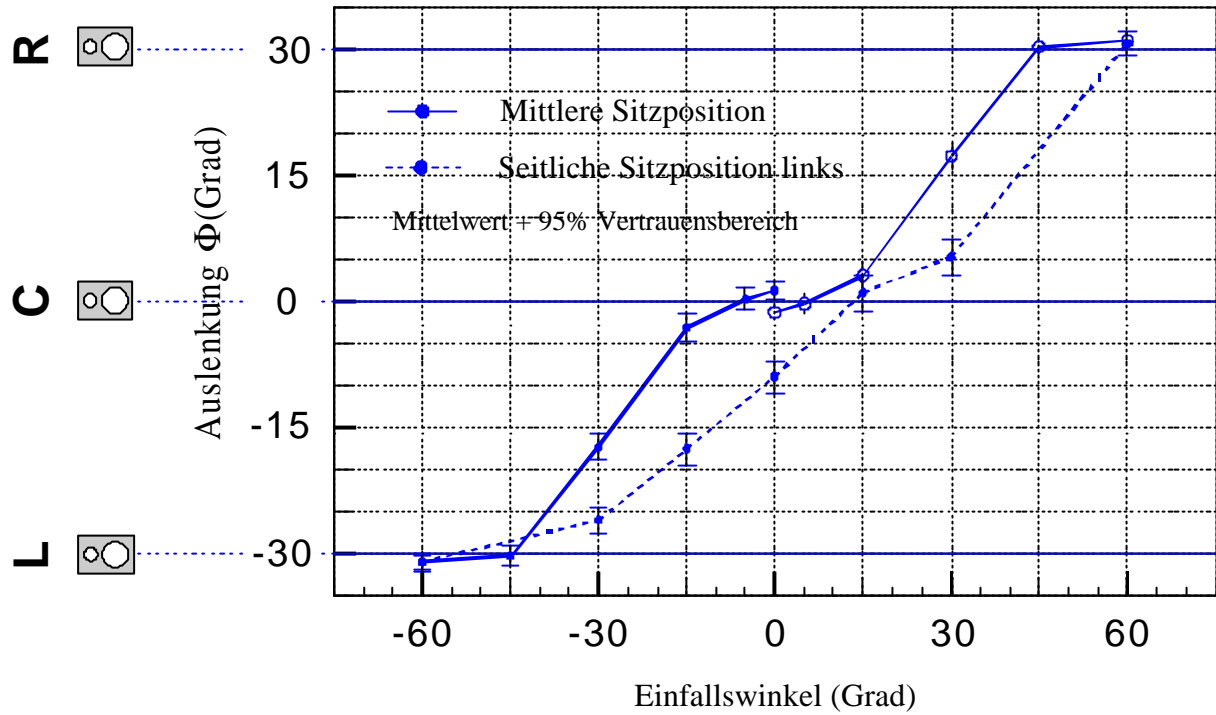
6.3.2.2. OCT 70 (Abbildung 6.11.)

OCT 70: Lokalisationskurven experimentell (Sitzposition M und L)



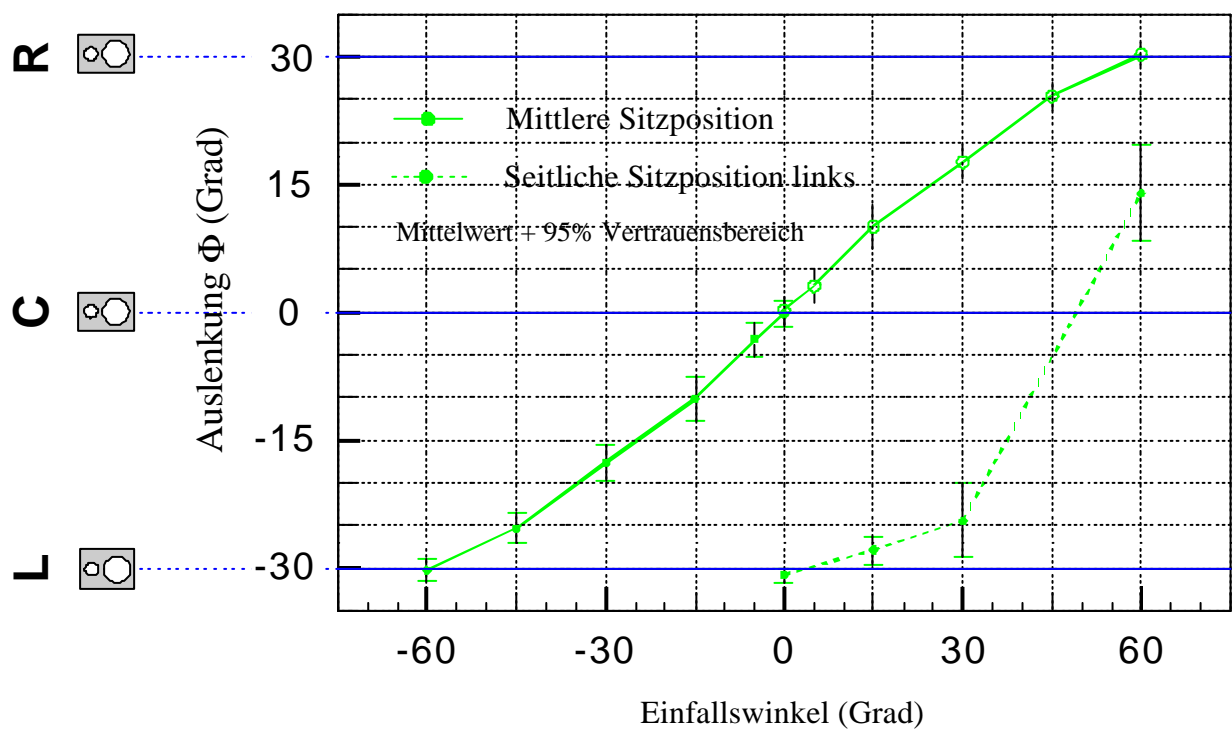
6.3.2.3. INA3 (Abbildung 6.12.)

INA3: Lokalisationskurven experimentell (Sitzposition M und L)



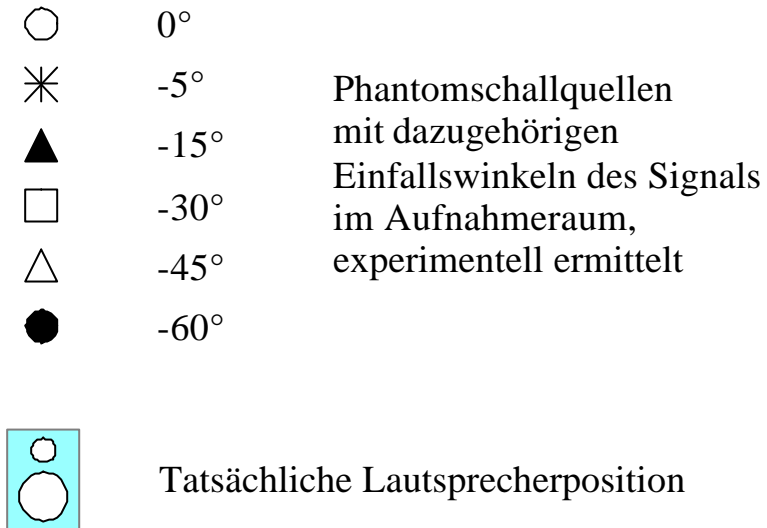
6.3.2.4. Quasi-ORTF (Abbildung 6.13.)

Quasi-ORTF: Lokalisationskurven experimentell (Sitzposition M und L)



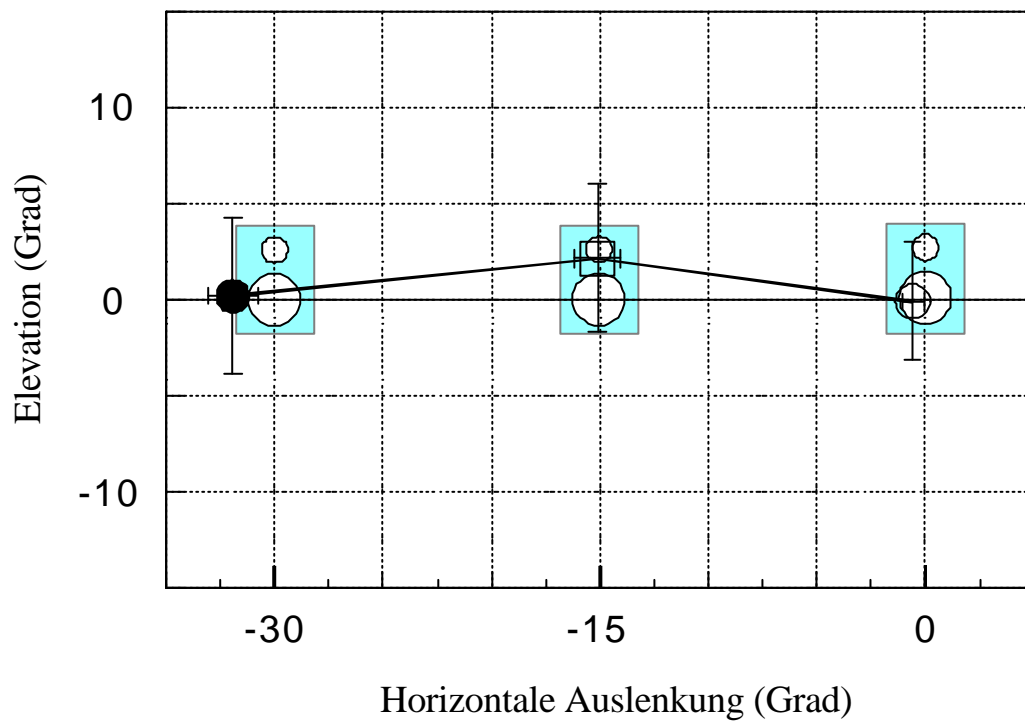
6.3.3. Elevation, zweidimensionale Darstellungen der gemessenen Phantomschallquellen

Legende:



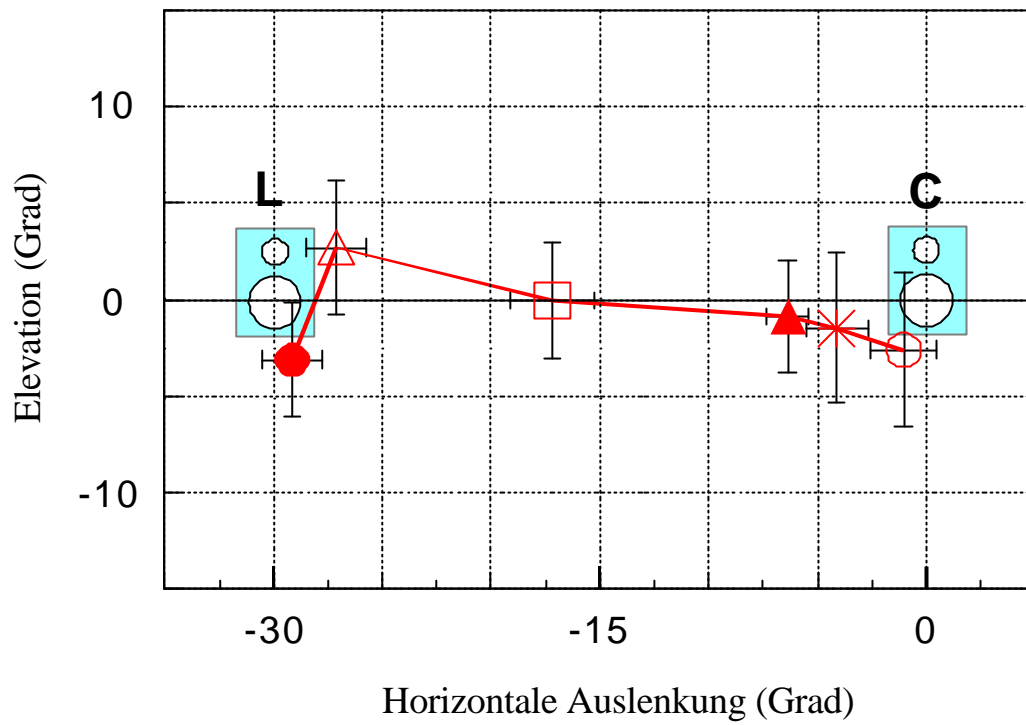
6.3.3.1. Einzelne Lautsprechersignale: L, HL, C (Abbildung 6.14.)

Einzelne Lautsprecher L, HL, C



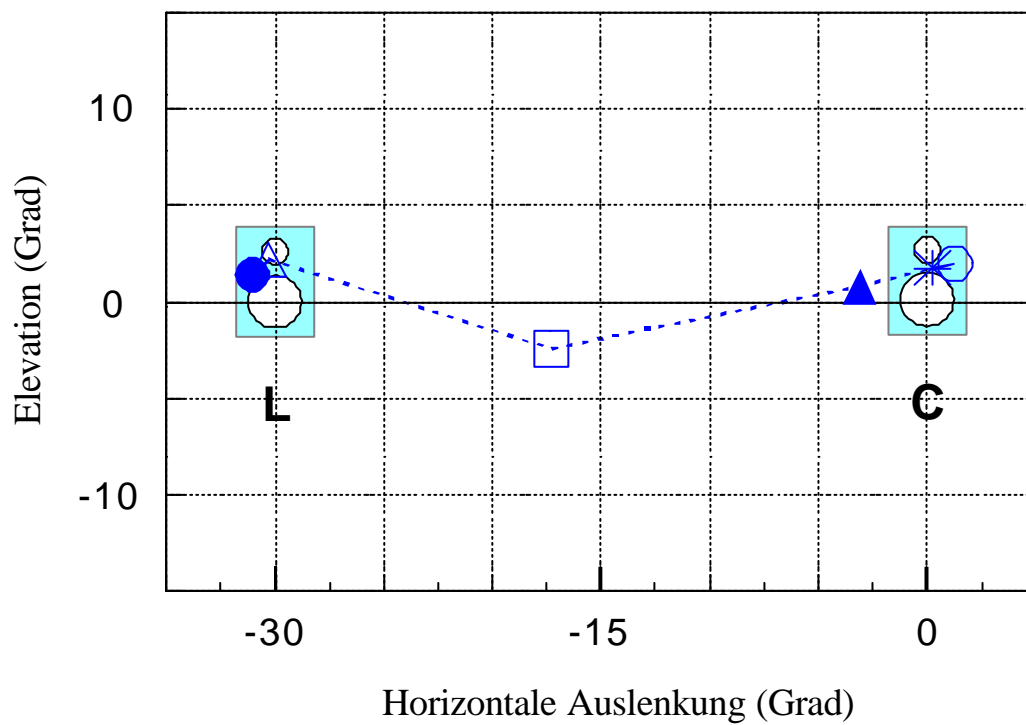
6.3.3.2. OCT 70 (Abbildung 6.15.)

OCT 70: zweidimensionale Phantomschallquellenebene



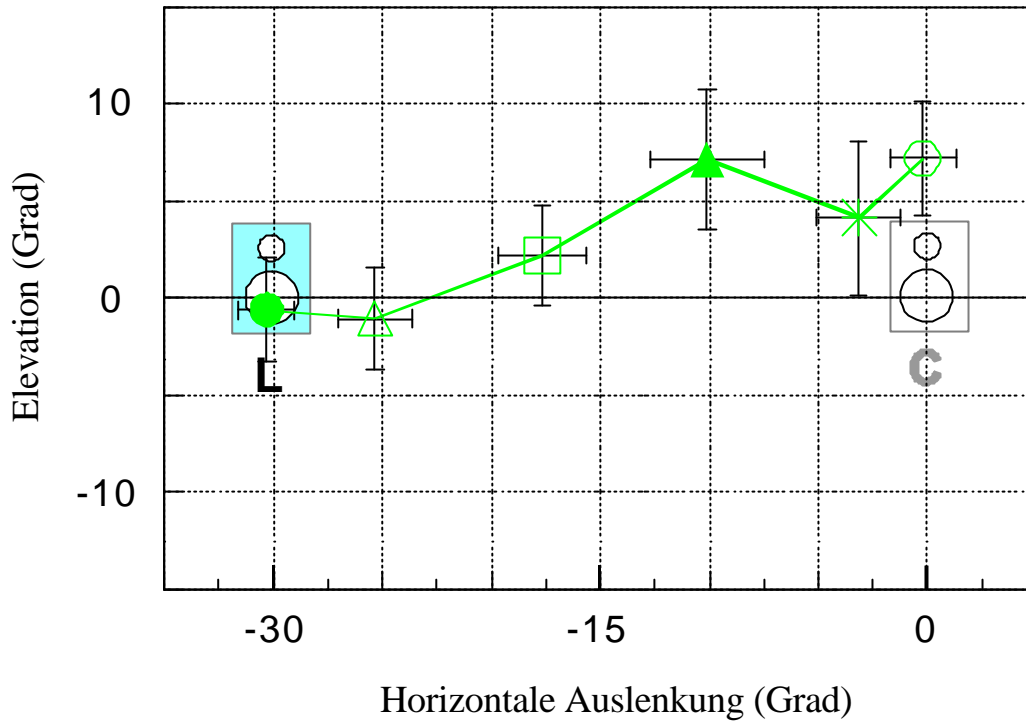
6.3.3.3. INA3 (Abbildung 6.16.)

INA3: zweidimensionale Phantomschallquellenebene



6.3.3.4. Quasi-ORTF (Abbildung 6.17.)

Quasi-ORTF: zweidimensionale Phantomschallquellenebene



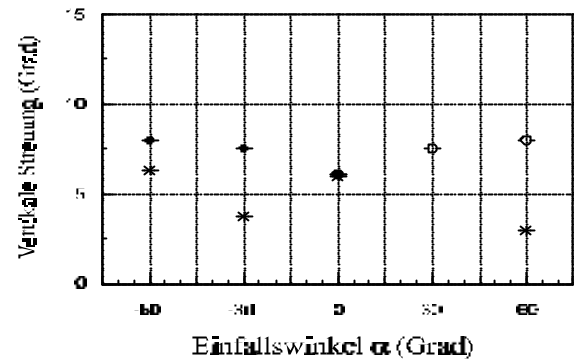
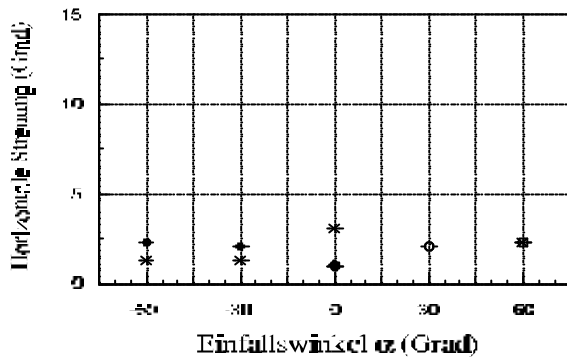
6.3.4. Streuungen: Standardabweichungen der gemessenen Daten

Es werden die Streuungen der gemessenen Daten angezeigt. Die entscheidende Größe ist dabei die Standardabweichung der Meßwerte.

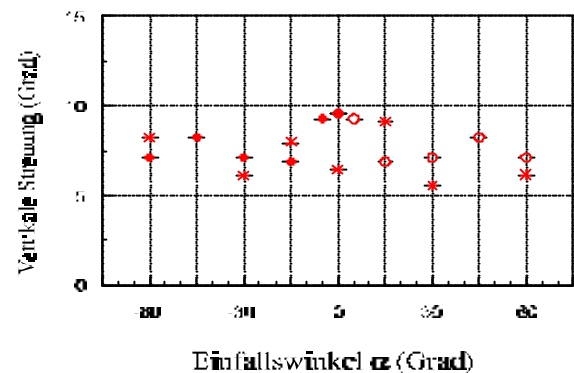
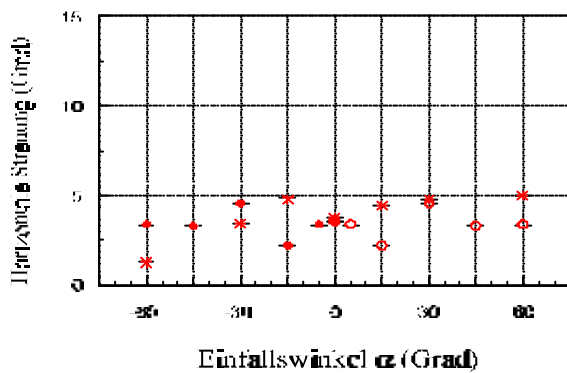
Legende:

- mittlere Hörposition, nur zwischen L-C gemessen
- mittlere Hörposition, durch Annahme der Symmetrie zur Mittelachse gespiegelte Werte zwischen C-R
- * seitliche Hörposition

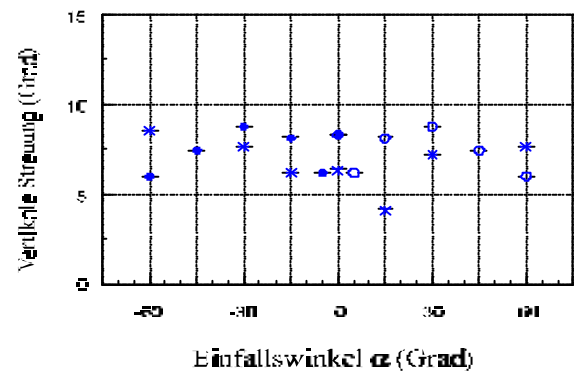
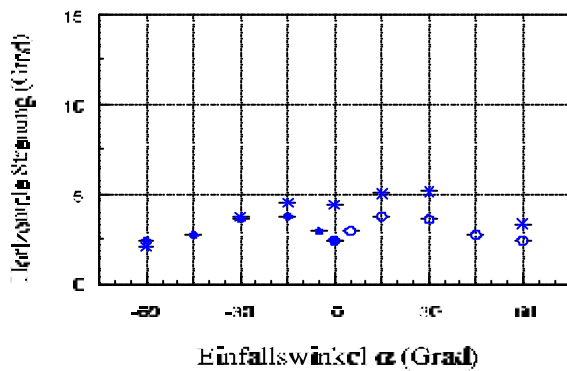
Einzelne Lautsprecher: Standardabweichungen



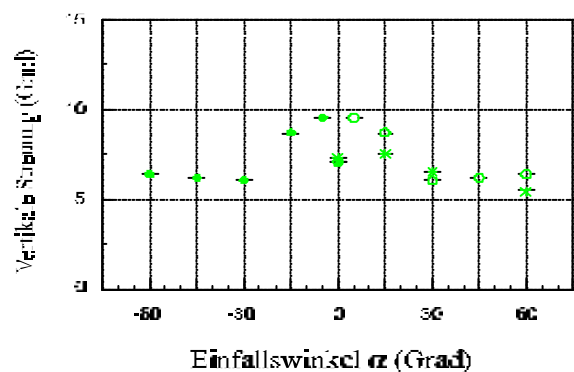
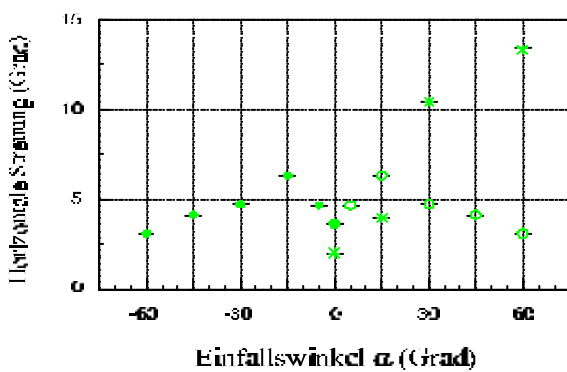
OCT 70: Standardabweichungen



INA3: Standardabweichungen



Quasi-ORTF: Standardabweichungen



6.4. Interpretation der Ergebnisse

6.4.1. Vergleich der experimentell ermittelten Lokalisationskurven mit den rechnerisch ermittelten Lokalisationskurven

Mit den rechnerisch ermittelten Lokalisationskurven läßt sich eine gute Näherung der tatsächlichen Abbildungsbedingungen erreichen.

Die Quasi-ORTF-Kurve (Abbildung 6.8.) gibt Anlaß zur Vermutung, daß die aus der Zweikanal-Stereofonie bekannten Gesetze in dieser rechnerischen Form anwendbar sind.

Die Ergebnisse der dreikanaligen Anordnungen (Abbildungen 6.6., 6.7., 6.9.) zeigen kein so eindeutiges Bild, allerdings werden die auftretenden Abweichungen möglicherweise zum einen durch den sog. „Zieh-Effekt“ zum Lautsprecher hingezogen, zum anderen zeigt auch die Messung der einzelnen Lautsprecher (Abbildung 6.5.) eine leichte Abweichung nach außen. Dies deutet darauf hin, daß entweder Anzeigemethode oder Raumakustik eine Verschiebung der gemessenen Daten verursachen.

Etwas nach außen verschobene Auslenkungen bei geringen Signaldifferenzen sind allerdings in [Martin et al. 1999] beobachtet worden (siehe Abbildungen in Kap. 2.3.2. und 2.3.3.)

6.4.2. Verlauf der experimentell ermittelten Lokalisationskurven, Hörposition Mitte

Die Versuchsergebnisse zeigen die theoretisch und rechnerisch erwarteten Eigenschaften:

- die Lokalisationskurve der **Quasi-ORTF-Anordnung** (Abbildung 6.13.) weist einen sehr ausgewogenen Verlauf auf. Die für Äquivalenzmikrofonanordnungen typischen Krümmungen der Kurve, die im rechnerischen Modell bereits dargestellt wurden (Kap.3) lassen sich sehr genau nachvollziehen.
- die Lokalisationskurve der **OCT-Anordnung** (Abbildung 6.11.) zeigt einen im Vergleich zu ORTF-Kurve leicht abweichenden Verlauf bei mittleren Auslenkungen aus der Basismitte, das heißt im Bereich der Auslenkungen $-7,5^\circ$ und $-22,5^\circ$. Trotzdem kann sie einen recht linearen Verlauf gut annähern

- Die Lokalisationskurve der **INA3-Anordnung** (Abbildung 6.12.) kann keine lineare Abbildung zwischen den Lautsprechern L, C und R mehr erreichen. Die Kurve erzielt Abbildung zwischen den Lautsprechern fast nur im Bereich von Einfallswinkeln zwischen -10° und -45° . Das bedeutet, betrachtet man den ganzen möglichen Bereich von Einfallswinkeln von -60° bis $+60^\circ$: Sowohl der mittlere Bereich (-10° bis $+10^\circ$) als auch der äußere Bereich ($\gamma > 45^\circ$ oder $\gamma < -45^\circ$) hat Abbildung nur in einem einzigen Lautsprecher zur Folge.

Ein weiterer Aspekt sollte beachtet werden, der in diesem Hörversuch nicht untersucht wurde: Der vom Einfallswinkel abhängige Summenpegel der Lautsprecher spielt bei der gleichzeitigen Abbildung verschiedener Klangquellen eine wichtige Rolle. Die verschiedenen Mikrofonanordnungen erzeugen, abhängig vom Einfallswinkel des Signals im Aufnahmeraum unterschiedliche Gesamtpegel. Dieser Gesamtpegel steigt zum Beispiel bei der Anordnung INA3 zur Mitte hin an. Dies drückt sich in einer Verstärkung des negativen Effekts der Ballung von Klangquellen im Center-Bereich aus.

Verlauf des Gesamtpegels der drei Mikrofonensignale (Summenleistungspegel):

Einfallswinkel	Summenleistungspegel in dB, 0 dB bei -60°		
	INA	OCT	Quasi-ORTF
-60°	0,0	0,0	0,0
-50°	0,4	0,0	0,6
-40°	0,7	-0,1	1,1
-30°	0,9	-0,2	1,4
-20°	1,0	-0,3	1,7
-10°	1,1	-0,4	1,8
0°	1,2	-0,5	1,9

Tabelle 6.3.: Verlauf der Summenleistungspegel

6.4.3. Verlauf der experimentell ermittelten Lokalisationskurven, Hörposition Seite

Die Versuchsergebnisse zeigen deutliche Unterschiede der beteiligten Mikrofonanordnungen. Die Abweichung zwischen den an den zwei Sitzpositionen entstandenen Lokalisationskurven zeigt die unterschiedlichen Entstehungsarten der verschiedenen Phantomschallquellen.

Die geringste Verzerrung ist beim **OCT-Mikrofon** (Abbildung 6.11.) anzutreffen. Gerade der Center-Bereich bleibt außerordentlich stabil. Das heißt, ein Signal, das im Center abgebildet werden soll, bleibt auch bei abweichender Sitzposition stabil im Center. Die Abweichungen im Center-nahen Bereich bleiben aufgrund des weitgehend vermiedenen Übersprechens gering.

Das **INA3-Mikrofon** (Abbildung 6.12.) kann diese Stabilität nicht erreichen.

Im mittleren Bereich wurde Auslenkung gleichsinnig durch Pegel- und Laufzeitdifferenzen erreicht. Das bedeutet, daß die Pegeldifferenz des linken zum mittleren Lautsprecher geringer ist. Hier macht sich auch der negative Einfluß des Übersprechens bemerkbar, das bei diesem Signal auf den äußeren Lautsprechern vorhanden ist.

Dadurch wird die Lokalisationskurve zum linken Lautsprecher hingezogen.

Ein Signal, das im Center-Lautsprecher abgebildet werden soll, wird nun bei ca. -9° geortet.

Das **Quasi-ORTF-Mikrofon** (Abbildung 6.13.) kann praktisch keine Abbildung zwischen den Lautsprechern mehr bieten. Nur die beiden Signale $+30^\circ$ und $+60^\circ$, die bei mittlerer Sitzposition rechts abgebildet werden, werden noch zwischen den Lautsprechern geortet. Allerdings ist das verbunden mit extrem geringer Abbildungsschärfe und großer Urteilsunsicherheit. Beim Wert $+60^\circ$ konnten die Hälfte der Versuchspersonen gar keinen bestimmten Abbildungsort angeben.

6.4.4. Elevation

Die zweikanalige Anordnung Quasi-ORTF (Abbildung 6.17.) zeigt bei Phantomschallquellen im mittleren Bereich deutliche Elevation. Im Gegensatz zu den Lautsprechern werden diese Phantomschallquellen um ca. 5° - 7° eleviert wahrgenommen.

Die beiden dreikanaligen Anordnungen zeigen diese Elevation nicht (Abbildungen 6.15. und 6.16.). Im mittleren Bereich ist nun der Center-Lautsprecher für die Höhenwahrnehmung verantwortlich.

Möglicherweise kann man die unterschiedlichen Werte der Signale 0° so deuten:

Durch die Mischung des INA3-Signals aus Real- und Phantomschallquelle entsteht auch Elevation in entsprechendem Maße: Die Elevation an diesem Punkt liegt zwischen den Werten der reinen Phantomschallquelle ORTF und der annähernd reinen Realschallquelle OCT.

6.4.5. Streuung

Anhand der Streuung der Versuchsergebnisse lassen sich auch Indizien für die Lokalisationsschärfe der Phantomschallquellen ableiten. So ist bei geringer Lokalisationsschärfe generell eine größere Streuung zu erwarten.

Die Streuungen der Versuchsergebnisse in horizontaler Richtung weisen folgende auffällige Eigenschaften auf (Abbildung 6.18.):

- Die Zweikanalanordnung Quasi-ORTF hat im allgemeinen eine höhere Streuung als die beiden dreikanaligen Anordnungen
- Die Streuungen der beiden dreikanaligen Anordnungen weisen keine signifikanten Unterschiede auf.
- ein Wert ist allerdings auffallend: OCT, Einfallswinkel -30° . Hier macht sich wohl bemerkbar, daß die Signaldifferenzen an dieser Stelle gegensinnig verlaufen. Die dadurch sinkende Lokalisationsschärfe macht sich in einem erhöhten Streuungswert bemerkbar.
- Die an der seitlichen Sitzposition auftretende Streuung ist im allgemeinen größer als die Streuung, die an der mittleren Sitzposition gemessen wurde.

Die Streuungen der Versuchsergebnisse in vertikaler Richtung zeigt:

Hier treten deutlich größere Streuungen auf, was in Einklang mit der geringeren Fähigkeit des menschlichen Gehörs steht, in der Medianebene exakt zu lokalisieren.

Kapitel 7

Hörversuch Teil 2 : Abbildungsschärfe

7.1. Versuchsdurchführung

7.1.1. Begriffsklärung

7.1.2. Vergleichstest

7.1.3. Testsignale

7.2. Versuchsauswertung

7.2.1. allgemein

7.2.2. Statistik

7.3. Darstellung der Ergebnisse

7.3.1. Abbildungsschärfe – mittlere Sitzposition

7.3.2. Abbildungsschärfe – seitliche Sitzposition

7.4. Interpretation der Ergebnisse

7.1. Versuchsdurchführung

7.1.1. Begriffsklärung

Teil 2 des Hörversuchs beinhaltete die Ermittlung der Abbildungsschärfe einer Phantomschallquelle. Die Begriffsdefinition war im Versuchsformular enthalten, und wurde vor Beginn des Versuchs ausführlich mit den Testpersonen besprochen:

„Die Abbildungsschärfe bezeichnet die Präzision der Abbildung oder die Qualität, mit der sich eine Phantomschallquelle lokalisieren läßt.

Die Ausdehnung des Hörereignisses nimmt zu, wenn die Abbildungsschärfe sinkt.“

Dabei wurde klar zum Ausdruck gebracht, daß große Hörereignisausdehnung nicht unbedingt gleichzusetzen ist mit schlechter Abbildungsschärfe. Es kann auch Signale mit scheinbar größerer Ausdehnung, z.B. durch Reflektionen und Nachhall geben, die trotzdem scharf lokalisierbar sind.

Wie in Abschnitt 5.4. besprochen, war bei einem solchen Parameter auch bei geübten Versuchspersonen eine ausführliche Trainingsphase notwendig, um Mißverständnisse zu klären und dem Teilnehmer einen Eindruck von möglichen Veränderungen aufzuzeigen.

7.1.2. Vergleichstest

Der Test wurde nach den Empfehlungen ITU-R BS 562-3 „Subjective Assessment of Sound Quality“ [ITU 1990] durchgeführt.

Darin heißt es: „Because of the extreme unreliability of the long or medium-term aural memory, the instantaneous comparison method should always be used.“

Daraus folgte für Teil 1 und Teil 2 die Notwendigkeit des Vergleichs mit einer konstanten Referenz.

In Teil 1 wurde als Referenz, wie in Abschnitt 5.2.1.4. besprochen, das Signal der mittleren Nierenkapsel auf einem einzelnen Lautsprecher in angepaßter Lautstärke präsentiert. Da die Referenz natürlich beim Vergleich der Abbildungsschärfe am selben

Platz wie die erzeugte Phantomschallquelle erscheinen mußte, war der Einsatz von mehreren Lautsprechern an verschiedenen Orten unvermeidlich.

So mußte die Auswahl der verwendeten Phantomschallquellen auch auf die möglichen Standorte der Lautsprecher abgestimmt werden.

Der Vergleich von Referenz und zu beurteilendem Beispiel erfolgte mit dem in Kapitel 5.3. besprochenen MIDI-Fußpedal. So war geräuschfreies und komfortables, direkt von der Versuchsperson selbst gesteuertes Umschalten möglich. Signal A (Pedal links) war die Referenz, Signal B (Pedal rechts) das jeweilige Beispiel.

Nach der Bewertung des Hörbeispiels stoppte der Verfasser die play-Schleife und startete das nächste Beispiel.

Die verwendete Beurteilungsskala entsprach den ITU-Empfehlungen für eine „five-grade quality and impairment scale“ [ITU 1990]. Das Wort *störend* wurde allerdings vermieden, da es nicht Ziel des Hörversuchs war, die *erwünschte* Abbildungsschärfe zu evaluieren, sondern sie relativ zu bestimmen.

Daher kam folgende Skala zur Anwendung:

Signal A und B ...

5 = zeigen keinen Unterschied

4 = unterscheiden sich leicht

3 = unterscheiden sich

2 = unterscheiden sich stark

1 = unterscheiden sich sehr stark

... in Bezug auf die Abbildungsschärfe.

7.1.3. Testsignale

Folgende Signale wurden in zufälliger Reihenfolge verglichen:

a) mittlere Sitzposition:

Nr.	Mikrofonanordnung	Einfallswinkel	Hauptachsenwinkel des Referenzlautsprechers
1	OCT 70	0°	0°
2	“ “	-5°	0°
3	“ “	-15°	-7,5°
4	“ “	-30°	-15°
5	“ “	-45°	-22,5°
6	“ “	-60°	-30°
7	OCT 50	-30°	-15°
8	“ “	-45°	-22,5°
9	INA3	0°	0°
10	“ “	-5°	0°
11	“ “	-15°	-7,5°
12	“ “	-30°	-15°
13	“ “	-45°	-22,5°
14	“ “	-60°	-30°
15	Quasi-ORTF	0°	0°
16	“ “	-5°	0°
17	“ “	-15°	-7,5°
18	“ “	-30°	-15°
19	“ “	-45°	-22,5°
20	“ “	-60°	-30°

Tabelle 7.1.: in Hörversuch Teil 3 an optimaler Hörposition präsentierte Testsignale

b) seitliche Sitzposition (links):

(Dabei wurden die Signale aus Einfallswinkeln mit positiven Vorzeichen durch einfaches Vertauschen der beiden äußeren Kanäle der korrespondierenden Signale aus Einfallswinkeln mit negativen Vorzeichen erzeugt.)

Nr.	Mikrofonanordnung	Einfallswinkel	Hauptachsenwinkel des Referenzlautsprechers
1	OCT 70	0°	0°
2	“ “	5°	0°
3	“ “	15°	0°
4	“ “	30°	7,5°
5	INA3	0°	7,5°
6	“ “	5°	0°
7	“ “	15°	0°
8	“ “	30°	15°

Tabelle 7.2.: in Hörversuch Teil 3 an seitlicher Hörposition präsentierte Testsignale

7.2. Versuchsauswertung

7.2.1. allgemein

Zur Auswahl der Versuchspersonen siehe Kapitel 5.4.

Sämtliche Bewertungen aller Versuchspersonen gingen in die Bewertung ein.

Die teilweise abgegebenen schriftlichen oder mündlichen Kommentare ergeben keine signifikante, allgemeingültige Aussage.

7.2.2. Statistik

Folgende statistische Werte wurden ermittelt (siehe Kapitel 6.2.2.):

- Mittelwert
- 95% Vertrauensbereich des Mittelwerts

7.3. Darstellung der Ergebnisse

7.3.1. Abbildungsschärfe – mittlere Sitzposition

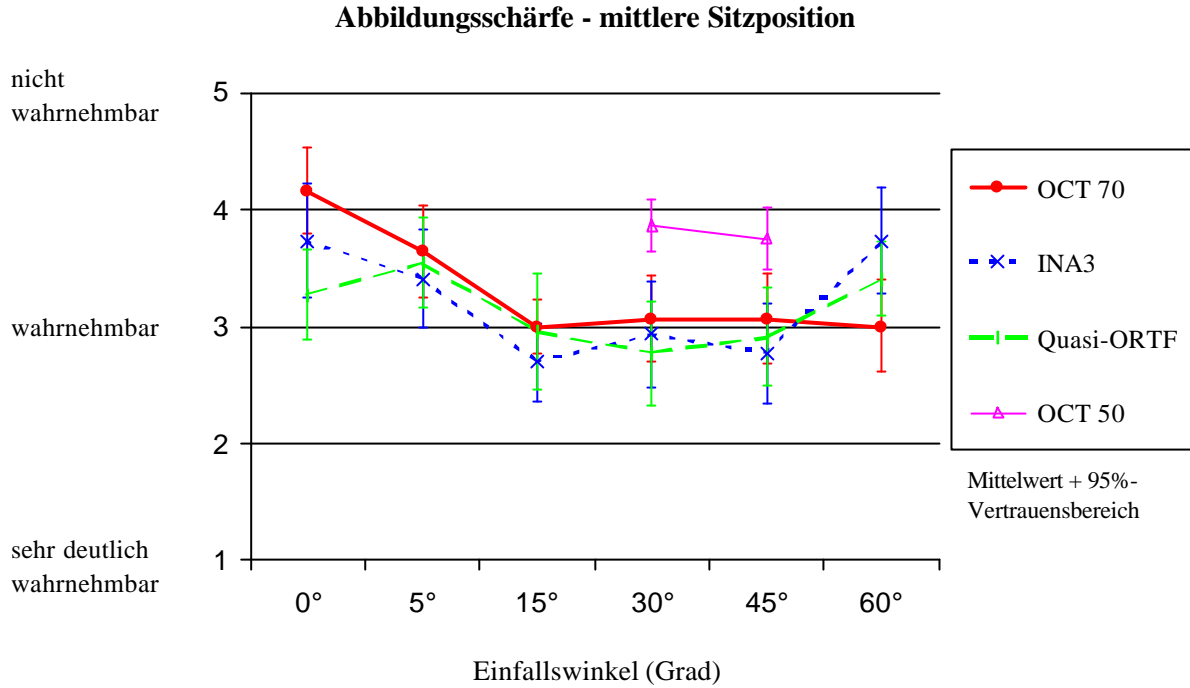


Abbildung 7.1.: Ergebnisse Hörversuch, Teil 2: Abbildungsschärfe, mittlere Hörposition

7.3.2. Abbildungsschärfe – seitliche Sitzposition

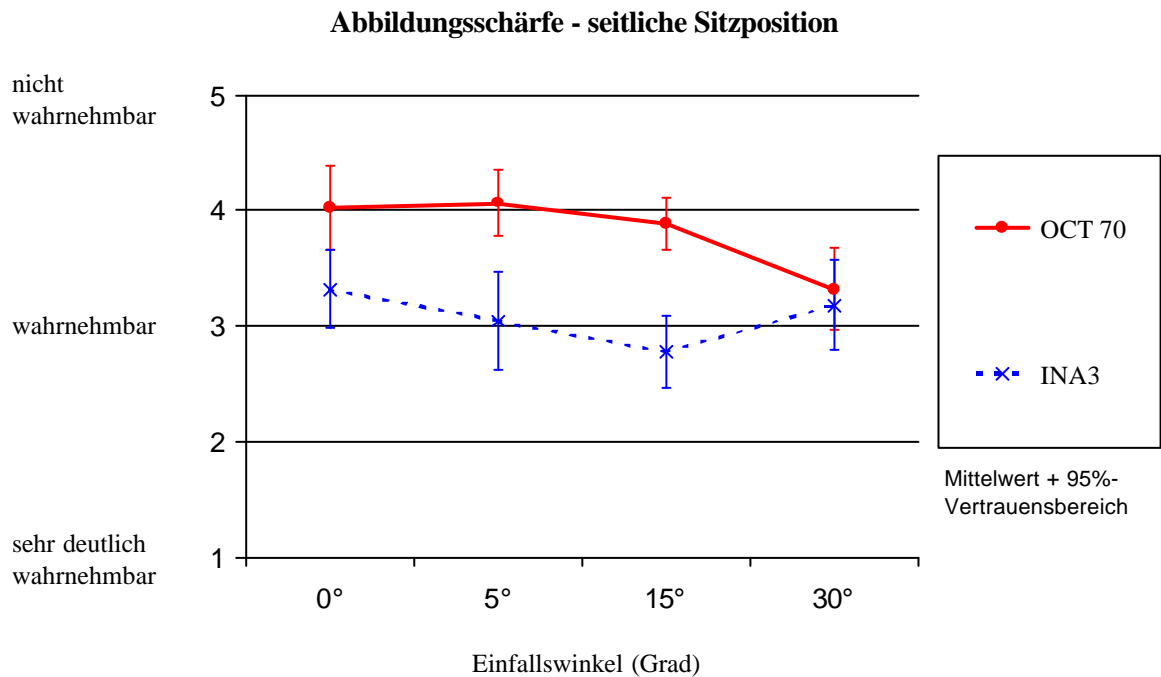


Abbildung 7.2.: Ergebnisse Hörversuch, Teil 2: Abbildungsschärfe, seitliche Hörposition

7.4. Interpretation der Ergebnisse

Mittlere Sitzposition (Abbildung 7.1.):

Die Beurteilungen des Unterschieds der Abbildungsschärfe im Vergleich zur Referenz lassen folgern:

- Die Existenz des Center-Lautsprechers bei den beiden dreikanaligen Anordnungen bewirkt gar nicht bzw. kaum eine Verbesserung der Abbildungsschärfe bei schrägem Schalleinfall und dadurch verursachter Abbildung zwischen den Lautsprechern. (vergleiche Vorversuch 2B, Kap.2.4.3.)
- bei allen Mikrofonanordnungen steigt die Abbildungsschärfe erwartungsgemäß, wenn der Einfallswinkel und damit auch der seitliche Abstand zum Center-Lautsprecher verringert wird. Bei den dreikanaligen Anordnungen stellt dieser Verlauf den Übergang von der reinen Phantomschallquelle zur Mischung Phantom-/Real-schallquelle dar.
- Die zweikanalige Anordnung Quasi-ORTF zeigt dieselbe Entwicklung – hier steigt mit Verringerung der Laufzeitdifferenzen die Abbildungsschärfe. (vergleiche Vorversuch 2B, Kap.2.4.3.)
- Die Bewertung der Abbildungsschärfe des Signals 0° zeigt die Unterschiede zwischen den drei Verfahren auf:
 - Die reine Phantomschallquelle der Quasi-ORTF-Anordnung besitzt die geringste Abbildungsschärfe
 - das OCT-Signal besteht hauptsächlich aus der Realschallquelle Center-Lautsprecher, die Abbildungsschärfe ist dementsprechend groß
 - das INA3-Signal stellt durch die relativ hohen Pegel der Kanäle L und R (\rightarrow Kap.2.2.5.) eine Mischung zwischen Phantom- und Realschallquelle dar. Die Abbildungsschärfe liegt genau zwischen den beiden anderen Verfahren.
- Liegen bei INA3 keine Signaldifferenzen mehr vor (Einfallswinkel 30°), läßt sich ein leichter Anstieg der Abbildungsschärfe beobachten. Dies wurde auch in Vorversuch 2B schon festgestellt. Der korrespondierende Wert der OCT-Kurve zeigt diesen Anstieg kaum - an dieser Stelle liegen gegensinnige Signaldifferenzen vor, die sich ungünstig auf die Abbildungsschärfe auswirken.
- Die Verbesserung dieser Gegensinnigkeiten beim OCT 50-Mikrofon bewirkt einen deutlichen Anstieg der Abbildungsschärfe in diesem Bereich.

- INA3 und Quasi-ORTF können am Rand des Aufnahmebereichs wieder höhere Abbildungsschärfe erreichen, OCT 70 gelingt diese Verbesserung nicht. Hier wird deutlich: Das OCT-System arbeitet an den äußeren Rändern hauptsächlich mit den für die Abbildungsschärfe ungünstigeren Laufzeitdifferenzen. Außerdem steigt hier schon der Pegel des rückwärtigen, phasengedrehten Zipfels der Superniere.

Bei -60° Einfallswinkel lagen folgende Signalverhältnisse vor: (tatsächliche Meßwerte)

Anordnung	Einfallswinkel	DL	Dt	Übersprechpegel
OCT	-60°	$\Delta L(L/C) = 3 \text{ dB}$	$\Delta t(L/C) = -0,77 \text{ ms}$	$\Delta L(R/(L+C)) = 13,4 \text{ dB}^*$
INA3	-60°	$\Delta L(L/C) = 4 \text{ dB}$	$\Delta t(L/C) = -0,88 \text{ ms}$	$\Delta L(R/(L+C)) = 18,3 \text{ dB}$
ORTF	-60°	$\Delta L(L/R) = 7,1 \text{ dB}$	$\Delta t(L/R) = -0,52 \text{ ms}$	

*Tabelle 7.3.: Signalverhältnisse bei Einfallswinkel -60° *phasengedreht!*

Seitliche Sitzposition links (Abbildung 7.2.):

Die Beurteilungen des Unterschieds der Abbildungsschärfe im Vergleich zur Referenz lassen folgern:

Der Unterschied zwischen den Verfahren OCT und INA3 wird gerade an nicht-optimalen Sitzpositionen deutlich. Hier zeigt sich die Konsequenz aus unterschiedlichen Signaldifferenzen der drei Lautsprecher.

OCT erreicht im mittleren Bereich (Einfallswinkel 0° , 5° , 15°) durch die deutliche Dominanz des Center-Lautsprechers immer noch hohe Werte bei der Beurteilung.

INA3 hingegen wird in diesem Bereich deutlich niedriger beurteilt. Die Abbildungsschärfe sinkt an seitlichen Sitzpositionen durch den relativ hohen Pegel des der Versuchsperson nahen Lautsprechers L. Dieser ist bei mittlerer Sitzposition nicht in dem Maße an der Abbildung beteiligt.

Sowohl gegenüber der Bewertung aus der mittleren Sitzposition als auch gegenüber der Bewertung der OCT-Signale sind wesentliche kleinere Werte festzustellen.

Das Absinken der INA3-Kurve bei schrägeren Einfallswinkeln gegenüber dem Wert bei 0° erklärt sich durch die zunehmende Beteiligung des Lautsprechers R, der nun auch noch an der Bildung der Phantomschallquelle beteiligt ist. Die beiden Kurven nähern sich erst beim Signal 30° wieder an. Dort liegen wieder ähnliche Signaldifferenzen vor und das Übersprechsignal ist schwächer.

Kapitel 8

Hörversuch Teil 3 : Klangfarbe

8.1. Versuchsdurchführung

8.1.1. Begriffsklärung

8.1.2. Versuchsablauf

8.1.3. Testsignale

8.2. Versuchsauswertung – siehe Kapitel 7.2.

8.3. Darstellung der Ergebnisse

8.3.1. Klangfarbe – mittlere Sitzposition

8.3.2. Klangfarbe – seitliche Sitzposition

8.4. Interpretation der Ergebnisse

8.1. Versuchsdurchführung

8.1.1. Begriffsklärung

Teil 3 des Hörversuchs beinhaltete die Ermittlung von Klangfarbenunterschieden.

Die Versuchspersonen, die durch den Ablauf des Tests bisher schon an die Hörsituation gewohnt waren, erhielten in der Trainingsphase Beispiele für mögliche Klangfarbenveränderungen unterschiedlichen Grades. Es wurde darauf hingewiesen, daß nun nicht mehr auf andere Parameter wie Orts- oder Ausdehnungsveränderungen zu achten war, sondern nur auf Veränderungen in der Klangfarbe der dargebotenen Beispiele. In der Trainingsphase wurden explizit Beispiele präsentiert, die deutliche Änderungen der Abbildungsschärfe, aber weniger Veränderungen der Klangfarbe aufwiesen. Mit Rückfragen wurden sichergestellt, daß die Versuchsperson den Inhalt dieses Versuchsteils richtig erfaßte.

8.1.2. Versuchsablauf

Ebenso wie in Hörversuch Teil 2 wurde auch in diesem Teil der Vergleich mit einer Referenz durchgeführt, die Einrichtungen sowie die Skala waren die selben wie in Teil 2 (→Kapitel 7).

Es wurde sichergestellt, daß die Sitzposition und die Phantomschallquellenpositionen denjenigen in Teil 2 glichen.

Allein die Testsignale wurden nun ausgetauscht:

8.1.3. Testsignale

Testsignale war der gleiche Satz wie in Teil 2 des Hörversuchs, diesmal allerdings von einem männlichen Sprecher dargeboten. Die Wahl fiel auf dieses Testsignal, da Klangfarbenunterschiede gerade bei männlicher Sprache aufgrund der darin enthaltenen tieffrequenten Anteile besonders leicht zu bemerken sind.

Folgende Signale wurden in zufälliger Reihenfolge verglichen:

a) mittlere Sitzposition:

Nr.	Mikrofonanordnung	Einfallswinkel	Hauptachsenwinkel des Referenzlautsprechers
1	OCT 8/70	0°	0°
2	“ “	-5°	0°
3	“ “	-15°	-7,5°
9	INA3	0°	0°
10	“ “	-5°	0°
11	“ “	-15°	-7,5°
15	Quasi-ORTF	0°	0°
16	“ “	-5°	0°
17	“ “	-15°	-7,5°

Tabelle 8.1.: Testsignale in Hörversuch, Teil 3: optimale Sitzposition

b) seitliche Sitzposition (links):

(Dabei wurden die Signale aus Einfallswinkeln mit positiven Vorzeichen durch einfaches Vertauschen der beiden äußeren Kanäle der korrespondierenden Signale aus Einfallswinkeln mit negativen Vorzeichen erzeugt.)

Nr.	Mikrofonanordnung	Einfallswinkel in Grad	Hauptachsenwinkel des Referenzlautsprechers
1	OCT 8/70	-5°	-7,5°
2		0°	0°
3		5°	0°
4		15°	7,5°
5	INA3 53/60	-5°	-15°
6		0°	-7,5°
7		5°	-7,5°
8		15°	0°
9	Quasi-ORTF	-5°	-30°
10		0°	-30°
11		5°	-30°
12		15°	-22,5°

Tabelle 8.2.: Testsignale in Hörversuch, Teil 3: seitlich verschobene Sitzposition

8.2. Versuchsauswertung – siehe Kapitel 7.2.

8.3. Darstellung der Ergebnisse

8.3.1. Klangfarbe – mittlere Sitzposition

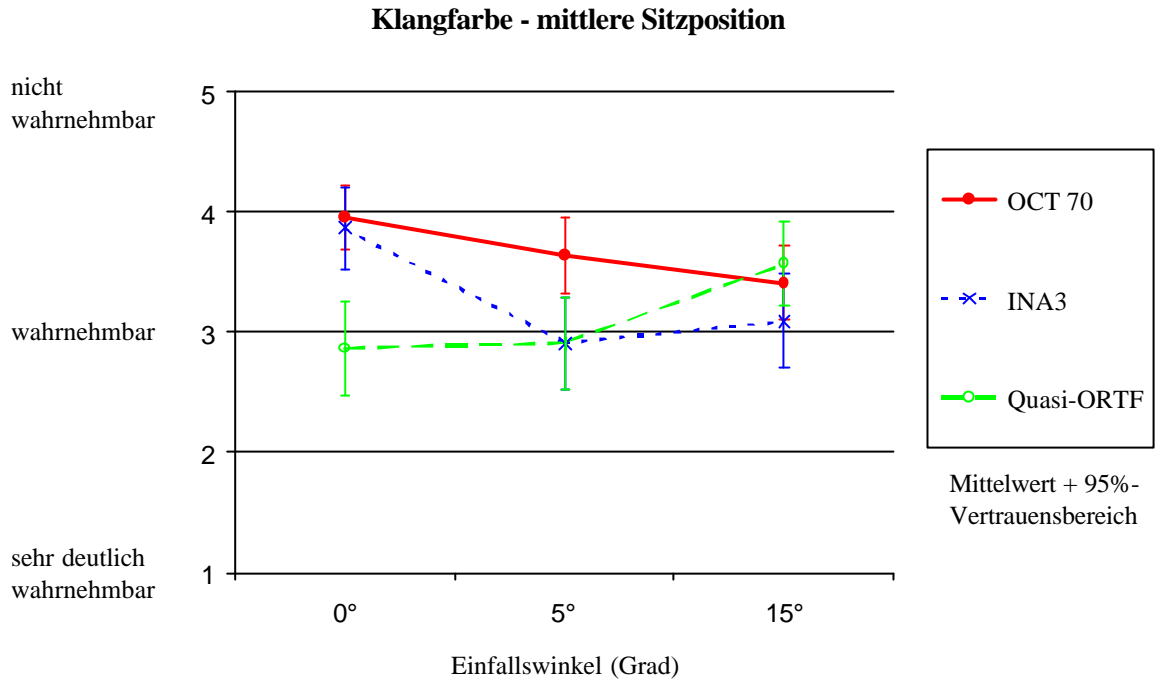


Abbildung 8.1.: Ergebnisse Hörversuch, Teil 3: Klangfarbe, mittlere Sitzposition

8.3.2. Klangfarbe – seitliche Sitzposition

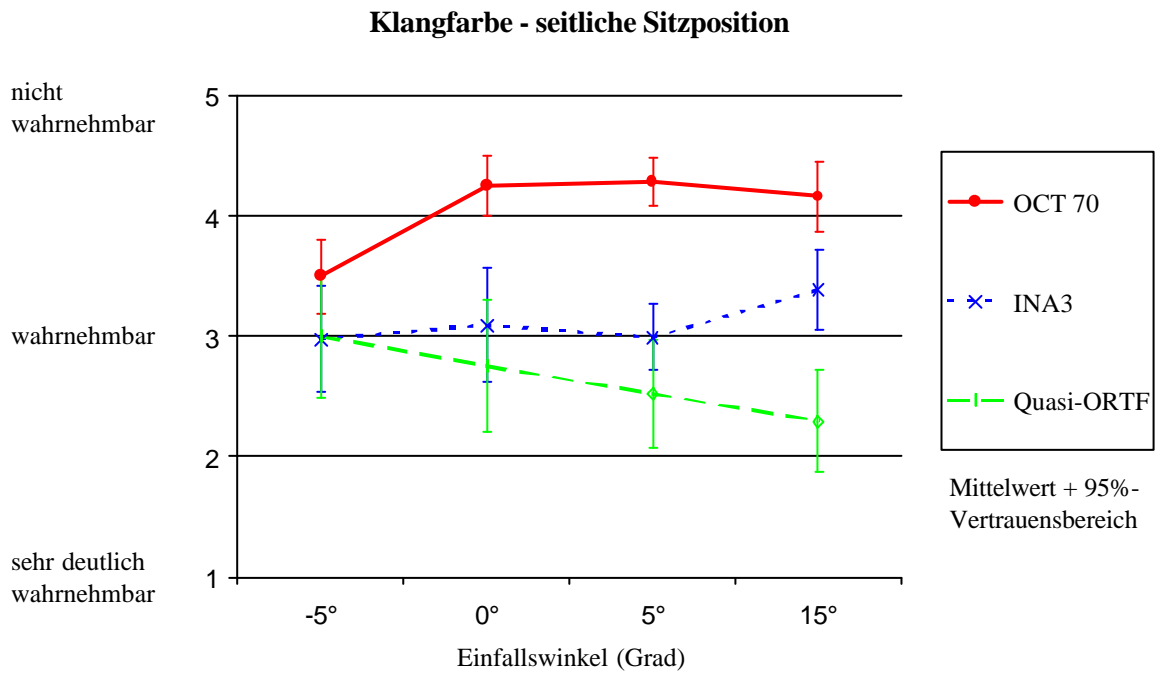


Abbildung 8.1.: Ergebnisse Hörversuch, Teil 3: Klangfarbe, mittlere Sitzposition

8.4. Interpretation der Ergebnisse

Mittlere Sitzposition (Abbildung 8.1.):

Die Beurteilungen des Unterschieds der Klangfarbe der Phantom- zu Realschallquelle zeigen einen Zusammenhang zur Art der Entstehung der Phantomschallquelle.

Den geringsten Unterschied zur Referenz zeigen die beiden dreikanaligen Anordnungen beim Signal 0°. Diese Ähnlichkeit zum einzelnen Lautsprecher als Referenz wird geringer, wenn die Signale durch größere Einfallswinkel entstehen:

- OCT weist eine leichte, konstante Entwicklung zu deutlicher wahrnehmbaren Unterschieden auf
- INA3 zeigt bereits beim Signal 5°, das ebenfalls in der Mitte abgebildet wird, wahrnehmbare Unterschiede auf.

Diese unterschiedlichen Kurvenverläufe zeigen die abweichenden Entstehungsarten der verschiedenen Phantomschallquellen.

Zum Verständnis der unterschiedlichen Bewertung beim Signal 5° ist ein Blick auf die vorhandenen Signaldifferenzen notwendig:

Anordnung	Einfallswinkel	DL	Dt
OCT	5°	$\Delta L (C/L) = 9,1 \text{ dB.}$	$\Delta t (C/L) = -0,20 \text{ ms.}$
		$\Delta L (C/R) = 12,4 \text{ dB.}$	$\Delta t (C/R) = -0,39 \text{ ms.}$
INA3	5°	$\Delta L (C/L) = 4,7 \text{ dB.}$	$\Delta t (C/L) = -0,79 \text{ ms.}$
		$\Delta L (C/R) = 6,5 \text{ dB.}$	$\Delta t (C/R) = -1,04 \text{ ms.}$

Tabelle 8.3.: Signaldifferenzen für Einfallswinkel 5°

OCT erzielt die Auslenkung hauptsächlich durch deutliche Pegeldifferenzen zwischen L und C von 9,1 dB, während INA3 hauptsächlich Laufzeitdifferenzen bei weniger großen Pegelunterschieden benutzt.

Außerdem ist auch der Pegel des dritten Lautsprechers R entscheidend: Dieser Pegel liegt bei OCT um 12,4 dB unter dem des Centers, bei INA3 sind es nur 6,5 dB.

Somit ist die INA3-Anordnung diejenige, die deutlich mehr durch Überlagerungen verschiedener Lautsprechersignale geprägt ist.

Die negativen Einflüsse des Übersprechens bei INA3 machen sich somit auch aus der mittleren Sitzposition bemerkbar.

Aus den Ergebnissen von Vorversuch 2A (→ Kap.2.4.2.) wird klar:

Es gibt Punkte, an denen sich bei dreikanaligen Anordnungen mit kleineren Öffnungswinkeln Klangverfärbungen zeigen. Die Zweikanal-Anordnung Quasi-ORTF wird beim Signal 15° als die klangneutralste beurteilt.

Quasi-ORTF zeigt allerdings mit der reinen Phantomschallquelle des Signals 0° die deutlichsten Unterschiede zur Referenz auf.

Dieser Umstand ist auch aus Untersuchungen am IRT ersichtlich, die mit unterschiedlichen Signalen Phantom- und Realschallquellen vergleichen [Silzle 1990].

Der Unterschied wird mit steigender Auslenkung durch steigende Pegeldifferenzen geringer.

Seitliche Sitzposition (Abbildung 8.2.):

Wiederum zeigen sich die deutlichsten Unterschiede erst bei einer Sitzposition, die von der optimalen abweicht:

Die durch Überlagerung mehrerer Signale entstehenden Klangverfärbungen sind deutlich nachweisbar:

- OCT hat nur auf der dem Hörer zugewandten Seite (Signal -5°) eine relevante Beteiligung von mehr als einem Lautsprecher → nur hier wird die Wahrnehmbarkeit von Klangverfärbungen größer.
- INA3 zeigt bei den Signalen -5° , 0° , 5° deutlich die Beteiligung aller drei Lautsprecher an der Phantomschallquellenbildung → hier werden überall wahrnehmbare Klangverfärbungen bemerkt. Der Pegel des dritten Lautsprechers wird erst beim Signal 15° weniger relevant → der Unterschied zur Referenz wird geringer.
- die Quasi-ORTF-Signale zeigen umso schlechtere Bewertungen, je höher der Pegel des abgewandten Lautsprechers wird, also je geringer die Dominanz eines (des nahen) Lautsprechers wird. Erst dann entsteht die Phantomschallquelle durch Überlagerung zweier Signale und weist Klangverfärbungen auf.

9. Anhang

9.1. Vorversuch 1: Ermittlung der Auslenkung durch Laufzeitdifferenzen

9.2. Begriffsklärungen

9.3. Formelzeichen

9.4. Meßdaten der Testsignale für den Hörversuch

9.1. Vorversuch 1

Ziel dieses Vorversuchs war die Ermittlung der zur Auslenkung einer Phantomschallquelle nötigen Laufzeitdifferenz Δt .

Es wurden sowohl die Zweikanalbasis L-R als auch die Mehrkanalbasis L-C untersucht.

9.1.1. Versuchsvorbereitungen

Der Vorversuch fand unter denselben Bedingungen wie Hauptversuch Teil 1 (siehe Kapitel 6) statt.

Testsignal war weibliche Sprache, EBU-Test-CD SQAM [EBU 1988].

9.1.2. Versuchsdurchführung

Es fanden jeweils 2 Durchläufe mit 3 geübten Versuchspersonen statt.

Auf einer vor den Lautsprechern L-C angebrachten Skala waren die Zahlen 0 bis 7 notiert. Durch die Umrechnung in die dazugehörigen Winkelwerte in Grad konnte die Auslenkung der wahrgenommenen Phantomschallquelle ermittelt werden.

9.1.3. Versuchsauswertung

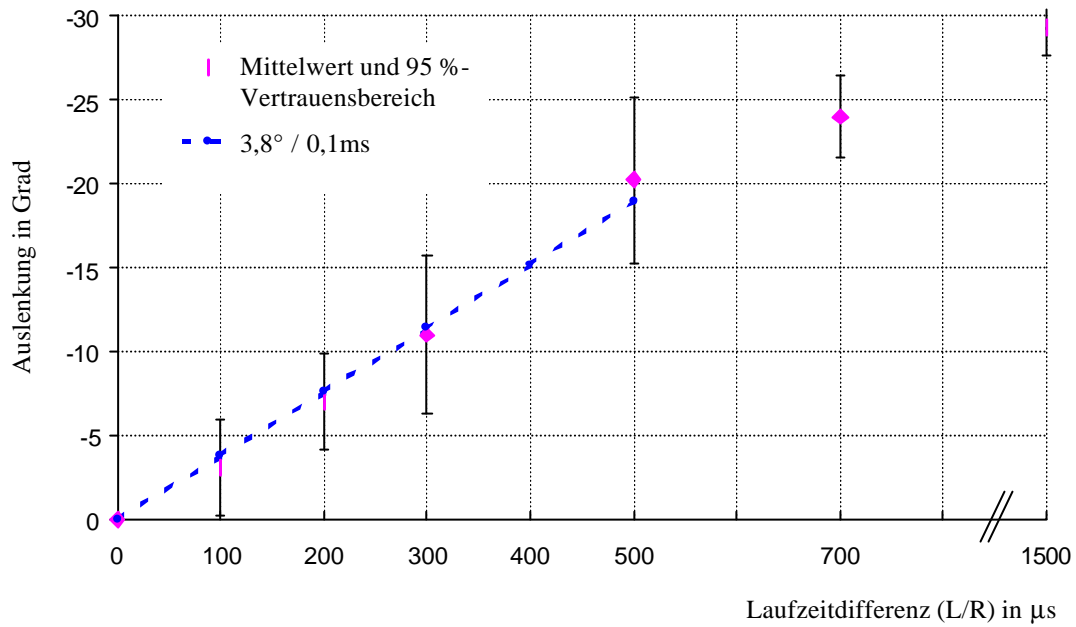
Folgende statistische Größen wurden errechnet:

- Mittelwert
- 95%-Vertrauensbereich des Mittelwerts

9.1.4. Darstellung der Versuchsergebnisse

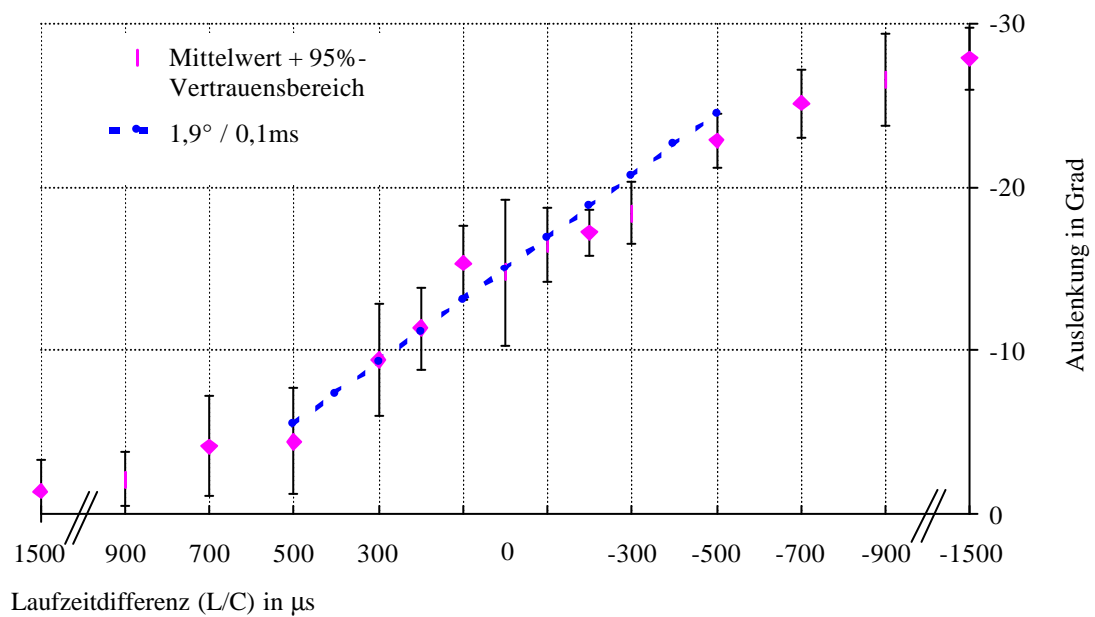
9.1.4.1. Basis L/R: Abbildung 9.1.

L - R : Auslenkung durch Laufzeitdifferenz



9.1.4.2. Basis L/C: Abbildung 9.2.

L - C : Auslenkung durch Laufzeitdifferenz



9.1.5. Interpretation der Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse (Abbildungen 9.1. und 9.2.) geben Anlaß zur Anerkennung der Glaubwürdigkeit des angegebenen Zusammenhangs $3,8^\circ / 0,1 \text{ ms}$ bzw. $1,9^\circ / 0,1 \text{ ms}$ im linearen Bereich bis zu 50% Auslenkung und zeigen darüberhinaus eine nichtlineare Beziehung.

Ob dieser Zusammenhang innerhalb der kleinen Basis L-C aufrechtzuerhalten ist, kann aufgrund des Charakters dieses Versuchs als Vorversuch mit nur 8 Meßwerten pro Signal nicht signifikant bestätigt werden.

Zur Berechnung der rechnerischen Lokalisationskurve wird angenommen, daß der Zusammenhang für beide Basisgrößen gilt. Mit einer abschnittsweise definierten Näherungsfunktion wird der Verlauf der Meßdaten in mathematischer Form ausgedrückt.

Große Streuungen ergeben sich sowohl aus der geringen Teilnehmerzahl des Vorversuch als auch möglicherweise aus der angenommenen Urteilsunsicherheit bei laufzeitbasierten Phantomschallquellen ([Martin et al. 1999]) und →Kap.2.3.3.).

9.2. Begriffsklärungen

Um Mißverständnisse zu vermeiden, sind im folgenden einige in dieser Arbeit verwendete Fachbegriffe und Normen erläutert und definiert. Nicht hier genannte Begriffe sind zum Teil Inhalt eines Abschnitts dieser Arbeit und werden dort erläutert.

- a. Abbildungsschärfe
- b. Aufnahmebereich, Aufnahmewinkel
- c. Auslenkung
- d. Hauptachsenwinkel, Versatzwinkel
- e. Öffnungswinkel einer Lautsprecherbasis
- f. Signaldifferenz(-en)
- g. Stereo(-fonie), Standard-Stereo, Zweikanaltechnik, 3/2-Stereo, 5.1-Surround
- h. „sweet spot“, „sweet area“, Optimale Hörposition

a. Abbildungsschärfe

Die Abbildungsschärfe bezeichnet die einer Abbildung zwischen Lautsprechern zugeordnete Lokalisationsschärfe. Somit wird das Maximum an Abbildungsschärfe durch Wiedergabe in einem einzelnen Lautsprecher erreicht. Die Abbildungsschärfe bezeichnet die Präzision, mit der eine Phantomschallquelle lokalisiert werden kann. (→ Kap.2.2.2.)

b. Aufnahmebereich, Aufnahmewinkel

Der Aufnahmebereich einer Mikrofonanordnung ist derjenige Bereich von Klangquellen im Aufnahmeraum, der eine Abbildung zwischen den Lautsprechern einer Lautsprecherbasis zur Folge hat.

Er endet dort, wo eine Klangquelle nur noch in einem Lautsprecher abgebildet wird.

Der Aufnahmebereich verläuft bei symmetrischen Mikrofonanordnungen symmetrisch zur Mittelachse der Mikrofonanordnung. Der *gesamte* Winkel zwischen linker und rechter Grenze wird als Aufnahmebereich oder Aufnahmewinkel bezeichnet.

Aus der Lokalisationskurve einer Mikrofonanordnung ist der Aufnahmebereich leicht abzulesen, indem die beiden Einfallswinkel gesucht werden, an denen gerade nur noch

in einem (der äußeren) Lautsprecher Abbildung erzeugt wird. Die Differenz dieser beiden Einfallswinkel entspricht dem Aufnahmebereich.

Aufnahmebereich des ORTF-Mikrofons, abzulesen aus der rechnerischen Lokalisationskurve

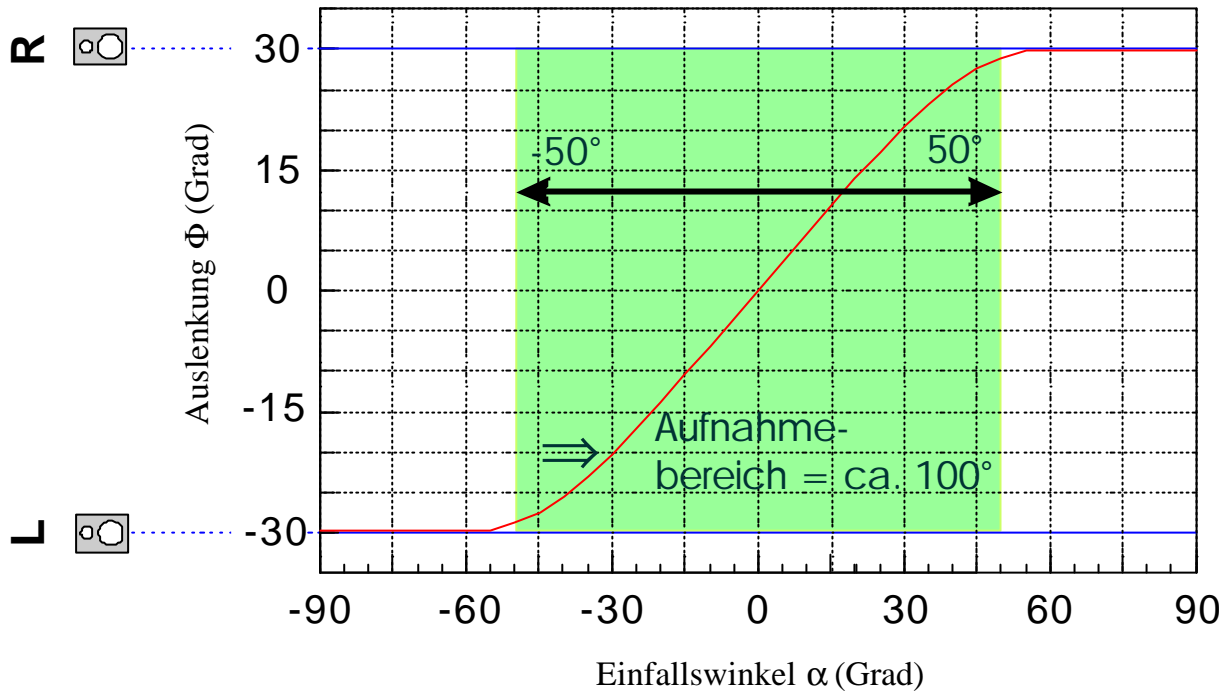


Abbildung 9.3.: Bestimmung des Aufnahmebereichs anhand der Lokalisationskurve, Beispiel: ORTF

c. Auslenkung

Die Auslenkung einer Phantomschallquelle bezeichnet den Winkel, den eine Phantomschallquelle mit der Symmetrieachse zwischen den beiden beteiligten Lautsprechern einschließt. Bei 2/0-Stereoanordnung entsteht die Symmetrieachse genau durch die Schnittgerade aus Median- und Horizontalebene. 0° oder keine Auslenkung bedeutet somit, daß die Phantomschallquelle sich genau in der Median-Ebene befindet. Negative Auslenkung bedeutet, daß sich die Phantomschallquelle vom Hörer aus gesehen links von der Achse befindet, positive Auslenkung ist entsprechend definiert.

Bei 3/2-Stereo-Aufstellung ist in der Praxis zwischen L-C-R die Auslenkung so definiert, daß sie der Auslenkung zwischen L-R entspricht, also 0° Auslenkung entspricht der Abbildung im Center-Lautsprecher.

Die Auslenkung kann auf zwei unterschiedlichen Arten angegeben werden:

- relative Auslenkung ϕ : prozentuale Auslenkung bezogen auf den halben Öffnungswinkel $\Omega/2$, unabhängig vom Öffnungswinkel der Lautsprecherbasis

- absolute Auslenkung Φ : abhängig vom Öffnungswinkel, gemessen in Grad, bezogen auf Mittelachse zwischen den Lautsprechern, bzw. durch Center-Lautsprecher

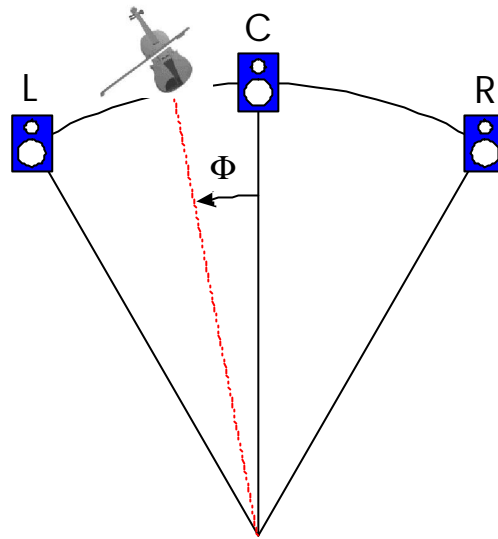


Abbildung 9.4.: Definition der Auslenkung bei 3/2-Stereo-Anordnung, hier: negative Auslenkung \mathbf{F}

d. Hauptachsenwinkel, Versatzwinkel

Als Hauptachsenwinkel wird derjenige Winkel bezeichnet, den die Hauptachse des Mikrofons mit der Mittelachse der Mikrofonanordnung einschließt. Zeigt ein Mikrofon von der Achse gesehen nach links, wird der Winkel negativ gerechnet, zeigt es nach rechts, positiv.

Bei symmetrischen Anordnungen wird der Winkel bis zur Symmetrieachse zwischen den beiden (äußeren) Mikrofonen der Anordnung gerechnet. Er liegt dann bei beiden (äußeren) Mikrofonen mit unterschiedlichem Vorzeichen vor.

Der Versatzwinkel bezeichnet den Winkel zwischen den beiden Mikrofonen und stellt somit bei symmetrischer Anordnung das Doppelte des Hauptachsenwinkels dar.

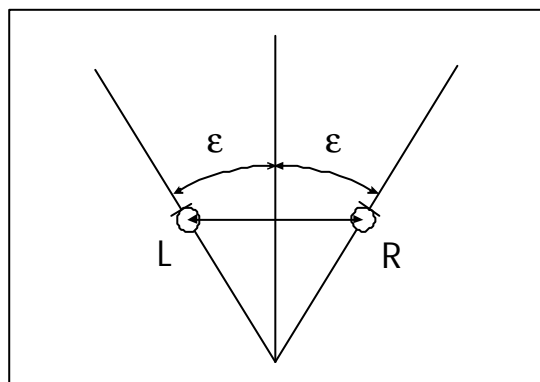


Abbildung 9.5.: Definition des Hauptachsenwinkels \mathbf{e} einer Mikrofonanordnung

e. Öffnungswinkel einer Lautsprecherbasis

Als Öffnungswinkel einer Lautsprecherbasis wird derjenige Winkel bezeichnet, den die beiden Lautsprecher mit dem Hörer einschließen. Bei Zweikanal-Aufstellung nach dem 2/0-Stereo-Standard beträgt der Öffnungswinkel 60° , bei 3/2-Stereo-Aufstellung entstehen fünf Lautsprecherbasen mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln:

L-C, C-R: 30°

L-LS, R-RS: 80°

LS-RS: 140°

Der Öffnungswinkel sowie die Richtung der Mittelachse sind entscheidend für verschiedene Parameter einer Abbildung, wie Lokalisationskurve, Stabilität, Klangfarbe und Elevation einer Phantomschallquelle.

In dieser Arbeit wird der Öffnungswinkel mit Ω bezeichnet.

f. Signaldifferenz(-en)

Der Begriff gilt als Überbegriff über die beiden für die Auslenkung einer Phantomschallquelle verantwortlichen Parameter Laufzeit- und Pegeldifferenz der Lautsprechersignale.

g. Stereo(-fonie), Standard-Stereo, Zweikanaltechnik, 3/2-Stereo, 5.1-Surround

Mit Stereo(-fonie) wird in der Tontechnik das Verfahren bezeichnet, eine räumlich ausgedehnte Abbildung von Klangquellen zu erzeugen.

Somit bezeichnet Stereo sowohl die Zweikanaltechnik als auch die Mehrkanaltechnik.

Im Sprachgebrauch ist allerdings das Wort Stereo als Bezeichnung für die Zweikanaltechnik geläufig, so daß dies zu Mißverständnissen führen kann. Zur besseren Unterscheidung wird im folgenden von Zweikanaltechnik und Mehrkanaltechnik bzw. speziell 3/2-Stereo die Rede sein.

Mit Zweikanaltechnik, -anordnung oder -aufstellung, bzw. 2/0-Stereo ist dabei die Aufstellung der beiden Lautsprecher im Stereo-Dreieck gemeint, mit 3/2-Stereo die genormte Aufstellung nach ITU-R 775-1[ITU 1992] bzw. SSF-001[SSF 1998].

5.1-Surround (SSF-Empfehlung 002[SSF 1998]) bezeichnet eine Norm für den Programmaustausch, bestehend aus den drei vorderen Kanälen L, C und R, den Surround-Kanälen LS und RS, sowie dem LFE-Kanal, der zur Erzeugung zusätzlicher Effekte bei tiefen Frequenzen vorgesehen ist.

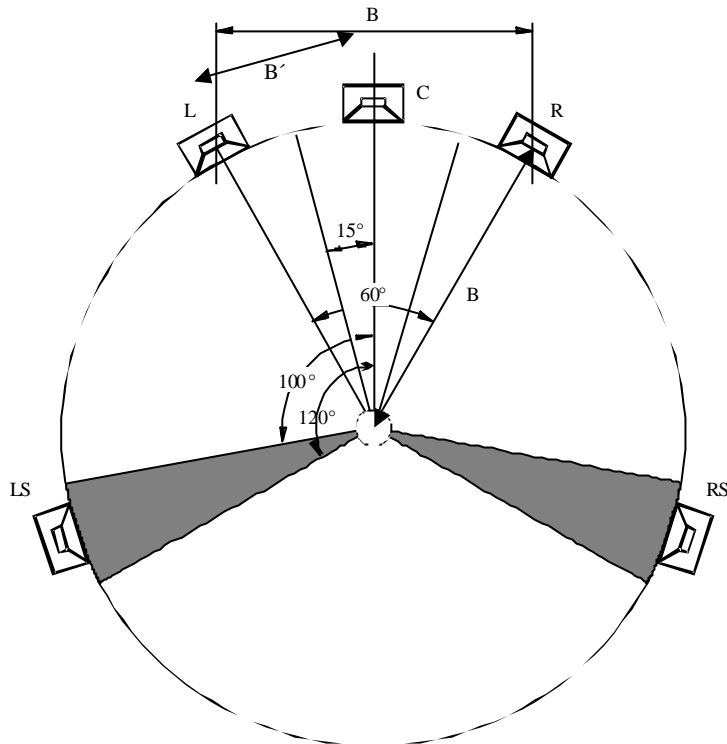


Abbildung 9.6.: 3/2-Stereo-Standard nach SSF-Empfehlung-001[SSF 1998]

„Sweet spot“, optimale Hörposition

Die Bezeichnung „Sweet spot“ steht für eine räumlich begrenzte Zone, in der optimale Eigenschaften einer Aufnahme, wiedergegeben durch eine 3/2-Stereo-Aufstellung vorliegen.

Die optimale Hörposition, die durch [SSF 1998] definiert ist, liegt in dieser Zone. Die Größe der Zone hängt von der Art der Entstehung der Aufnahme ab.

Manchmal wird eine gelungene Vergrößerung dieser Zone als „sweet area“ bezeichnet.

Die im 3/2-Stereo-Standard festgelegte optimale Abhörzone entspricht NICHT dieser Zone. Hier wurde willkürlich eine Abweichung von 80cm vom optimalen Hörort als wünschenswerte Abhörzone festgelegt.

9.3. Formelzeichen

Einige der in dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen werden hier aufgeführt.

Mangels einheitlicher und passender Normen in den bisherigen Veröffentlichungen zum Thema werden einige Zeichen neu für diese Arbeit definiert:

B	Größe einer Lautsprecherbasis = Abstand der beiden Lautsprecher
α	Einfallswinkel des Signals im Aufnahmeraum, senkrechter Schalleinfall $\rightarrow \alpha=0^\circ$
ε	(epsilon) Hauptachsenwinkel der Mikrofonanordnung, siehe Definition in Kap. 9.2.
ϕ	(klein-fi) Relativer Grad der Auslenkung einer Phantomschallquelle, 0 bis 100%
Φ	(gross-fi) absolute Auslenkung einer Phantomschallquelle, - $(\Omega/2)^\circ$ bis $(\Omega/2)^\circ$
Ω	(omega) Öffnungswinkel einer Lautsprecherbasis
r, R	Radius = Abstand der Signalquelle zum Basispunkt (Mittelpunkt der Basis L-R) einer Mikrofonanordnung

Tabelle 9.1.: in dieser Arbeit verwendete Formelzeichen

9.4. Meßdaten der Testsignale für den Hörversuch

9.4. Meßdaten der Testsignale für den Hörversuch													
Einfallswinkel (Grad)	Dt(L/C)		Dt(R/C)		Dt(L/R)		L(L)	L(C)	L(R)	DL(L/C)	DL(C/R)	DL(L/R)	
	Smpl.	ms	Smpl.	ms	Smpl.	ms	dBA	dBA	dBA	dB	dB	dB	
INA3	0	-41	-0,93	-41	-0,93	0	0,00	96,7	102,1	96,7	-5,4	5,4	0
	-5	-35	-0,79	-46	-1,04	-11	-0,25	97,3	102	95,5	-4,7	6,5	1,8
	-15	-22	-0,50	-56	-1,27	-34	-0,77	98,5	101,7	94,3	-3,2	7,4	4,2
	-30	-1	-0,02	-64	-1,45	-63	-1,43	100	100,8	91,7	-0,8	9,1	8,3
	-45	20	0,45	-73	-1,66	-93	-2,11	101	99,5	88,5	1,5	11	12,5
	-60	39	0,88	-80	-1,81	-119	-2,70	101,7	97,7	84,9	4	12,8	16,8
OCT70	0	-13	-0,29	-13	-0,29	0	0,00	89,9	100,5	89,9	-10,6	10,6	0
	-5	-9	-0,20	-17	-0,39	-8	-0,18	91,4	100,5	88,1	-9,1	12,4	3,3
	-15	-1	-0,02	-24	-0,54	-23	-0,52	93,9	100,3	82,6	-6,4	17,7	11,3
	-30	12	0,27	-35	-0,79	-47	-1,07	96,8	99,8	79,2	-3	20,6	17,6
	-45	25	0,57	-39	-0,88	-64	-1,45	99,1	98,9	85,8	0,2	13,1	13,3
	-60	34	0,77	-45	-1,02	-79	-1,79	100,6	97,6	89	3	8,6	11,6
ORTF	0					0	0,00	102,2		102,2			0
	-5					-2	-0,05	102,6		101,9			0,7
	-15					-7	-0,16	103,3		101,6			1,7
	-30					-14	-0,32	103,5		100,1			3,4
	-45					-19	-0,43	103,5		98,3			5,2
	-60					-23	-0,52	103,1		96			7,1
OCT50	-30	6	0,14	-28	-0,63	-34	-0,77	99,2	102,1	80,7	-2,9	21,4	18,5
	-45	14	0,32	-31	-0,70	-45	-1,02	101,3	101,2	87,4	0,1	13,8	13,9

Die Signale R der Anordnungen OCT 70 und OCT50 bei den Einfallswinkeln -30, -45, -60 sind in ihrer Phase gedreht!

Zusammenfassung

- Der **Center-Kanal** kann Vorteile im Hinblick auf Stabilität, Klangfarbe und Lokalisationsschärfe bieten, er kann aber auch negative Auswirkungen durch die Entstehung „dreikanaliger Klangbilder“ haben.
- Der Abbildungsverlauf eines zwei- oder dreikanaligen Mikrofons ist weitgehend **voraussagbar**.

Näheres zu diesen beiden Hauptaussagen dieser Diplomarbeit:

Das **Signal des Center-Kanals** kann gegenüber der durch die beiden äußeren Lautsprecher erzeugten Phantomschallquelle einen Gewinn an Lokalisationsschärfe, originalgetreuer Wiedergabe der Klangfarbe und Stabilität bieten.

Dies wurde neben einem Vorversuch (Vorversuch 2, Kap.2.4.) gezeigt, indem zwei dreikanalige, sog. L-C-R-Hauptmikrofone mit einem Zweikanalmikrofon im Hörversuch verglichen wurden (Kap. 5, 6, 7, 8). Das zweikanalige Äquivalenzmikrofon zeigt im Gegensatz zu den beiden beteiligten dreikanaligen Mikrofonen OCT und INA3 mehr oder weniger deutliche Beeinträchtigungen im Hinblick auf diese drei Eigenschaften. Auch die zwei L-C-R-Hauptmikrofone unterscheiden sich wiederum deutlich in dieser Hinsicht.

Einen entscheidenden Gewinn erzielt man nur durch die geeignete Konfiguration der Mikrofonanordnung nach einer allgemein formulierten Regel:

Vermeidung von „dreikanaligen Klangbildern“.

Ein „dreikanaliges Klangbild“ entsteht, wenn alle drei vorderen Lautsprecher in erheblichem Maße an der Bildung der Phantomschallquelle beteiligt sind. Die Größenordnung dieses „erheblichen Maßes“ kann mit Vorversuch 3 (Kap.2.4.4) abgeschätzt werden.

Die Übertragung eines Signals auf allen drei Kanälen entsteht bei L-C-R-Hauptmikrofonen durch mangelndes Vermeiden von *Übersprechen*, das heißt, wenn im Gegensatz zur prinzipiellen Abbildung jeweils nur zwischen zwei benachbarten Lautsprechern auch der dritte Kanal erheblichen Pegel aufweist. Die Ursache für die Entstehung von Übersprechen stellt die hauptsächlichliche Verwendung von Laufzeitdifferenzen zur Auslenkung von Phantomschallquellen dar.

Ein dreikanaliges Klangbild kann auch entstehen, wenn sich der Hörer einem der Lautsprecher nähert, also die optimale Hörposition verläßt. Dadurch werden Pegel und Zeitverhältnis dieses Lautsprechers schon bei kleinen Bewegungen aus dem „sweet spot“ erheblich verändert. (Kap.2.3.5.)

Die Wirkung dieses „dreikanaligen Klangbilds“ kann im Vergleich zweier Mikrofonsysteme abgeleitet werden (Hörversuch Teil 1, 2, 3), die das ungünstige Übersprechen mehr oder weniger vermeiden. Das OCT-System wurde im Gegensatz zum INA3-System in Bezug auf das Auftreten von Übersprechen optimiert. (Kap.4.4.2.)

Das hat folgende Konsequenzen:

- Die durch die dreikanaligen Mikrofone im Gegensatz zum Zweikanalmikrofon gewonnene **Stabilität** an nicht-optimalen Sitzpositionen leidet erheblich durch das Vermeiden von Übersprechen: INA3 zeigt im Gegensatz zum OCT-System deutlich zum Hörer hingezogene Lokalisationskurven. (Kap.6.3.2.)
- Der Gewinn des Center-Kanals im Hinblick auf die Vergrößerung der **Lokalisationsschärfe** vor allem an nicht-optimalen Hörpositionen ist nur beim OCT-System erheblich. (Kap.7.3.)
- Die Beeinträchtigung der **Klangfarbe** vor allem an nicht-optimalen Hörpositionen kann wesentlich nur durch das OCT-System verhindert werden. (Kap.8.3.)

Der **Verlauf der Abbildung** zwischen den Lautsprechern auch am optimalen Hörort stellt einen weiteren Punkt dar, in dem das OCT-System aufgrund der speziellen Konfiguration Vorteile aufweist: Das dem Stereo-Äquivalenzmikrofon eigene Ideal einer maßstabsgetreuen Abbildung wird nur vom OCT-System annähernd erreicht. (Kap.6.3.1.)

Die **Voraussage der Abbildung** zwei- oder dreikanaliger Hauptmikrofone stützt sich auf die Verwendung der Gesetze zur Auslenkung einer Phantomschallquelle. Diese wurden auf ihre Gültigkeit überprüft, bzw. im Vorversuch ermittelt. Dabei wird davon ausgegangen, daß Gesetze für die Zweikanalbasis L-R auch bei der Abbildung zwischen den kleineren Basen L-C und C-R ihre Gültigkeit behalten. (Kap. 2.3.)

Im Rahmen dieser Arbeit werden diese Voraussagen nicht vollständig auf ihre Gültigkeit überprüft, die Ergebnisse aus Kap.6.3. machen es jedoch wahrscheinlich, im

Zweikanalbereich von einer sehr guten, im Dreikanalbereich von einer guten Näherung auszugehen.

Die Verwendung der rechnerischen Lokalisationskurven macht es möglich, beliebige Mikrofonkonfigurationen auf ihre Abbildung zu überprüfen. So ist es leicht machbar, jedem beliebigen Aufnahmewinkel entsprechende Mikrofonkonfigurationen zuzuordnen. Aus den Anteilen von Pegel- und Laufzeitdifferenzen an der Auslenkung der Phantomschallquellen ist es ferner möglich, bestimmte Eigenschaften der Abbildung abzulesen.

Eine große Hilfe für die Ermittlung der Abbildungseigenschaften verschiedener Mikrofone innerhalb dieser Diplomarbeit war die Entwicklung eines JAVA-Applets, das unter dem Namen „*Image Assistant*“ eine im Internet bedienbare grafische Oberfläche für die Darstellung der Lokalisationskurven beliebiger Mikrofonkonfigurationen darstellt (www.hauptmikrofon.de).

Diese Arbeit kann eine Hilfe für einen Tonmeister bei der Wahl seines Mikrofonsystems darstellen, sie beleuchtet aber nur einen winzigen Bereich der Parameter, die für eine solche Entscheidung beachtet werden müssen.

Literaturverzeichnis

1. Blauert, Jens: *Räumliches Hören*, Hirzel Verlag, Stuttgart 1974
2. Bortz, Jürgen: *Lehrbuch der Statistik*, Springer-Verlag, Berlin, 1977
3. Bruck, Jerry: *Die Lösung des Surround-Dilemmas*, in Bericht zur 19. Tonmeistertagung 1996, Saur, 1996, S. 117 ff.
4. EBU, Tech.3253-E: *Sound quality assessment material recordings for subjective tests*. Genf, 1988
5. Gernemann, Andreas: *Mikrofonanordnungen für drei Front-Kanäle – eine systematische Betrachtung*, in Bericht zur 20. Tonmeistertagung 1998, Saur, 1999, S. 518-542
6. Gerzon, Michael: *Panpot Laws for Multispeaker Stereo*, AES-Preprint No.3309, 1992, 1
7. Gerzon, Michael: *General Metatheory of Auditory Localisation*, AES-Preprint No.3306, 1992, 2
8. Griesinger, David: Informationen auf der Website:
<http://www.world.std.com/%7Egriesngr/>, Mai 2000, 1
9. Griesinger, David: *Physik, Psychoakustik und Surround-Technik*, aus Production Partner Spezial 21. Tonmeistertagung, Musik-Media-Verlag Ulm, 2000, 2
10. Herrmann, Ulf/ Henkels, Volker: *Vergleich von 5 verschiedenen Hauptmikrofonverfahren* in Bericht zur 20. Tonmeistertagung 1998, Saur, 1999, S. 508-517
11. ITU-Recommendation: ITU-R BS.775-1: *Multichannel stereophonic system with and without accompanying picture*. Genf, 1992.
12. ITU-Recommendation: ITU-R BS.562-3: *Subjective Assessment of Sound Quality*, Genf, 1990
13. Martin, Woszczyk, Corey, Quesnel - McGillUniversity: *Sound Source Localization in a Five-Channel Surround Sound Reproduction System*, AES-Preprint No.4994, 1999
14. Rebscher, Roland: *Untersuchungen zur Verbreiterung der Hörzone durch Erhöhung der Lautsprecheranzahl innerhalb der Stereo-Wiedergabebasis*, Diplomarbeit IRT/Fachhochschule Düsseldorf, 1989, auch als AES-Preprint erhältlich

15. v. Ripka, Adrian: *Die Beurteilung verschiedener Wiedergabeeinrichtungen bezüglich der Abbildungsschärfe*, aus Fortschritte der Akustik, 13.Tagung der DAGA, DPG-GmbH, Aachen, 1987
16. Sachs, Lothar: *Angewandte Statistik*, Springer-Verlag, Berlin, 1973
17. Schoeps: Meßprotokolle der Mikrofontypen CCM 4 und CCM 41V, private Mitteilungen Jörg Wuttke, 2000
18. Sengpiel, Eberhard: *Forum der Mikrofon-Aufnahmetechnik und Tonstudioteknik* auf www.sengpielaudio.co.uk, November 2000
19. Silzle, Theile: HDTV-Mehrkanalton: Untersuchungen zur Abbildungsqualität beim Einsatz zusätzlicher Mittenlautsprecher, in Bericht zur 16. Tonmeistertagung 1990, Saur, 1990, S. 208 ff.
20. Surround-Sound-Forum (SSF): Empfehlung SSF-001 und -002, Surround-Sound-Forum des VDT, 1998
21. Theile, Plenge: *Localization of lateral phantom-sources*, AES-Preprint B-5, 1976
22. Theile, Günther: *Über die Lokalisation im überlagerten Schallfeld*, Dissertation, TU Berlin, 1980
23. Theile, Günther: *Neuere Erkenntnisse zur Wahrnehmung der Richtung und Entfernung von Phantomschallquellen und Konsequenzen für die stereofone Aufnahmepraxis*, in VDT-Informationen Januar/Februar 1989
24. Theile, Günther: *Multichannel Natural Recording*, AES-Preprint No.5156, 2000
25. Williams, Michael: *Unified theory of microphone systems for stereophonic sound recording*. AES-Preprint No.2466, 1987
26. Williams, Michael: *Multichannel Microphone Array Design*. AES-Preprint No.5157, 2000
27. Wittek, Helmut: „Image Assistant“ auf www.hauptmikrofon.de, November 2000
28. Wöhr, Goeres, Pösselt, Theile: *Raumbezogene Stütztechnik – eine Möglichkeit zur Optimierung der Aufnahmequalität*, in Bericht zur 15. Tonmeistertagung 1988, Saur, S. 302 ff, 1988
29. Wuttke, Jörg: *Mikrofonaufsätze*, Schalltechnik Dr.-Ing.Schoeps GmbH, Karlsruhe, 2000

Danksagung

Ich bin sehr froh, daß ich die einmalige Chance hatte, eine Diplomarbeit in meiner Lieblingsthematik, nach meinen Vorstellungen und in meinem eigenen zeitlichen Rahmen durchzuführen.

Ich will mich deshalb herzlichst bei Dr.Ing. Günther Theile bedanken, der mir in unendlichem Vertrauen die Möglichkeit gab, die Untersuchung seiner Ideen durchzuführen und mir dabei stets mehr als hilfreich und kompetent zur Seite stand.

Außerdem geht mein besonderer Dank an Prof.Dr. Braun, der mir damit wesentlich half, daß für ihn Qualität mehr zählt als Bürokratie.

Für die scheinbar selbstverständliche geistige und materielle Hilfe möchte ich mich sehr bei Herrn Dipl.Ing. Jörg Wuttke, technischer Direktor der Firma Dr.-Ing. Schoeps GmbH bedanken. Ohne diese erhebliche Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Die ganze Abteilung Audiosystemtechnik und weitere Mitarbeiter des IRT unterstützten mich täglich in herzlicher und hilfsbereiter Weise. Vielen Dank an Dipl.Ing. Gerhard Spikofski, Dipl.Ing. Birgit Rathbone, Dipl.Ing. Wolfgang Zieglmaier, Dipl.Ing. Philipp Mackensen, Dipl.Ing. Markus Fruhmann, Michael Wechsel, Dipl.Ing. Sebastian Gossens, Dipl.Ing. Martin Link, Dipl.Ing. Reiner Söcker.

Ohne die aufopfernde Hilfe mir nahestehender Leute wäre das Gelingen dieser Arbeit nicht geglückt. Vielen Dank an meine Mutter und meinen Vater, nicht nur für die wochenlange Hilfe bei der Statistik, vielen Dank an meinen Bruder Dieter für die mathematische Unterstützung und nicht zuletzt ein Danke für die so selbstverständliche Hilfe meiner Freundin Barbara.

Herzlichen Dank auch an alle nicht näher genannten Teilnehmer des Hörversuchs und schließlich meine beiden JAVA-Spezialisten Dipl.Ing. Tobias Rieger und Dipl.Ing. Mark Schenkl.