

Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien

Fakultät Electronic Media

Untersuchung verschiedener Hauptmikrofon-Verfahren für Auro-3D-Anwendungen



vorgelegt von Christian Philipp

an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 21. März 2012

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Dr. Helmut Wittek

Erklärung

Hiermit erkläre ich, meine Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel zur Bearbeitung herangezogen zu haben.

Ich versichere, dass ich bisher keine Prüfungsarbeit mit gleichem oder ähnlichem Thema bei einer Prüfungsbehörde oder einer anderen Hochschule vorgelegt habe.

Ort, Datum

Christian Philipp

Abstract

Diese Bachelorarbeit befasst sich theoretisch sowie auch praktisch mit Hauptmikrofonverfahren für das Wiedergabeformat „Auro-3D“. In der theoretischen Arbeit werden die Grundlagen der Stereophonie dargestellt und anschließend mögliche Aufnahmeverfahren vorgestellt. Die praktische Arbeit umfasst eine Untersuchung anhand eines Hörversuchs.

Vorwort

Diese Bachelorarbeit wäre ohne die Hilfe vieler nicht möglich gewesen. Ich möchte allen Beteiligten meinen großen Dank aussprechen. Allen voran danke ich meinen Betreuern Oliver Curdt und Helmut Wittek die mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen. Ich danke allen beteiligten Musikern des Orchestervereins Stuttgart für die Ermöglichung der Aufnahmen sowie der Firma Schoeps für die Bereitstellung der Mikrofone, der gesamten Aufnahmetechnik und der Logistik.

Zum Schluss möchte ich meinen Eltern für die Unterstützung während meines gesamten Studiums danken.

Inhaltsverzeichnis

ERKLÄRUNG	I
VORWORT	II
INHALTSVERZEICHNIS	III
KAPITEL 1: EINLEITUNG	1
KAPITEL 2: GRUNDLAGEN	5
2.1 LOKALISATION.....	5
2.2 KOPFBEZOGENES KOORDINATENSYSTEM	5
2.3 RICHTUNGSHÖREN.....	7
2.3.1 <i>Richtungshören in der Horizontalebene</i>	7
2.3.2 <i>Richtungshören in der Medianebene (Vertikalebene)</i>	8
2.4 ENTFERNUNGSHÖREN UND DARSTELLUNG DES AUFNAHMERAUMS	9
2.4.1 <i>Entfernungshören</i>	9
2.4.2 <i>Darstellung des Aufnahmeraums</i>	10
2.5 PSYCHOAKUSTIK DER STEREOFONEN ÜBERTRAGUNG (RÄUMLICHES HÖREN BEI LAUTSPRECHERWIEDERGABE).....	16
2.6 STEREOFONE AUFNAHMEVERFAHREN.....	18
2.6.1 <i>Hauptmikrofon</i>	18
2.6.2 <i>Stützmikrofone</i>	21
2.6.3 <i>Lokalisationskurve (Abbildungskurve)</i>	22
2.6.4 <i>Pegeldifferenz-Stereofonie</i>	23
2.6.5 <i>Laufzeit-Stereofonie</i>	28
2.6.6 <i>Äquivalenzverfahren (Gemischte Aufnahmeverfahren)</i>	31
2.8 MEHRKANAL-HÖRANORDNUNG FÜR AURO-3D (9.1)	33
2.7 DOWNMIX VON AURO-3D AUF 5.1	37
KAPITEL 3: PSYCHOAKUSTISCHE ANFORDERUNGEN FÜR MEHRKANALTONAUFNAHMEN MIT HÖHE	38
3.1 ERHEBUNG VON SCHALLQUELLEN UND ABBILDUNG DES FRONTALEN KLANGBILDES.....	39
3.2 SEITLICHE PHANTOMSCHALLQUELLEN	40
3.3 FÜLLEN DER ZWISCHENRÄUME	41
3.4 DIFFUSER SCHALL	43
3.5 MÖGLICHE VERTEILUNG DER SCHALLFELDER	44

3.6 KANALÜBERSPRECHEN.....	45
KAPITEL 4: KONZEPTION NEUER HAUPTMIKROFONE FÜR AURO-3D.....	47
4.1 OMNI-ARRAY (DECCA-TREE + 4).....	47
4.2 OCT9 (OCT-SURROUND + 4)	51
KAPITEL 5: HÖRVERSUCH	59
5.2 ORGANISATION DES HÖRVERSUCHS	59
5.2.1 Aufnahme der Testsignale	59
5.2.2 Akustik des AufnahmeRaums.....	59
5.2.3 Audiotechnik.....	60
5.2.4 Mikrofonierung.....	61
5.3 STIMULI UND BEARBEITUNG DER TESTSIGNALE	63
5.4 DURCHFÜHRUNG DES HÖRVERSUCHS	65
5.4.1 Versuchsablauf.....	65
5.4.2 Versuchspersonen	66
5.4.3 Wiedergabetechnik.....	66
5.4.4 Parameter.....	67
5.5 ERGEBNISSE DES HÖRVERSUCHS.....	69
5.6 DISKUSSION DER ERGEBNISSE	71
5.6.1 Parameter: „Lokalisationsschärfe der Schallquellen“	71
5.6.2 Parameter: „Breite des Ensembles“	71
5.6.3 Parameter: „Entfernung des Ensembles“	71
5.6.4 Parameter: „Tiefe des Ensembles“.....	72
5.6.5 Parameter: „Robustheit“	72
5.6.6 Parameter: „Umhüllung“	72
5.6.7 Parameter: „Raumqualität“	72
5.6.8 Parameter: „Klangfarbe“	73
5.6.9 Zusammenfassung.....	73
KAPITEL 6: FAZIT	75
LITERATURVERZEICHNIS	76
ANHANG.....	79

KAPITEL 1: Einleitung

Seit einigen Jahren ist das Thema 3D¹ in aller Munde. Der 3D-Film beansprucht in diesem Bereich eine Vorreiter-Stellung. Kaum ein Filmanbieter kann in letzten Jahren auf das Bereitstellen von visuellen 3D-Medien verzichten. Doch nach 3D-Bild kommt das Thema 3D-Ton auf.

Im Gegensatz zu der mit Stereoskopie erzeugten Tiefe beim 3D-Bild, wird bei 3D-Ton die dritte Dimension durch Hinzunahme der Höhe erreicht. Diese zusätzliche Raumdimension erweitert bisherige zweidimensionale Systeme um die Möglichkeit, Geräuschen die aus der Höhe kommen, wie Beispielsweise Hubschrauber, auch tatsächlich von oben Abzubilden. Aber auch bei der Aufnahme von Aufführungen aus realen Räumen kann durch die Höhe eine bessere räumlicher Wirkung und Umhüllung erzeugt werden.

Für die Wiedergabe von Ensemble-Musik über entsprechende Wiedergabesysteme werden geeignete und einfach zu bedienende **Hauptmikrofon-Aufnahmeverfahren** benötigt, die eine natürliche Wiedergabe zum Ziel haben. Diese Verfahren müssen jedoch deutlich bessere Resultate bereitstellen als bereits jetzt verfügbare Upmix-Prozessoren (z.B. „Auro-3D upmix processor“ oder „Barco AP20 Audio Processor“)², die in der Lage sind, die Höheninformation aus dem verfügbaren Klangmaterial zu extrahieren.³ (Abb.1)

¹ 3D = dreidimensional

² Barco, 2010, S. 4

³ vgl. Theile und Wittek, 2011a, S.35



Abb.1: Barco AP20 Audio Processor; Ermöglicht das Upmixen auf Auro-3D aus beliebiger Quelle⁴

Im Zuge der Auseinandersetzung mit dem Thema wurde schnell deutlich, dass es kaum Forschungsliteratur bezüglich Hauptmikrofontechniken für das – noch sehr neue und doch sehr vielversprechende – Wiedergabeformat **Auro-3D** gibt.

Angesichts dieser Unzulänglichkeit wird in der hier vorliegenden Arbeit zum Ziel gesetzt, zwei für Auro-3D geeignete Hauptmikrofon-Techniken zu vergleichen und auf Praktikabilität zu untersuchen.

Die Grundregeln der akustischen Wahrnehmung sowie der stereofonen Aufnahme und Wiedergabe sind auch bei 3D-Ton gültig und werden mit einer anschließender Betrachtung des Auro-3D-Wiedergabesystems (9.1) in Kapitel 2 erläutert. Kapitel 3 wird der Mehrkanaltonaufnahme mit Höhe gewidmet. Nach Betrachtung der Anforderungen werden zwei geeignete, jedoch grundsätzlich unterschiedliche Hauptmikrofonanordnungen vorgestellt. Weiterhin wird in Kapitel 4 die Hörversuchsdurchführung beschrieben und anschließend die Ergebnisse präsentiert. Es wird versucht die Unterschiede der Hauptmikrofone zu erfassen und darzustellen.

⁴ Barco, 2010, S. 4

Entwicklung und Geschichte der Mehrkanal-Audiowiedergabe

Am Anfang der Tonaufzeichnung erfolgte die Tonwiedergabe nur mit einem Lautsprecher in **Mono**. Von einer Richtungsdarstellung konnte keine Rede sein, bestenfalls konnte eine Entfernungsdarstellung abgebildet werden. Die Möglichkeit zur Richtungslokalisierung bestand erst in den 60er Jahren mit der Einführung der **Zweikanal-Stereofonie**. Klangereignisse konnten beliebig zwischen den Lautsprecherbasen und sogar in der horizontalen Projektionsebene hinter den Lautsprechern platziert werden. Es entstand ein zweidimensionales Wiedergabeformat mit Breite und Tiefe, der bis heute noch ein Produktionsstandard in der Industrie ist und ständig die Entwicklung von Aufnahmeverfahren angetrieben hat. Ein 4-Kanal-Wiedergabesystem (**Quadrofonie**), das in den 70er Jahren vorgestellt wurde, erweiterte den Wiedergabebereich um den Zuhörer, konnte sich jedoch aus wirtschaftlichen, technischen wie auch aus klanglichen Gründen nicht durchsetzen.⁵

In den 90er Jahren entstand mit dem **5.1-Mehrkanalformat** (3/2) ein Kompromiss, der die Kompatibilität mit Zweikanal- und den Kino-Formaten gewährleistete. Mit „ITU-R BS. 775-1“ wurde eine Empfehlung der „International Telecommunication Union“ verabschiedet, die einen Ansatz für eine entsprechende Lautsprecheranordnung formuliert. Auch die Akzeptanz der Konsumenten, zumindest aus dem Bereich „Heimkino“, hat zugenommen. Durch die Einführung des Center-Kanals und der Surround-Kanäle wurde eine Verbreiterung der Stereohörzone erreicht.⁶

Aber nicht nur aus dem Filmbereich werden Wünsche nach einem Wiedergabeformat laut, das die Unzulänglichkeiten von bereits auf dem Markt etablierten 5.1-Surround-System beseitigt. Für klassische Musikaufnahmen verspricht ein 3D-Wiedergabeformat eine räumliche Abbildung und somit naturgetreuere Rekonstruktion des Klanggeschehens. Besonders die Hinzunahme von Höheninformationen hilft beim Erfassen der Attribute der räumlichen Wahrnehmung. Doch 3D ist nicht nur auf das Abbilden von realistischer Räumlichkeit beschränkt,

⁵ vgl. Dabringhaus, 2000, S. 266-268

⁶ vgl. Theile und Wittek, 2011a, S. 31; vgl. ITU, 1996

auch bietet es für die Tonschaffenden erweiterte Gestaltungsmöglichkeiten, die mit der hinzugekommenen z-Achse einen neuen Grad an Realismus erreichen.

Diese Eigenschaften verspricht das Auro-3D-Mehrkanal-Tonsystem, das vom Wilfried Van Baelen im Jahr 2006 in Paris vorgestellt wurde. Die Höhe wird bei diesem System mit quadrofon angeordneten Lautsprechern erzeugt. Hierauf wird später näher eingegangen.⁷

Weitere Systeme mit Höhenlautsprechern:

- 10.2 System⁸
- 2+2+2 System⁹
- 22.2 System¹⁰
- Dolby Pro Logic IIz¹¹

⁷ vgl. Theile & Wittek, 2011, S. 32

⁸ Birkner, 2002, S. 61-62

⁹ Dabringhaus, 2000

¹⁰ Hamasaki, 2005

¹¹ Dolby Laboratories, 2009

KAPITEL 2: Grundlagen

Zwar ist es möglich, Mikrofone an willkürlichen Orten zu platzieren und ohne fundiertes Wissen einfach etwas aufzunehmen, doch nur selten wird diese Vorgehensweise zum erhofften Resultat führen. Bevor wir uns mit Mehrkanal-Hauptmikrofon-Aufnahmetechniken beschäftigen können, müssen die Grundlagen aus diesem Bereich sorgfältig erarbeitet werden. Im folgenden Kapitel sollen diese Grundlagen kurz beschrieben werden.

2.1 Lokalisation

Als Lokalisation wird das Zuordnungsgesetz zwischen bestimmten Merkmalen eines Schallereignisses und dem Ort des zugehörigen Hörereignisses bezeichnet. Merkmale im diesem Zusammenhang sind z.B. Schallquellenort und Hörereignisrichtung. Anders ausgedrückt ist Lokalisation das Erkennen von Richtung und Entfernung einer Schallquelle durch das menschliche Gehör.¹²

2.2 Kopfbezogenes Koordinatensystem

Für die Beschreibung der Hörereignisrichtung und Schallquellenort hat sich bei Hörversuchen und Hörexperimenten ein sogenanntes kopfbezogenes (Head-Related) Koordinatensystem durchgesetzt. Da die Ohren einen festen Bezug zum Kopf aufweisen ist das System somit auch ein ohrenbezogenes Koordinatensystem. (**Abb.2**)

¹² vgl. Blauert, 1974, S. 30

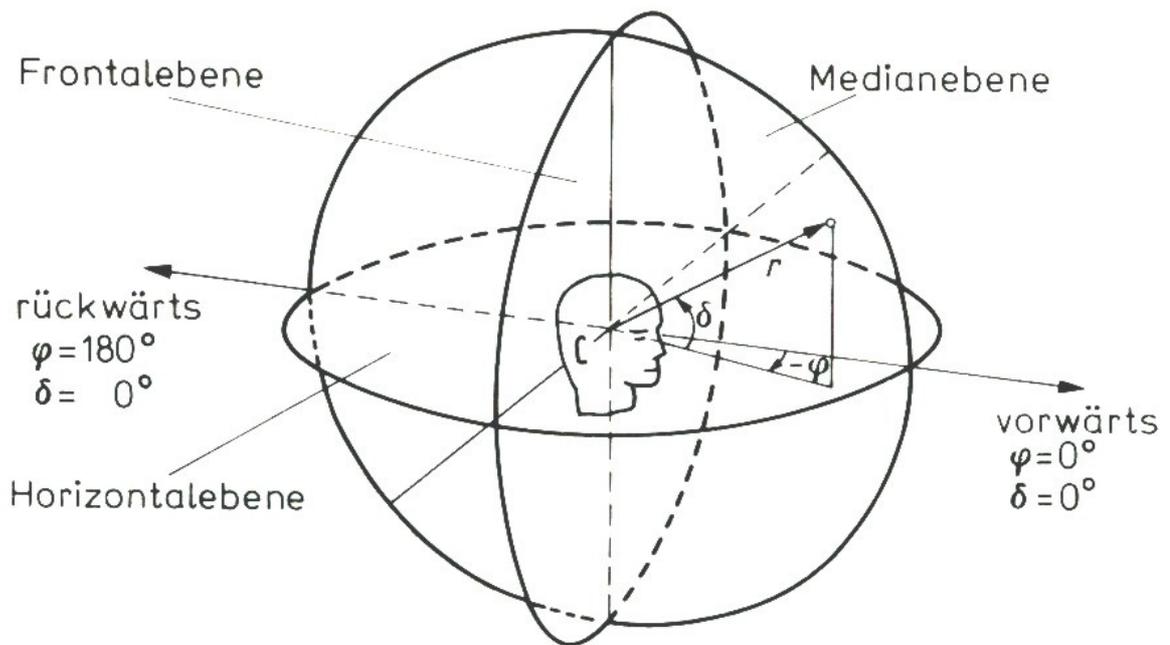


Abb.2: Kopfbezogenes Koordinatensystem; r = Entfernung, φ = Seitenwinkel, δ = Erhebungswinkel.¹³

Eine seitliche Auslenkung in der Horizontalebene wird mit Seitenwinkel φ angegeben. Positionen in der Medianebene – auch Vertikalebene genannt – wird mit Erhebungswinkel δ bezeichnet.¹⁴

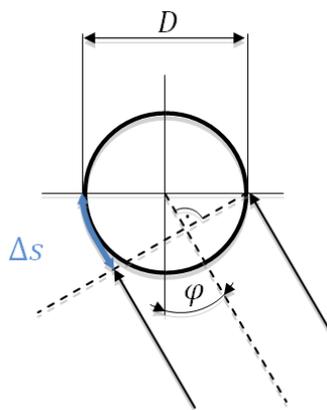
¹³ Blauert, 1974, S. 11

¹⁴ vgl. Blauert, 1974, S. 11

2.3 Richtungshören

2.3.1 Richtungshören in der Horizontalebene

Die Wahrnehmung von Richtungsinformationen aus der Horizontalebene basiert auf interauralen Differenzen. Interaurale Differenzen sind Laufzeit-(ITD), Pegel-(ILD) und Spektralunterschiede zwischen dem linken und rechten Hörorgan, die durch die Geometrie des menschlichen Kopfes und der Ohren verursacht werden. (Abb.3) Laufzeitunterschiede von $10 \mu\text{s}$ können bereits zur Richtungslokalisierung durch das menschliche Gehör ausgewertet werden. Dies entspricht in etwa einer Lokalisationsschärfe von etwa einem Grad. Laufzeit- und Pegelunterschiede, sind für die Wahrnehmung in der Horizontalebene die wichtigsten Größen. Sie bewirken bereits bei exklusiver Anwendung eine Richtungswahrnehmung, kommen bei natürlichen Schallquellen jedoch nur in kombinierter Form vor. Die Lokalisation bei tiefen Frequenzen wird durch ITD und bei hohen Frequenzen durch ILD dominiert.¹⁵ (Abb.4)



Längendifferenz:

$$\Delta s = \frac{D}{2} (\varphi + \sin \varphi)$$

Laufzeitdifferenz:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c}$$

Abb.3: Vereinfachte Berechnung von interauralen Signaldifferenzen beim parallelen Schalleinfall.¹⁶

¹⁵ vgl. Blauert, 1974, S. 111-142; vgl. Breebaart & Faller, 2007, S. 33

¹⁶ vgl. Blauert, 1974, S. 60

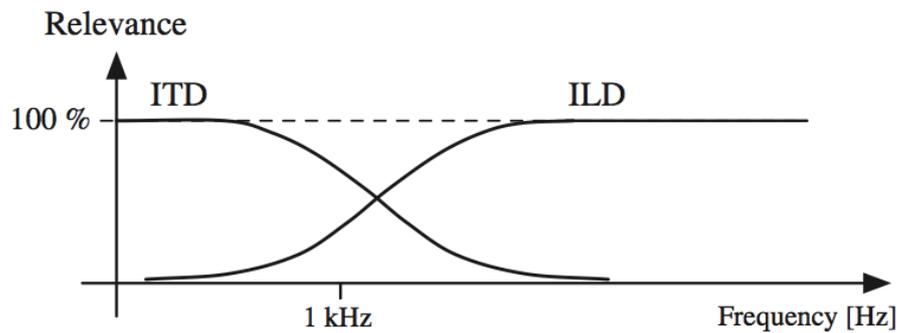


Abb.4: ITD dominieren Lokalisation bei tiefen Frequenzen und ILD bei hohen Frequenzen. Der Übergang zwischen ITD und ILD befindet sich ist ca. bei 1-2 kHz.¹⁷

2.3.2 Richtungshören in der Medianebene (Vertikalebene)

Bewegt sich eine Schallquelle auf der Medianebene, bleiben die interauralen Pegel- und Laufzeitdifferenzen annähernd gleich groß. Für das Richtungshören von Hörereignissen in der Medianebene ist die individuelle Außenohrübertragungsfunktion (HRTF) maßgebend verantwortlich, die durch Abschattung und Beugung an Ohrmuschel, Kopf und Schultern zu einer Klangfärbung des Signals führt. Durch diese nichtlinearen Verzerrungen ist das Gehör in der Lage eine Erhebung (Elevation) der Schallquelle festzustellen bzw. zwischen „vorne“, „oben“ und „hinten“ zu unterscheiden. Durch Hörversuche wurde außerdem festgestellt, dass die Lokalisation der Richtung in der Medianebene bei schmalbandigen Signalen von der Frequenz und nicht von der tatsächlichen Position des Hörereignisses bestimmt wird. (s. Abb. 5) Die Lokalisation in der Medianebene ist allerdings im Vergleich zu Horizontalebene sehr ungenau und von Bekanntheit der Schallquelle und der Breite des Signalspektrums abhängig. Breitbandige Schallquellen werden besser lokalisiert als schmalbandige und bekannte Signale besser als unbekannte. Außerdem müssen laut Blauert Signalanteile über 7 kHz vorhanden sein, um eine Erhebung in der Medianebene zu lokalisieren.¹⁸

¹⁷ Breebaart & Faller, 2007, S. 34

¹⁸ vgl. Görne, 2008, S. 118; vgl. Blauert, 1974, S. 35 und S. 80ff; vgl. Dickreiter, 2011, S.130

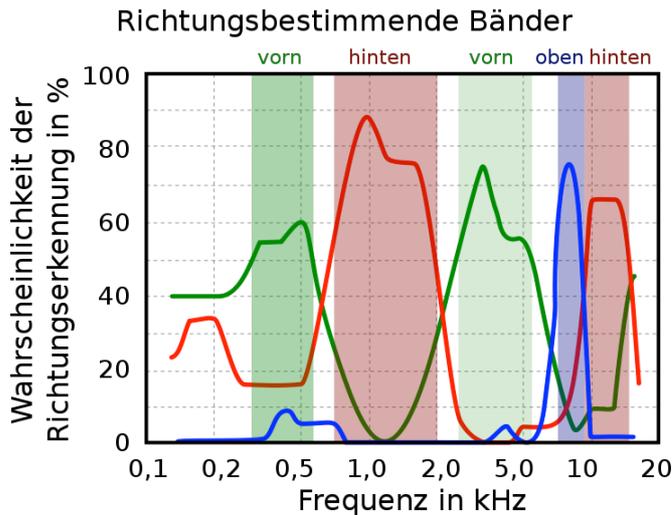


Abb.5: Richtungsbestimmenden Bänder (blauertsche Bänder) für das Richtungshören von schmalbandigen Signalen in der Medianebene (vorn, oben, hinten) verantwortlich.¹⁹

2.4 Entfernungshören und Darstellung des Aufnahme-raums

2.4.1 Entfernungshören

Die Wahrnehmung von Entfernungen kann grob in drei Kategorien unterteilt werden. Sehr geringe Schallquellenentfernungen ≤ 25 cm, mittlere Entfernungen ca. 25 bis 15 m und große Entfernungen > 15 m. Bei sehr geringen Schallquellenentfernungen modifiziert sich die monaurale und interaurale Übertragungsfunktion sehr bedeutend mit der Schallquellenentfernung. Das Spektrum der Ohrsignale wird entfernungsabhängig und somit für das Gehör unverkennbar verändert. Bei Annäherung einer Schallquelle an das Hörorgan erhöhen sich der wahrgenommene Signalpegel und die interaurale Pegeldifferenz. Bei mittleren Entfernungen basiert die Wahrnehmung von Distanzen zur Schallquelle u. a. auf Pegelunterschieden des Signalpegels. Der Pegel einer Schallquelle verändert sich mit $1/r$, somit reduziert sich der Pegel eines Kugelstrahlers bei Abstandsverdopplung um 6 dB. Entfernte Schallquellen erscheinen somit leiser als nahe Schallquellen. In diesem Zusammenhang verändert sich auch die Klangfarbe von breitbandigen

¹⁹ http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/Akustik_-_Richtungsbaender.svg

Schallquellen, denn das Lautstärkeempfinden ist frequenzabhängig und gemäß den **Normalkurven gleicher Lautstärkepegel** (s. Abb. 6) bei hohen Pegeln etwas flacher. Außerdem hat das Verhältnis zwischen Direktschall und Erstreflexionen in diesem Abstandsbereich eine wirksame Rolle für die Abstandsbeurteilung.²⁰

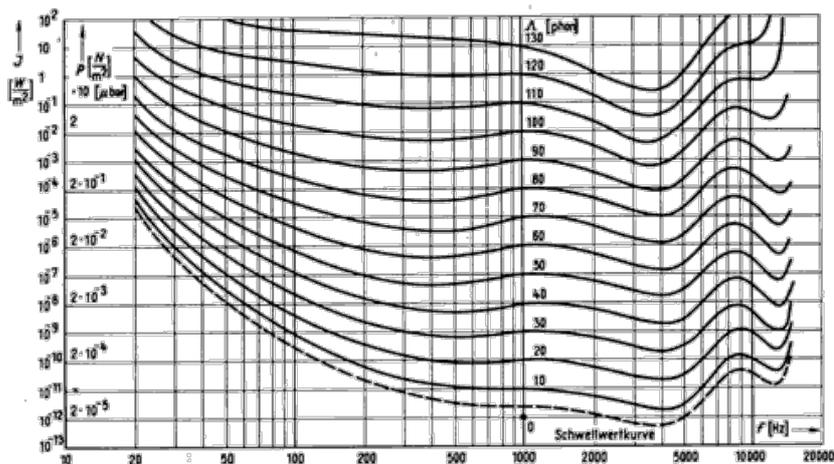


Abb.6: Kurven gleicher Lautstärke; Auf gleichen Kurven liegende Pegel-Frequenzkombinationen werden subjektiv gleich laut empfunden.²¹

Bei großen Entfernungen wirkt sich zusätzlich eine frequenzabhängige Dämpfung auf das Schallsignal aus. Diese Dämpfung steigt zu hohen Frequenzen und zum Ausbreitungsweg an. Entfernte Schallquellen erscheinen auf Grund dieser Höhendämpfung dumpfer als nähere Schallquellen.²²

2.4.2 Darstellung des Aufnahmebereichs

Das Ohr als Sinnesorgan ist ganz wesentlich an der räumlichen Wahrnehmung beteiligt. Hörereignisse klingen in unterschiedlichen räumlichen Gegebenheiten jedoch ganz unterschiedlich. Dies ist besonders dann wahrnehmbar, wenn in Räumen unterschiedlicher Art ein impulsartiges Schallereignis wiedergegeben

²⁰ vgl. Blauert, 2008, S. 98-99

²¹ Webers, 2007, S. 103

²² vgl. Blauert, 2008, S. 98-99

wird.²³ „[Aus den weiter unten aufgeführten Komponenten Direktschall, Erstreflexionen und Nachhall eines natürlichen Schallfeldes in einem Raum ist das menschliche Gehör in der Lage, Rückschlüsse] auf die Schallquelle, die Anregung und auch den Raum, in dem das Ereignis ausgelöst wurde und sich der Schall ausbreitet [, zu ziehen.]“²⁴ Größe und Form des Raumes sowie die Position der Schallquelle und des Empfängers im Raum sind bei Erstreflexionen und Nachhall zentrale Einflussfaktoren.²⁵ Abb. 10 demonstriert das Impulsverhalten eines Raumes.

2.4.2.1 Direktschall

Ausgehend von der Schallquelle erreicht der Direktschall (DS) den Zuhörer auf direktem Wege. Die Verzögerung, die das Signal auf dem Weg erfährt, kann mit der Schallgeschwindigkeit v und der Strecke S zwischen Schallquelle und Hörer gemäß Abb.7 ermittelt werden.²⁶ (s. auch Abb. 9-10)

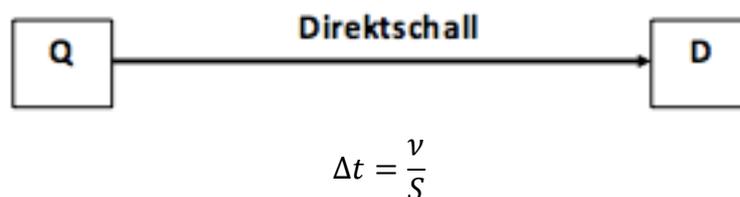


Abb.7: Verzögerung des Direktschalls auf dem Weg von der Quelle (Q) zum Empfänger (D).

Das menschliche Gehör ist in der Lage, aus dem Direktschall die Richtung, aus der ein Schallereignis das Gehör erreicht, zu lokalisieren.²⁷

²³ vgl. Raffaseder, 2010, S. 40

²⁴ Raffaseder, 2010, S. 46

²⁵ vgl. Raffaseder, 2010, S. 96

²⁶ vgl. Raffaseder, 2010, S. 96

²⁷ vgl. Henle, 2001, S. 44; vgl. Dickreiter, 2011, S. 10 und S. 14ff

2.4.2.2 Erstreflexionen (Early Reflections)

Erstreflexionen (ER) erster Ordnung sind Reflexionen, die den Zuhörer in kurzen Abständen nach einem einfachen Reflektieren an Begrenzungsflächen, deren Abmessungen über der Wellenlänge des Schallereignisses liegen, wie z.B. Boden, Wände und Decke, erreichen.²⁸ (s. Abb. 8-10) In geschlossenen Räumen sind Erstreflexionen erster Ordnung, die den Zuhörer innerhalb von $\Delta t = 15$ bis 50 ms erreichen, für den Raumeindruck (Räumlichkeit, räumliche Tiefe, Größe des Raumes) sowie für die Bestimmung der Position des Hörereignisses im Raum vornehmlich verantwortlich.²⁹ Die Erstreflexionen erreichen den Zuhörer später und im Pegel gedämpfter als der Direktschall. Der Pegel der Reflexionen sowie die Verzögerung gegenüber dem DS sind abhängig von den Raumeigenschaften und dem Reflexionsweg. Erstreflexionen haben durch den Präzedenzeffekt (s. Präzedenzeffekt) keinen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmung der Richtung des Schallereignisses. Auf Grund der nicht möglichen Lokalisation ist es unerheblich, aus welcher Richtung die Erstreflexionen kommen, jedoch werden sie vom Gehör besser verarbeitet, sofern deren Einfallsrichtung der zugehörigen Richtungen eines natürlichen Schallfelds entspricht.³⁰

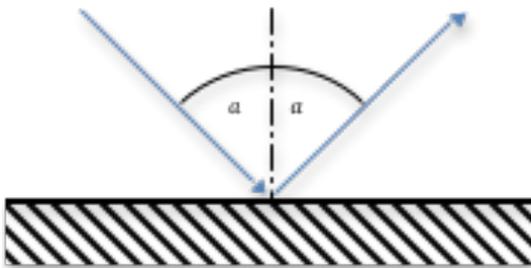


Abb.8: Reflexion von Schallwellen an einer ebenen Begrenzungsfläche nach Snellius; Einfallswinkel und Reflexionswinkel α sind gleich³¹

²⁸ vgl. Raffaseder, 2010, S. 92

²⁹ vgl. Theile & Wittek, 2011, S. 34

³⁰ vgl. Henle, 2001, S. 44; vgl. Dickreiter, 2011, S. 10, S. 14ff; vgl. Raffaseder, 2010, S. 97; vgl. Blauert, 1974, S. 177ff

³¹ vgl. Webers, 2007, S. 65

2.4.2.3 Nachhall

Durch mehrfaches Reflektieren an den Begrenzungsflächen steigt die Anzahl der Reflexionen bei abnehmendem Energiegehalt. Diese Reflexionen werden nicht mehr als einzelne Schallereignisse wahrgenommen, sondern erscheinen als gleichmäßig verteilter, für den Raum charakteristischer Nachhall. Die Anfangszeit und Dauer des Nachhalls sind abhängig von der Geometrie des Raumes und von Absorptions-, Reflexions- und Streuungsgrad der Begrenzungsflächen. Diese Wellenfront ist für das Ausmaß der Umhüllung (Envelopment) des Zuhörers verantwortlich. Umhüllung ist der Eindruck von akustischem Schallfeld umgeben zu sein, sich also mitten im Klang zu befinden. Der Grad der empfundenen Umhüllung steigt mit abnehmender Korrelation (s. Korrelation) der Signale.³² (Abb. 9;10)

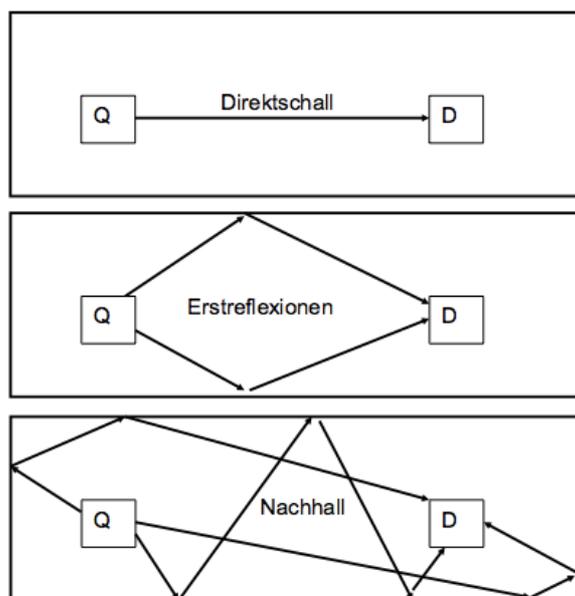


Abb.9: Ausbreitung von Schall in Geschlossenen Räumen; Q= Quelle, D = Destination

³² vgl. Henle, 2001, S. 44; vgl. Dickreiter, 2011, S. 10, S. 14ff

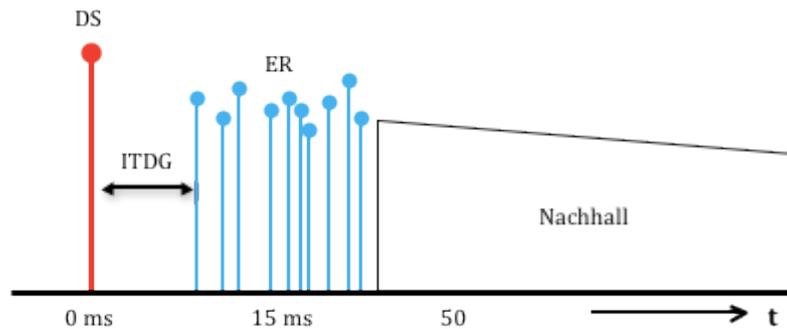


Abb.10: Vereinfachte Darstellung einer Impulsantwort in einem Raum;
Anfangszeitlücke Δt (ITDG = Initial Time Delay Gap)

2.4.2.4 Diffusschall/Raumschall

Die nach dem Direktschall beim Empfänger (z.B. Zuhörer oder Mikrofon) aus allen Richtungen eintreffenden Reflexionen – ersten Reflexionen und Nachhall – bilden zusammen den Diffusschall/Raumschall. Wie bereits oben beschrieben³³, ist der Diffusschall für den räumliche Eindruck und die Umhüllung des Zuhörers verantwortlich.³⁴

2.4.2.5 Hallradius (Critical distance)

Mit ansteigendem Abstand der Schallquelle zum Empfänger nimmt der Pegel des Direktschalls bei in etwa gleichbleibendem Diffusschallanteil ab. (Abb. 11) Auf diese Weise verändert sich das Intensitätsverhältnis zwischen Direktschall und Diffusschall. Derjenige Abstand, bei dem das Verhältnis von Direkt- und Diffusschall gleich ist, wird als Hallradius bezeichnet. Intensitätsverhältnis zwischen Direkt- und Diffusschall /Raumschall wird als D/R-Ration bezeichnet. D/R-Ratio ist eine wichtige Größe bei der Positionierung von Mikrofonen. Einen trockenen Klang, mit großem Direktschallanteil, wird mit einem innerhalb des Hallradius positioniertem Mikrofon erreicht. Mikrofone die außerhalb des Hallradius positioniert sind, liefern im Gegenzug einen indirekten räumlichen Klang. Um eine saubere

³³ s. „Erstreflexionen“ und „Nachhall“

³⁴ vgl. Dickreiter, 2011, S. 10

Verteilung der räumlichen Abbildung zu erreichen, ist es wichtig den Bereich zu kennen, bei dem das Direktsignal den Diffusanteil überwiegt. Bei Schallquellen mit gerichteter Schallabstrahlung und/oder Verwendung von richtenden Mikrofonen ist der Hallradius größer als bei Kugelstrahler und Kugelempfängern.³⁵

$$r_H = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}}$$

$r_H = \text{Hallradius [m]}$

$V = \text{Raumvolumen [m}^3\text{]}$

$T = \text{Nachhallzeit [s]}$

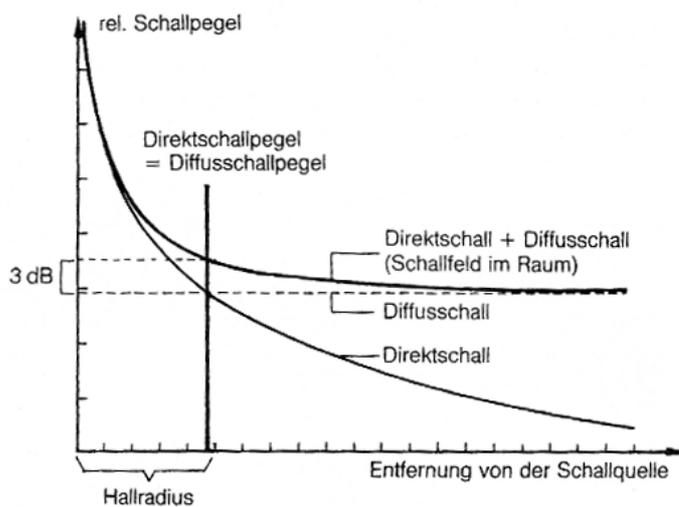


Abb.11: Hallradius³⁶

³⁵ vgl. Dickreiter, 2011, S. 10; vgl. Görne, 2008, S. 78

³⁶ Dickreiter, 2011, S. 30-31; Weinzierl, 2008, S. 183 und 188

2.4.2.6 Gesetz der ersten Wellenfront (Precedence-Effekt)

Weisen zwei kohärente Signale am Ort der Schallwahrnehmung eine Zeitdifferenz von $630\mu s < \Delta t < 1 ms$ auf, so ist allein das Primärsignal³⁷ für die Richtungslokalisierung entscheidend. Das Sekundärsignal oder auch „Rückwurf“ genannt, wird bei der Auswertung durch das Gehör unterdrückt.³⁸

Erst beim Überschreiten der Echschwelle – die stark abhängig von Eigenschaften der Schallquelle ist – werden zwei unabhängige Signale wahrgenommen.³⁹

2.4.2.7 Kohärenz

In der Stereophonie werden Signale, die kongruent sind oder gleichen Ursprung haben, als kohärent bezeichnet. Dabei können die Signale frequenzunabhängige Laufzeit- und/oder Pegeldifferenzen aufweisen.⁴⁰

2.4.2.8 Korrelation

„Die Korrelation eines Stereosignals ist ein Maß für die“ [Ähnlichkeit zwischen den einzelnen Kanälen].⁴¹ Diese dimensionslose Messgröße zeigt die Phasenbeziehungen und ist unabhängig von den Pegelunterschieden der Signale.⁴²

2.5 Psychoakustik der stereofonen Übertragung (Räumliches Hören bei Lautsprecherwiedergabe)

Bei der Wiedergabe von Stereosignalen über Lautsprecher, ist das Phänomen der **Phantomschallquellenbildung** maßgebend. Werden gleichzeitig gleiche (kohärente) Signale auf beiden Lautsprechern wiedergegeben, erscheint in der Mitte der Lautsprecherbasis eine Phantomschallquelle. Beim Verringern des Pegels eines Kanals wird die Phantomschallquelle auf der Basisachse zu der lauterer Seite

³⁷ Primärsignal = zuerst beim Zuhörer eintreffendes Signal

³⁸ vgl. Blauert, 1974, S. 163; vgl. Webers, 2007, S. 117-118

³⁹ vgl. Blauert, 1974, S. 179

⁴⁰ vgl. Blauert, 1974, S. 162; vgl. Dickreiter, 2011, S. 150-151

⁴¹ Dickreiter, 2011, S. 151

⁴² vgl. Dickreiter, 2011, S. 151 und 164

ausgelenkt bis sie bei Wiedergabe durch nur einen Lautsprecher zu einer Real- bzw. Ersatzschallquelle wird. (Abb.12)

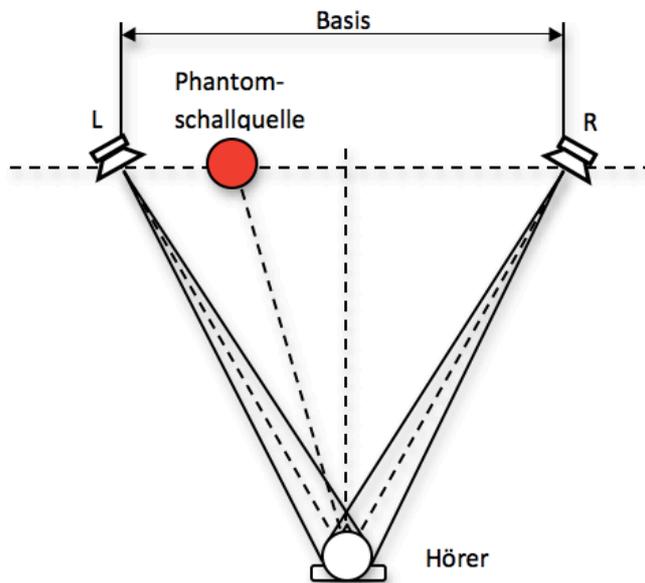


Abb.12: Phantomschallquellenbildung auf der horizontalen Lautsprecherbasis⁴³

Analog zu der oben beschriebenen Variation der Pegel wirkt die Laufzeit auf die Auslenkung einer Phantomschallquelle aus der Mitte einer Stereo-Lautsprecheranordnung (2 Lautsprecher mit Basiswinkel = 60°). Wird ein Kanal einer Stereoübertragung zwischen $630 \mu\text{s}$ und 1ms verzögert, ist allein das frühere, beim Zuhörer eintreffende Direktsignal für die Richtungslokalisierung des Höreignisses verantwortlich. Eine komplette Auslenkung zur Seite eines im Stereodreieck befindenden Lautsprechers erfolgt bei $\Delta t = 1 \text{ms}$. Wie auch beim natürlichen Richtungshören addiert sich die Wirkung von Laufzeit- und Pegeldifferenzen zu einem wirkungsvolleren gemeinsamen Effekt.⁴⁴

⁴³ vgl. Dickreiter, 2011, S.133

⁴⁴ vgl. Dickreiter, 2011, S. 132; vgl. Blauert, 1974, S. 163 und S. 178

2.6 Stereofone Aufnahmeverfahren

2.6.1 Hauptmikrofon

Der Raumeindruck prägt bedeutend das Hören im Konzertsaal. Da viele Aufnahmen von akustischen Instrumenten eine natürlich wirkende Wiedergabe von Schallfeldern des Aufnahme-raums zum Ziel haben, ist das Anwenden von Hauptmikrofontechniken dienlich. Aufgabe des Tonverantwortlichen ist, „mit Hilfe ihm zur Verfügung stehenden Übertragungsverfahren dem Hörer die Wirkung des Raumes auf die musikalische Darbietung zu vermitteln“⁴⁵. Dies geschieht in erster Linie durch Wahl geeigneter Hauptmikrofonanordnungen, die auf Laufzeit- und Pegeldifferenzen oder auf Kombination von beiden basieren.⁴⁶ (Abb. 13)

Prinzipien	Stereoverfahren
Pegeldifferenzen	Pegeldifferenz-Stereofonie (meist als Koinzidenzmikrofon aufgebaut)
Laufzeitdifferenzen	Laufzeitstereofonie
Pegel- und Laufzeitdifferenzen	Äquivalenzstereofonie (Gemischtes Aufnahmeverfahren)

Abb.13: Stereoverfahren und zugehörigen Prinzipien

Als Hauptmikrofon wird eine gewissermaßen standardisierte Mikrofon-Anordnung bezeichnet, die alle wesentlichen Merkmale eines Klangereignisses erfassen kann. Klangfarbe, Richtungs- und Entfernungsdarstellung (räumliche Disposition), sowie die groben Pegelverhältnisse werden mit einem Hauptmikrofon aufgezeichnet. Sowohl Direktschallanteile als auch deren Reflexionen werden erfasst. Dies ermöglicht die Abbildung der Klangquelle und ihre Umgebung, was sich in Räumen mit gut klingenden akustischen Eigenschaften besonders vorteilhaft zeigt. Ein Hauptmikrofon besitzt möglichst praxismgerechte Abmessungen, einfache Hand-

⁴⁵ Theile, 1984, S. 170

⁴⁶ vgl. Theile, 1984, S. 170

habung und sollte für den schnellen Einsatz ohne langwierige Soundchecks und Aufbau geeignet sein. Bereits mit geringem Aufwand ist dadurch ein gutes Ergebnis oder zumindest eine Basis für die Mischung erzielbar.⁴⁷

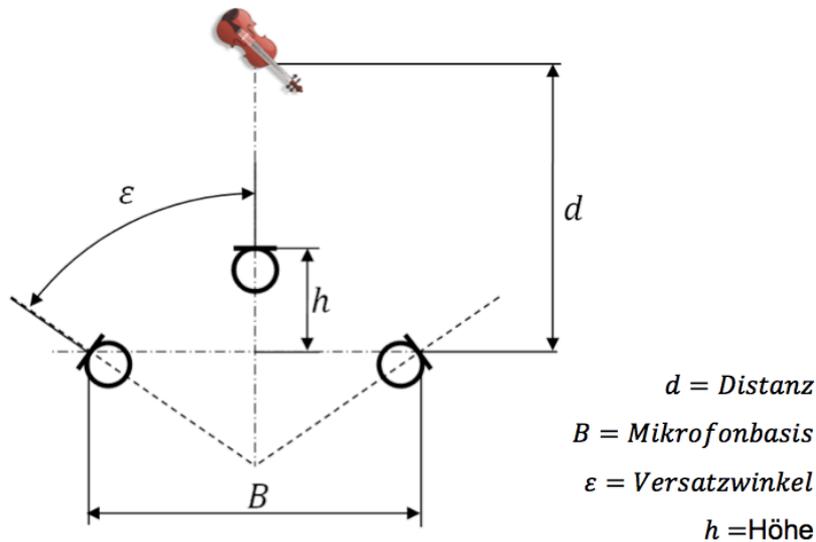


Abb.14: Parameter eines stereofonen Hauptmikrofons⁴⁸

Variable Parameter eines Hauptmikrofons, die bei der Beschreibung der unterschiedlichen Verfahren verwendet werden, sind (s. auch Abb. 14):

- Versatzwinkel
- Aufnahmewinkel (sollte mit der Klangkörperausdehnung korrelieren)
- Mikrofonbasis (Abstand zwischen Mikrofonpaaren)
- Distanz zur Schallquelle
- Höhe (Erhebung aus dem Bezugspunkt in Richtung der Schallquellen)

Auch die Richtcharakteristik der eingesetzten Mikrofone spielt eine entscheidende Rolle. Diese Parameter werden zur Beschreibung der Anordnungen verwendet. Eine Übersicht über die grundlegenden stereofonen Verfahren ist in Abb. 15 dargestellt.

⁴⁷ vgl. Gernemann, 2001, S. 1; vgl. Dickreiter, 2011, S. 186

⁴⁸ vgl. Wittek, 2011c

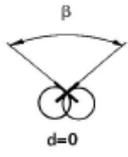
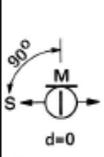
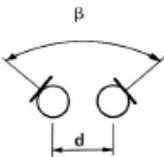
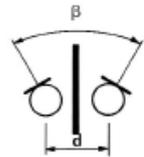
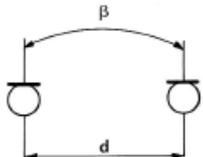
Stereo-Art	Intensitätsstereofonie		kleine Laufzeit + Intensitätsdifferenz	Trennkörperstereofonie	Laufzeitstereofonie
Name	XY	MS	z.B. ORTF	z.B. Jecklin-Scheibe	AB
					
Kapselabstand d	0cm meist übereinander		5cm - 30cm voneinander abhängig	abhängig vom Trennkörper	40cm - 80cm oder mehr
Winkel zwischen 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	_____ abhängig von den verwendeten Mikrofonen _____ 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.	

Abb.15: Übersicht gängiger stereofoner Hauptmikrofon-Systeme; Räumlichkeit und Lokalisation verhalten sich entgegengesetzt.⁴⁹

Verbesserung des Klangbildes eines Hauptmikrofons ist durch sorgfältige Wahl der Entfernung und Höhe möglich. Alle aufzunehmenden Instrumente müssen un-

⁴⁹ Wuttke, 2000, S. 15

tereinander ausgewogen abgenommen werden. Eine Höhe von 3 m über der Bühne erweist sich bei großer Ensemblediefe als guter Startwert und sollte nach Bedarf hörend verändert werden.⁵⁰ (Abb. 16)

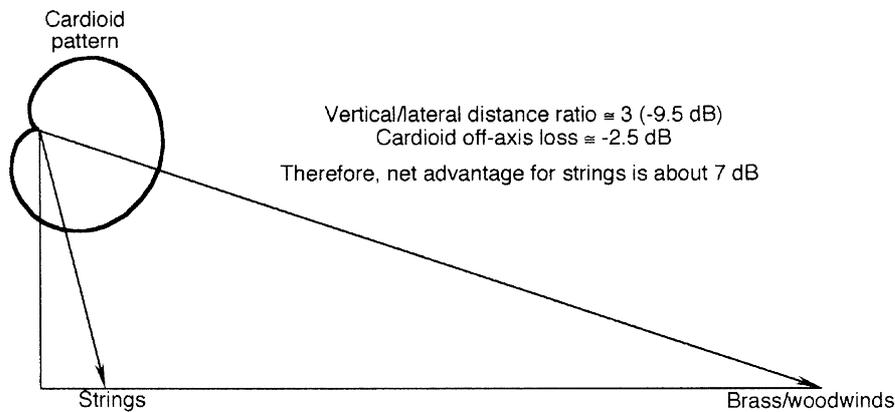


Abb.16: Vertikale Erhebung des Hauptmikrofons für eine ausgewogene Abbildung einer in die Tiefe ausgedehnten Schallquelle.⁵¹

2.6.2 Stützmikrofone

Erfüllt das Hauptmikrofon nicht alle notwendigen Qualitätsmerkmale, können Mängel wie z. B. Klangfarbe, Präsenz, Lokalisierbarkeit und Tiefenstaffelung durch Einsatz s.g. Stützmikrofone verbessert werden. Stützmikrofone sind meistens richtende Mikrofone, die in monofoner oder stereofoner Form im Nahfeld der Instrumente bzw. Instrumentengruppen platziert werden um möglichst viel Direktschallanteil aufnehmen. Räumliche Einteilung wird bei der Aufnahme der Stützmikrofone nicht berücksichtigt und wird bei Bedarf erst bei der Postproduktion hinzugefügt. Durch Ausgleich von Laufzeitdifferenzen zwischen Stütz- und Hauptmikrofon kann die Durchhörbarkeit verbessert werden.⁵²

⁵⁰ vgl. Theile, 1984, S. 178-180

⁵¹ Rayburn, 2012, S. 265

⁵² vgl. Wöhr, 1988, S. 302-303; vgl. Dickreiter, 2011, S. 178-179

2.6.3 Lokalisationskurve (Abbildungskurve)

Die Lokalisationskurve bzw. Abbildungskurve beschreibt den „Zusammenhang zwischen Schalleinfallswinkel am Stereomikrofon und Phantomschallquellenauslenkung“⁵³ auf der Lautsprecherbasis. Die resultierenden Lokalisationskurven beziehen sich auf frequenzabhängige pegel- und/oder laufzeitbasierte Stereo-Mikrofonanordnungen mit zwei oder drei Mikrofonen.⁵⁴

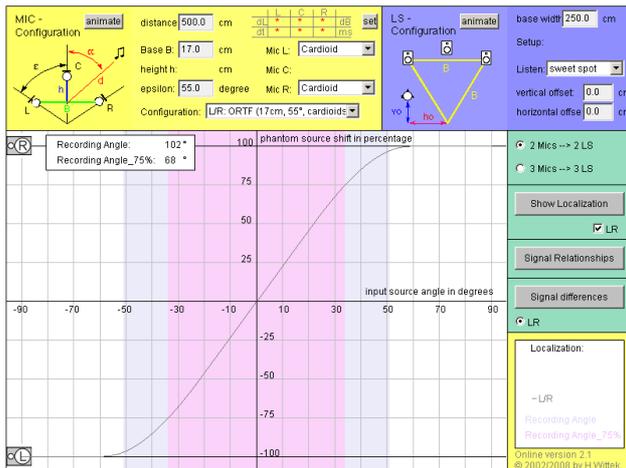


Abb.17: Lokalisationskurven mit Image Assistent. Abbildung einer ORTF-Anordnung. Resultierende Aufnahmewinkel $100\% = 102^\circ$ und Aufnahmewinkel $75\% = 68^\circ$.⁵⁵

Die Voraussage der horizontalen Positionen von Phantomschallquellen bei der Wiedergabe ist mittels „Image Assistent“⁵⁶ (IMA) möglich. (Abb. 17)

Die Berechnung erfolgt in Abhängigkeit von folgenden Parametern:

- Charakteristika der verwendeten Mikrofone
- Versatzwinkel der Mikrofone
- Mikrofonbasis
- Abstand der Schallquelle zum Mikrofon
- sowie weitere Einflüsse (Verzögerung, Pegel einfluss)

⁵³ Dickreiter, 2011, S. 151

⁵⁴ Dickreiter, 2011, S. 152; Wittek, 2000, S. 1-22

⁵⁵ Wittek, 2011c

⁵⁶ IMA ist ein Java Applet das online auf der Homepage „www.hauptmikrofone.de“ verfügbar ist.

Mit der Darstellung der Lokalisationskurven werden die Auswirkungen der Mikrofonanordnungen visuell erfassbar und vergleichbar.⁵⁷

2.6.4 Pegeldifferenz-Stereofonie

Die Pegeldifferenz-Stereofonie basiert auf einem Koinzidenzmikrofon und wird in den häufigsten Fällen als Hauptmikrofon verwendet. Als Koinzidenzmikrofon versteht man zwei, unmittelbar beieinander platzierten Mikrofone mit einem Versatzwinkel. Die Räumlichkeit entsteht nur durch die Intensitätsdifferenzen (Pegeldifferenzen) der einzelnen Mikrofon-Signale, bei „Schalleinfall aus unterschiedlichen Richtungen“.⁵⁸

Grundsätzlich unterscheidet man, abhängig von der Ausrichtung und Wahl der Mikrofone und Zuordnung bzw. Matrizierung der Kanäle, zwei unterschiedliche Verfahren der Pegeldifferenz-Stereofonie.⁵⁹ Die XY- und MS-Stereofonie. Diese lassen sich mathematisch äquivalent herleiten, in der Praxis jedoch unterscheiden sie sich wegen der Frequenzabhängigkeit der Richtcharakteristik und der unterschiedlichen Übertragungsmaße der verwendeten Mikrofone.⁶⁰

Der größte Vorteil der Pegeldifferenz-Stereofonie ist die sehr gute Monokompatibilität. Da das Verfahren, Prinzip bedingt, keine Laufzeitunterschiede berücksichtigt, entstehen bei Summierung der L/R-Signale keine bzw. kaum phasenbedingten Auslöschungen des Signals. Bei Anwendungen, die eine Monokompatibilität gewährleisten müssen, wird die Pegeldifferenz-Stereofonie gerne eingesetzt. Dabei wird eine schlechtere räumliche Abbildung auf Grund nicht vorhandener Laufzeitunterschiede in Kauf genommen.⁶¹

⁵⁷ Wittek, 2000, S. 2

⁵⁸ Henle, 2001, S. 183; vgl. Henle, 2001, S. 179

⁵⁹ vgl. Henle, 2001, S. 179

⁶⁰ vgl. Dickreiter, 2011, S. 156

⁶¹ vgl. Henle, 2001, S. 184

2.6.4.1 XY-Mikrofonverfahren

Beim XY-Mikrofonverfahren werden meist zwei Druckgradient-Mikrofone mit Nierencharakteristik verwendet. Die Mikrofone werden mit einem Versatzwinkel direkt übereinander platziert. (s. Abb.18) Der Versatzwinkel bestimmt den Aufnahmewinkel und kann, je nach Breite des Klangkörpers, variabel verändert werden. (Abb. 20) Der Aufnahmewinkel ist jedoch von der Richtcharakteristik der verwendeten Mikrofone abhängig und in der Praxis selten größer als 90° . Ein Sonderfall besteht bei der XY-Stereofonie mit einer Acht-Charakteristik. Der Versatzwinkel bei dieser Anordnung beträgt stets $\pm 45^\circ$. Dieses Verfahren wird auch Blumlein-Technik genannt (s. Blumlein). „Beim XY-Mikrofonverfahren sind die Signale X und Y unmittelbar die Signale für den linken bzw. rechten Kanal“⁶² und können nachträglich durch die Panoramaregler an der Mischkonsole in der Breite verändert werden.⁶³

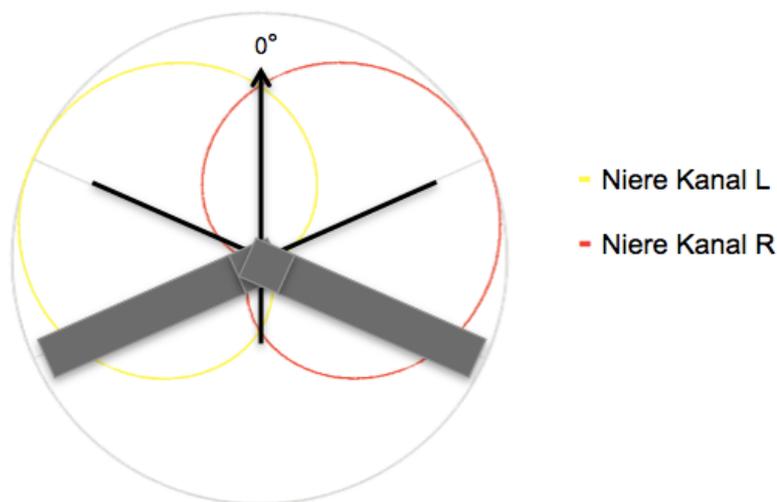


Abb.18: XY-Anordnung mit Nieren und Versatzwinkel $\pm 66^\circ$

⁶² Dickreiter, 2011, S. 157

⁶³ vgl. Dickreiter, 2011, S. 158-159; vgl. Henle, 2001, S. 182-185

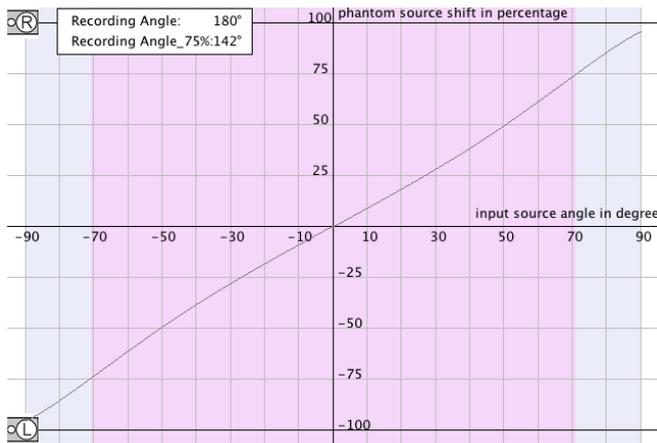


Abb.19: Mit Image Assistent rechnerisch bestimmte Lokalisationskurve einer XY-Anordnung (Versatzwinkel = 45°, Basis = 0°)

2.6.4.2 MS-Mikrofonverfahren

Das MS-Mikrofonverfahren besteht aus zwei koinzident angeordneten Mikrofonen (Abb.21). Das M-Mikrofon (Mitten-Signal) mit beliebiger Richtcharakteristik und das S-Mikrofon mit einer Achtcharakteristik das einen Versatzwinkel von 90° nach Links aufweist. Um aus diesen zwei Mikrofonen ein L/R-Signal zu erzeugen, ist eine Matrizierung des M/S-Signals (wie in Abb. 22 dargestellt) erforderlich. Um den Aufnahmewinkel zu verändern, ist lediglich der Pegel des S-Signals zu variieren, dies ist – im Gegensatz zum XY-Aufnahmeverfahren – auch nach der Aufnahme möglich. Das MS-Aufnahmeverfahren ist komplett Mono-Kompatibel.⁶⁴

⁶⁴ vgl. Dickreiter, 2011, S. 160; vgl. Henle, 2001, S. 179

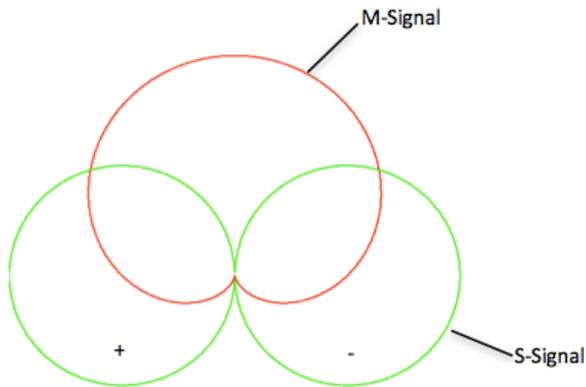
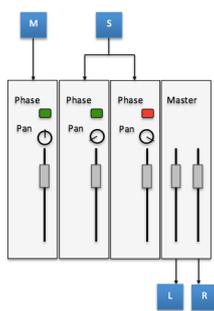


Abb.21: MS-Mikrofonverfahren mit Nieren- und Achterrichtcharakteristik⁶⁵



$$M = (L + R) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$L = (M + S) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$S = (L - R) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$R = (M - S) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Abb. 22: Matrizierung und Mathematische Beziehungen beim MS-Mikrofonverfahren⁶⁶

2.6.4.3 Blumlein (Stereosonic)

Blumlein oder Stereosonic ist eine koaxiale Anordnung von zwei Mikrofonen mit der Richtcharakteristik Acht und einem Versatzwinkel von 45°. Diese Anordnung weist einen festen Aufnahmewinkel von 72° auf. (s. Abb. 23-24) Das dem XY sehr ähnliche Verfahren wurde bereits in 30er Jahren von Alan Blumlein entwickelt. Mikrofone mit einer nativen Achtcharakteristik besitzen Empfängerprinzip bedingte schwache Wiedergabe von tiefen Frequenzen. Das ist bei Verwendung als

⁶⁵ vgl. Dickreiter, 2011, S.161

⁶⁶ vgl. Dickreiter, 2011, S. 161

Hauptmikrofon, Beispielsweise bei Besetzungen mit tiefen Instrumenten, als Nachteil anzusehen. Die Blumleintechnik bietet als einzige koinzidente Anordnung die Möglichkeit, Diffusschall mit wenig korrelierten Anteilen aufzunehmen. Dies ist aus Abb. 25 ersichtlich.⁶⁷

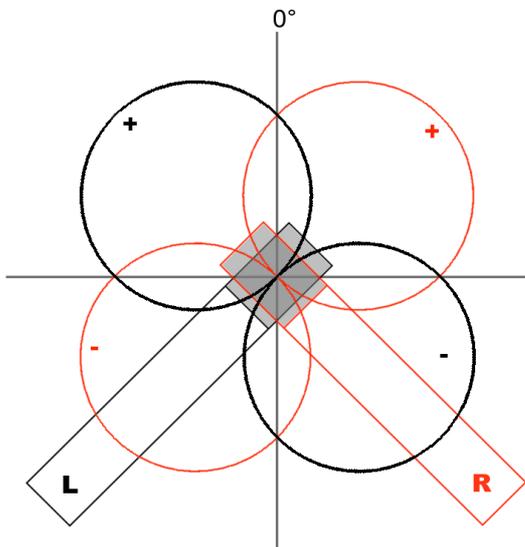


Abb.23: Blumlein, koinzidente Anordnung

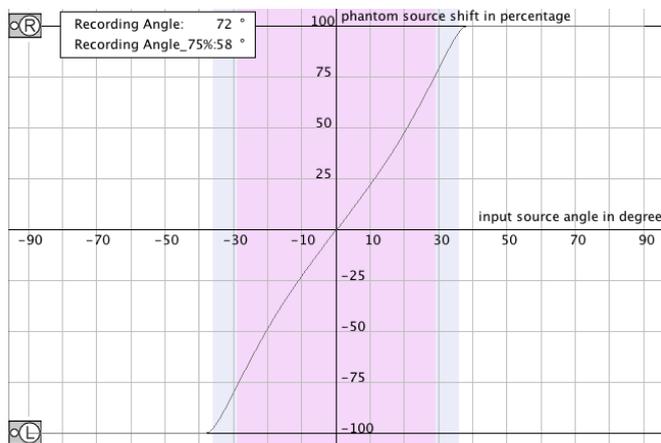


Abb.24: Rechnerisch ermittelte Lokalisationskurve einer Blumlein-Anordnung

⁶⁷ vgl. Dickreiter, 2011, S. 158; vgl. Weinzierl, 2008; S. 576

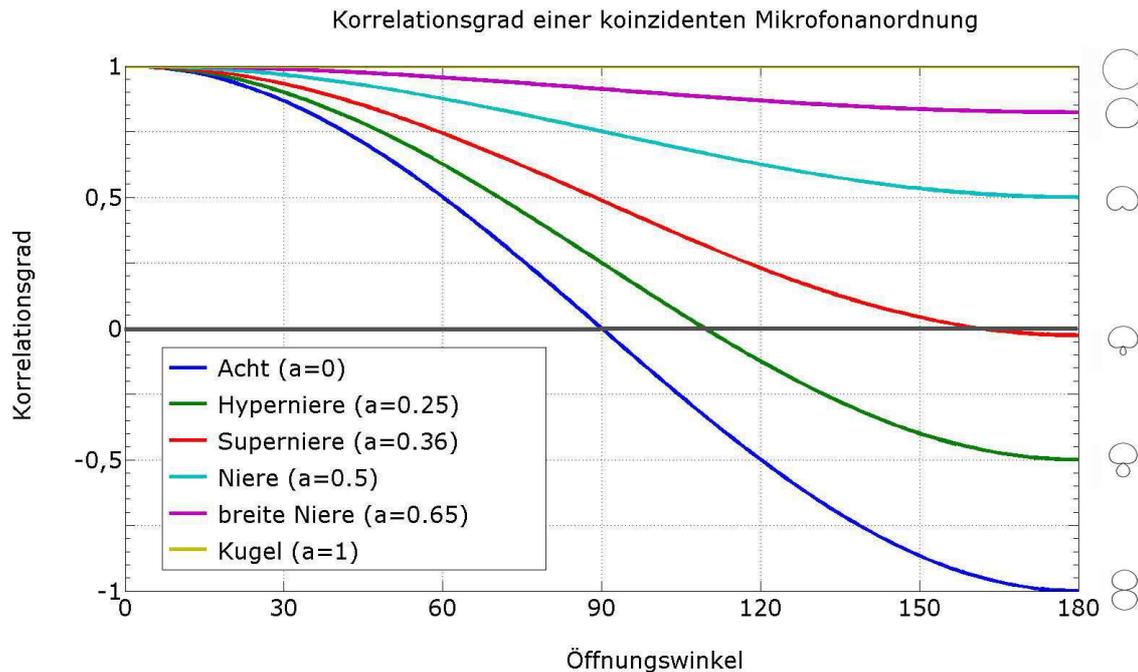


Abb.25: Korrelationsgrad einer koinzidenten Mikrofonanordnung im Diffusfeld in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel der Mikrofonanordnung für verschiedene Richtcharakteristika. Angegeben ist auch der Kugelanteil des Mikrofons nach der Mikrofonformel: $sens = a + (1 - a) * \cos(\varphi)$.⁶⁸

2.6.5 Laufzeit-Stereofonie

Die Laufzeitstereofonie basiert auf Laufzeitdifferenzen zwischen zwei oder auch mehreren räumlich getrennten Mikrofonen. Pegeldifferenzen werden nicht bzw. nur geringfügig involviert. Eine Laufzeitdifferenz wird durch einen Abstand zwischen den Mikrofonen erzeugt. Diesen Abstand nennt man Mikrofonbasis. Signale, die keine Laufzeitdifferenzen erzeugen, werden als Phantomschallquelle in der Mitte abgebildet. Für eine komplette Auslenkung zur Seite ist eine Laufzeitdifferenz von ca. 1 ms notwendig. Ein Signal, das am linken Mikrofon früher antrifft als am rechten, wird während der Wiedergabe links lokalisiert. Zwischenwerte auf der Stereobasis entstehen durch Variation der Laufzeitdifferenz im diskreten Bereich. Das Überschreiten des Maximalwertes von ca. 1 ms führt zu keinerlei Richtungslenkung der Schallquelle. Mit der Laufzeitstereofonie ist eine sehr gute Raumabbildung möglich, diese wird durch ständig wechselnde Phasendifferenzen

⁶⁸ Wittek, 2006, S. 14

zwischen den L- und R-Signalen bewirkt. Deswegen ist ein Korrelationsgradmesser oder ein Stereosichtgerät kein geeignetes Messinstrument für derartige Aufnahmen. Laut Dickreiter: „allein das Gehör kontrolliert hier“^{69 70}

Die Laufzeitstereophonie besitzt eine sehr gute Abbildung des Aufnahme-raums bei gleichzeitig schwacher Richtungsauflösung und Mittenabbildung. Für eine vollwertige Stereo-Aufnahme ist ein zusätzlicher Einsatz von Stützmikrofonen in meisten Fällen erforderlich. Der Abstand zwischen Mikrofon und Schallkörper muss ein Mehrfaches der Mikrofonbasis ausmachen. Bestimmt durch die oben beschriebenen Eigenschaften, wird groß AB häufig für Atmo- und Klassik-aufnahmen verwendet.⁷¹

2.6.5.1 Klein AB-Mikrofonverfahren

Beim sog. klein AB-Verfahren werden zwei gleiche Mikrofone mit einem Basisver-satz von ca. 34 - 60 cm parallel auf den Klangkörper ausgerichtet (s. Abb. 27). Dies erzeugt einen Laufzeitunterschied von ca. 1 ms, bei einem Aufnahmewinkel von ca. 180-60°.⁷²

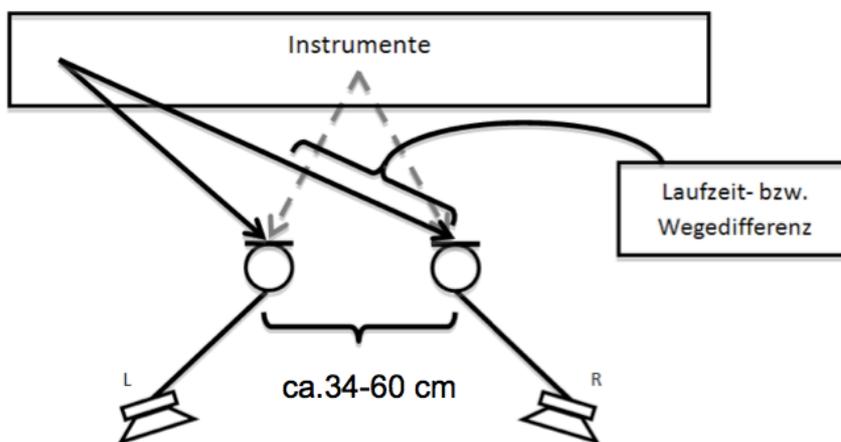


Abb.27: klein AB⁷³

⁶⁹ Dickreiter, 2011, S. 166

⁷⁰ vgl. Dickreiter, 2011, S. 166; vgl. Weinzierl, 2008, S. 578-579

⁷¹ vgl. Dickreiter, 2011, S. 166-169; vgl. Henle, 2001, S. 185-186

⁷² vgl. Dickreiter, 2011, S. 166-169

⁷³ vgl. Dickreiter, 2011, S. 167

2.6.5.2 Groß AB-Mikrofonverfahren

Wird die Basis einer klein AB-Aufstellung auf 1 bis 3m erweitert, spricht man von groß AB. Bei dieser Anordnung werden Laufzeitdifferenzen über 1ms erreicht. Dadurch entstehen keine Phantomschallquellen und ein sehr kleiner Aufnahme-winkel. Schon kleinste Veränderungen aus der Mitte des Aufnahmebereichs führen bei der Wiedergabe zu einer extremen Auslenkung zur Seite. Mit großem Basisabstand erhält man bis in die tiefen Frequenzen unkorrelierte Signale, da der Seitenschall den Direktschall dominiert.⁷⁴

2.6.5.3 Anordnungen mit drei Mikrofonen

Decca-Tree und ABC sind Anordnungen mit drei Mikrofonen und sehr großer Mikrofonbasis. Durch das zentrierte Mikrofon wird eine Stabilisierung der Mitte, mit gleichzeitig Eigenschaften des groß AB, erreicht. (Abb. 28) Bei Decca-Tree wird das Mittenmikrofon, wie in Abb. 29 dargestellt, um 0,8 bis 2,2m näher an die Schallquelle platziert. Alle Mikrofone weisen eine Omni-Charakteristik auf.⁷⁵

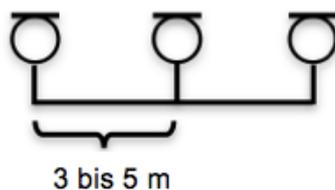


Abb.28: ABC⁷⁶

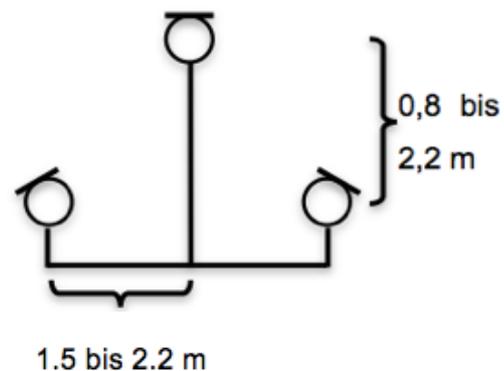


Abb.29: Decca-Tree⁷⁷

Anordnungen mit drei Mikrofonen haben das Problem einer Dreifachabbildung. Jede Kombination der Mikrofone (L-C; C-R; L-R) untereinander erzeugen in den Lautsprecherbasen Phantomschallquellen, die sich lokal nicht decken. Abhilfe

⁷⁴ vgl. Dickreiter, 2011, S. 166-169

⁷⁵ vgl. Dickreiter, 2011, S. 168

⁷⁶ vgl. Dickreiter, 2011, S.168

⁷⁷ vgl. Dickreiter, 2011, S.168

schaffen große Mikrofonbasen, die unkorrelierte Signale erzeugen. Dies bewirkt eine schlechte Lokalisation, jedoch gute Räumliche Abbildung.⁷⁸

2.6.6 Äquivalenzverfahren (Gemischte Aufnahmeverfahren)

Gemischte Aufnahmeverfahren – auch Äquivalenzverfahren genannt – kombinieren Laufzeit- und Intensitätsunterschiede in einem Verfahren. Die Vorteile aus beiden Verfahren werden genutzt. Pegel und Laufzeitdifferenzen unterstützen die Wirkung einer richtungsabhängigen Abbildung. Eine Laufzeitdifferenz von 0,6ms, entspricht ca. einer Pegeldifferenz von 1dB, 1ms Laufzeitdifferenz entspricht jedoch 15dB Pegeldifferenz.⁷⁹

Mit einem gemischten Aufnahmeverfahren wird ein Stereosignal mit präziser Abbildung der Phantomschallquellen, bei gleichzeitig guter räumlicher Abbildung und guter Tiefenstaffelung, erzeugt. Besonders bei unbekanntem Aufnahme-situationen erhält der Anwender mit dem Äquivalenzverfahren schnell und sicher gute Ergebnisse.⁸⁰

2.6.6.1 ORTF

Die universell einsetzbare ORTF-Anordnung wurde, auf der Suche nach einem einfachen und monokompatiblen Mikrofonverfahren, von Mitarbeitern des französischen Rundfunks (ORTF) entwickelt. Verwendet werden zwei Nieren-Mikrofone mit einer Basis von 17,5 cm und einem Versatzwinkel von $\pm 55^\circ$. Bei dieser Konfiguration wird ein Aufnahmewinkel von ca. 100° erreicht.⁸¹ (s. Abb. 30-31)

⁷⁸ vgl. Theile, 1996, S. 145

⁷⁹ vgl. Dickreiter, 2011, S. 170

⁸⁰ vgl. Dickreiter, 2011, S. 170

⁸¹ vgl. Dickreiter, 2011, S. 170-173

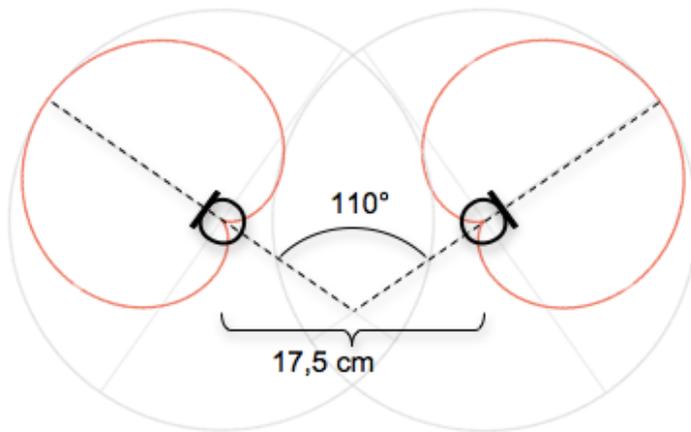


Abb.30: ORTF-Mikrofonverfahren

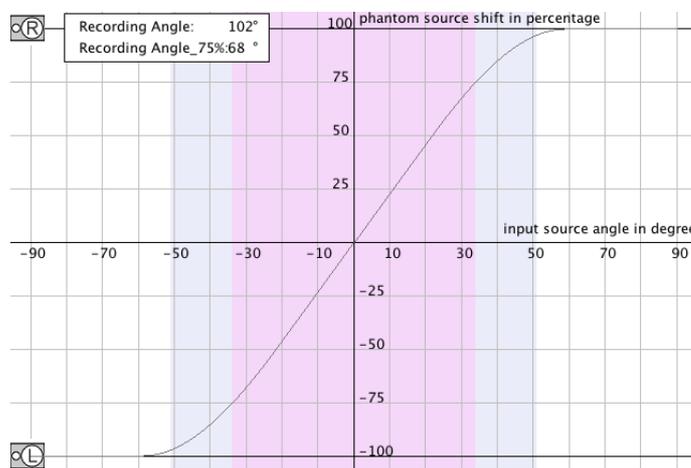


Abb.31: Rechnerische Lokalisationskurve einer ORTF-Anordnung (Basis = 17,5 cm, Versatzwinkel = 55°)

2.6.6.2 NOS

Ähnlich dem ORTF-Verfahren wird bei dem NOS-Mikrofonverfahren zwei Nieren-Mikrofone mit 30cm Basis und 90° Versatzwinkel verwendet. Bei dieser Konfiguration wird ein Aufnahmewinkel von ca. 81° erreicht.⁸²

⁸² vgl. Weinzierl, 2007, S. 583

2.8 Mehrkanal-Höranordnung für Auro-3D (9.1)

Im nachkommenden Kapitel wird der Aufbau des Zielmediums⁸³ erläutert. Die Kenntnisse darüber helfen beim Verständnis und Aufbau eines zugehörigen Hauptmikrofons.

Auro-3D ist ein System, welches eine räumliche Wiedergabe von akustischen Ereignissen aus drei Raumachsen ermöglicht. Um eine Abwärtskompatibilität und leichtes Aufrüsten bereits vorhandener Systeme zu gewährleisten, wurde für Auro-3D die vereinheitlichte 3/2- bzw. 5.1-Anordnung nach „ITU-R BS.775-1-Empfehlung“ als Grundlage verwendet. Demzufolge ist das System ohne Weiteres zu den Standards 5.1, 2.1 und 2.0 kompatibel.

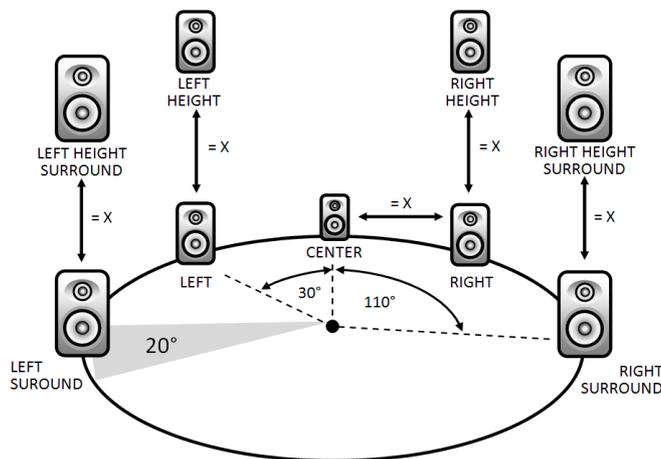


Abb.32: Lautsprecher-Anordnung für Auro-3D (9.1); Darstellung ohne LFE-Kanal (Low Frequency Effect); Der Toleranzbereich für die Positionierung der Surround-Lautsprecher beträgt 20° und ist in grau eingezeichnet;⁸⁴

Die bereits oben erwähnte ITU 5.1-Empfehlung wird bei Auro-3D (9.1) um weitere vier, ähnlich der Quadrofonie aufgestellte Höhenlautsprecher ergänzt. (s. Abb. 32)

⁸³ Nur das Auro-3D (9.1) Wiedergabesystem wird an dieser Stelle als Zielmedium bezeichnet. Auro-3D Wiedergabeformate mit höherer Kanalanzahl sind für Film wichtige Formate, werden jedoch in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

⁸⁴ vgl. Baelen, 2011, S. 15

Alle 9 Lautsprecher des Systems werden gleichartig ausgelegt. Ausnahme ist der bereits aus 5.1-Systemen bekannte LFE⁸⁵.⁸⁶

Die optimale Lautsprecherkonfiguration wurde in den „Galaxy Studios“ experimentell ermittelt. Im Einzelnen sind das:

- Lh (left height),
- Rh (right height),
- Lsh (left surround height) und
- Rsh (right surround height)

Diese befinden sich entsprechend über den unteren Kanälen L, R, Ls und Rs befinden. Die Entfernung zwischen den unteren und den oberen Lautsprechern muss identisch mit der Entfernung zwischen Center und linken bzw. rechten Lautsprecher sein. Dies entspricht ca. der $\frac{1}{2}$ Basisbreite zwischen linken und rechten Lautsprecher. Abgesehen davon werden die Höhenlautsprecher bezogen auf den Sweet Spot um 25-35° geneigt. (s. Abb. 33)

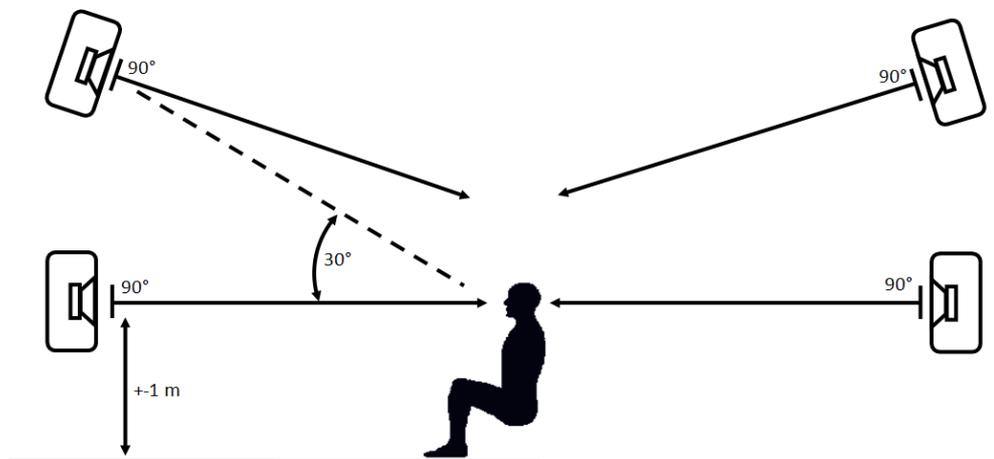


Abb. 33: Auro-3D Lautsprecheraufstellung von der Seite.⁸⁷

Optimale räumliche Darstellung wird laut Wilfried van Baelen erzielt, wenn die Höhen-Lautsprecher auf einen im Sweet-Spot aufrecht stehenden Zuhörer gerichtet

⁸⁵ LFE (Low frequency effects channel) ist ein frequenzbegrenzter Effektkanal.

⁸⁶ vgl. Baelen, 2011, S. 15

⁸⁷ vgl. Baelen, 2011, S. 15

sind. (s. Abb. 34) Die genaue Größe des Zuhörers ist allerdings nicht angegeben, es ist somit von ca. 1,75 m der Durchschnittsgröße eines Menschen auszugehen.⁸⁸

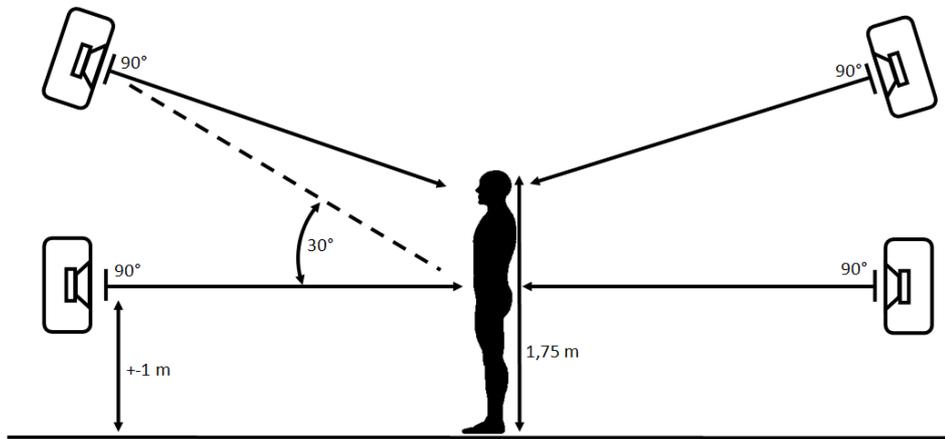


Abb.34: Ausrichtung der oberen Lautsprecher auf den Kopf eines stehenden Zuhörers.⁸⁹

Da Lautsprecher frequenzabhängiges Abstrahlverhalten aufweisen, ist davon auszugehen, dass die Signale der hohen Lautsprecher (stark abhängig von Lautsprecher) nicht optimal beim Zuhörer, der sich im optimalen Fall im Sweetspot befindet, ankommen werden. (s. Abb. 35) Rafaseder schreibt zur Positionierung von Lautsprechern: „Die Lautsprecher sollen direkt auf die Ohren des Hörers strahlen, da die Abstrahlung der Lautsprecher vor allem im hohen Frequenzbereich meist gerichtet erfolgt.“⁹⁰ In Abb. 36 ist das oben beschriebene Verhalten von Lautsprechern skizzenhaft dargestellt.

⁸⁸ vgl. Baelen, 2011, S. 15; vgl. http://de.wikibooks.org/wiki/Mensch_in_Zahlen

⁸⁹ vgl. Baelen, 2011, S. 15

⁹⁰ Rafaseder, 2010, S. 178

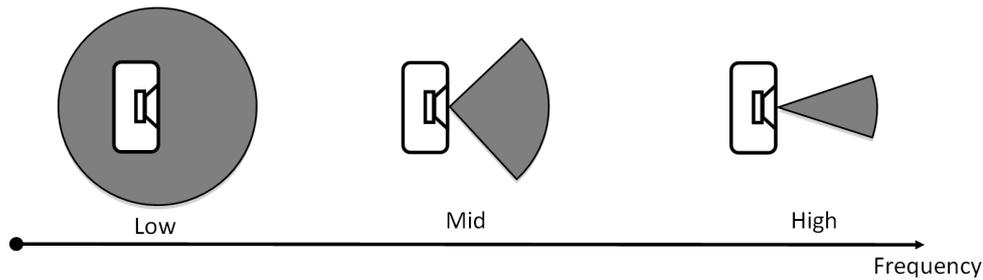


Abb.35: Skizzenhafte Darstellung der frequenzabhängigen Richtwirkung von geläufigen Lautsprechern

Die Abstände von Zuhörer und den hohen Lautsprechern ist nicht mit den Abständen zu den unteren Lautsprechern äquivalent. Dadurch befinden sich die oberen Lautsprecher nicht auf einer Halbkreisbahn, die einen homogenen Radius aufzeigt. Dieser Versatz äußert sich mit Laufzeitdifferenzen zwischen oberen und unteren Lautsprechern. (s. Abb. 36) Direktschall wird aufgrund von Precedence-Effekt (Kap. 2.4.2.6) wesentlich aus der nächstgelegenen Lautsprecherrichtung wahrgenommen, also aus den auf der unteren Ebene positionierten Lautsprechern. Bei der Abbildung von Diffusschallanteilen hat diese Laufzeitdifferenz wenig Relevanz, da ohnehin natürliche Verzögerungen zwischen einzelnen Reflexionen vorliegen.⁹¹

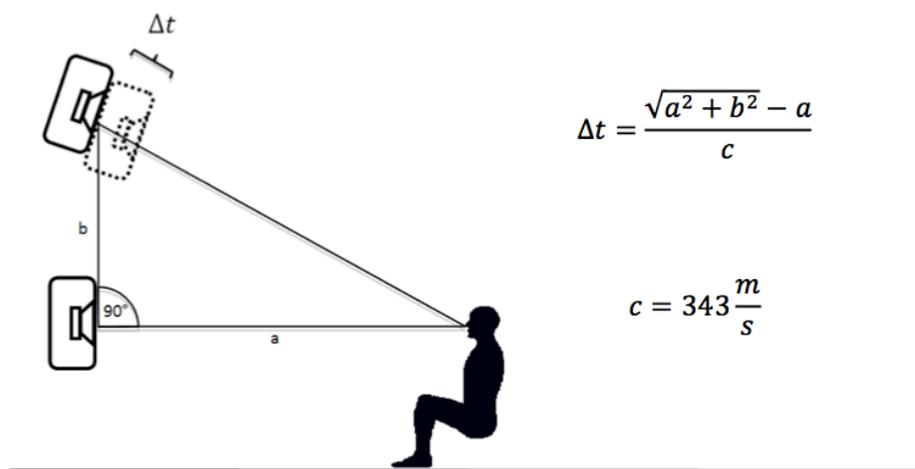


Abb. 36: Lautsprecher-Versatz resultiert mit Laufzeitdifferenzen

⁹¹ vgl. Theile und Wittek, 2011a, S.35

2.7 Downmix von Auro-3D auf 5.1

In vielen Gegenüberstellungen von Auro-3D und herkömmlichen 5.1-Wiedergabesystemen ist das einfache Ein- und Ausschalten von oberen Lautsprechern zu beobachten. Diese Vorgehensweise erzeugt fälschlicherweise einen deutlichen Vorteil für das erstgenannte System und sollte korrekterweise vermieden werden.⁹²

Aufgrund der Analogie zwischen Höhen-Kanälen des Auro-3D-Systems und Surround-Kanälen des 5.1-Systems ist anzunehmen, dass ein Downmix, wie für Surround-Kanäle in „ITU-R BS.775-2“ beschrieben, auf Höhen-Kanäle angewandt werden kann. In Abb. 37 sind Koeffizienten dargestellt, die beim Addieren der Höhen-Kanäle zu dem darunterliegenden Kanälen des 5.1-Systems angewandt werden können.⁹³

	L	R	C	Ls	Rs	Lh	Rh	LsH	RsH
L' =	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7071	0.0000	0.0000	0.0000
R' =	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7071	0.0000	0.0000
C' =	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ls' =	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7071	0.0000
Rs' =	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7071

Abb.37: Downmix von Auro-3D (9.1) Material auf 5.1-Senken

Im Ordner Downmix der im Anhang beiliegenden Begleit-CD-Rom befindet sich eine aus Auro-3D-Material entstandene 5.1-Datei, erzeugt unter Zuhilfenahme der oben genannten Koeffizienten.

⁹² vgl. Theile und Wittek, 2011, S. 37

⁹³ vgl. ITU, 2006, S. 8

KAPITEL 3: Psychoakustische Anforderungen für Mehrkanaltonaufnahmen mit Höhe

Merkmale der räumlichen Wahrnehmung	Akustische Merkmale des Schallfelds			
	Direktschall	frühe, sog. Erste Reflexionen	Nachhall	Umhüllender Schall, zusammengesetzt aus Diffusschall und Nachhall
Richtung und Erhebung	**	*		
Entfernung und Tiefe		** 15-50 ms	*	
Räumlichkeit		** 10-80 ms		
Halligkeit		*	**	*
Raumeindruck		**	**	
Raumgröße		** 15-50 ms		
Umhüllung			*	**
Klangfarbe	**	*	**	

Abb. 38: Zuordnung von Merkmalen der räumlichen Wahrnehmung und akustischen Merkmalen des Schallfelds, ** Zuordnung eng, * Zuordnung weniger eng.⁹⁴

In Abb. 38-39 wird grob demonstriert, „welche Bedeutung der Direktschall, die frühen Reflexionen, der Nachhall und der umhüllende Schall für die einzelnen oben genannten [Merkmale der räumlichen Wahrnehmung hat].“⁹⁵ Diese werden vom Gehör intuitiv ausgewertet und sollten im besten Fall einem natürlichen Schallfeld gleichen.

⁹⁴ vgl. Dickreiter, 2011, S. 145

⁹⁵ Theile und Wittek, 2011, S. 33

Im Folgenden soll unter Berücksichtigung oben aufgeführten und weiterer zusammenhängender Parameter die Möglichkeiten und Grenzen des Auro-3D-Systems beleuchten, um daraus die Anforderungen an geeignete Hauptmikrofon-Systeme zu verstehen.

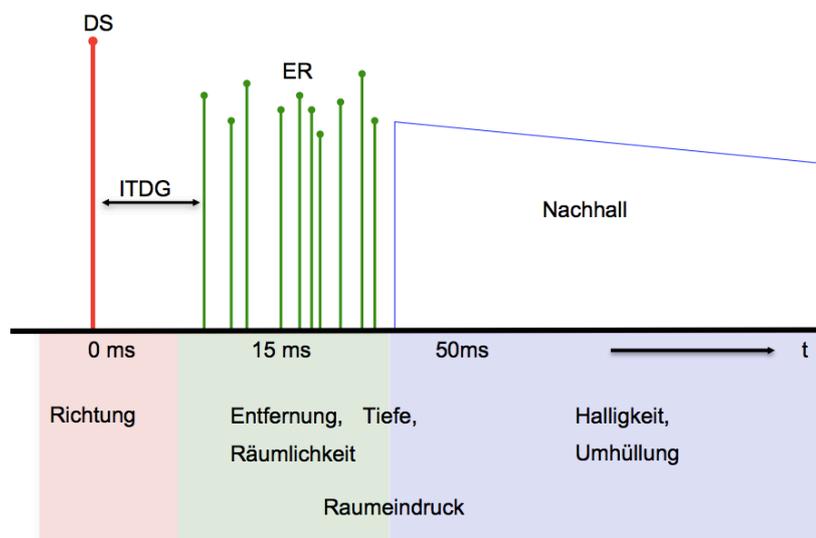


Abb. 39: Vereinfachte Darstellung einer Impulsantwort in einem Raum und Zuordnung der Attribute der räumlichen Wahrnehmung; Anfangszeitlücke Δt (ITDG = Initial Time Delay Gap)⁹⁶

3.1 Erhebung von Schallquellen und Abbildung des frontalen Klangbildes

Das Lokalisationsvermögen des menschlichen Gehörs ist in der Medianebene deutlich schwächer ausgebildet als in der Horizontalebene.⁹⁷ Praktische Untersuchungen haben ergeben, dass die Abbildung von Phantomschallquellen in der Medianebene, also zwischen unteren und oberen Lautsprechern, sehr instabil und abhängig vom Spektrum der Quelle ist.⁹⁸ (s. Abb. 40) Eine saubere stereofone Darstellung, wie im Frontbereich der Horizontalebene (L-R; L-C-R), ist nicht erreichbar und resultiert mit Klangfärbungen sowie mit einem verschwommenen Klangbild (localisation blur). Eine Abbildung von beweglichen Schallquellen zwischen den Lautsprechern ist in gewissen Grenzen praktikabel, erzeugt aber

⁹⁶ vgl. Theile und Wittek, 2011a, S. 34

⁹⁷ vgl. Nipkow, 2011, S. 22

⁹⁸ Barbour, 2003, S. 1-8

keine stabilen Quellen und bewirkt Klangfärbungen. Eine Stereoabbildung auf der Basis zwischen den oberen Lautsprechern Lh und Rh ist jedoch genauso möglich wie die Abbildung zwischen L-R. Es wird somit mehr Platz für die Positionierung von Schallquellen bereitgestellt, dies wirkt sich positiv auf die Klangfarbe aus.⁹⁹

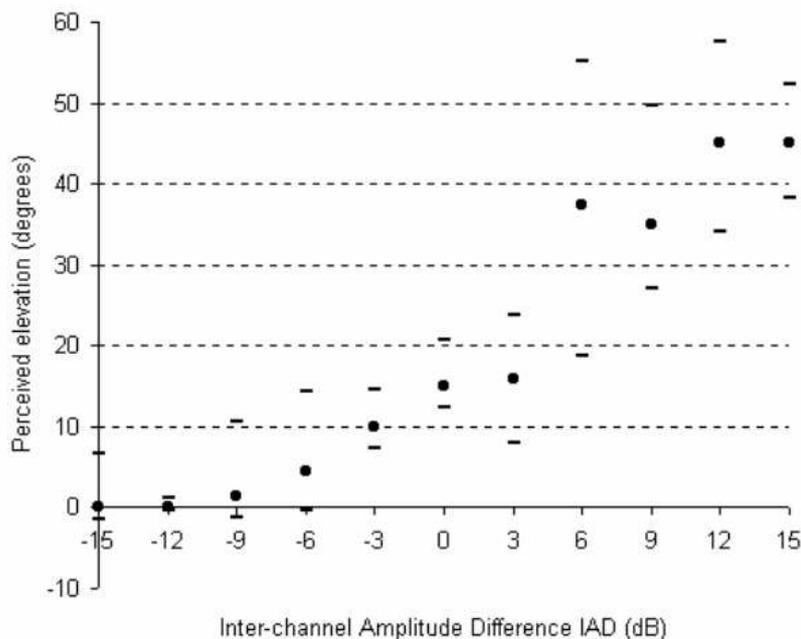


Abb.40: Lokalisation von stereofon abgebildeter Phantomschallquellen in der Medianebene (0° - 45°); Stereofone Abbildung durch Pegelunterschiede.¹⁰⁰

3.2 Seitliche Phantomschallquellen

Äquivalenz zum Verhalten zwischen unteren und oberen Lautsprechern ist auch bei seitlichen Phantomschallquellen zwischen L-Ls und R-Rs zu beobachten. In Abb. 41 ist dargestellt das der Bereich zwischen 30° und 120° besonders große Lokalisationsstreuungen aufweist. Schon leichte Kopfbewegungen lassen das Hörereignis durch Laufzeit- und Pegelunterschiede nach vorne oder nach hinten springen. Hier gilt das „Gesetz der ersten Wellenfront“. Phantomschallquellen in

⁹⁹ vgl. Barbour, 2003, S. 6-7; vgl. Theile und Wittek, 2011a, S. 35

¹⁰⁰ Barbour, 2003, S. 3

seitlichen Bereichen sind demzufolge nicht stabil und sollten gemieden werden, um eine Verwirrung des Zuhörers zu vermeiden.¹⁰¹

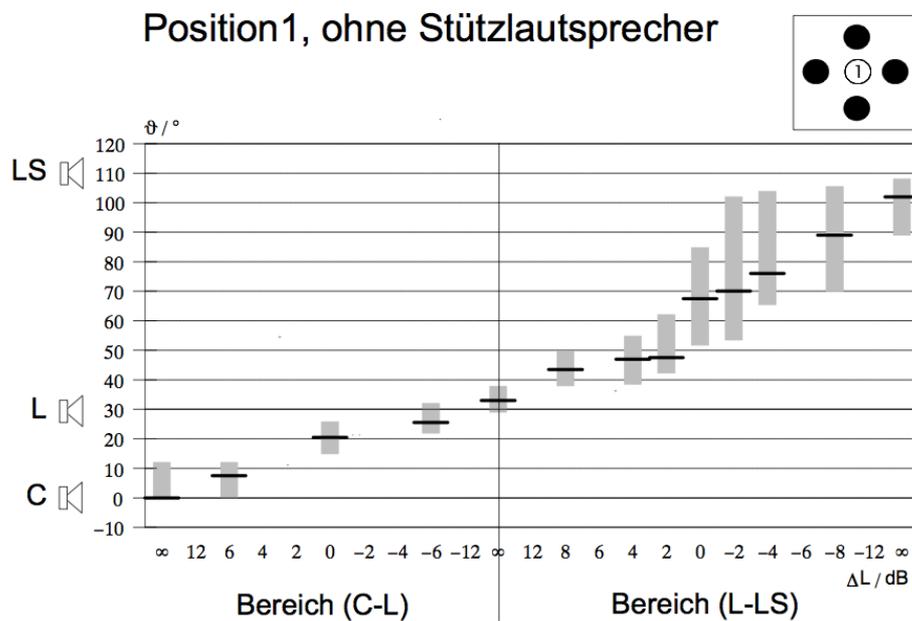


Abb.41: Lokalisation seitlicher Schallquellen.¹⁰²

3.3 Füllen der Zwischenräume

Mit Aufnahmeverfahren, die nicht zu einer ausgeprägten Phantomschallquellenbildung führen, ist es jedoch möglich, die Flächen zwischen den unteren und oberen Lautsprechern zu füllen. Hierzu sind vor allem **Groß-AB-Anordnungen**¹⁰³, mit einer Mikrofonbasis von 1 bis 3m, ausgezeichnet geeignet. Anordnungen mit derartig großen Basen besitzen zwar einen sehr engen Aufnahmewinkel, erzeugen jedoch eine beeindruckende räumliche Abbildung. Eine korrekte Richtungsabbildung ist mit solchen Anordnungen nicht möglich, gestattet jedoch klanglich ausgeglichene, platzunabhängige Darstellung von ausgedehnten Klangquellen und des reflektierten Schalls.¹⁰⁴

¹⁰¹ vgl. Sengpiel, 2000, S. 1; vgl. Zieglmeier, 1996, S. 159-161

¹⁰² Zieglmeier, 1996, S. 159-161

¹⁰³ Groß-AB-Anordnungen erzeugen Laufzeitunterschiede, die weit über dem Wert für komplette Auslenkung liegen. Ab $\Delta t > 1$ ms erscheinen Phantomschallquellen zunehmend breiter und unschärfer!

¹⁰⁴ vgl. Theile und Wittek, 2011a, S. 35; vgl. Dickreiter, 2011, S. 167-169

Durch Laufzeitdifferenzen einzelner Reflexionen zwischen den Mikrofonen wird die Reflexionendichte reduziert und das Klangbild in die Höhe erweitert. Frühe Reflexionen werden ähnlich dem natürlichen räumlichen Schallfeld in den Flächen zwischen den Lautsprechern verteilt, was sich positiv auf die Güte der räumlichen Darstellung auswirkt. Auf Grund ausgebreiteter Verteilung der Reflexionen werden räumliche Attribute, wie Entfernung und Tiefe, durch das Gehör leichter wahrgenommen und Klangfärbungen durch überlagernde Schallereignisse werden verringert.¹⁰⁵ (s. Abb. 42)

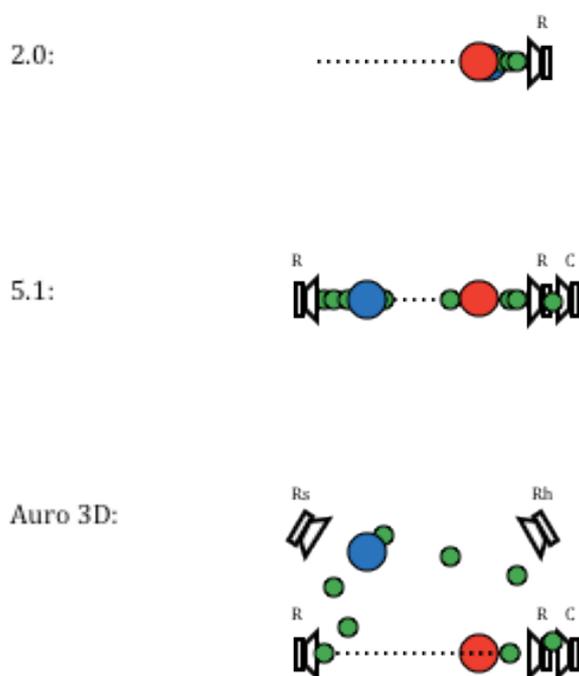


Abb. 42: Räumliche Verteilung von Schallquellen bei 2-Kanal-Stereo, 5.1-Surround und Auro 3D. Rot und Blau: Direktschall, Grün: Diffus-schall.¹⁰⁶

¹⁰⁵ vgl. Theile und Wittek, 2011a, S. 35

¹⁰⁶ vgl. Theile und Wittek, 2011a, S. 35

3.4 Diffuser Schall

Die Wirkung der **Umhüllung** des Zuhörers ist stark abhängig vom **Korrelationsgrad** der diffusen Informationen (Nachhall oder Atmo). Nur heterogene, diffuse Signale auf allen Lautsprechern, die vor allem bis in die tiefen Frequenzen einen niedrigen Korrelationsgrad besitzen, erzeugen ein Gefühl der Umhüllung und einen großen Diffusfeld-Sweet-Spot. Durch Übersprechen benachbarter Mikrofone entstehen **teilkohärente Signale**, die sich bei der Wiedergabe als **Monoanteil** im diffusen Schallfeld auswirken. Sie führen zu Klangverfärbungen und schmälern die wahrgenommene Räumlichkeit ein. Dekorrelation von diffusen Schallfeldern ist durch Laufzeit- und Pegelunterschiede erreichbar, z. B. durch Verändern der Basisbreite bzw. der Richtcharakteristik der Mikrofone. Für die Aufzeichnung des diffusen Feldes sind demzufolge nur Mikrofonanordnungen geeignet, die aufgrund ihrer kleinen Diffusfeld-Korrelation, keine Einschränkung der räumlichen Breite bewirken.¹⁰⁷ Untersuchungen zur „Voraussage der wahrgenommenen räumlichen Breite stereofoner Mikrofonanordnungen“¹⁰⁸ (s. auch Abb. 43) haben ergeben, dass folgende Anordnungen diese Vorgaben erfüllen:

- Koinzidenzverfahren:
Blumlein, Öffnungswinkel: $\pm 45^\circ$, Basis = 0 m;
- Laufzeitstereofonie:
AB (Omnidirectional), Öffnungswinkel: 0° , Basis: $> 0,35$ m;
- Äquivalenzstereofonie:
Äquivalent (Cardioid), Öffnungswinkel: $\pm 30^\circ$, Basis $> 0,5$ m

¹⁰⁷ vgl. Nipkow, 2011, S. 21; vgl. Theile und Wittek, 2011a, S.37

¹⁰⁸ vgl. Riekehof-Böhmer, 2010, S. 1-12

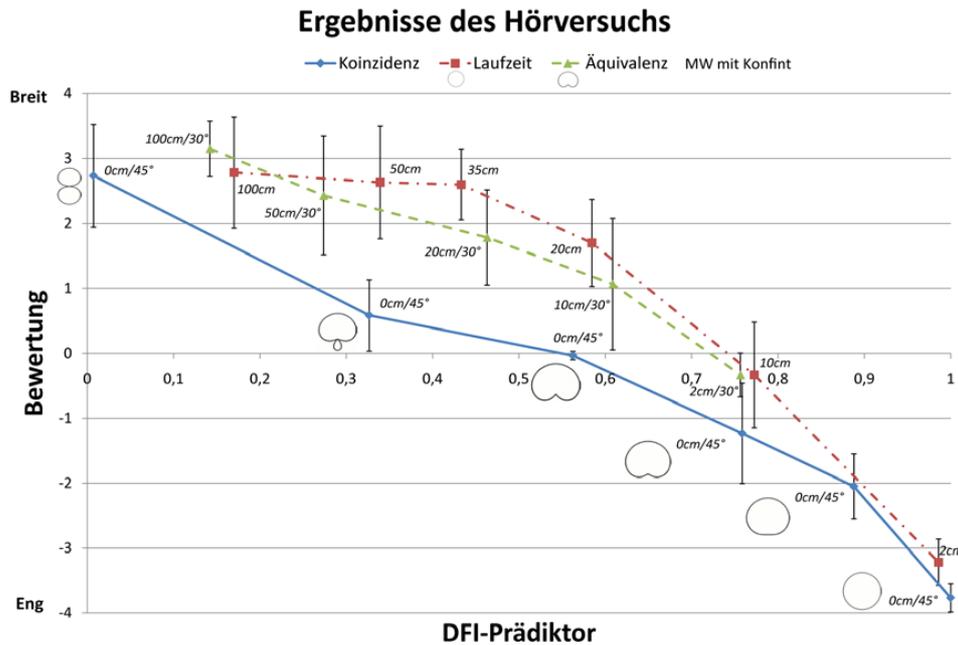


Abb. 43: Voraussage der wahrgenommenen räumlichen Breite stereofoner Mikrofonanordnungen¹⁰⁹; Werte > 2 auf der y-Achse ergeben keine Einschränkung der räumlichen Breite

Laufzeit- und Äquivalenzanordnungen schneiden auch diesmal besser ab als koinzidente Verfahren. Blumlein ist die einzige koinzidente Anordnung, die für die Aufnahme von geringfügig korrelierten Signalen im Diffusfeld akzeptabel ist.

3.5 Mögliche Verteilung der Schallfelder

In Abb. 44 ist eine mögliche Verteilung der Schallfelder zwischen den Lautsprecherpaaren eines Auro-3D-Wiedergabesystems (9.1) dargestellt.

Primäre Aufgabe der unteren Frontlautsprecher ist die korrekte Wiedergabe des frontalen Hörereignisses. Sie sollen eine Lokalisation der aufgenommenen Instrumente möglichst genau ermöglichen. Verfärbungen durch Bildung von Phantomschallquellenschatten sollten vermieden werden, was mit steigender Lautsprecheranzahl zunehmend schwieriger wird. In diesem Sinne ist ein Übersprechen zwischen Mikrofonen bei der Aufnahme zu vermeiden.

¹⁰⁹ vgl. Riekehof-Böhmer, 2010, S. 10

Phantomschallquellen außerhalb der L-C-R- und Lh-Rh-Basis, sind mit Einschränkungen möglich, sind jedoch nicht stabil und führen zur Klangfärbung.¹¹⁰

Abbildung von Direktschallquellen in diskret zugewiesenen Lautsprechern ist möglich, jedoch bei der Aufnahme mit einem Hauptmikrofonverfahren - auf Grund von Übersprechen zwischen den Mikrofonen - schwer zu realisieren (s. Kap. 3.1 und Kap. 3.6).

Die Höhen-Lautsprecher und die Surround-Lautsprecher übertragen Rauminformationen. Sie tragen stark zur Umhüllung des Zuhörers bei.

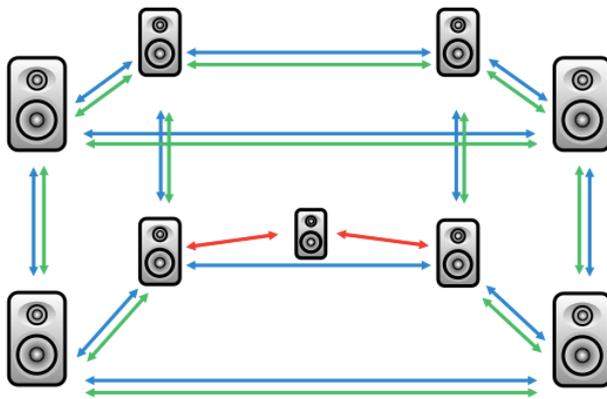


Abb. 44: Mögliche Verteilung der räumlichen Attribute bei Auro-3D (9.1) Wiedergabe. Rot =Direktschall, Blau = Erstreflexionen, Grün = Nachhall; Auf der L-C-R-Basis wird Direktschall der Schallquelle abgebildet. Auf den hinteren und oberen Lautsprechern wird Räumlichkeit in form von dekorreliertem Diffusschall übertragen.

3.6 Kanalübersprechen

Während für gute räumliche Ergebnisse der Diffusschallanteil möglichst unkorreliert und der Direktschallanteil klein sein sollte, ist die Forderung an die Signale von Direktschall adversativ; eine scharfe Abbildung zwischen zwei benachbarten Lautsprechern ist nur mit kohärenten Signalen möglich, die sich nur gering in Pegel- und Zeitdifferenz unterscheiden. Kohärente Signale auf mehr als zwei

¹¹⁰ vgl. Barbour, 2003, S. 6-7; vgl. Dickreiter, 2011, S. 139

Lautsprechern wirken sich zunehmend negativ auf die Lokalisationsschärfe und Klangfarbe aus, die auch stark von der Hörposition im Abhörraum abhängig ist. Die Gefahr von unerwünschtem Übersprechen (Crosstalk) zwischen den Mikrofonen steigt jedoch mit der Anzahl der Wiedergabe-Kanäle. Eine befriedigende akustische Trennung zwischen Direktschall und Diffus-schallkomponenten wird zunehmend komplexer. (s. Abb. 45)

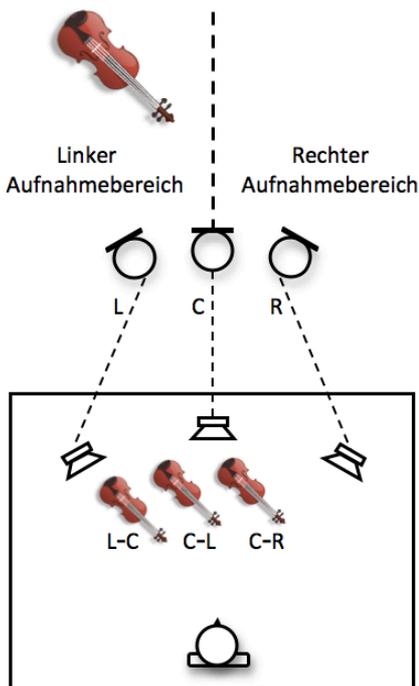


Abb. 45: Kanalübersprechen; Wünschenswert ist eine Kanaltrennung über 15 dB oder Reduktion des Effektes durch große Laufzeiten¹¹¹

Bei der Aufnahme kann Übersprechen entweder durch große Laufzeiten – wie sie bei Groß-AB-Verfahren entstehen - in der Auswirkung abgeschwächt oder durch optimierte Verfahren wie „OCT“ vermieden werden.¹¹²

¹¹¹ vgl. Theile, 2003, S.32

¹¹² vgl. Nipkow, 2011, S. 22; vgl. Theile und Wittek, 2011a, S. 36

KAPITEL 4: Konzeption neuer Hauptmikrofone für Auro-3D

In diesem Kapitel werden zwei Hauptmikrofonverfahren gezeigt, die auf Laufzeit (Omni-Array) und Äquivalenz (OCT9) beruhen. Auf die Darstellung von Hauptmikrofonverfahren, die koinzident angeordnet sind und rein auf Intensitätsunterschieden basieren, wurde auf Grund bereits getätigter Untersuchungen verzichtet.¹¹³

4.1 Omni-Array (Decca-Tree + 4)

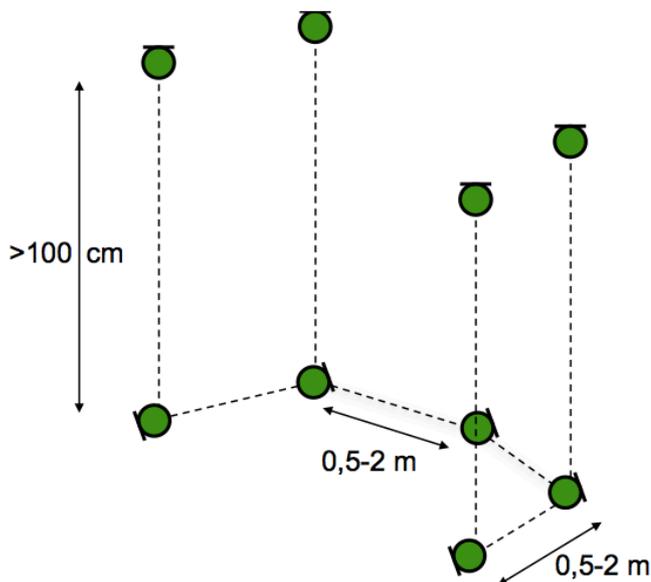


Abb. 46: Omni-Array Hauptmikrofon für Auro-3D (9.1)¹¹⁴

Das Omni-Array (s. Abb. 46) ist eine Variation des „Decca-Tree“, welche für die Abbildung der Front auf einer weiten Dreiecksanordnung L–C–R basiert. Der „Decca-Tree“ wurde von der Firma Decca bereits in den 60er Jahren für stereo-phonie Aufnahmen entwickelt.¹¹⁵ Das L-C-R-Mikrofon, die Surround-Mikrofone als auch die Höhen-Mikrofone des Omni-Arrays besitzen – wie die Bezeichnung des Systems vermuten lässt – eine Kugelcharakteristik und basieren auf dem Prinzip

¹¹³ vgl. Wöhr, 1988, S. 302; Wittek, 2011d

¹¹⁴ vgl. Wittek, 2011a, S. 14

¹¹⁵ vgl. Gernemann, 2002, S. 1-2

der AB-Mikrofonierung. Diese Anordnung erzeugt zwar eine stabile, jedoch keine proportionale Richtungsabbildung. Der räumliche Eindruck ist eindrucksvoll und meistens größer als in der Wirklichkeit.¹¹⁶

Da nach Gernemann die verwendeten Kugeln für Schall aus allen Richtungen so gut wie gleich empfindlich sind, besteht die Möglichkeit – bei gleicher R/D-Ratio (Balance zwischen Direkt- und Diffusschall) – mit den Mikrofonen näher an das Hörereignis heranzugehen, was einen vergleichbaren Raumeindruck mit gutem Näheindruck ermöglicht.¹¹⁷ (s. Abb. 47)

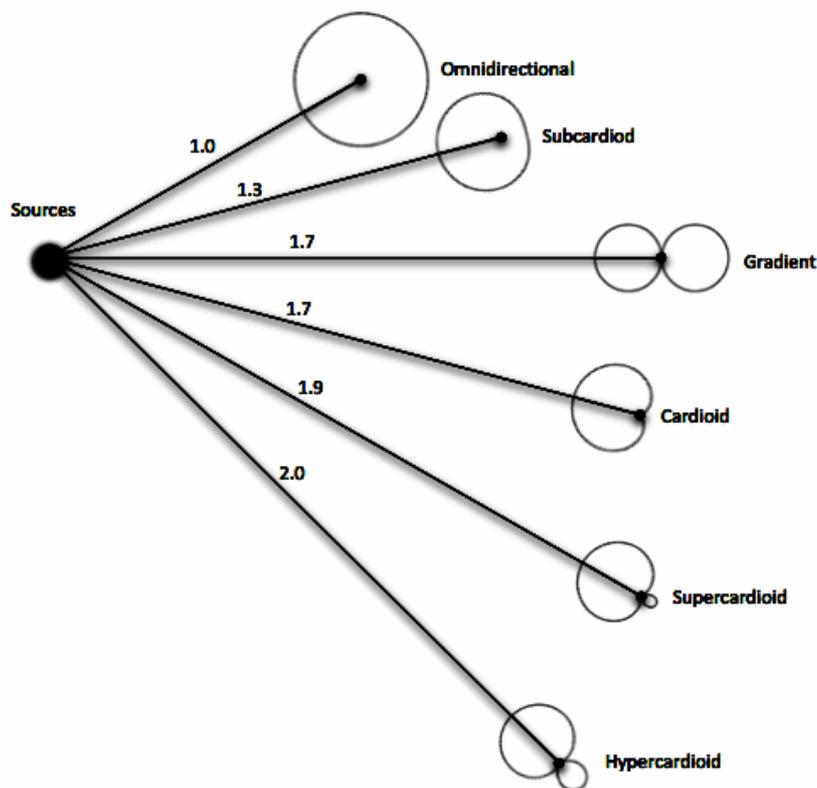


Abb. 47: Äquivalentes Verhältnis von R/D-Ratio bei verschiedenen Abständen zur Quelle¹¹⁸

¹¹⁶ vgl. Theile und Wittek, 2011b, S. 8

¹¹⁷ vgl. Gernemann, 2002, S. 3-4

¹¹⁸ vgl. Dickreiter, 2011, S.32

Die unteren L-C-R-Mikrofone zeigen auf den Klangkörper und die hohen Mikrofone nach oben, während die unteren Surround-Mikrofone nach hinten gerichtet sind. Der Abstand der drei Frontwandler sollte nah zum Klangkörper gewählt werden (1,5-2 m). Die Abstände zwischen den einzelnen Mikrofonen zueinander sind von 0,5 bis 2 m auf der Horizontalebene und größer oder gleich 1 m auf der Vertikalebene variabel veränderbar und werden situativ nach Anforderung und Klangvorstellung des Tonmeisters hörend verändert. Bei solch großen Mikrofonbasen wird durch erhöhte Aufnahme von Reflexionen und Nachhall eine gute räumliche Abbildung erzeugt. Um störende Lokalisation von Schallquellen in den Surround-Lautsprechern zu vermeiden, werden für Surround-Mikrofone untereinander und zu L-C-R-Mikrofonen etwas größere Abstände verwendet als für Mikrofone des Frontsystems. Prinzipiell wird bei der Ausrichtung auf Lautstärkerelation, ein ausgewogenes Klangverhältnis der Instrumenten-Gruppen, auf die Breite der Basis und gute Dekorrelation der Surround- und Höhen-Signale geachtet. Zu kleine Mikrofonbasen bewirken aufgrund mehrfacher Bildung von Phantomschallquellen Verfärbungen des Klangbildes. Bei großen Mikrofonbasen ist eine Lokalisation der Schallquellen nicht mehr möglich. Es entsteht auf Grund unkorrelierter Signale ein hoher Diffusanteil, der zu keinen ausgeprägten Phantomschallquellen führt, jedoch einen starken Räumlichkeitseindruck erzeugt. Der Korrelationsgrad ist abhängig von der Frequenz der Signale und der Basis zwischen den Mikrofonen. Durch die Mikrofonbasen wird die mögliche, untere Grenzfrequenz für dekorrelierte Diffusanteile eines Signals eingestellt. In Abb. 49 sind Anhaltspunkte für die Positionierung der Mikrofone aufgeführt, die eine Aufnahme von unkorrelierten Diffusschall ermöglichen.¹¹⁹ In Abb. 48 wird das Impulsverhalten der Omni-Array-Anordnung demonstriert.

¹¹⁹ vgl. Gernemann, 2002 , S. 11

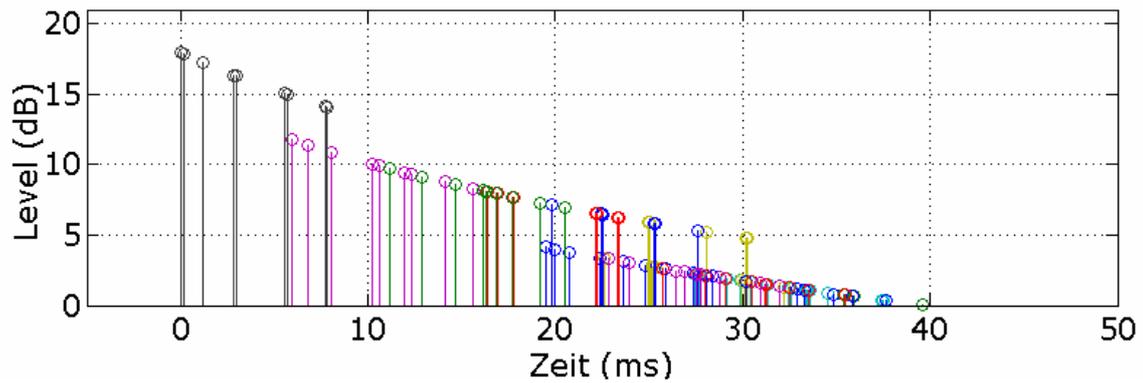


Abb.48: Impulsverhalten einer Omni-Array-Anordnung¹²⁰ Mit gleichen Farben sind einzelne, mehrfach Abgebildete Reflexionen gemeint.

$a(f) = \frac{c}{2 \cdot f} = \lambda/2$		
f	λ	$\lambda/2 = a$
	$\Delta\varphi = 360^\circ$	$\Delta\varphi = 180^\circ$
10000 Hz	0,0343 m	0,0172 m
5000 Hz	0,0686 m	0,0343 m
2000 Hz	0,172 m	0,086 m
1000 Hz	0,343 m	0,172 m
500 Hz	0,686 m	0,343 m
200 Hz	1,72 m	0,86 m
100 Hz	3,34 m	1,72 m
50 Hz	6,86 m	3,43 m
20 Hz	17,2 m	8,6 m

Abb. 49: Einfluss der Wellenlänge auf die Phasendifferenz.¹²¹

Die Anordnung der einzelnen Mikrofone beim Omni-Array ähnelt sehr der Geometrie der Lautsprecherpositionen bei Auro-3D-Wiedergabe.

¹²⁰ Theile und Wittek, 2011a, S.36

¹²¹ vgl. Sengpiel, 1995, S. 1

Die einzelnen Mikrofon-Kanäle werden diskret den zugehörigen Lautsprecherkanälen zugeordnet. Ein auf Kugeln basiertes Hauptmikrofon ist für korrekte Richtungsabbildung nicht geeignet. Für die Verbesserung der Lokalisation der einzelnen Instrumentengruppen sind zusätzliche richtungsvorgebende Stützmikrofone notwendig.¹²²

4.2 OCT9 (OCT-Surround + 4)

Das von Helmut Wittek vorgeschlagene OCT9¹²³ (Abb. 50) basiert auf der von Theile entwickelten OCT-Aufnahmetechnik¹²⁴. Diese wurde für gute Abbildungseigenschaften von den vorderen drei Kanälen L-C-R (-30° bis +30°) einer Surround-Aufnahme optimiert. Das Prinzip basiert auf der getrennten Betrachtung von benachbarten Sektoren L-C, C-R, die einzeln als unsymmetrische Äquivalenzanordnungen zu betrachten sind und dadurch eine gute Kanaltrennung erzeugen. Für optimale Separation zwischen benachbarten Lautsprecherbasen L-C und C-R werden bei OCT drei richtende Mikrofone angewandt, die diskret den Kanälen L, C und R zugeordnet werden. Diese Anordnung dient meist der Übertragung des direkten Hörereignisses und wird in dieser Arbeit als L-C-R-Mikrofon bezeichnet. Die Surround-Kanäle Ls, Rs sowie die Höhen-Kanäle Lh, Rh, Lsh und Rsh, dienen vorwiegend der Übertragung der Raumanteile und werden durch Druckgradientenempfänger erfasst. In Abb. 51 wird das Impulsverhalten der OCT9-Anordnung demonstriert.

¹²² vgl. Theile, 2000, S. 6; vgl. Theile, 1996, S. 144

¹²³ vgl. Wittek, 2011a, S. 13

¹²⁴ OCT= Optimized Cardioid Triangle

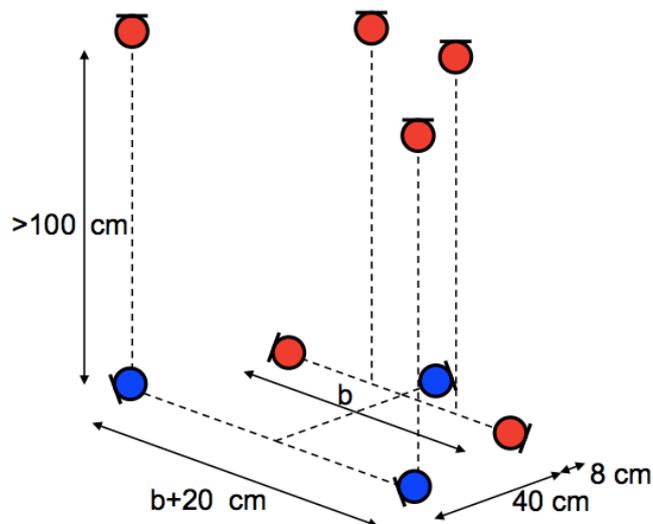


Abb. 50: OCT9 Hauptmikrofon für Auro 3D (9.1)¹²⁵; Abgeleitet aus der OCT-Surround Technik (G. Theile), $b = 40 - 90\text{cm}$; Die einzelnen Kanäle werden entsprechend den zugehörigen Kanälen der Wiedergabeeinrichtung diskret zugeordnet; Gemischtes Aufnahmeverfahren (Pegel- und Laufzeitdifferenzen); OCT-Array mit zwei Supernieren (CCM41) für L,R und einer Niere (CCM4) für C. Surroundkanäle über zwei nach hinten gerichtete Nieren (CCM4) mit Basis = $b + 20\text{ cm}$. Höhenkanäle mit vier, nach oben gerichteten Supernieren (CCM41).

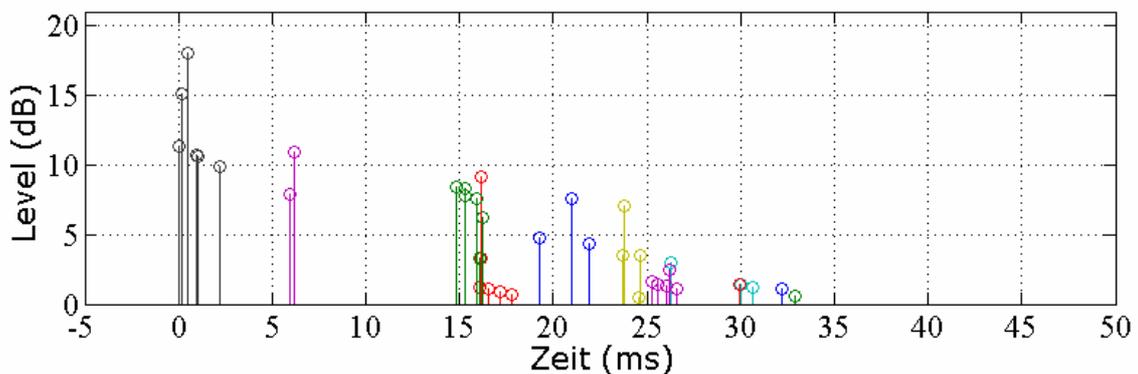


Abb. 51: Impulsverhalten einer OCT9-Anordnung¹²⁶; Mit gleichen Farben sind einzelne, mehrfach abgebildete Reflexionen gemeint.

¹²⁵ vgl. Wittek, 2011a, S. 13

¹²⁶ Theile und Wittek, 2011a, S.36

Die dürftige Bassübertragung von Druckgradienten ist in Fällen hilfreich, in denen tiefe Frequenzen nicht erforderlich sind, jedoch bei Relevanz mittels Entzerrung oder Anpassungen am Mikrofon-Setup (wie Beispielsweise in Abb. 52 dargestellt) auszugleichen.¹²⁷

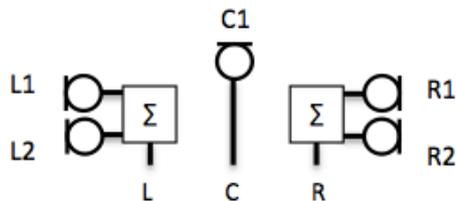


Abb. 52: Alternative OCT Konfiguration für verbesserte Basswiedergabe; L1/R1: Superniere; C1: Niere; L2/R2: Kugel, LP (40 Hz).¹²⁸

Die Aufstellung und Ausrichtung des OCT9-Systems erfordert wenig Zeitaufwand. Wenn die akustischen Voraussetzungen im Raum gut sind und der Klangkörper ausbalanciert ist, reicht bereits ein OCT9-Hauptmikrofon für ein harmonisches, natürliches, räumliches Klangbild aus. Besonders die Lokalisation von Direktschall und die Entfernung und Ausdehnung der Räumlichkeit kann gut dargestellt werden.¹²⁹

L-C-R-Mikrofon

Um eine effektive Dämpfung von Kanalübersprechen (Crosstalk) zu erreichen, werden für den L- und R-Kanal zwei Supernieren mit einem Versatzwinkel von $\pm 90^\circ$ und einer Basis von 40 bis 90 cm – je nach gewünschtem Aufnahmewinkel – verwendet. Durch die modifizierbare Basisbreite zwischen L-R ist der Aufnahmewinkel von 90° bis 180° frei bestimmbar. Um eine ausgewogene Schallquellenverteilung über die gesamte Basis L–C–R sicherzustellen, weist der Center-Kanal

¹²⁷ vgl. Betz, 2000, S. 486

¹²⁸ vgl. Theile, 2003, S. 38

¹²⁹ vgl. Theile, 1984, S. 180

einen in der Basismitte befindliches sowie um 8 cm nach vorne versetzte Mikrofon mit Nieren-Charakteristik auf. Durch eine gute Trennung der Lautsprechersektoren L–C und C–R wird eine Färbung durch Kammfiltereffekte vermieden, bei gleichzeitig guter Richtungsstabilität von Schallquellen aus dem Frontbereich. Schallquellen, die sich im Aufnahmebereich des linken Sektors befinden, werden hauptsächlich von Mikrofonen des linken Sektors aufgenommen. Diese Anforderungen gelten auch für Mikrofone des rechten Sektors.

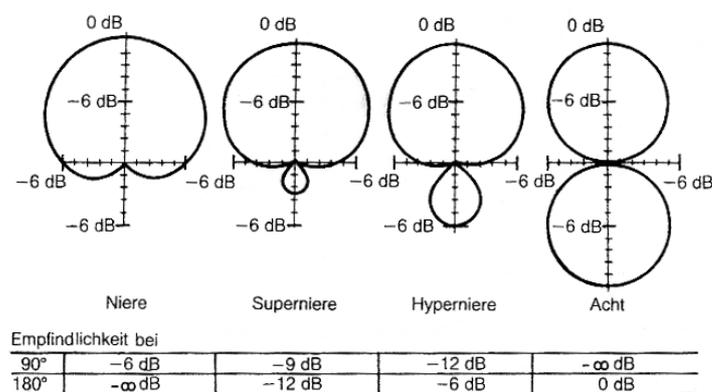


Abb. 53: Theoretische Richtungsmaße für verschiedene Winkelbereiche.¹³⁰

Von links kommender Schall wird primär von der linken Superniere aufgezeichnet. Die Niere des C-Kanals wird später, sowie um ca. 6 dB gedämpfter angesprochen. Nach einer weiteren Verzögerung und Dämpfung um ca. 10 dB (L–R) empfängt die rechte Superniere das Signal mit der Rückkeule und somit gegenphasig.

130 Dickreiter, 2011, S.97

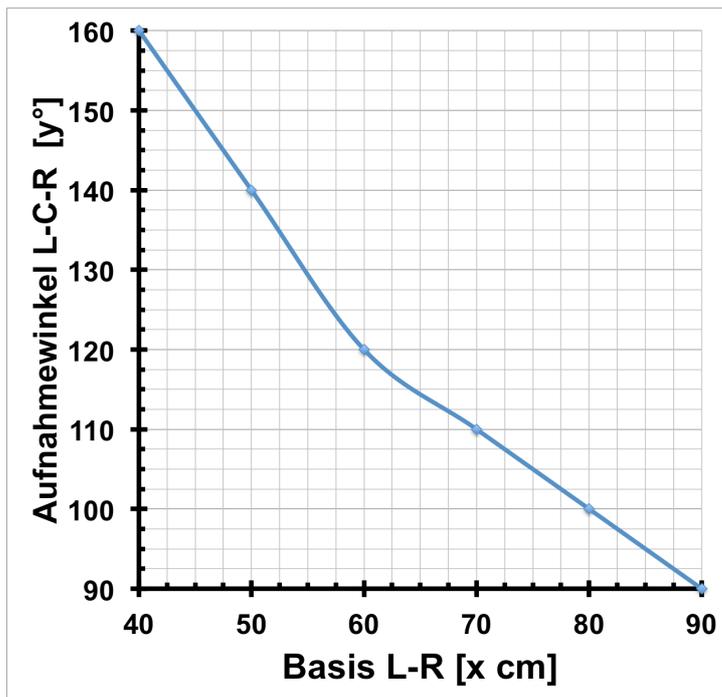


Abb. 54: Mikrofonbasis L – R von OCT-Frontsystem und zugehörige Aufnahmewinkel L-C-R¹³¹

Bei Schalleinfall aus der 0°-Richtung wird vor allem die zentrale Niere angesprochen, was in einer sauberen Abbildung des C-Kanals resultiert. Die Übersprechdämpfung vom C-Kanal zum L- und R-Kanal beträgt ca. 10 dB.¹³² (s. Abb.53)

Surround-Mikrofone

Für die Surround-Kanäle Ls, Rs werden zwei Nieren mit einem Versatzwinkel von $\pm 180^\circ$ verwendet. Die Basis Ls-Rs entspricht der Basis L-R +20 cm und ist im Bezug zur L-R Basis parallel um 40 cm nach hinten versetzt.

Höhenmikrofone

Für die Höhenmikrofone werden vier Supernieren verwendet, die in einer Höhe von >1 m über dem unteren System angeordnet werden. Alle Höhenmikrofone

¹³¹ vgl. Dickreiter, 2011, S.197

¹³² vgl. Dickreiter, 2011, S. 196

weisen nach oben um eine gute Trennung zum unteren System zu gewährleisten. Dadurch soll das Aufnehmen von kohärenten Anteilen zwischen unterem und oberem System vermieden werden, um möglichst unkorrelierte Signale zum Füllen der Flächen zwischen den Lautsprechern zu erzeugen. Um eine symmetrische Abbildung der horizontalen Basisbreite zum unteren Frontsystem zu erhalten, werden - ergänzend zum vorgeschlagenen Aufbau von Wittek - die vorderen Mikrofone der Höhenebene mit variabler Basis über dem OCT-Frontsystem angeordnet. Dabei wird der Aufnahmewinkel (75%) vom oberen AB-System an das untere OCT-Frontsystem angeglichen. Die Anpassung ist komfortabel mit dem online verfügbaren „Image Assistant 2.1“¹³³ realisierbar. In Abb. 55-57 ist der Unterschied ersichtlich dargestellt.

Die Surroundmikrofone Lsh und Rsh des Höhensystems werden direkt über den zugehörigen Surroundmikrofonen Ls und Rs der unteren Ebene angeordnet.

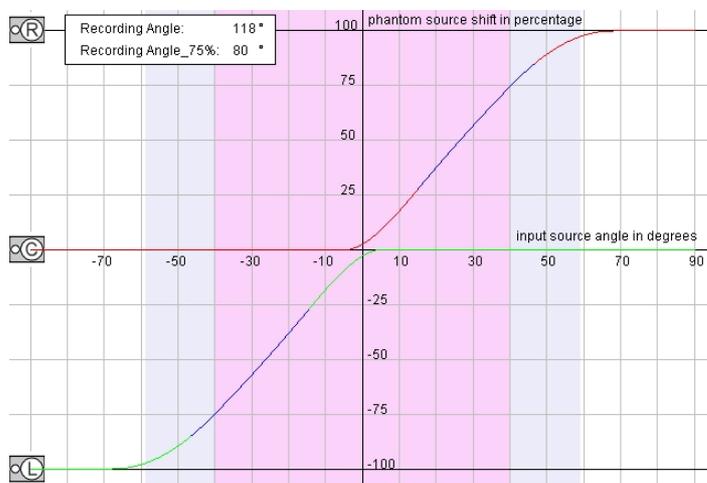


Abb. 55: OCT-Front mit Basis = 70 cm ergibt einen Aufnahmewinkel(75%) = 80°

¹³³ Wittek, 2011c

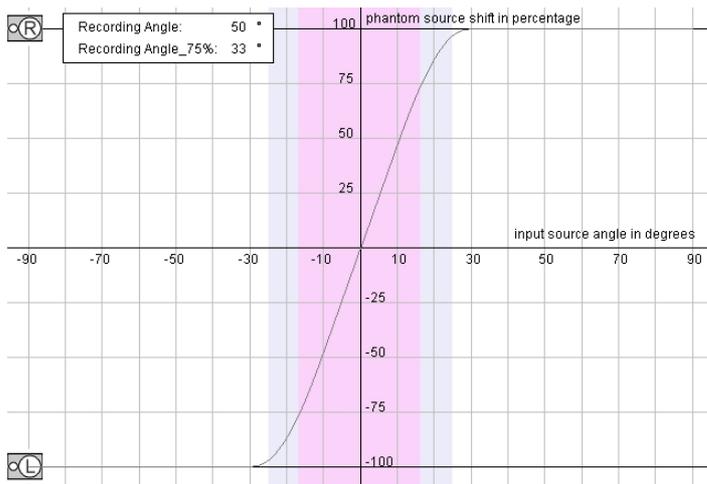


Abb. 56: ab-Höhen des OCT9 ohne Anpassung. Basis = 70 cm ergibt Aufnahmewinkel(75%) = 33°

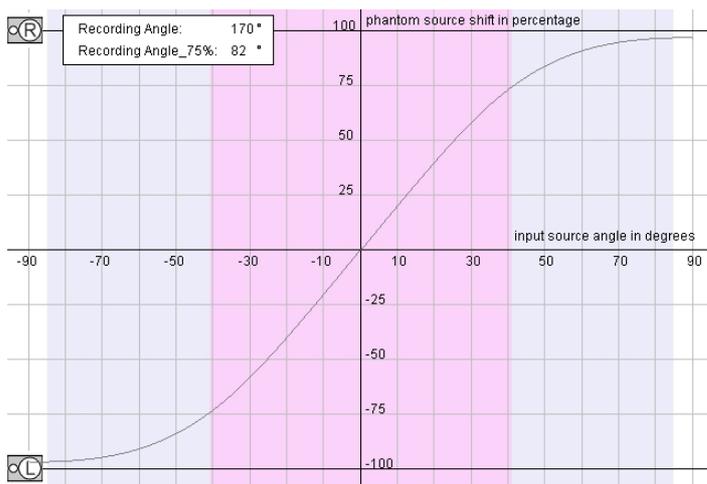


Abb. 57: ab-Höhen des OCT9 mit Anpassung. Basis = 32 cm ergibt Aufnahmewinkel(75%) = 82°

Vorgehensweise bei der Positionierung

Die Mikrofonabstände der OCT9-Anordnung müssen für gute Ergebnisse eingehalten werden. Bei der Positionierung der Anordnung und Einstellen des Aufnahmewinkels ist nach folgender Reihenfolge vorzugehen:

- Durch die Wahl der Entfernung zum Klangkörper wird die R/D-Ratio¹³⁴ des Frontdreiecks festgelegt.
- Ausgehend von der gewählten Position, wird der Aufnahmewinkel geschätzt.
- Mit Hilfe der Tabelle in Abb. 54 bzw. „Image Assistent“¹³⁵ wird der Aufnahmewinkel ermittelt und die resultierende L-R Basis eingestellt.
- Die Basis der unteren Surround-Mikrofone ist um 20 cm größer zu wählen, als die Basis L-R des Frontsystems.
- Die Höhen-Mikrofone werden hörend positioniert. Um die Korrelation zwischen unterem und oberem System möglichst klein zu halten, werden Abstände größer oder gleich 1m gewählt.

Die Vorteile des OCT9-Systems sind niedriges Übersprechen zwischen den Aufnahmekanälen (kein "crosstalk"). Sehr ausgeglichene Lokalisation der Front und die Abwesenheit von Direktschall in den hinteren und Höhen-Kanälen führt zu einem großem Hörbereich. Die Korrelation von diffusen Signalen ist optimal niedrig. Raum- und Direktschallinformation werden gut getrennt.¹³⁶

¹³⁴ D/R-Ratio= Verhältnis von Direkt- zu Diffusschall

¹³⁵ Wittek, 2011c

¹³⁶ vgl. Dickreiter, 2011, S.199; vgl. Theile und Wittek, 2011b, S. 14

KAPITEL 5: Hörversuch

Das Erfassen von Werten durch herkömmliche Messinstrumente der Tontechnik haben nur bedingt Bedeutung bei der Bewertung von Hauptmikrofon-Verfahren. Die rein subjektive Bewertung ist deshalb ein wichtiges Instrument, denn Präferenzen und Geschmäcker können sehr unterschiedlich sein. Um zu untersuchen, ob die theoretischen Gesetzmäßigkeiten auch den subjektiven Präferenzen realer Subjekte entsprechen, wurde ein Hörversuch durchgeführt.

5.2 Organisation des Hörversuchs

5.2.1 Aufnahme der Testsignale

Die Aufnahme der Testsignale fand im „Hegel-Saal“ des „Kultur- und Kongresszentrum Liederhalle Stuttgart“ statt. Der aufgenommene Klangkörper war ein Orchester unter der Leitung des Gastdirigenten Fritz Roth. Das gespielte Werk „Bilder einer Ausstellung“ wurde ursprünglich von „Modest Petrowitsch Mussorgski“ als Klaviersolo verfasst und von „Maurice Ravel“ für Orchester bearbeitet.

Ein Orchester als Klangquelle wurde gewählt, weil für den Hörvergleich ein Klangkörper mit möglichst großer Ausdehnung notwendig war. Wegen der großen Anzahl der Mikrofone und der ohne Publikum profilierten akustischen Eigenschaften wurde eine Generalprobe ausgesucht.

Ziel der Aufnahme war die Schaffung eines realistischen Eindrucks von direktem Schall aus dem Frontbereich sowie Erstreflexionen und vorwiegend diffusem Schall von den Seiten, hinten und von oben. (s. Abb. 44)

5.2.2 Akustik des AufnahmeRaums

Der „Hegel-Saal“ des „Kultur- und Kongresszentrum Liederhalle Stuttgart“ hat eine Fläche von ca. 858 m² und einen unregelmäßigen, siebeneckigen Grundriss, bei dem keine Wand parallel zum gegenüberliegenden verläuft. Der mit einem herab-

hängenden Glassegel bestückte „Hegel-Saal“ besitzt eine herausragende Akustik für beeindruckende Auro-3D-Aufnahmen.

5.2.3 Audiotechnik

Die gesamte beteiligte Audiotechnik war eine Leihgabe der Firma Schoeps.

5.2.3.1 Mikrofon-Vorverstärker und Interface:

- RME Mixtasy (verbunden über ADAT und BNC mit Fireface 800)
- Focusrite OctoPre MkII, (verbunden über ADAT mit Fireface 800 und BNC an Mixtasy)
- RME Fireface 800 (Clock master; über Firewire 800 an Mac mini angebunden)
- SoundDevices 788t (verbunden über Analoge Eingänge des Fireface 800)

5.2.3.2 Rechner, DAW und Monitoring:

Ein Mac mini mit 2,3 GHz dual-core Intel Core i5, 2 GB Arbeitsspeicher und 500 GB Festplatte wurde in Kombination mit Nuendo 5 als Audiorechner verwendet. Die kleinen Abmessungen des „Mac mini“ waren optimal für den mobilen Einsatz geeignet.

Während der Aufnahme wurde mit einem „Ultrasone PRO 550“ Kopfhörer abgehört, da ein Auro-3D-Abhörplatz nicht realisierbar war.

5.2.3.3 Verwendete Mikrofone:

Für die Aufnahme des Testmaterials wurden Kleinmembran-Mikrofone der Marke Schoeps verwendet. Diese Mikrofone der CCM-Baureihe besitzen eine rein akustische Entzerrung und sind wegen der kompakten Bauweise sehr handlich und bequem einsetzbar. Insgesamt 18 Mikrofone mit drei unterschiedlichen Richtcharakteristiken waren im Einsatz. Dazu gehören im einzelnen Mikrofone mit Kugel-, Nieren- und Supernierencharakteristik (CCM2; CCM4; CCM41).

Weitere Information zum Einsatz der einzelnen Mikrofone wurde im nächsten Kapitel (Kap. 4.1.6) aufgezeigt. Ausführliche Eigenschaften und technische Daten der Mikrofone sind auf der Homepage der Firma Schoeps zu finden.¹³⁷

5.2.4 Mikrofonierung

Um vergleichbare Bedingungen bei der Beurteilung zu gewährleisten, wurden oben beschriebene Hauptmikrofonverfahren simultan aufgezeichnet. Der Spurenplan ist in Abb. 58 dargestellt.

Spur No.	Mikrofon	Richtcharakteristik	Signal
1	Schoeps CCM2	Omni	Omni-Array_L
2	Schoeps CCM2	Omni	Omni-Array_R
3	Schoeps CCM2	Omni	Omni-Array_C
4	Schoeps CCM2	Omni	Omni-Array_Ls
5	Schoeps CCM2	Omni	Omni-Array_Rs
6	Schoeps CCM2	Omni	Omni-Array_Lh
7	Schoeps CCM2	Omni	Omni-Array_Rh
8	Schoeps CCM2	Omni	Omni-Array_Lsh
9	Schoeps CCM2	Omni	Omni-Array_Rsh
10	Schoeps CCM41	Supercardioid	OCT9_L
11	Schoeps CCM41	Supercardioid	OCT9_R
12	Schoeps CCM4	Cardioid	OCT9_C
13	Schoeps CCM4	Cardioid	OCT9_Ls
14	Schoeps CCM4	Cardioid	OCT9_Rs
15	Schoeps CCM41	Supercardioid	OCT9_Lh
16	Schoeps CCM41	Supercardioid	OCT9_Rh
17	Schoeps CCM41	Supercardioid	OCT9_Lsh
18	Schoeps CCM41	Supercardioid	OCT9_Rsh

Abb. 58: Spurenplan für die Aufnahme des Testmaterials

¹³⁷CCM (Compact Condenser Microphone):
<http://www.schoeps.de/de/products/categories/overview-compac>

5.2.4.1 Mikrofonanordnungen

Omni-Array (s. Kap 4.1)

Aufgenommen wurde mittels einer Omni-Array-Anordnung mit Basis L-R $b_{LR}=2$ m. Das Hauptmikrofon war unmittelbar hinter dem Dirigenten in einer Höhe von ca. 3,5 m aufgestellt. Der Abstand zum Klangkörper war ca. 2 m. In Abb. 59 wird das Mikrofonsetup gezeigt.



Abb. 59: Omni-Array--Anordnung bei der Aufnahme der Testsignale

OCT9 (s. Kap. 4.2)

Mit zwei übereinander angeordneten OCT-Surround-Schienen, die zueinander einen Abstand von 1 m hatten, wurde eine OCT9-Anordnung realisiert und aufgenommen. Das OCT9-Hauptmikrofon wurde hinter dem Dirigenten, in einer Höhe von ca. 3,5 m positioniert. Die Basis L-R $b_{LR}=0,7$ m führte zu einem Aufnahme winkel (75%) von ca. 84° . Die Basis Lh-Rh der Höhenmikrofone, mit $b_{LhRh}=0,32$ m wurde mit Hilfe von IMA an das untere System angepasst. Der Abstand zum Klangkörper ergab ca. 2 m. Abb. 60 zeigt das verwendete OCT9-Mikrofonsetup.

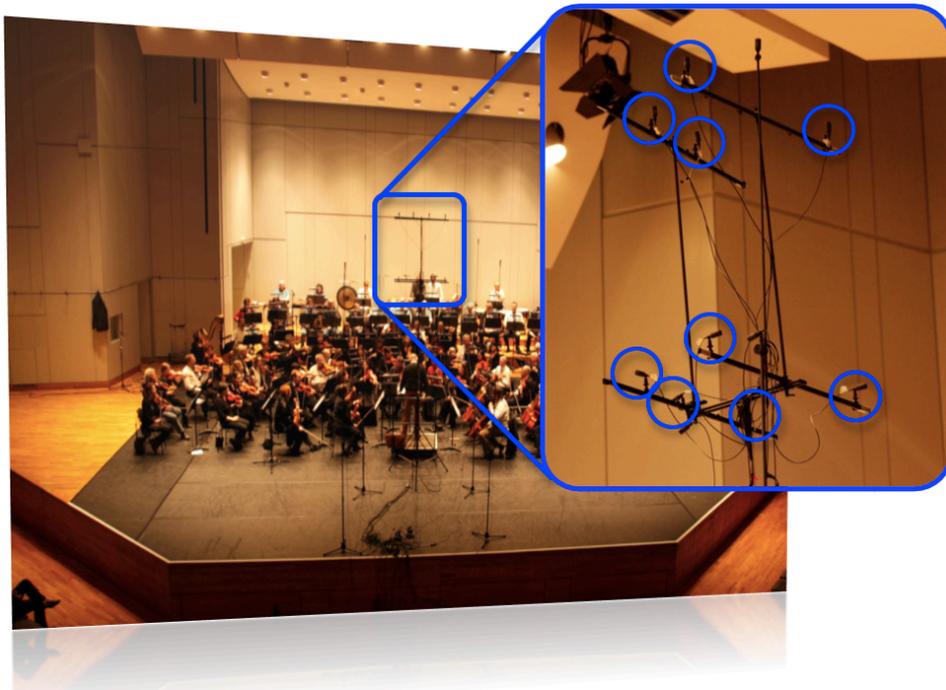


Abb. 60: OCT9-Anordnung bei der Aufnahme der Testsignale

5.3 Stimuli und Bearbeitung der Testsignale

Aus der gesamten Aufnahme wurde ein Stück (s. Abb. 61) mit 57 Sekunden Spiel­länge selektiert und in weiteren Prozessen bearbeitet. Um die schwache Wieder­gabe von tiefen Frequenzen der eingesetzten Druckgradienten auszugleichen, wurden die Einzelspuren des OCT9 um zwei tiefpassgefilterte Kugel-Signale erweitert. (s. Abb. 62) Außerdem fand bei den Signalen C, Ls, Rs, LH, RH, LsH und RsH eine Anhebung bei 120 Hz mit einem Low-Shelf-Filter statt. Die einzel­nen Spuren des OCT9-Testsignals sowie des Omni-Array wurden abgemischt und im Gesamtpegel angeglichen um Fehlurteile aufgrund von Pegeldifferenzen zu vermeiden.

Originaltitel	deutsche Über­setzung	Komponist	Orchestrierung	Zeit [s]
Избушка на курьих ножках (Баба-Яга)	Die Hütte auf Hüh­nerfüßen (Baba-Jaga)	Modest Mus­ sorgski aus dem Jahr 1874	Maurice Ravel	57

Abb. 61: Titel, Komponist und Orchestrierung der Testsignal

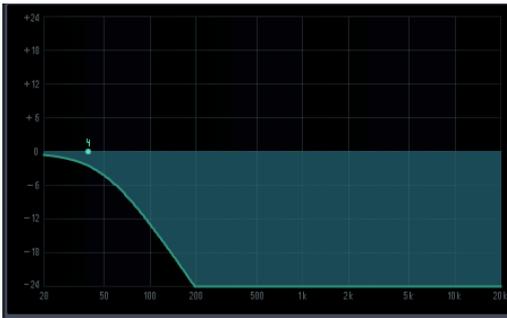


Abb. 62: *Bearbeitung der Kugel-Signale für die erweiterte OCT9-anordnung.*

Für den Hörversuch wurden zwei Auro-3D Testsignale mit folgenden Einzelspuren angefertigt:

Testsignal A: OCT9

- 01_OCT9_L
- 02_OCT9_R
- 03_OCT9_C
- 04_OCT9_LS
- 05_OCT9_RS
- 06_OCT9_LH
- 07_OCT9_RH
- 08_OCT9_LSH
- 09_OCT9_RSH
- 10_OCT9_LPOmni_L
- 11_OCT9_LPOmni_R

Testsignal B: Omni-Array

- 01_Omni-Array_L
- 02_Omni-Array_R
- 03_Omni-Array_C
- 04_Omni-Array_LS
- 05_Omni-Array_RS
- 06_Omni-Array_LH
- 07_Omni-Array_RH
- 08_Omni-Array_LSH
- 09_Omni-Array_RSH

Eine Begleit-CD-Rom, die alle Einzelspuren des Hörversuchs enthält, liegt im Anhang dieser Arbeit bei. Diese Einzelspuren geben die Möglichkeit zur eigenen Beurteilung der einzelnen Hauptmikrofonverfahren.

5.4 Durchführung des Hörversuchs

5.4.1 Versuchsablauf

Um eine Beeinflussung durch die Dateibezeichnung auszuschließen wurden die Einzelspuren in zwei Ordnern zusammengefasst und mit Testsignal-A (OCT9) und Testsignal-B (Omni-Array) bezeichnet. (s. Abb. 63)

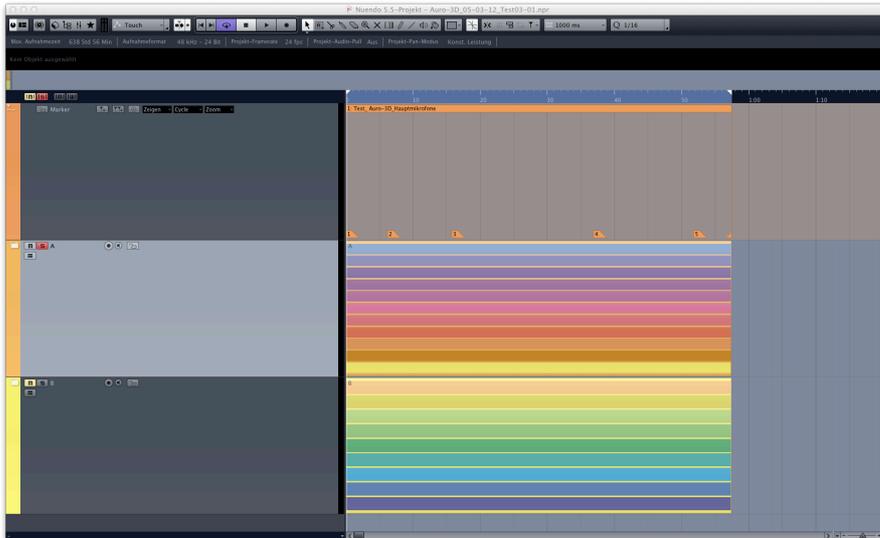


Abb. 63: Bedienungsfläche für Hörversuch; Durch Klicken im linken Bereich ist das Umschalten zwischen Testsignal-A und Testsignal-B möglich. Im rechten Bereich ist eine beliebige Position auf der Zeitachse schnell erreichbar.

Nach einer schriftlichen und mündlichen Instruktion startete jede Versuchssitzung mit einer Trainingssession. Die Probanden hatten die Möglichkeit das Testmaterial bei Bedarf während des gesamten Tests beliebig oft zu hören und durch AB-Test zu vergleichen. Eine Umschaltung zwischen Testsignal A und B war während des Abspielens ohne wahrnehmbare Artefakte gegeben.

Nach der Trainingssession wurden die Fragen des Fragebogens auf mehreren bipolaren Skalen durch Ankreuzen beantwortet. Der Moderator stand im Verlauf des gesamten Hörversuchs für Fragen der Versuchspersonen zwecks Begriffsklärung oder Hilfe bei der Bedienung des Rechners zur Verfügung.

Die Versuchsdauer variierte je nach Erfahrung des Versuchsteilnehmers von 20 bis 50 Minuten.

5.4.2 Versuchspersonen

Die aus 10 Personen bestehende Probanden-Gruppe wurde sorgfältig ausgewählt. Dabei wurde versucht ein breites Spektrum abzudecken. So war der jüngste Teilnehmer 27 und der älteste Teilnehmer 70 Jahre jung. Das Durchschnittsalter der Probanden beträgt 38,2 Jahre. Nicht nur tontechnisch erfahrene Personen wurden befragt, sondern auch in Zukunft mögliche zukünftige Konsumenten von Auro-3D-Medien wurden berücksichtigt.

5.4.3 Wiedergabetechnik

Im folgenden Kapitel wird der Aufbau der Wiedergabetechnik des Hörversuchs beschrieben. Der Hörversuch wurde im Auro-3D-Studio der Firma Schoeps durchgeführt. In Abb. 64 ist die Abhörordnung abgebildet.



Abb. 64: Schoeps Auro-3D-Studio (9.1) Wiedergabe für Hörversuch.

5.4.3.1 Rechner und DAW

Der bereits bei der Aufnahme des Testmaterials verwendete Mac mini (s. Kap. 4.1.4.2), wurde auch beim Hörversuch herangezogen. Zur Wiedergabe der Testsignale wurde Nuendo 5 eingesetzt. Genügend DA-Wandler wurden durch Kaska-

dierung von RME Fireface UC und RME Fireface 800 über ADAT erreicht. Die Verschaltung des Rechners und der DA-Wandler wird in Abb. 65 demonstriert.

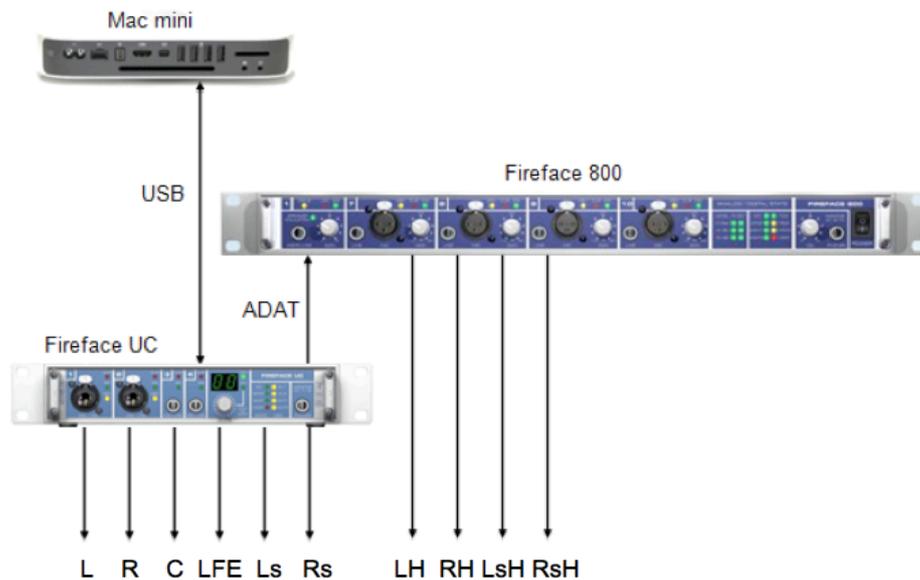


Abb. 65: Signalfluss zwischen Rechner und Audiointerface

5.4.3.2 Monitoring

Das untere 5.1-System wurde mit Genelec 8030 Lautsprechern realisiert. Leider waren nicht alle Monitore gleichwertig ausgelegt. Für das obere System waren Genelec 1029a Lautsprecher im Einsatz.

5.4.4 Parameter

Die Beurteilung der Aufnahmen erfolgte rein subjektiv nach den unten aufgeführten Parametern.

1. Lokalisationsschärfe der Schallquellen: Die Position der Schallquellen ist gut und eindeutig erkennbar. Von 1 (nicht lokalisierbar) bis 6 (lokalisierbar).

2. Breite des Ensembles: Breite bestimmt durch äußere Musiker des Ensembles ganz rechts und ganz links. Von 1 (schmal) bis 6 (breit).

3. Entfernung des Ensembles: Abstand zwischen Zuhörer und Ensemble. Von 1 (entfernt) bis 6 (nahe).

4. Tiefe des Ensembles: Beurteilung der hörbaren Entfernung zwischen vorderen und hinteren Musiker des Ensembles. Von 1 (flach) bis 6 (tief).

5. Robustheit: Stabilität des Klangbildes bei Kopfbewegungen. Von 1 (instabil) bis 6 (stabil).

6. Umhüllung: Gefühl vom Schall umgeben zu sein. Von 1 (unbefriedigend) bis 6 (sehr gut).

7. Raumqualität: Qualität der durch die Aufnahmeverfahren generierten Abbildung des Aufnahmeraums. Von 1 (unbefriedigend) bis 6 (sehr gut).

8. Klangfarbe: Saubere Abbildung des Schallspektrums. Von 1 (unbefriedigend) bis 6 (sehr gut).

Der verwendete Fragebogen ist auf der Begleit-CD-Rom als PDF-Datei beigelegt.

5.5 Ergebnisse des Hörversuchs

Bei der Auswertung der Versuchsdaten wurden statistische Berechnungen durchgeführt. Mit x_i wird der entsprechende i-te Bewertungswert gemeint, n beschreibt die Anzahl der Versuchspersonen.

Arithmetisches Mittel:¹³⁸

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Standardabweichung:¹³⁹

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

95%-Konfidenzintervall:¹⁴⁰

$$\mu = 1,96 \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls:¹⁴¹

$$\underline{\bar{\mu}} = \bar{x} \pm \mu$$

Die Werte des Hörversuchs werden als arithmetisches Mittel berechnet und mit den zugehörigen Antonympaaren in einer Grafik aufgezeigt. (s. Abb. 66) Zusätzlich zum arithmetischen Mittel wurden die Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls angegeben.

¹³⁸ Duller, 2007, S. 96

¹³⁹ Duller, 2007, S. 109, 179

¹⁴⁰ Duller, 2007, S. 227

¹⁴¹ Duller, 2007, S. 227

Ergebnisse des Hörversuchs

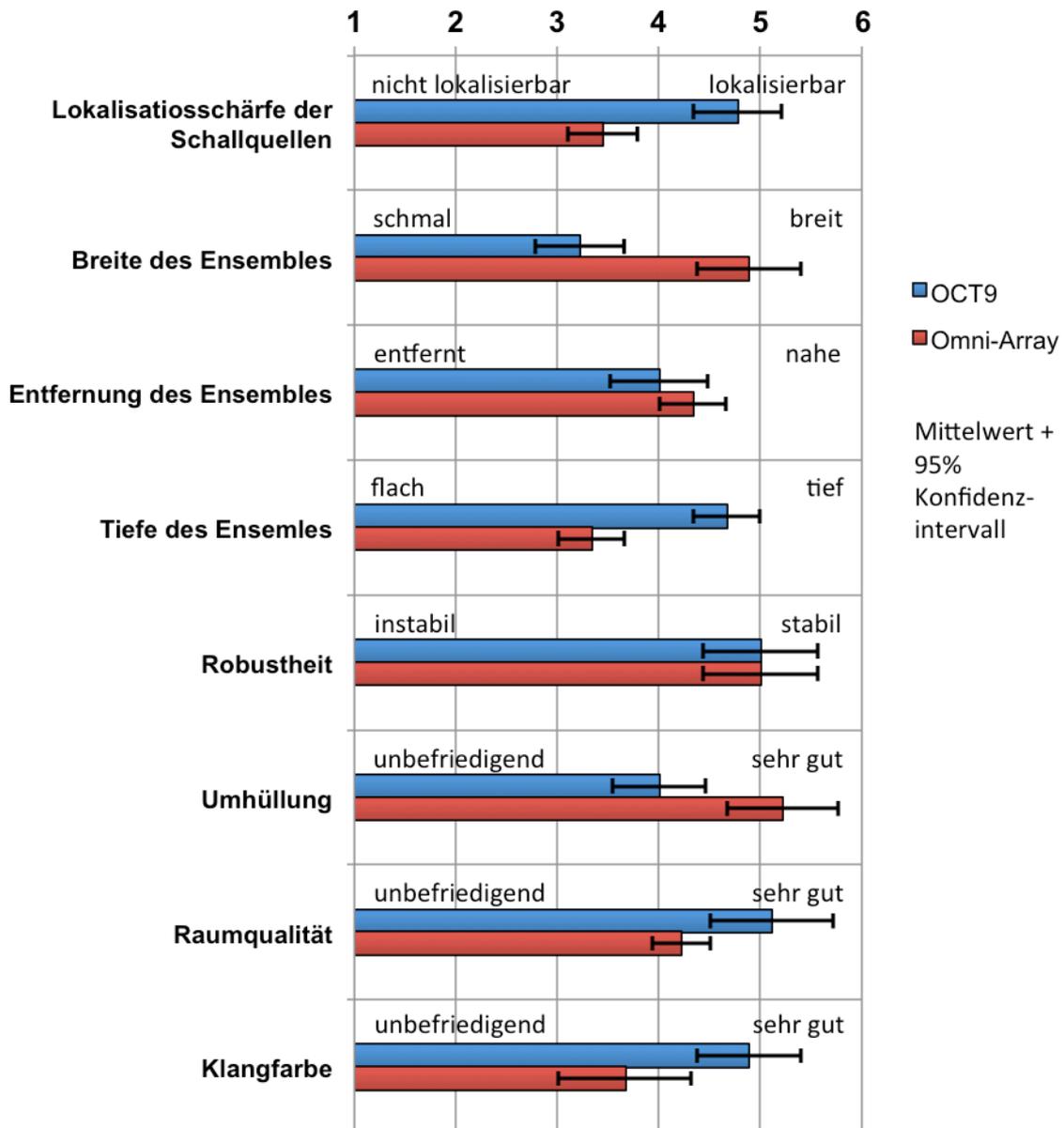


Abb. 66: Ergebnisse des Hörversuchs; Diese Darstellung ist auf der Begleit-CD-Rom als PDF-Datei beigefügt.

5.6 Diskussion der Ergebnisse

5.6.1 Parameter: „Lokalisationsschärfe der Schallquellen“

Die OCT9-Anordnung weist eine deutliche Ausprägung der Lokalisationseigenschaften auf. Die Positionen der einzelnen Instrumente des Ensembles sind gut erkennbar. Das liegt an der guten Kanaltrennung der OCT9-Anordnung. (s. auch Abb. 51) Die diskutierte Eigenschaft wurde beim Omni-Array nur als mittelmäßig beurteilt. Ein Grund dafür könnte die reine Verwendung von Laufzeitunterschieden, die prinzipbedingt die Lokalisation einzelner Schallquellen durch mehrfache Abbildung zwischen benachbarten Mikrofonpaaren benachteiligt. (s. auch Abb. 48)

5.6.2 Parameter: „Breite des Ensembles“

Beim Parameter „Breite des Ensembles“ ist in Bezug zum oben diskutiertem Parameter ein gegensinniges Verhalten zu beobachten. Die Abbildung der „Breite des Ensembles“ wird beim Omni-Array von den Versuchspersonen als sehr breit empfunden. Eine Ursache könnte der sehr große Abstand zwischen den Mikrofonen sein. Mit resultierenden Laufzeitdifferenzen, die weit über den notwendigen Werten für eine komplette Auslenkung zu einer Seite liegen, werden die Schallquellen ganz links, im Center und ganz rechts abgebildet. Beim OCT9 wird die Breite als mittelmäßig beurteilt, was im direkten Vergleich mit dem sehr breit abbildenden Omni-Array liegen könnte. Eine weitere Ursache könnte eine zu breite Basisbreite(L-R) der L-C-R-Mikrofone während der Aufnahme sein. Durch eine engere Wahl der Basis(L-R) ist eine Erweiterung der Breite erzielbar.

5.6.3 Parameter: „Entfernung des Ensembles“

Der Parameter „Entfernung des Ensembles“ wird bei beiden Anordnungen als annähernd gleich empfunden. Die Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls belegen dies durch eine sehr hohe Überschneidung. Jedoch ist eine Tendenz, entfernter zu klingen, bei der OCT9-Anordnung erkennbar. Offenbar wird beim OCT9 durch die unsymmetrische Äquivalenzanordnung ähnliche R/D-Verhältnisse erzielt wie beim Omni-Array.

5.6.4 Parameter: „Tiefe des Ensembles“

Die OCT9-Anordnung kann die Probanden bei der Abbildung der „Tiefe des Ensembles“ überzeugen. Durch das geringe Übersprechen zwischen den Kanälen wird das Reflexionsmuster des Aufnahmeraumes sauber abgebildet. (s. Abb. 51) Die Tiefenwahrnehmung wird dadurch deutlich gefördert und wurde von den Probanden als deutlich besser empfunden als das Verhalten des Omni-Arrays.

5.6.5 Parameter: „Robustheit“

Beim Parameter „Robustheit“ korrelieren die Resultate bei beiden Verfahren und werden von den Versuchsteilnehmern als sehr hoch angegeben. Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass durch den Einsatz der Center- und Höhen-Mikrofone beide Verfahren eine ausreichende Stabilität des Klangbildes erreichen. Auch Rauminformationen bleiben bei Bewegung innerhalb des Schallfeldes stabil. Dadurch fällt der „Sweetspot“ deutlich größer aus.

5.6.6 Parameter: „Umhüllung“

Die „Umhüllung“ des Zuhörers wird von den Probanden bei Omni-Array besser bewertet als bei OCT9. Dies könnte beim Omni-Array an der Richtcharakteristik der eingesetzten Mikrofone liegen. Ein Mikrofon mit Kugelcharakteristik ist grundsätzlich aus allen Richtungen gleich empfindlich. Direktschall und auch Raumreflexionen werden aus allen Richtungen aufgenommen. Dies führt beim Omni-Array zu einer sehr großen Reflexionendichte und mehrfachen, aus allen Richtungen und in unregelmäßigen Abständen beim Zuhörer ankommenden Direktschallanteilen. (s. Abb. 48) Durch diesen Effekt wird beim Omi-Array auch die Überzeichnung der räumlichen Attribute ersichtlich.

5.6.7 Parameter: „Raumqualität“

Die „Raumqualität“ wurde beim OCT9 besser bewertet als beim Omni-Array. Dieses Verhalten liegt an der oben beschriebenen, guten Abbildung der Reflexionsmuster des Aufnahmeraumes. Gleichwohl ist eine knappe Überschneidung der Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls existent. Daher kann eine eindeutige Aussage nicht mit einer 95%-Wahrscheinlichkeit gemacht werden. Hierzu müssten Versuche mit höherer Anzahl von Versuchsteilnehmern durchgeführt werden.

Dessen ungeachtet ist der erzielte Wert bei beiden Verfahren sehr hoch bewertet worden.

5.6.8 Parameter: „Klangfarbe“

Die „Klangfarbe“ der OCT9-Anordnung wurde im Mittel besser angegeben als die des Omni-Arrays. Dieses Ergebnis konnte durch das Hinzumischen von gefilterten Kugel-Mikrofonen und durch die Entzerrung der OCT9-Mikrofone erreicht werden. Unverkennbar lassen sich auf diese Weise die negativen Eigenschaften von Druckgradient-Mikrofonen gut kontrollieren.

5.6.9 Zusammenfassung

Unter Berücksichtigung der Erfahrungen bei der Aufnahme und anschließender Auswertung der Ergebnisse, kann der folgende Schluss gezogen werden.

Omni-Array:

Die Omni-Array-Technik ist besonders durch breite Abbildung des Ensembles, Überzeichnung des Nachhalls und Herstellung einer guten Umhüllung des Zuhörers aufgefallen. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass diese Technik in großen, gut klingenden Räumen mit langer Nachhallzeit Einsatz finden wird. Aufnahmen in Räumen mit mangelhaften akustischen Eigenschaften würde diese noch zusätzlich betonen und sollte nach Möglichkeit mit anderen Verfahren realisiert werden. Schlechte Lokalisationsschärfe der beteiligten Schallquellen und die sehr breite Abbildung des Ensembles erfordert zwingend den Einsatz von zusätzlichen Stützmikrofonen, um die Präsenz der einzelnen Schallquellen zu fördern und die Zwischenräume zwischen den Lautsprechern zu füllen. Dies erhöht deutlich die Anzahl der benötigten Mikrofone und der verwendeten Audiokanäle, erweitert hiermit aber auch die Möglichkeiten bei der Nachbearbeitung und Mischung. Relativ große Abstände zwischen den Mikrofonen erfordern beim Aufstellen des Omni-Array-Hauptmikrofons bereits fünf separate und zudem sehr hohe Stative.

OCT9:

Die OCT9-Technik erzeugt Aufnahmen mit einer guten Lokalisierung der einzelnen Schallquellen. Auch die genaue Abbildung der räumlichen Tiefe und Breite gehört zu den eindeutigen Stärken der OCT9-Anordnung. Auch bei Raumqualität und Klangfarbe ist eine positive Tendenz erkennbar. Bei Schallquellen mit großen Ausdehnungen sind nur wenige Stützmikrofone notwendig um ein ausgewogenes Klangbild zu erhalten. Durch die kompakten Abmessungen der Anordnung ist ein einziges großes Stativ ausreichend, wodurch die Sicht bei Aufnahmen mit Publikum nur unwesentlich behindert wird.

KAPITEL 6: Fazit

Nach einer Einführung in die Grundlagen wurden unter Berücksichtigung bekannter psychoakustischer Phänomene, bereits vorhandene und zum Teil in dieser Arbeit ergänzte Hauptmikrofon-Anordnungen beschrieben. Als nächstes wurden zwei praktische Möglichkeiten aufgezeigt, wie ein Ensemble mikrofoniert werden kann. Die dadurch entstandenen Aufnahmen wurden in einem Hörversuch beurteilt. Ergebnisse aus dem Hörversuch dienten dem Vergleich der zwei unterschiedlichen Hauptmikrofon-Verfahren. Die Ausführungen haben gezeigt, dass es verschiedene Hauptmikrofon-Techniken für das Auro-3D-Wiedergabesystem gibt. Entscheidende Faktoren für die Wahl der Aufnahmetechnik wurden diskriminiert. Zu diesem Zeitpunkt ist zu betonen, dass beide Hauptmikrofon-Anordnungen gute Ergebnisse erzeugen. Die kleinen Unterschiede bestimmen den Einsatzzweck und die Arbeitsweise. So ist für sehr gute Ergebnisse bei beiden Systemen der Einsatz von zusätzlichen Stützmikrofonen erforderlich, bei OCT9 jedoch eine kleinere Anzahl. Beim Omni-Array sind fünf große Mikrofonstative notwendig und auch räumlich wird viel Platz gebraucht. Dies könnte bei Aufnahmen während einer Aufführung das Publikum in der Sicht behindern. OCT9 dagegen ist sehr kompakt und sehr gut bei Aufführungen mit Publikum einsetzbar.

Ob sich Auro-3D als Wiedergabeformat für Ton behaupten kann, hängt sehr von der Akzeptanz der Konsumenten ab, welche durch erste Versuche im Bereich Film ihre Anfänge findet. Erste Filme wurden mit Auro-3D-Ton produziert und auch erste Kinos wurden bereits für die Wiedergabe von Auro-3D aufgerüstet. Im Allgemeinen bleibt „Auro-3D“ ein spannendes Thema und bietet viele Möglichkeiten für weitere Untersuchungen.

Literaturverzeichnis

Baelen, Wilfried van. „Auro 3D - ein neuer Standard?“ Elke Wisse. VDT-Magazin, 1. März 2011. S.13-18.

Barbour, James. „ELEVATIO PERCEPTION: PHANTOM IMAGES IN THE VERTICAL HEMI-SPHERE“. Abhandlung. 24th AES International Conference. Banff: AES - Audio Engineering Society, 2003.

Barco. „Auro-3D - Creating a new dimension in sound“. Belgium, Mai 2010.

Birkner, Christian. „SURROUND - Einführung in die Mehrkanalton-Technik“. Bergkirchen: PPV Presse Project Verlags GmbH, 2002.

Blauert, Jens. „Räumliches Hören“. Stuttgart: S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1974.

Breebaart, Jeroen und Christof Faller. „Spatial Audio Processing MPEG Surround and Other Applications“. England: John Wiley & Sons Ltd, 2007.

Dabringhaus, Werner. „2+2+2 - kompatible Nutzung des 5.1 Übertragungsweges für ein System dreidimensionaler Klangwiedergabe klassischer Musik mit drei stereophonen Kanälen“. VDT-Bericht. 21. Tonmeister Tagung. München: K. G. Sauer, 2000. 264-272.

Dickreiter, Michael. „Mikrofonaufnahme, Aufnahme Räume - Instrumente - Mikrofone - Stereo- & Surroundaufnahme“. 4. Auflage. Stuttgart: Hirzel Verlag, 2011.

Dolby Laboratories. „Dolby Pro Logic IIz for Heightened Surround Sound“. 2009. Letzter Zugriff am 10. Dezember 2011 <<http://www.dolby.com/us/en/consumer/technology/home-theater/dolby-pro-logic-iiiz.html#>>.

Duller, Christine . „Einführung in die Statistik mit EXCEL und SPSS“. Linz: Physica-Verlag, 2007.

Görne, Thomas. „Tontechnik“. München: Professor Dr. Ulrich Schmidt, 2008.

Gernemann, Andreas. „Surround-Sound Mikrophonierungen für Ensemblesmusik.“ 2001. www.uni-koeln.de. Letzter Zugriff am 20. Januar 2012 <www.uni-koeln.de/phil-fak/muwi/ag/tec/sse.pdf>.

—. „Decca-Tree - gestern und heute.“ 2002. www.uni-koeln.de. Letzter Zugriff am 20. Januar 2012 <www.uni-koeln.de/phil-fak/muwi/ag/tec/deccatree.pdf>.

Hamasaki, Kimio, Koichiro Hiyama and Reiko Okumura. „The 22.2 Multichannel Sound System and Its Application“. AES 118th Convention. Barcelona: AES E-Library, 2005.

- Henle, Hubert. „Das Tonstudio Handbuch, Praktische Einführung in die Professionelle Aufnahmetechnik“. 5. Auflage. München: GC Carstensen Verlag, 2001.
- ITU (International Telecommunication Union). „Rec. ITU-R BS.775-2 - Multichannel stereophonic sound system with and without accompanying picture“. Geneva: Electronic Publication, 1. Juli 2006.
- Nipkow, Lasse. „Angewandte Psychoakustik bei Aurophonic 3D Aufnahmen“. VDT-Magazin - Audio 3D und Auro 3D März 2011: S.19-23.
- Raffaseder, Hannes. „Audiodesign“. München: Carl Hansen Verlag, 2010.
- Rayburn, Ray A. „Eargle's Microphone Book“. Oxford: Elsevier Inc., 2012.
- Riekehof-Böhmer, Hans, Helmut Wittek und Robert Mores. „Voraussage der wahrgenommenen räumlichen Breite stereofoner Mikrofonanordnungen“. Leipzig: 26. Tonmeistertagung, 2010.
- Schalltechnik Dr.-Ing. Schoeps GmbH. „<http://www.schoeps.de/documents/oct-d.pdf>.“ 15. December 2011 Letzter Zugriff am 20. Dezember 2011 <<http://www.schoeps.de/documents/oct-d.pdf>>.
- Sengpiel, Eberhard. „Seitliche Phantomschallquellen gibt es nicht - wirklich?“. 1. Februar 2000. sengpielaudio.com. Letzter Zugriff am 7. Januar 2011 <www.sengpielaudio.com/SeitlichePhantomschallquellen.pdf>.
- Sengpiel, Eberhardt. „Welche Mikrofonbasis brauchen Raum-Mikrofone? 1“. 1. Juni 1995. sengpielaudio.com. Letzter Zugriff am 5. Januar 2012 <www.sengpielaudio.com/WelcheMikrofonbasisRaummikros1.pdf>.
- Theile, Günther. „Grundlagen und Praxis der Surround-Technik“. Oktober 2003. www.hauptmikrofone.de. Letzter Zugriff am 21. Januar 2012 <www.hauptmikrofon.de/theile/64_VDT_Seminar_Okt2003_Leipzig.pdf>.
- Theile, Günther and Helmut Wittek. „Die dritte Dimension für Lautsprecher-Stereofonie“. VDT-Magazin - Audio 3D und Auro 3D März 2011a: S. 31-37.
- Theile, Günther. „Hauptmikrofon und Stützmikrofon - Neue Gesichtspunkte für ein bewährtes Aufnahmeverfahren.“ VDT. 13. Tonmeistertagung, Tagungsbericht. Vol. 13. München: K. G. Sauer, 1984. S. 170-184.
- Theile, Günther. „Möglichkeiten und Grenzen der 3/2-Stereo-Aufnahme.“ Theile, Günther. 19. Tonmeistertagung. München: K. G. Sauer, 1996. S.139-169.
- Theile, Günther und Helmut Wittek. „Principles in Surround Recordings with Height“. 30. November 2011b. www.hauptmikrofon.de. Letzter Zugriff am 03. Januar 2012

<http://www.hauptmikrofon.de/index.php?option=com_content&view=article&id=66:principles-in-surround-recordings-with-height&catid=29&Itemid=77>.

Wöhr, Martin, et al. "Raumbezogene Stütztechnik - Möglichkeit zur Optimierung der Aufnahmequalität". VDT- Tagungsbericht. Tonmeistertagung. München: K. G. Sauer, 1988.

Webers, Johannes. "Handbuch der Tonstudioteknik für Film, Funk und Fernsehen". Poing: Franzis Verlag GmbH, 2007.

Weinzierl, Stefan. Handbuch der Audiotechnik. Berlin Heidelberg: Stefan Weinzierl, 2008.

Wikibooks.org. "Mensch in Zahlen". 19. Dezember 2011. Letzter Zugriff am 20. Dezember 2011 <http://de.wikibooks.org/wiki/Mensch_in_Zahlen>.

Wittek, Helmut. "Lokalisationskurven online - Der "Image Assistent"." November 2000 November. www.hauptmikrofon.de. Letzter Zugriff am 19 Januar 2012 <<http://www.hauptmikrofon.de/HW/IMA-Doku.pdf>>.

—. "ORF-Musikaufnahmen: Hauptmikrofone im Vergleich". 23. März 2011d. Letzter Zugriff am 19. Februar 2012 <www.hauptmikrofon.de/ORF/ORF_und_FHD.htm>.

—. [hauptmikrofon.de](http://www.hauptmikrofon.de). 23. März 2011c. Letzter Zugriff am 16. Januar 2012 <<http://hauptmikrofon.de/ima2-folder/ImageAssistant2.html>>.

—. Systems and Techniques for 3D recording. Karlsruhe, 2011a.

Wittek, Helmut, Christopher Haut und Daniel Keinath. "Doppel-MS – eine Surround-Aufnahmetechnik unter der Lupe". Leipzig: 24. Tonmeistertagung. München: K. G. Sauer, 2006.

Wuttke, Jörg. "Mikrofonaufsätze zweite, erweiterte Auflage". 2. Auflage. Karlsruhe (Durlach): Schalltechnik Dr.-Ing. Schoeps GmbH, 2000.

Zieglmeier, Wolfgang und Günther Theile. "Darstellung seitlicher Schallquellen bei Anwendung des 3/2-Stereo-Formats". 19. Tonmeistertagung. München: K. G. Sauer, 1996.

Anhang

Begleit-CD-Rom:

Die beiliegende Begleit-CD-Rom beinhaltet alle, in dieser Arbeit einbezogene Audiodateien im Wav-Format (24 Bit / 48 kHz).

Ordner: Omni-Array

01_ Omni-Array_L
02_ Omni-Array_R
03_ Omni-Array_C
04_ Omni-Array_LS
05_ Omni-Array_RS
06_ Omni-Array_LH
07_ Omni-Array_RH
08_ Omni-Array_LSH
09_ Omni-Array_RSH

Ordner: OCT9

01_OCT9_L
02_OCT9_R
03_OCT9_C
04_OCT9_LS
05_OCT9_RS
06_OCT9_LH
07_OCT9_RH
08_OCT9_LSH
09_OCT9_RSH
10_OCT9_LPOmni_L
11_OCT9_LPOmni_R

Ordner: Downmix

01_ Downmix _L
02_ Downmix _R
03_ Downmix _C
04_ Downmix _LFE
05_ Downmix _LS
06_ Downmix _RS

Ordner: Fragebogen

Fragebogen_Hörversuch

Ordner: Ergebnisse des Hörversuchs

Ergebnisse_des_Hörversuchs.pdf

