

Christian Sobotzick

Williams Microphone Array (WMA)

Untersuchung der Gestaltungsprinzipien in Hinblick auf die Wiedergabequalität

Bakkalaureatsarbeit

Institut für Elektronische Musik und Akustik
Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

Lehrveranstaltung: Aufnahmetechnik 1 Seminar
Beurteilung: Dr. Alois Sontacchi

Juni 2008

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	2
1.1. Aufbau und Konzeption des WMA.....	3
1.2. Einteilung des Schallfeldes in Segmente.....	4
1.3. Kopplung der Segmente mittels „Critical Linking“.....	5
1.4. Abdeckungswinkel und stereofoner Aufnahmewinkel (SRA).....	6
1.5. Laufzeit- / Intensitätsausgleich.....	9
2. Vorgehensweise zur Gestaltung des WMA.....	12
2.1. Vordere Dreiergruppe.....	12
2.2. Hinteres Paar.....	12
2.3. Seitliche Segmente.....	13
2.4. Auslegung des WMA am Beispiel der vorderen Segmente.....	14
2.5. Beispiel zum physikalischen Laufzeitausgleich.....	20
3. Untersuchungen zur Wiedergabequalität.....	22
3.1. Grenzen der Wahl des Aufnahmewinkels aus den SRA-Kurven.....	22
3.2. Einschränkungen des Laufzeit- / Intensitätsausgleichs.....	24
3.3. SRA-Kurven als Grundlage / Wiedergabe über Mehrkanal-Anordnung.....	29
3.4. Hörversuch zur Lokalisationsqualität (Segar / Rumsey).....	30
3.5. Übersprechen zwischen den Kanälen / Mehrfachabbildungen.....	33
4. Zusammenfassung.....	36
Quellenverzeichnis.....	38
Anhang.....	40

1. Einleitung

Mikrofonierungskonzepte für Mehrkanal-Anwendungen wurden von Michael Williams¹ zum ersten Mal bei der 91th AES Convention im Jahre 1991 in New York [1] vorgestellt. Williams beschreibt dort Mikrofonanordnungen bestehend aus 4, 5 oder 6 Mikrofonen, die zirkular und äquidistant aufgebaut sind. Die Richtcharakteristik der Mikrofone ist dabei nierenförmig, wobei auch „Super-/Hyperniere“ und „Breite Niere“ verwendet werden können. Die Wiedergabe erfolgt über eine Anordnung von zirkular und äquidistant aufgebauten Lautsprechern, die der Anzahl der Mikrofone entsprechen. Als Berechnungsgrundlage der Positionen und Ausrichtungen der Mikrofone dienen die Kurven für Stereo-Aufnahmewinkel von Williams, die als „Stereophonic Recording Angle“-Kurven² bezeichnet werden.

Im Zuge der Verbreitung des 5.1³ bzw. 3/2⁴-Standards wurde von Williams die erweiterte 5-kanalige, als „Multichannel Microphone Array“ (MMA) oder als „Williams Microphone Array“ (WMA) bezeichnete, Variante vorgestellt. Es handelt sich dabei nicht um genau eine, feste Anordnung, sondern um grundlegende Prinzipien, die eine Vielzahl von Arrays möglich machen. Vorgestellt wurde dieses Konzept zuerst bei der 107th AES Convention im Jahre 1999 in New York [2] und in erweiterter Fassung bei der 108th AES Convention im Jahre 2000 in Paris [3]. Für die Wiedergabe ist dabei eine standardisierte 3/2-Lautsprecherkonfiguration nach ITU-Norm⁵ vorgesehen.

Diese Arbeit beschränkt sich, aufgrund der nach wie vor großen Aktualität, auf die 5-kanaligen Mikrofonanordnungen, die in weiterer Folge stets als WMA bezeichnet werden. Es wird nur auf die Verwendung von Mikrofonen mit der Richtcharakteristik „Niere“ eingegangen, da sich die Vorgehensweise der Auslegung und die grundsätzlichen Überlegungen eines WMA für andere nierenförmige Varianten kaum unterscheidet und daher eine einfache Adaption möglich ist (vgl. [7]).

Ziel der Arbeit ist es nun, die Konzeption und die zugrunde liegenden Prinzipien zu erklären und Vor- und Nachteile, die aus den vielen möglichen Mikrofonanordnungen resultieren, in Hinblick auf die Wiedergabequalität näher zu beleuchten.

1 "Sounds of Scotland", Paris, France

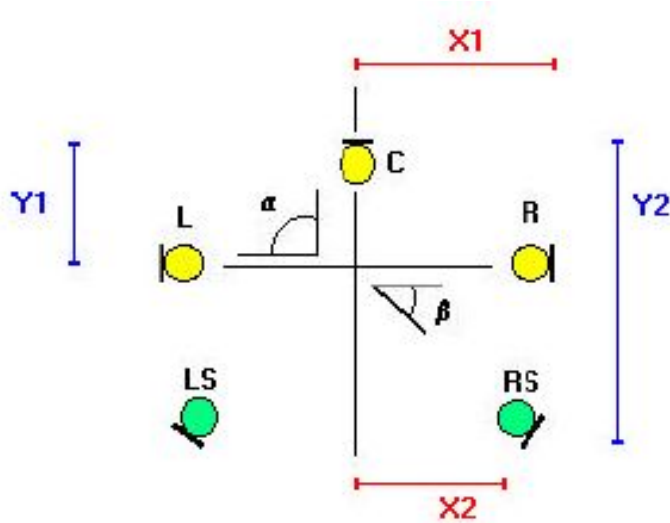
2 Kurzform: SRA-Kurven oder auch Williams-Kurven, vgl. [4], [5], siehe auch Abb. 3

3 Bezeichnung aus dem Surround-Bereich kommend, fünf Kanäle mit voller Bandbreite und ein bandbegrenzter Kanal, wird auch als 3/2/1 bezeichnet

4 Bezeichnet fünf Kanäle in Hinblick auf drei vordere und zwei hintere Lautsprecher

5 ITU-R BS.775, siehe auch Abb. 25

1. Aufbau und Konzeption des WMA



Richtcharakteristik aller Mikrofone (C, L, R, LS, RS) ist nierenförmig.

Beschreibende Größen:

X1, X2: Abstand horizontal von C („Center“) zu R („Right“) und von C zu RS („Right Surround“)

Y1, Y2: Abstand vertikal von C zu L („Left“) und C zu RS („Left Surround“)

α, β : Winkel zwischen C und L bzw. R und RS

Abbildung 1: Aufbau des WMA; Anordnung der Mikrofone mit beschreibenden Größen

Für das WMA werden fünf Mikrofone mit nierenförmiger Richtcharakteristik verwendet. Alle Mikrofone befinden sich in der horizontalen Ebene auf gleicher Höhe. Die Positionen der einzelnen Mikrofone, d.h. die Winkel und Abstände zueinander, werden in Abhängigkeit des gewünschten Aufnahmewinkels zwischen zwei benachbarten Mikrofonen gewählt. Die gesamte Mikrofonanordnung soll einen Aufnahmewinkel von 360 Grad in der horizontalen Ebene besitzen. Die Wiedergabe eines einzelnen Mikrofons erfolgt dabei über den jeweilig zugehörigen Lautsprecher der 3/2-Konfiguration.

Worin besteht nun das grundlegende Konzept und was ist das Ziel?

In einem weiten Bereich wählbare Aufnahmewinkel der Mikrofonpaare, lassen laut Williams eine optimale Anpassung an ein spezielles musikalisches und akustisches Umfeld zu. Um eine große Flexibilität zu gewährleisten, werden über 220 verschiedene Arrays von Williams zur Verfügung gestellt (Anhang, vgl. [6]).

„Arrays have been chosen so as to assist the sound engineer in his search for the optimum microphone array for a given recording situation.“ ([6], S.1)

Alle Anordnungen sollen bei der Wiedergabe den Eindruck eines homogenen Schallfeldes vermitteln, unabhängig von der Ausrichtung des Hörers zu den Lautsprechern. Damit ist eine gewisse Bewegungsfreiheit im Sinne einer Drehung des Kopfes gemeint. Eine Hörposition im Zentrum der Lautsprecher, auch als „sweet spot“ bezeichnet, bleibt weiterhin notwendig.

Um die dafür notwendige gleichmäßige Abdeckung des gesamten Aufnahmebereiches zu erreichen, wird das Schallfeld entsprechend der Mikrofone in Segmente unterteilt und eine „nahtlose“, als „Critical Linking“ bezeichnete, Kopplung dieser Segmente angestrebt. Dies ist Thema der nächsten beiden Kapitel.

1.2. Einteilung des Schallfeldes in Segmente

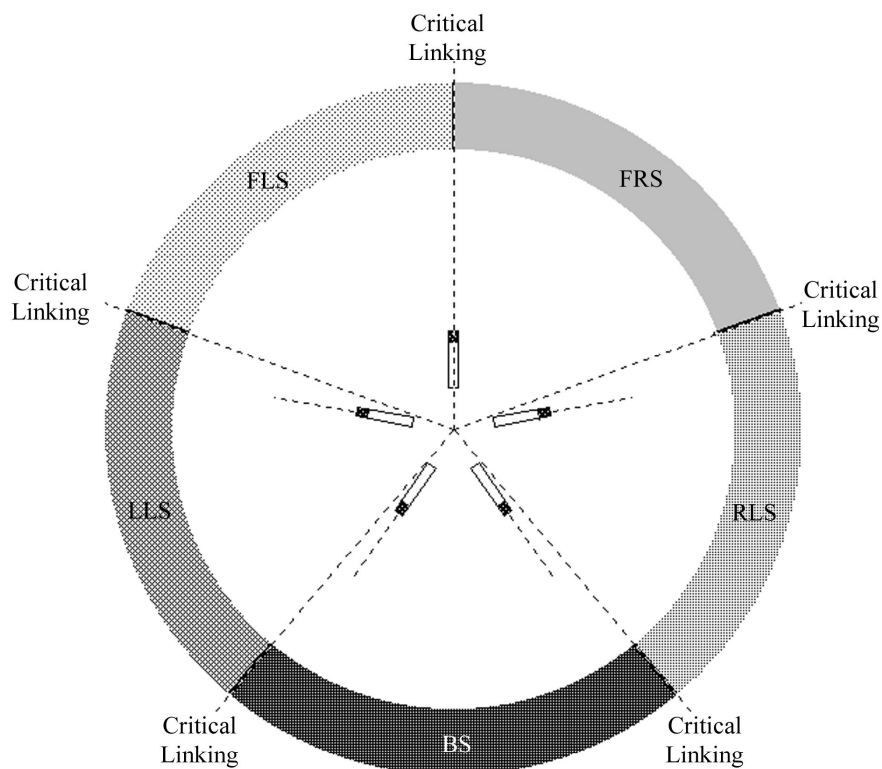


Abbildung 2: Einteilung des Schallfeldes in 5 Segmente; Kopplung zweier benachbarter Segmente der Mikrofonanordnung mittels „Critical Linking“ (siehe Kap. 1.3.)

Das gesamte Schallfeld, also der gewünschte Abdeckungsbereich von 360°, wird von Williams in fünf Segmente eingeteilt. Dies ist in Abbildung 2 dargestellt. Jedes Segment entspricht dabei dem Aufnahmewinkel zwischen zwei benachbarten Mikrofonen:

- FLS („Front Left Segment“) - linkes vorderes Segment
- FRS („Front Right Segment“) - rechtes vorderes Segment
- LLS („Left Lateral Segment“) - linkes seitliches Segment
- RLS („Right Lateral Segment“) - rechtes seitliches Segment
- RS („Rear Segment“) - hinteres Segment

Der Aufnahmewinkel eines Segments wird von Williams dabei als Abdeckungswinkel („Coverage Angle“) bezeichnet. Die Unterscheidung dieser Begriffe wird eingeführt, da der Aufnahmewinkel im WMA im Allgemeinen nicht mehr symmetrisch zur mittleren Achse zwischen zwei benachbarten Mikrofonen liegt (siehe Abb. 2), wie dies bei stereofonen Anordnungen der Fall ist. Ein symmetrischer Stereo-Aufnahmewinkel von beispielsweise $\pm 40^\circ$ wird daher zu einem Segment mit einem Abdeckungswinkel von 80° .

1.3. Kopplung der Segmente mittels „Critical Linking“

„The concept of critical Linking means that the impression of a continuous sound field is reproduced no matter what the orientation of the listener within the loudspeaker setup.“ ([6], Seite 2, Absatz 2)

Wie bereits gesagt (Kap 1.1.), ist eine gleichmäßige Abdeckung des gesamten Aufnahmebereiches und damit eine homogene Reproduktion des Schallfeldes ein Ziel, das mit dem WMA-Ansatz verfolgt wird. Um dies zu erreichen, spielt die Kopplung benachbarter Segmente mittels „Critical Linking“ eine zentrale Rolle bei der Auslegung eines WMA. Eine solche Kopplung der Segmente wurde bereits in Abbildung 2 dargestellt, dabei sind weder Überlappungen noch Lücken zwischen den Segmenten zu erkennen.

Warum ist „Critical Linking“ nun so wichtig?

„Critical Linking“ ist deshalb wichtig, weil eine naturgetreue Abbildung des Schallfeldes, in Hinblick auf die Lokalisation der Schallquellen, bei der Wiedergabe sonst nicht möglich ist. Ein „Loch“ zwischen dem linken und rechten vorderen Segment (FLS und FRS) in der Anordnung führt

beispielsweise dazu, dass Quellen, die in Richtung des „Loches“ strahlen, bei der Wiedergabe stark verdichtet, fast ausschließlich über den Lautsprecher in der Mitte wiedergegeben werden. Eine „Überlappung“ der beiden Segmente hat einen ähnlichen Effekt, es kommt auch hier zu einer Verdichtung bei der Wiedergabe um den mittleren Lautsprecher herum. Eine Winkelverzerrung des Einfallswinkels der Schallquelle zum Wiedergabewinkel im Bereich der Überlappung ist also die Folge (vgl. [8]).

Die Frage, warum es überhaupt zu Lücken oder Überlappungen zwischen zwei Segmenten kommen kann, liegt an dieser Stelle natürlich nahe. Dieses Problem entsteht durch Unterschiede zwischen Abdeckungswinkel und physikalischen Winkel eines Mikrofonpaares. Im folgenden Kapitel wird darauf eingegangen.

1.4. Abdeckungswinkel und stereofoner Aufnahmewinkel

Um nun die Möglichkeiten und Probleme einer Mehrkanal-Anordnung zu verstehen, müssen die Grundlagen der stereofonen Mikrofonierung mit zwei Mikrofonen bei der Wiedergabe über zwei Lautsprecher klar sein. Die Auslegung einer Mikrofonanordnung mit mehr als zwei Kanälen baut auf diesen bekannten Prinzipien auf. Deshalb kann der Aufnahmewinkel zwischen zwei benachbarten Mikrofonen, also der Abdeckungswinkel eines Segments des WMA aus den „Stereophonic Recording Angle“-Kurven in Abbildung 3 entnommen werden. In weiterer Folge werden sie stets als SRA-Kurven bezeichnet. Diese Kurven zeigen die möglichen Winkel und Abstände zweier Mikrofone zueinander für jeweils einen stereofonen Aufnahmewinkel. Sie beruhen auf bekannten psychoakustischen Untersuchungen und mathematischen Berechnungen bei stereofonen Anwendungen.

Zwei Mikrofone erzeugen für eine Schallquelle mit bestimmten Einfallswinkel eine Kombination aus Laufzeit- und Pegeldifferenzen. Diese Werte lassen sich, aus Abstand und Winkel der Mikrofone zueinander, in Abhängigkeit des Einfallswinkels einer Schallquelle berechnen. Aus psychoakustischen Untersuchungen sind die benötigten Laufzeit- und Pegeldifferenzen zur Auslenkung einer Phantomschallquelle zwischen zwei Lautsprechern bekannt. Wird nun der Aufnahmewinkel, also ein maximaler gewünschter Einfallswinkel der Schallquelle festgelegt, können die verschiedenen Varianten von Abstand und Winkel als Kurve dargestellt werden (vgl. [4], [5]).

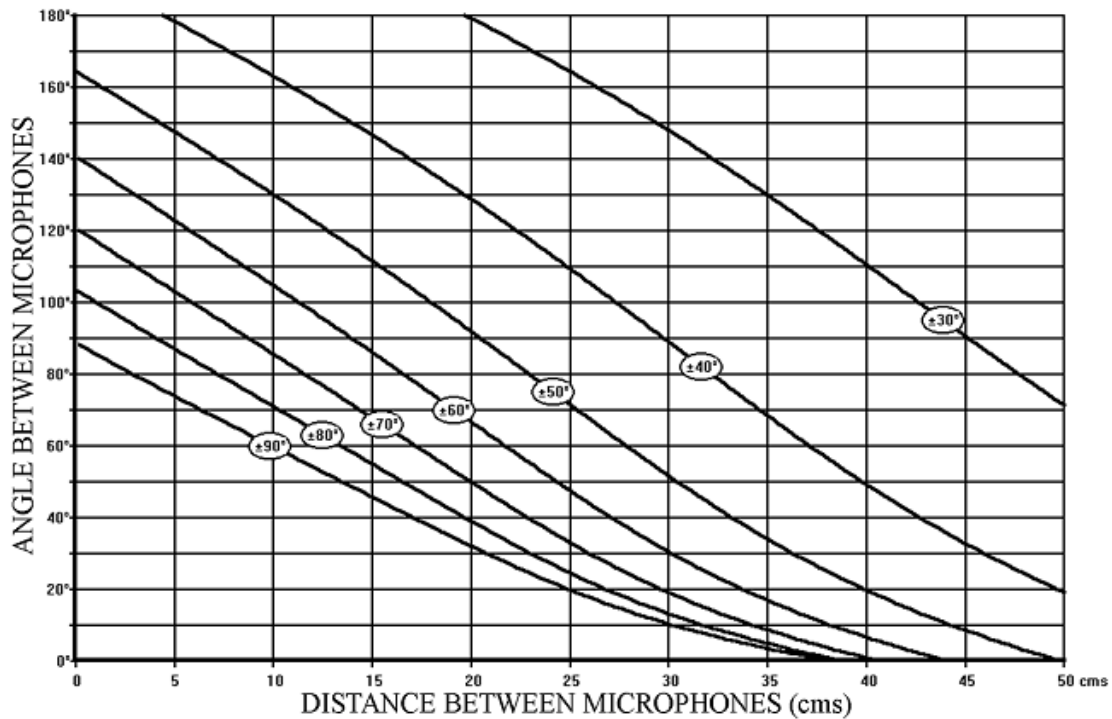


Abbildung 3: Stereo-Aufnahmewinkel (SRA) nach Williams für Mikrofone mit nierenförmiger Richtcharakteristik in Abhängigkeit von Abstand und Winkel zweier Mikrofone zueinander

Ein grundsätzliches Problem bei der Verwendung von mehr als zwei Mikrofonen in einer Anordnung ist nun der Unterschied zwischen Aufnahmewinkel und dem physikalischen Winkel zweier benachbarter Mikrofone, der von nun an als Öffnungswinkel bezeichnet wird. Dieser Unterschied führt zu den bereits angesprochenen Problemen von Überlappungen und Lücken zwischen den einzelnen Segmenten. Abbildung 4 und 5 zeigen jeweils eine Mikrofonanordnung, bei der der Aufnahmewinkel kleiner bzw. größer als der Öffnungswinkel ist:

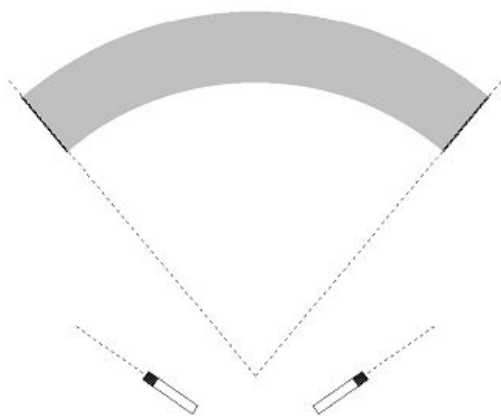


Abbildung 4: Aufnahmewinkel kleiner als Winkel zwischen den Mikrofonen

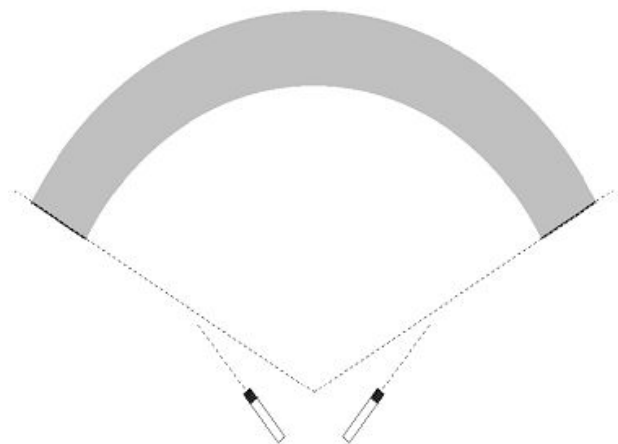


Abbildung 5: Aufnahmewinkel größer als Winkel zwischen den Mikrofonen

Möchte man nun Segmente ohne Überlappungen oder Lücken koppeln, ist dies ohne Korrekturen nur dann möglich, wenn Abdeckungswinkel und Öffnungswinkel gleich groß sind. Ein Mikrofon spielt im WMA immer für zwei Segmente eine Rolle (vgl. Abb. 2).

Um dieses Problem zu umgehen, könnte man zum Beispiel den gesamten gewünschten Abdeckungsbereich von 360° in fünf gleich große Segmente mit jeweils 72° Abdeckungswinkel einteilen. Dieser Abdeckungswinkel von 72° müsste nun auch einem Öffnungswinkel der Mikrofone von 72° entsprechen, um „Critical Linking“ zu erreichen. Die so entstandene Mikrofonanordnung hätte zwar eine gute Kopplung der Segmente, allerdings wären keine weiteren Änderungen an den einzelnen Segmenten möglich. Da die flexible Anpassung an eine Aufnahmesituation laut Williams ein großer Vorteil des WMA ist, werden mehrere Varianten angeboten, die eine gute Kopplung der Segmente ermöglichen, auch wenn Aufnahmewinkel und Öffnungswinkel der Mikrofone nicht übereinstimmen.

Mit Hilfe eines Laufzeit- und/oder Intensitätsausgleichs, der im folgenden Kapitel behandelt wird, kann der symmetrische stereofone Aufnahmewinkel verschoben bzw. gedreht werden, wie in Abbildung 6 und 7 dargestellt, und damit „Critical Linking“ in weiterer Folge für die gesamte Anordnung gewährleistet werden.

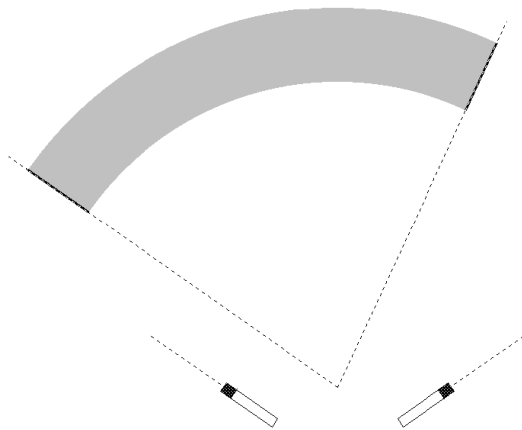


Abbildung 6: Drehung des Stereo-Aufnahmewinkels (SRA) um 15° gegen den Uhrzeigersinn: Linke Grenze des SRA und Mikrofonachse stimmen über ein

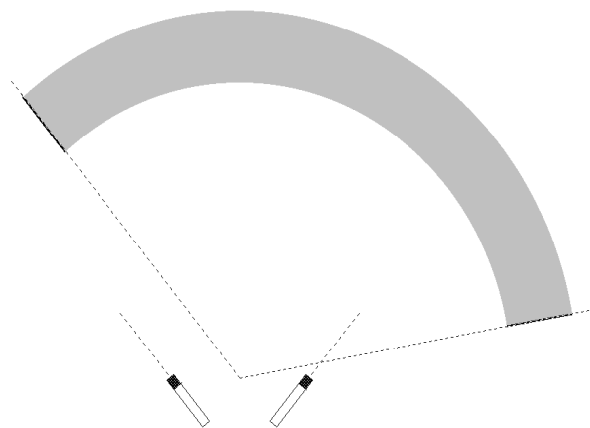


Abbildung 7: Drehung des Stereo-Aufnahmewinkels (SRA) um 20° im Uhrzeigersinn: Linke Grenze des SRA und Mikrofonachse stimmen über ein

1.5. Laufzeit- / Intensitätsausgleich („Time / Intensity Offset“)

Die benachbarten Segmente des WMA können durch einen Laufzeit- oder Intensitätsausgleich optimal gekoppelt werden. Durch eine Verschiebung der Zeit- oder Intensitätsachse kann eine gezielte Drehung des Aufnahmewinkels erreicht werden. Vier Methoden werden dabei unterschieden, wobei auch eine Kombination dieser Methoden bei der Anwendung möglich ist:

- **MPTO** („Mikrophone Position Time Offset“) ist die physikalische Laufzeitkorrektur durch Änderung der Position des Mikrofons mit Beibehaltung der Ausrichtung
- **MPIO** („Mikrophone Position Intensity Offset“) bezeichnet die physikalische Intensitätskorrektur durch Änderung der Ausrichtung des Mikrofons, die Position in Bezug auf die Kapsel bleibt unverändert
- **ETO** („Electrical Time Offset“) bezeichnet die elektronische Korrektur der Laufzeit in den jeweiligen Kanälen⁶ des WMA
- **EIO** („Electrical Intensity Offset“) ist die elektronische Korrektur der Intensität in den jeweiligen Kanälen⁷ des WMA

In weiterer Folge wird der Ausgleich der Laufzeit und/oder Intensität kurz als „Offset“ bezeichnet.

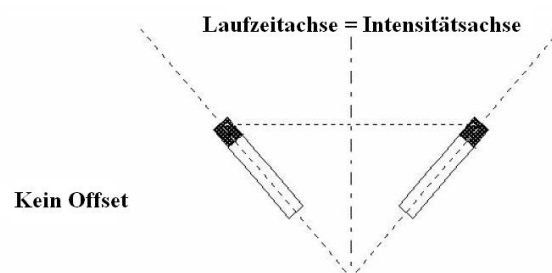


Abbildung 8: *Kein Offset – Laufzeit-/ Intensitätsachse zweier Mikrofone ist deckungsgleich*

⁶ Verzögerung mehrerer zusammengehörender Mikrofone, vgl. Kap. 2.3.

⁷ Meist Absenkung mehrerer zusammengehörender Mikrofone, vgl. Kap. 2.3.

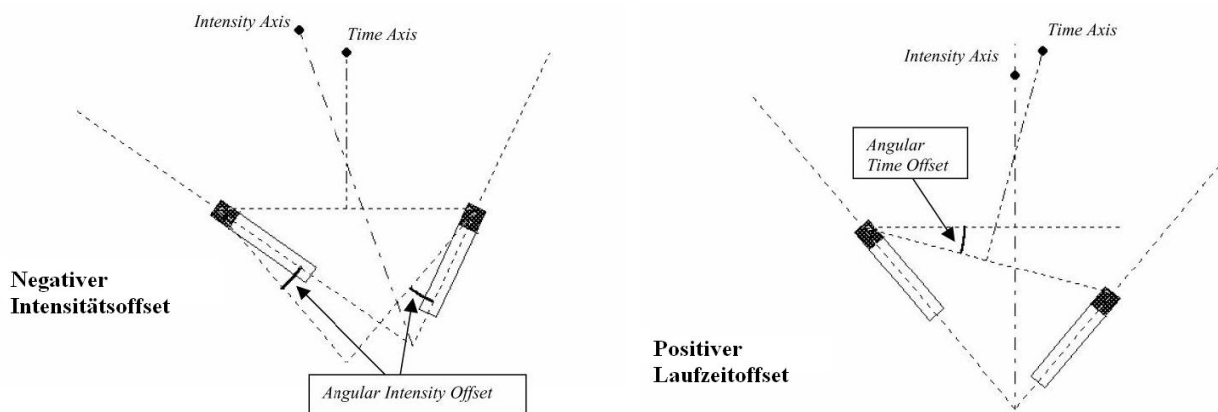


Abbildung 9: Verschiebung der Zeit- /Intensitätsachse relativ zueinander durch physikalischen Intensitäts- bzw. Laufzeitoffset (links MPIO, rechts MPTO)

Williams setzt MPIO und MPTO gleich, da er den Unterschied nur in der Sichtweise, also der Verschiebung der Zeit- und Intensitätsachse relativ zueinander, sieht. Demnach entspricht ein positiver MPTO einem negativem MPIO. Positiv ist dabei per Definition im Uhrzeigersinn, negativ gegen den Uhrzeigersinn. Abbildung 8 zeigt nun zwei Mikrofone deren Laufzeit- und Intensitätsachse, also die Symmetrieachse der Pegel- und Laufzeitdifferenzen, deckungsgleich zwischen den Mikrofonen liegt. Dies ist der Fall ohne Offset. Eine negative Verschiebung der Intensitätsachse erfolgt nun durch Drehung der beiden Mikrofone mit nierenförmiger Richtcharakteristik gegen den Uhrzeigersinn, wobei der Drehpunkt die Kapsel des jeweiligen Mikrofons ist, dies ist in Abbildung 9 auf der linken Seite veranschaulicht. Auf der rechten Seite zeigt Abbildung 9 dagegen eine positive Verschiebung der Zeitachse durch Verschiebung des rechten Mikrofons nach hinten, wobei der Abstand der Mikrofone zueinander gleich bleibt (vgl. auch Abb. 20). In beiden Fällen ist das Resultat, die relative Verschiebung zwischen Zeit- und Intensitätsachse, gleich.

Gewöhnlich wird ein Offset in Form von MPTO von Williams verwendet, um eine gute Kopplung zwischen den vorderen drei Segmenten zu gewährleisten. Der generelle Vorteil von MPTO gegenüber MPIO ist dabei der unveränderte Winkel und die unveränderte Position eines Mikrofons. Bei MPIO ist dies nicht der Fall, da die Winkel beider Mikrofone des jeweiligen Segments geändert werden müssten und damit wiederum eine unerwünschte Beeinflussung eines anderen Segments auf beiden Seiten stattfinden würde. Eine Kopplung mit „Critical Linking“ wäre also nicht möglich.

ETO findet oft Verwendung zur Anpassung der seitlichen Segmente (siehe Kap. 2.3.). WMA Anordnungen die nur mit MPTO auskommen, bezeichnet Williams als Anordnungen die „Natural

Critical Linking“ aufweisen, da keine elektronischen Korrekturen nötig sind. Möchte man sich darauf beschränken, würde dies die prinzipiellen Möglichkeiten des WMA sehr einschränken. Der Vorteil ist allerdings, dass alle Kanäle des WMA direkt aufgezeichnet und wiedergegeben werden können.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die verschiedenen Offsets qualitativ nicht gleichwertig sind, auch wenn in den Veröffentlichungen von Williams manchmal der Eindruck einer relativ beliebigen Wahl vermittelt wird. Das Resultat ist zwar jeweils eine Drehung des Segments um den gewünschten Winkel, Offsets können aber, je nach Art und Verwendung, zu Beeinträchtigungen in Hinblick auf Wiedergabequalität führen. In Kapitel 3.3. wird dies näher beleuchtet.

2. Vorgehensweise zur Gestaltung eines WMA

Nachdem nun die grundlegenden Prinzipien erklärt wurden, wird die Vorgehensweise zur Gestaltung eines kompletten Arrays gezeigt und anhand von Beispielen veranschaulicht .

Es wird dabei von Williams grundsätzlich zwischen der Abdeckung der vorderen drei Mikrofone, des hinteren Paares und der seitlichen Segmente unterschieden (vgl. [2],[3],[6]):

2.1. Abdeckung der vorderen Dreiergruppe („Front Triplet Coverage“)

Als erster Schritt wird der Abdeckungsbereich der vorderen drei Mikrofone, von nun an als vordere Dreiergruppe bezeichnet, festgelegt. In Abhängigkeit der Ausdehnung der aufzunehmenden Schallquelle und des Abstands zu den Mikrofonen wird der gewünschte Abdeckungsbereich bestimmt. Dieser Bereich setzt sich aus den Abdeckungswinkeln der vorderen Dreiergruppe zusammen (FLS+FRS, Abb. 2). Er lässt sich sinnvoll zwischen $50^{\circ}+50^{\circ}$ bis $90^{\circ}+90^{\circ}$ wählen. Dies liegt zum einen an der für kleinere Abdeckwinkel erschwerten Kopplung mit den restlichen Segmenten, zum anderen an den von Williams vorgegebenen Grenzen für die Wahl des Aufnahmebereichs aus den SRA-Kurven (vgl. Abb. 21). Nähere Angaben dazu finden sich im Kapitel 3.1..

Je nach gewählter Größe des Abdeckungswinkels und dem Öffnungswinkel der Mikrofone muss nun eine Überlappung oder ein Loch zwischen den beiden Segmenten, sofern vorhanden, mittels Offset ausgeglichen werden (siehe Bsp. Kap. 2.2.).

2.2. Abdeckung des hinteren Paares („Back Pair Coverage“)

Als nächstes wird der Abdeckungsbereich des hinteren Paares festgelegt. Da nur zwei Mikrofone verwendet werden, ist dieser Bereich gleich dem Abdeckungswinkel der beiden hinteren Mikrofone (RS, Abb. 2). Hier liegt der von Williams als sinnvoll erachtete Bereich zwischen 40° bis 90° . Diese Mikrofone nehmen im Allgemeinen lediglich reflektierten Schall, also Raumanteil, auf. Um ein aufgewogenes Verhältnis zwischen direkten und reflektiertem Schall bei der Wiedergabe der gesamten Anordnung zu erhalten, sollten laut Williams eher kleinere Werte für diesen Abdeckungswinkel gewählt werden. Größere Winkel führen zu mehr Raumanteil, der über die hinteren Lautsprecher wiedergegeben wird und können als störend empfunden werden (vgl. [6]).

Dies gilt natürlich nur dann, wenn man davon ausgeht, dass sich die aufzunehmenden Schallquellen im Abdeckungsbereich der vorderen Dreiergruppe befinden (vgl. auch „Winkelverzerrungen“ Kap. 3.3.).

2.3. Abdeckung der seitlichen Segmente („Lateral Segment Coverage“)

Nachdem die gewünschte Abdeckung der vorderen Dreiergruppe und des hinteren Paares festgelegt ist, ergibt sich die Abdeckung der seitlichen Segmente aus dem übrigen Winkel (360° -FLS-FRS-BS). Wie beim hinteren Paar entspricht diesem Bereich der Abdeckungswinkel der beiden seitlichen Mikrofone (LLS+RLS, Abb. 2).

Nun wird der Abstand zwischen der vorderen Dreiergruppe und dem hinteren Paar aus den SRA-Kurven (Abb. 10) so gewählt, dass der bereits vorgegebene Öffnungswinkel der Mikrofone der seitlichen Segmente dem gewünschten, also übrigen Abdeckungswinkel entspricht. Dadurch ist zwar gewährleistet, dass die Größe des Abdeckungswinkels der seitlichen Segmente der Gesamtdeckung abzüglich der übrigen Segmente entspricht, die Ausrichtung ist allerdings noch nicht angepasst. So können auch hier Überlappungen und Lücken zu den anderen Segmenten vorhanden sein, die ausgeglichen werden müssen. Da die Mikrofone durch ihre Rolle, die sie in den vorderen und hinteren Segmenten schon spielen, natürlich nicht mehr in Abstand und Winkel zueinander verändert werden dürfen, muss die Anpassung über einen elektronischen Offset erfolgen. Dieser Offset führt nun durch eine Verzögerung der Laufzeit oder Absenkung des Pegels der vorderen Dreiergruppe bzw. der hinteren Paares, je nachdem ob positiver oder negativer Offset erwünscht ist, zu einer Drehung des Abdeckungswinkels der seitlichen Segmente.

Meist wird als Form des Offsets ETO verwendet, da Williams beim EIO Probleme bezüglich der Energieverteilung des WMA sieht. Eine Absenkung oder Anhebung der vorderen oder hinteren Mikrofone verändert dabei das Gleichgewicht der Energieverteilung innerhalb der gesamten Anordnung, was zur ungleichmäßigen Wiedergabe zwischen den vorderen und hinteren Lautsprechern der 3/2-Konfiguration führen kann.

2. Auslegung eines WMA am Beispiel der vorderen Segmente

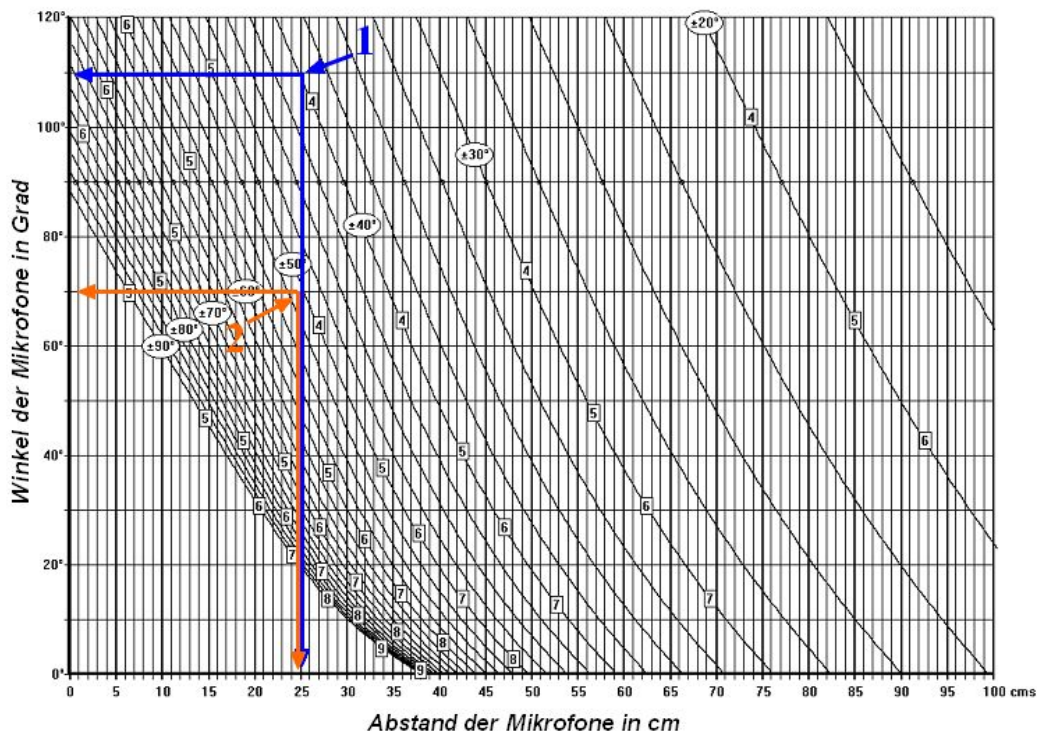


Abbildung 10: SRA-Kurven; Markierung 1: Abstand/Winkel 25cm/110° → Aufnahmeabstand $\pm 40^\circ$, Markierung 2: Abstand/Winkel 25cm/70° → Aufnahmeabstand $\pm 50^\circ$ (Ziffern in den Kästchen: Winkelverzerrung, siehe Kapitel 3.1.)

Als Beispiel dient nun der Abdeckungsbereich der vorderen Dreiergruppe. Prinzipiell gilt dies jedoch in ähnlicher Form für die Auslegung aller Segmente. Bei einem gewünschten Abdeckungswinkel von $80^\circ + 80^\circ$ für die vorderen Segmente ergibt sich ein Abstand der Mikrofone von 25cm und einem Öffnungswinkel von 110° (Aufnahmeabstand $\pm 40^\circ$, Abbildung 10, Markierung 1). Ohne Korrekturen ergibt sich ein „Loch“ zwischen den beiden Segmenten, wie in Abbildung 11 zu erkennen ist. Um dies zu vermeiden, müsste nun das FLS um 15° im Uhrzeigersinn (positiver Offset) und das FRS um 15° gegen den Uhrzeigersinn (negativer Offset) gedreht werden. Dies ist in Abbildung 12 dargestellt. Nun ist eine optimale Kopplung der Segmente gegeben.

Genauso ist natürlich auch eine Überlappung der beiden Segmente möglich, was in Abbildung 13 veranschaulicht wird. Hier ist der Abstand der Mikrofone gleich, der Winkel zwischen ihnen allerdings auf 70° verkleinert worden (Abbildung 10, Markierung 2). Damit ist der Aufnahmeabstand zwischen den Mikrofonen größer als der physikalische Winkel. Die für „Critical Linking“ notwendige Drehung des FLS (Offset von -15°) und FRS (Offset von $+15^\circ$) zeigt Abbildung 14.

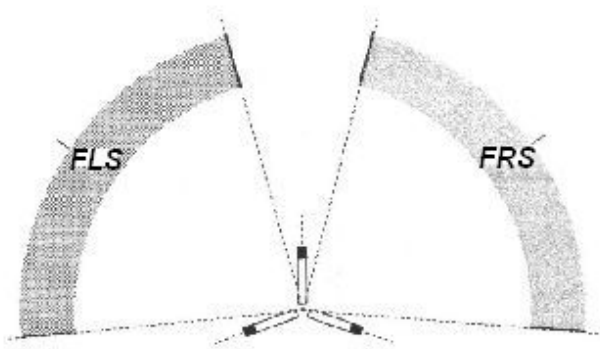


Abbildung 11: Vordere drei Mikrofone;
Abstand 25cm / Winkel 110° - Abdeckungswinkel 80° für jedes Segment - Kein Offset

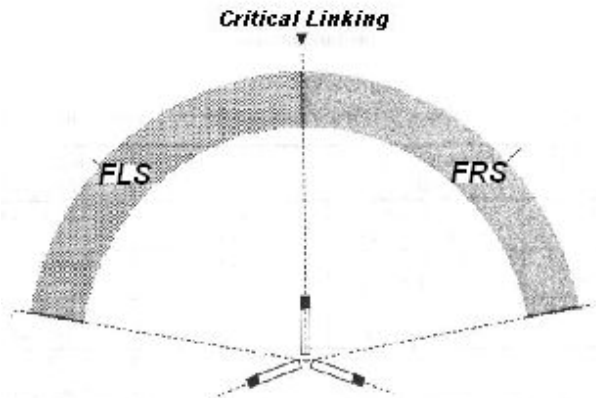


Abbildung 12: Vordere drei Mikrofone;
Abstand 25cm / Winkel 110° - Abdeckungswinkel 80° für jedes Segment - Offset von +15° FLS / Offset von -15° für FRS

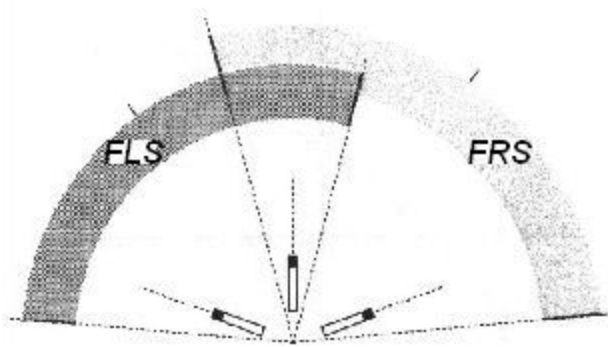


Abbildung 13: Vordere drei Mikrofone;
Abstand 25cm / Winkel 70° - Abdeckungswinkel 100° für jedes Segment - Kein Offset

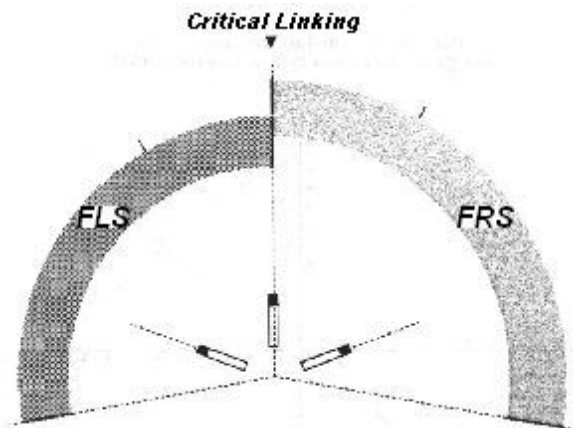


Abbildung 14: Vordere drei Mikrofone;
Abstand 25cm / Winkel 70° - Abdeckungswinkel 100° für jedes Segment - Offset von -15° für FLS / Offset von +15° für FRS

Um nun zu verstehen, wie mit Hilfe von Offsets die gezielte Drehung eines Segments möglich ist, erscheint eine Darstellung von Intensität-/Laufzeitdifferenzen in Abhängigkeit des Einfallswinkels einer Schallquelle und die daraus resultierende Auslenkung einer Phantomschallquelle sinnvoll.

Das folgende Diagramm (Abb. 15) zeigt die Funktion der Intensitäts-/Zeitdifferenzen ohne jegliche Offsets. Der Graph ist punktsymmetrisch zum Ursprung. Abstand und Winkel zwischen den Mikrofonen entspricht mit 25cm und 70° den Abbildungen 13 und 14. Zusätzlich ist der Zusammenhang von Aufnahmewinkel, der von -90° bis +90° auf der Kurve aufgetragen ist, und der

Auslenkung einer Phantomschallquelle veranschaulicht. Dies ist durch drei Kurven in 10° Schritten, jeweils in Richtung des linken bzw. rechten Lautsprechers, dargestellt. Ausgegangen wird dabei von einer für stereofone Anwendungen gebräuchlichen Anordnung der Lautsprecher. Sie sind also $\pm 30^\circ$ zur mittleren Achse der Abhörposition ausgerichtet. Der Aufnahmewinkel beträgt nun $\pm 50^\circ$, da der Schnittpunkt der 30° Kurve des rechten Lautsprechers, entsprechend der maximalen Auslenkung einer Phantomschallquelle, bei 50° des Einfallswinkels einer Schallquelle liegt. Dieser Winkel wird in weiterer Folge als Quellwinkel bezeichnet.

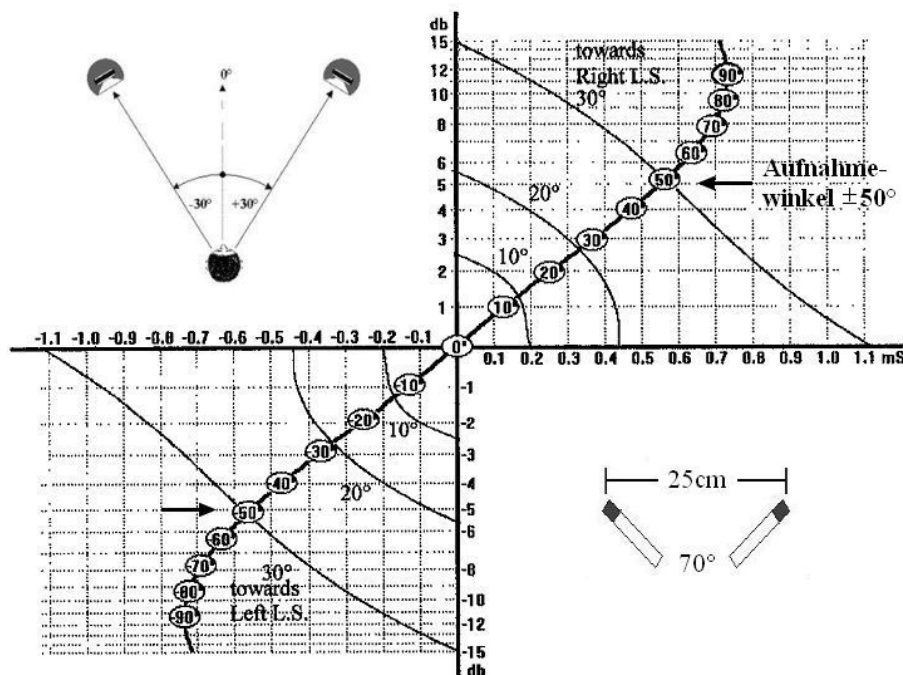


Abbildung 15: Funktion der Intensitäts-/Zeitdifferenzen ohne Offset, Abstand zwischen den Mikrofonen 25cm, Öffnungswinkel 70° , der Aufnahmewinkel beträgt $\pm 50^\circ$

Folgende Beispiele zeigen anhand der Funktion der Intensitäts-/Laufzeitdifferenzen, was passiert, wenn eine Drehung eines Segments durch eine oder mehrere der genannten Methoden des Laufzeit- und Intensitätsausgleichs (vgl. Kap. 1.5.) erfolgt. Folgende Varianten [2] sind unter anderem möglich, wobei sich diese Angaben auf das Beispiel zu Abbildung 13 und 14 beziehen, d.h. der Abdeckungsbereich eines Segments beträgt 100° , gedreht werden soll das vordere linke Segment (FLS) um 15° im Uhrzeigersinn:

- Abbildung 16: Positiver elektronischer Laufzeitoffset (ETO) mit $-0,28\text{ms}$
- Abbildung 17: Positiver elektronischer Intensitätsoffset (EIO) mit $-2,5\text{dB}$
- Abbildung 18: Kombination von positivem ETO mit $-0,145\text{ms}$ und positivem EIO mit $-1,15\text{dB}$
- Abbildung 19: Positiver physikalischer Laufzeitoffset (MPTO) mit einem Winkel von $+37^\circ$

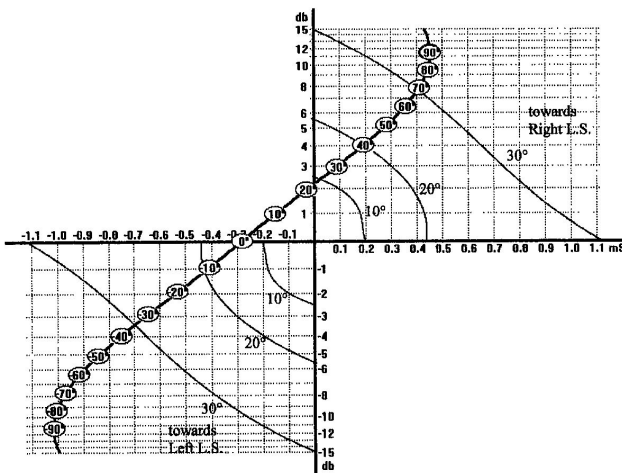


Abbildung 16: Funktion der Intensitäts-/Laufzeitdifferenzen; positiver ETO $-0,28\text{ms}$

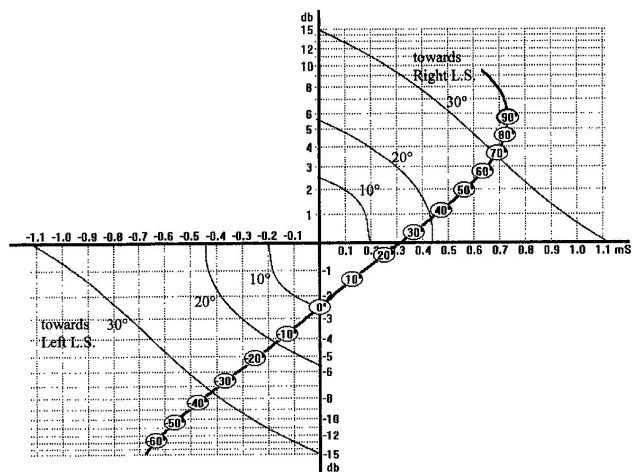


Abbildung 17: Funktion der Intensitäts-/Laufzeitdifferenzen; positiver EIO $-2,5\text{dB}$

Abbildung 16 zeigt die Verschiebung des Graphen der Intensität-/ Laufzeitdifferenzenfunktion entlang der Laufzeitachse durch einen positiven ETO von $-0,28\text{ms}$. Der Graph schneidet diese Achse bei $-0,28\text{ms}$. Der Aufnahmebereich reicht nun von etwa -35° bis knapp 70° . Der Aufnahmebereich beträgt insgesamt also knapp 105° .

Abbildung 17 zeigt die Verschiebung des Graphen der Intensität-/ Laufzeitdifferenzenfunktion entlang der Intensitätsachse durch einen positiven EIO von $-2,5\text{dB}$. Der Graph schneidet diese Achse bei $-2,5\text{dB}$. Der Aufnahmebereich reicht hier von etwa -35° bis 70° . Der Abdeckungswinkel beträgt dabei ebenso rund 105° .

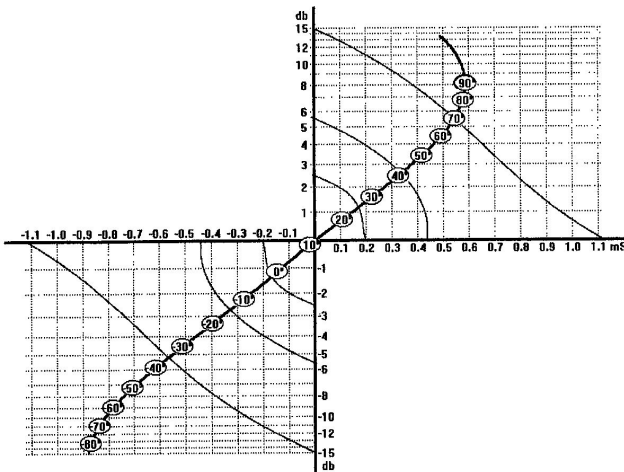


Abbildung 18: Funktion der Intensitäts-/Laufzeitdifferenzen; positiver ETO $-0,145\text{ms}$ und positiver EIO $-1,15\text{dB}$

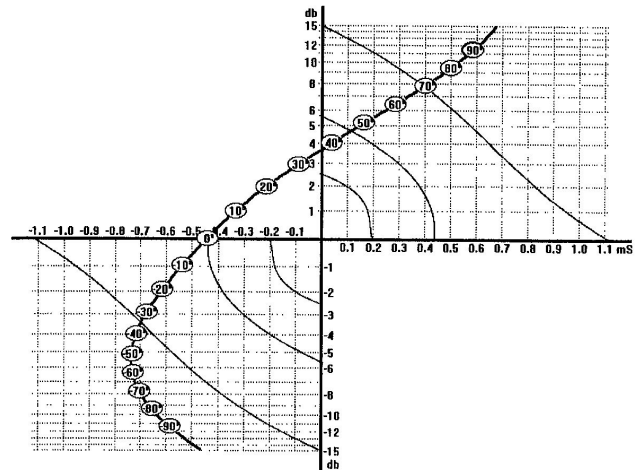


Abbildung 19: Funktion der Intensitäts-/Laufzeitdifferenzen; positiver MPTO $+37^\circ$

Abbildung 17 zeigt nun eine Verschiebung des Graphen durch eine Kombination aus positiven ETO mit $-0,145\text{ms}$ und ebenso positivem EIO mit $-1,15\text{dB}$. Der Graph schneidet hier, wie bei der unkorrigierten Kurve (Abb. 15) den Nullpunkt. Der Aufnahmebereich reicht von etwa -35° bis 70° . Der Abdeckungswinkel ist wieder rund 105° .

Abbildung 18 zeigt schließlich eine Verschiebung des Graphen entlang der Laufzeitachse durch einen physikalischen Laufzeitoffset von 37° . Der Graph schneidet diese Achse bei etwa $-0,45\text{ms}$ und besitzt, aufgrund der Positionsänderung des Mikrofons im Vergleich zur unkorrigierten Kurve (vgl. Abb 13), im mittleren Bereich eine Krümmung. Der Aufnahmebereich reicht wiederum von etwa -35° bis 70° . Auch hier beträgt der Abdeckungswinkel ungefähr 105° .

Im Vergleich zum Graphen ohne Offset (Abb. 15) lässt sich also allgemein feststellen:

- Alle Graphen liegen aufgrund des Offsets unsymmetrisch zum Ursprung, sie zeigen eine ungleiche Krümmung in den Randbereichen in Bezug auf die Grenzen des Aufnahmebereiches
- Durch einen physikalischen Laufzeitoffset kann es zu einer nicht unerheblichen Änderung der Kurvenform kommen

- Eine Kombination von Offsets macht es möglich, den Graphen den Nullpunkt schneiden zu lassen
- Der Abdeckungswinkel ändert sich geringfügig

Was lässt sich daraus schließen?

Eine Krümmung der Kurve im Randbereich stellt ein sich nichtlinear änderndes Verhältnis von Laufzeit-/Pegeldifferenzen an *einer* Grenze des Aufnahmebereichs dar. Bei einer Krümmung der Kurve durch MPTO ändert sich dieses Verhältnis nun nichtlinear über den *gesamten* Aufnahmebereich. Bei allen Kurven, die nicht den Nullpunkt schneiden, ist der Betrag der Laufzeit-/Intensitätsdifferenzen für positive und negative Quellwinkel *nicht* identisch. Ein positiver maximaler Einfallswinkel besitzt also ein anderes Verhältnis von Differenzen als ein negativer maximaler Einfallswinkel.

Allgemein gesagt führen Offsets also zu einer ungleichmäßigen Änderung des Verhältnisses von Laufzeit- zu Intensitätsdifferenzen über den Aufnahmebereich. Dies legt die Vermutung einer sich ändernden Abbildungsqualität bei der Wiedergabe nahe. Nun stellt sich die Frage, ab welcher Größenordnung von Offsets hörbare Beeinträchtigungen zu erwarten sind. Warum und inwieweit Offsets zu Problemen in Hinblick auf die Wiedergabequalität führen können und welche Grenzen für Offsets sinnvoll erscheinen, kommt in Kapitel 3.3. ausführlicher zur Sprache (vgl. auch [16]).

Die beobachtete geringfügige Änderung des Abdeckungswinkels hingegen scheint weniger kritisch und lässt sich bei der Auslegung eines WMA berücksichtigen, indem die Positionen und Abstände der Mikrofone korrigiert, bzw. bei der Auslegung von einem etwas kleineren/größeren relativen Aufnahmewinkel ausgegangen wird.

2.5. Beispiel zum physikalischen Laufzeitausgleich (MPTO)

Da der physikalische Laufzeitoffset häufig bei der Auslegung der vorderen drei Mikrofone zur Anwendung kommt, wird nun noch genauer darauf eingegangen. Die Angabe eines MPTO erfolgt stets als Winkel (vgl. Anhang, [6]), wobei dieser Winkel eben *nicht* der durch den Offset verursachten Drehung eines Segments entspricht. Die folgende Darstellung (Abb. 20) zeigt einen positiven MPTO von 37° , der einer Drehung eines Segments um 15° im Uhrzeigersinn entspricht (vgl. Kap. 2.4., Abb. 13/19):

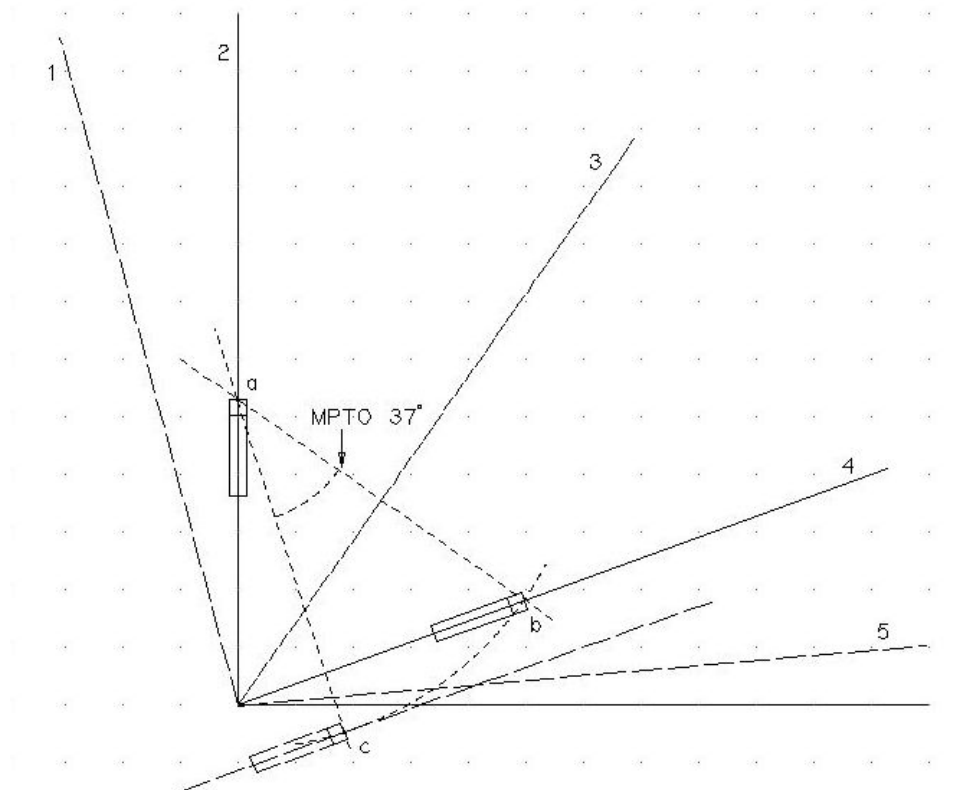


Abbildung 20: positiver physikalischer Laufzeitausgleich (MPTO) von 37° des rechten vorderes Segments (FRS) mit Verschiebung des Mikrofon b nach c

Die Mikrofone a (Achse 2) und b (Achse 4) sind nach den SRA-Kurven (Abb. 10) im Abstand von 25cm mit einem Öffnungswinkel von 70° angeordnet. Der daraus resultierende Abdeckungswinkel von 100° wird von den Geraden 1 und 5 aufgespannt. Um den gewünschten positiven MPTO von 37° zu erreichen, wird Mikrofon b nun an die Position c verschoben, der Winkel zwischen den beiden Mikrofonen, sowie der Abstand zueinander bleibt unverändert. Dies ist, mit anderen Worten ausgedrückt, eine Verschiebung des Punktes b auf einer Kreisbahn um Punkt a mit dem Radius

25cm.

Die räumliche Verschiebung parallel zur mittleren Achse (3) zwischen den Mikrofonen beträgt etwa 15cm, damit entsteht für diese Richtung eine Laufzeitdifferenz von 0,44ms (vgl. Abb. 19 MPTO) in Richtung der Achse (3). Die räumliche Verschiebung parallel zur Hauptachse (2) des WMA beträgt etwa 9,5cm, dies entspricht einer Laufzeitdifferenz von 0,28ms (vgl. Abb. 16 ETO) in Richtung der Achse (2). Der angegebene Winkel der MPTO resultiert also aus der für die Drehung nötigen gewünschten Verzögerung der Laufzeit in Richtung der ursprünglichen Symmetrieachse der Mikrofone.

3. Untersuchungen zur Wiedergabequalität

Nachdem nun die Vorgehensweise und die vielen Möglichkeiten bei der Auslegung eines WMA erklärt wurden, wird an dieser Stelle auf Einschränkungen bei der Auswahl eingegangen. Wo liegen also Grenzen für die Auswahl, wo die Unterschiede der Anordnungen in Hinblick auf die bei der Wiedergabe zu erwartende Qualität?

Es lassen sich dabei vorerst zwei Arten von Einschränkungen unterscheiden. Zum einen die Grenzen bei der Wahl des Aufnahmewinkels aus den SRA-Kurven, zum anderen die Grenzen von Laufzeit- und Intensitätsoffsets. Dies sind die Themen der nächsten beiden Kapitel.

3.1. Grenzen der Wahl des Aufnahmewinkels aus den SRA-Kurven

Bisher wurde der Eindruck erweckt, dass die Wahl des Aufnahmewinkels aus den SRA-Kurven völlig beliebig sei. Williams gibt jedoch Grenzen für diese Wahl vor (vgl. [10]).

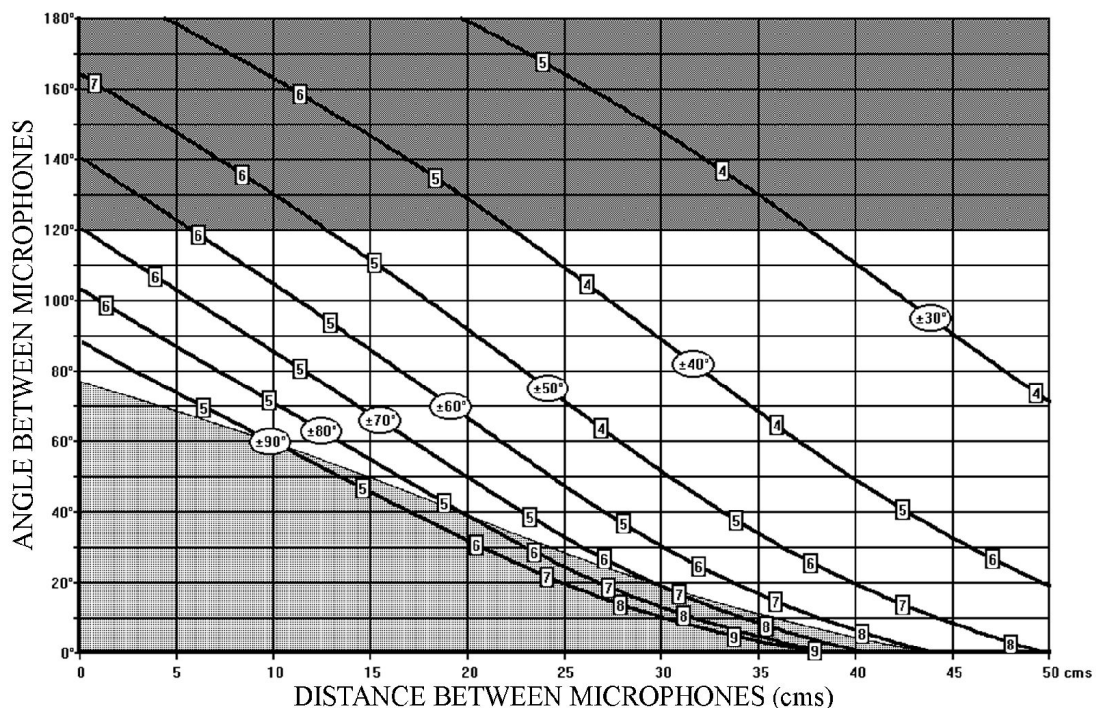


Abbildung 21: SRA-Kurven mit Grenzen (schraffierter Bereich) für das Verhältnis direkter / indirekter Schall sowie Stärke der Winkelverzerrung als Ziffern in den Kästchen

Bei der Wiedergabe des Schallfeldes, das von einem Mikrofonpaar aufgenommen wird, unterscheidet Williams folgende Probleme:

- Verzerrung des Lokalisationswinkels zum Quellwinkel innerhalb des Schallfeldes bei der Wiedergabe
- Veränderung des Verhältnisses zwischen direktem und reflektiertem Schall innerhalb des Schallfeldes bei der Wiedergabe

Abbildung 21 veranschaulicht diese Probleme. Die schraffierten Bereiche kennzeichnen dabei die Kombination aus Abstand und Winkel, bei denen sich das Verhältnis zwischen direktem und reflektiertem Schall innerhalb des Aufnahmebereichs merklich ändert (vgl. [5]). Bei den möglichen Anordnungen aus dem oberen schraffierten Bereich erhöht sich der Anteil des reflektierten Schalls im Verhältnis zum Direktschall vom Rand zur Mitte des Aufnahmebereichs hin. Der untere schraffierte Bereich kennzeichnet den umgekehrten Fall. Hier wird der Anteil des reflektierten Schalls vom Rand zur Mitte hin kleiner. Wobei Williams anmerkt, dass diese Grenzen nur eine Näherung des genannten Sachverhaltes darstellen.

Die Ziffern in den eckigen Kästchen an den einzelnen Kurven stellen laut Williams die maximale nichtlineare Verzerrung zwischen dem Winkel der Schallquelle und dem Lokalisationswinkel bei der Wiedergabe dar (vgl. [5]). Diese Verzerrung liegt je nach Kombination aus Abstand und Winkel der Mikrofone zwischen 4° - 9° . Nun meint diese Verzerrung aber *nicht* eine gleichmäßige „Stauchung“ eines Aufnahmewinkels von beispielsweise $\pm 50^{\circ}$ bei der Wiedergabe über zwei Lautsprecher, die gewöhnlich mit $\pm 30^{\circ}$ zum Hörer angeordnet sind. Hierbei würde jedem Einfallswinkel ein Lokalisationswinkel *linear* zugeordnet werden. Williams beschreibt es vielmehr als eine *nichtlineare* Verzerrung, bei der es bei Quellen, die nicht in der Mitte oder am Rand des Aufnahmebereiches liegen, zu einer Verzerrung des Lokalisationswinkels in Richtung des jeweiligen Lautsprechers kommt. Schallquellen werden tendenziell weiter „außen“ lokalisiert. Dies liegt an einem für die jeweilige Anordnung ungünstigen Verhältnis zwischen Laufzeit- und Pegeldifferenzen, d.h. eine der beiden Größen ist im Verhältnis zur anderen wesentlich zu groß. Eine Anordnung mit großer Mikrofonbasis und geringem Winkel besitzt einen erheblichen Anteil an Laufzeitdifferenzen. Bei geringem Abstand und sehr großem Winkel der Mikrofone sind dagegen stark ausgeprägte Pegeldifferenzen für die Bildung der Lokalisationsrichtung verantwortlich. Im Allgemeinen verursacht nun der nichtlineare Zusammenhang des Gehörs von Pegel-/ Laufzeit-

differenz und wahrgenommener Richtung der Quelle, besonders bei großen Laufzeitdifferenzen, nichtlineare Verzerrungen des Lokalisationswinkel (vgl. Kap. 3.2., Theile [16]).

Da die nichtlineare Verzerrung von Quellwinkel zu Lokalisationswinkel bei der Wiedergabe auch für kommende Betrachtungen von Bedeutung ist, wird sie von nun an als Winkelverzerrung („Angular Distortion“) bezeichnet.

Bei der Auslegung eines Segments eines WMA sollten also lediglich Abstands-/ Winkelkombinationen gewählt werden, für die beide Kriterien günstig erscheinen. Auch so bleibt noch eine Vielzahl von Varianten, die die meisten Anforderungen abdecken sollten.

3.2. Einschränkungen des Laufzeit- / Intensitätsausgleichs

Generell lässt sich feststellen, dass Offsets zu einer Verschiebung der Intensitäts-/ Laufzeitdifferenzenfunktion führen. Dies hat, wie bereits gesagt (vgl. Kap. 2.4.), eine ungleichmäßige Änderung der Laufzeit-/ Intensitätsdifferenzen über den Aufnahmebereich zur Folge.

Um nun abschätzen zu können, was dies für klangliche Auswirkungen haben könnte, und um generelle Aussagen über die qualitativen Unterschiede von Offsets und deren mögliche Probleme zu machen, müssen zuerst zwei psychoakustische Grundlagen klar sein:

- Die frequenzabhängige Ortung des Gehörs in Bezug auf Intensitäts-/ Laufzeitdifferenzen
- Die unterschiedliche Qualität der Lokalisation in Bezug auf Intensitäts-/ Laufzeitdifferenzen

So erfolgt bei tiefen Frequenzen unterhalb von 800Hz die Ortung hauptsächlich über interaurale Laufzeitdifferenzen, bei Frequenzen über 1600Hz hingegen vor allem über über interaurale Intensitätsdifferenzen. Zwischen diesen beiden Frequenzen gibt es einen Überlappungsbereich der beiden Ortungsarten (vgl. [17]).

Weiterhin ist aus psychoakustischen Untersuchungen bekannt, dass die Abbildungsschärfe bei durch Pegeldifferenzen erzeugten Phantomschallquellen mit wachsender Pegeldifferenz zunimmt. Die Sättigung ist erreicht, wenn die Ortung nur noch über einen Lautsprecher erfolgt. Der Eindruck der räumlichen Tiefe ist für reine pegelbasierte Auslenkung allerdings relativ gering (vgl. z.B. XY-

Mikrofonierung). Bei Phantomschallquellen, die durch Laufzeitdifferenzen erzeugt werden, nimmt die Abbildungsschärfe mit wachsender Laufzeitdifferenz ab. Hier ist die Sättigung erreicht, wenn nur noch der Präzedenzeffekt⁸ für die Ortung verantwortlich ist. Über laufzeitbasierte Auslenkung kann ein guter Eindruck der räumlichen Tiefe erreicht werden (vgl. z.B. Groß AB-Mikrofonierung). Eine laufzeitbezogene Auslenkung ist zusätzlich stark von der Impulshaftigkeit und Frequenz des Signals abhängig. Bei maximaler Auslenkung durch Laufzeitdifferenzen können starke Klangverfärbungen wahrgenommen werden (vgl. [11]).

An dieser Stelle lässt sich also schon vermuten, dass eine ungleichmäßige Änderung von Pegel- und Laufzeitunterschieden zu einer inhomogenen Wahrnehmung bei der Wiedergabe führen kann. So könnte beispielsweise (vgl. Abb. 16 oder 17) eine Schallquelle auf der einen Seite des Aufnahmebereichs, wenn im Vergleich mehr Intensitäts- als Laufzeitdifferenzen vorhanden sind, verhältnismäßig stabil geortet werden. Auf der gegenüberliegenden Seite allerdings, wo die Auslenkung zum größeren Anteil über Laufzeitdifferenzen funktionieren würde, wäre die Abbildung weniger stabil und weniger scharf.

Ferner kann es aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Ortung zu mehr oder weniger starken Winkelverzerrungen kommen. Schallquellen deren Frequenzanteil über 1600Hz groß ist, werden ungleichmäßig ausgelenkt, genauso wie Schallquellen deren Frequenzanteil hauptsächlich unterhalb von 800Hz liegt. Breitbandige Klangkörper werden über ihren Frequenzbereich inhomogen abgebildet.

Aus der Diplomarbeit von Helmut Wittek [11] stammen folgende Diagramme (Abb. 22, 23), die den Zusammenhang von Pegeldifferenz ΔL und Auslenkung einer Phantomschallquelle sowie Laufzeitdifferenz Δt und Auslenkung veranschaulichen. Sie beruhen auf Untersuchungen von Theile [16]:

⁸ Auch bezeichnet als: Haas-Effekt, Gesetz der ersten Wellenfront

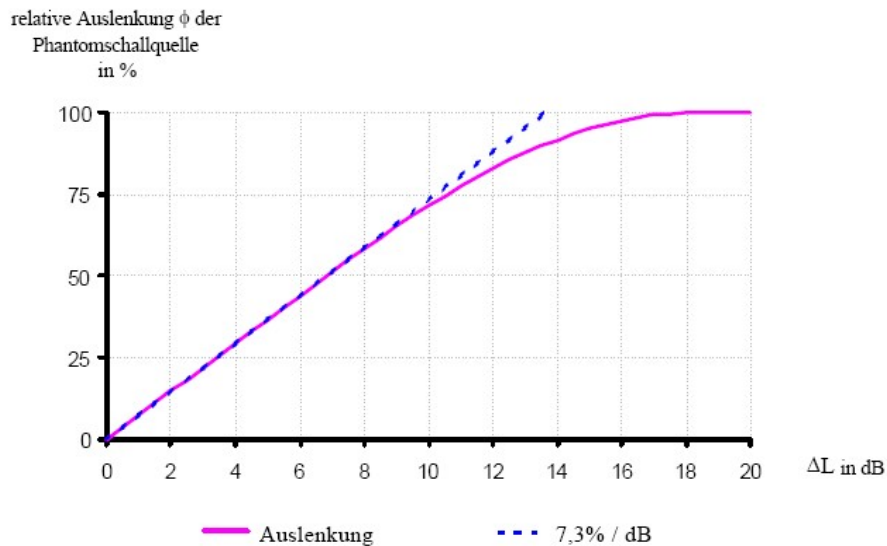


Abbildung 22: relative Auslenkung einer Phantomschallquelle in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz ΔL

Pegeldifferenzen:

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

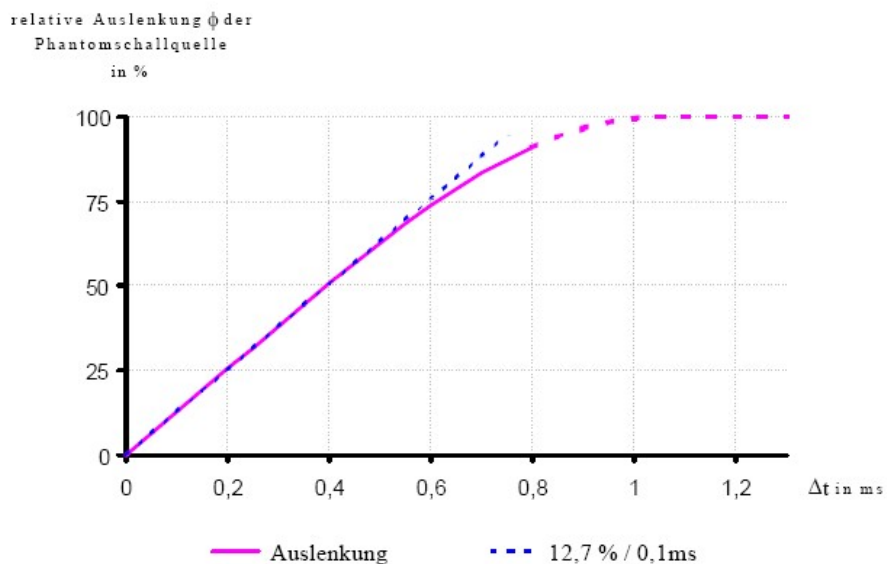


Abbildung 23: relative Auslenkung einer Phantomschallquelle in Abhängigkeit von der Laufzeitdifferenz Δt , gestrichelter violetter Bereich: Anstieg von Unschärfe und Klangverfärbung

Laufzeitdifferenzen:

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

Nun scheint aus psychoakustischer Sicht eine Vergrößerung der Laufzeitdifferenzen kritischer zu sein, als eine Vergrößerung der Pegeldifferenzen. Im Falle von elektronischen Offsets lässt sich allerdings erkennen, dass die für die Auslenkung einer Phantomquelle relevanten Laufzeit-/Pegeldifferenzen, die bei der Verschiebung des Graphen der Intensitäts-/ Laufzeitdifferenzenfunktion (vgl. Kap. 2.4., Abb. 16/17) vorkommen, sich für ETO und EIO kaum unterscheiden. Worauf allerdings geachtet werden sollte, ist die, unabhängig von der Art des Offsets, maximal verursachte Laufzeitdifferenz eines Mikrofonpaares inklusive Offset. So sollte diese Laufzeitdifferenz in Anlehnung an Abbildung 22 sicherlich kleiner als eine Millisekunde sein. Am problematischsten erscheinen große Offsets durch MPTO. Im Vergleich zu ETO/EIO sind hier die Nichtlinearitäten am stärksten ausgeprägt (vgl. Kap. 2.4., Abb. 19).

Williams hingegen gibt ferner zu bedenken, dass elektronische Intensitätsoffsets vorsichtig einzusetzen sind, da diese das Gleichgewicht der allgemeinen Energieverteilung innerhalb der Anordnung verändern. Dies ist bei der Anpassung der seitlichen Segmente ein Problem (Kap. 2.3.), liegt aber lediglich an der unerwünschten Beeinflussung der vorderen Segmente bzw. des hinteren Segments, nicht an psychoakustischen Phänomenen.

Gib es nun Möglichkeiten den potentiellen Problemen entgegenzuwirken?

Nach Theile [12] addieren sich Pegel- und Laufzeitunterschiede im linearen Bereich gleichsinnig. Eine Kombination von Pegel- und Laufzeitunterschieden scheint daher eine geeignete Möglichkeit zu sein, um den Nachteilen reiner laufzeitbasierter Auslenkung entgegenzuwirken. Der Anteil der Laufzeitdifferenzen an der Auslenkung ist auf diese Weise geringer. Hinzu kommt, dass, wie in Kapitel 2.2. bereits gezeigt (vgl. auch Abb. 18), die Kurve der Intensitäts-/ Zeitdifferenzenfunktion mit kombinierten Offsets wieder den Nullpunkt schneidet und damit eine Symmetrie der Intensitäts-/Laufzeitdifferenzen im Aufnahmebereich vorliegt (bis auf die äußeren Randbereiche).

Theile weist allerdings darauf hin:

„[...] , daß die Beziehung auf gegensinnige Kombinationen praktisch nicht anwendbar ist. Entsprechende Messungen haben gezeigt, daß bereits kleine gegensinnig wirkende $\Delta L/\Delta t$ -Werte die Lokalisationsschärfe stark reduzieren.“ ([16], S. 175)

Dieses Phänomen ist auch als „Trading“ bekannt und sollte in Form von gegensinnigen Offsets natürlich vermieden werden.

Es bleibt abschließend festzustellen, dass genaue Grenzen für Offsets schwierig festzulegen sind. Zusammenfassend erscheinen allerdings folgende Punkte wichtig:

- Offsets sollten gering gehalten werden
- Eine möglichst symmetrische Änderung der Laufzeit-/Pegeldifferenzen über den Aufnahmebereich sollte angestrebt werden
- Um Probleme zu minimieren, scheint eine Kombination von Intensitäts- und Laufzeitoffsets sinnvoll, wobei gegensinnige Offsets zu vermeiden sind

Die Kombinationen verschiedener Offsets wird dabei in der Praxis wohl eher aufwendig sein. Wenn allerdings bei der Auswahl der Mikrofonanordnung bereits darauf geachtet wird, dass der Unterschied zwischen Abdeckungswinkel und Öffnungswinkel der Mikrofone möglichst klein ist, können von vorn herein große Offsets vermieden werden.

3.3. SRA-Kurven als Grundlage / Wiedergabe über Mehrkanal-Anordnung

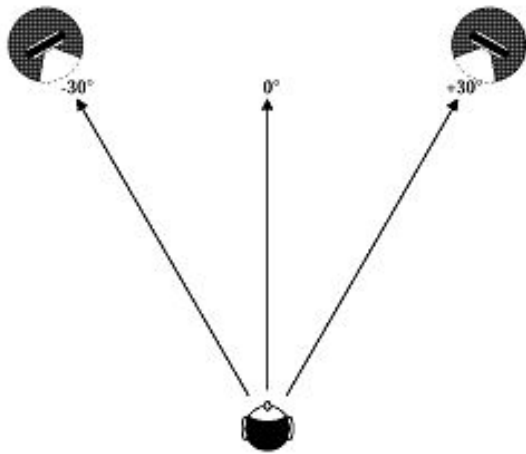


Abbildung 24: Standard Stereo-Lautsprecheranordnung

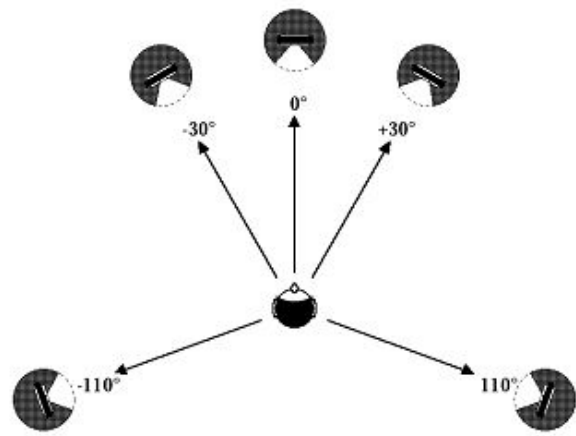


Abbildung 25: Mehrkanal-Lautsprecheranordnung (3/2) nach ITU-Standard

Die Berechnung der Positionen und Ausrichtungen aller Mikrofone eines WMA erfolgt anhand der SRA-Kurven von Williams. Diese Kurven wurden für die Wiedergabe mit einer gebräuchlichen Stereo-Lautsprecheranordnung⁹ ermittelt. Abbildung 24 zeigt die Ausrichtung der Lautsprecher mit $\pm 30^\circ$ zur mittleren Achse der Hörposition. Der gesamte Winkel beträgt also 60° . In der 3/2-Lautsprecher-Anordnung nach ITU-Standard in Abbildung 25 weichen die Winkel zwischen zwei Lautsprechern allerdings zum Teil nicht unerheblich von 60° ab. Von der Hörposition aus betrachtet beträgt der Winkel jeweils 30° zwischen zwei der drei vorderen Lautsprecher, 80° zwischen den seitlichen und 140° zwischen den hinteren Lautsprechern.

Nun ist die Frage, inwieweit sich durch diese Unterschiede praxisrelevante Probleme ergeben (vgl. auch [13]). Williams merkt dazu an, dass für die vorderen zwei Segmente kaum Unterschiede bezüglich Winkelverzerrungen entstehen (vgl. [2] S.7 Absatz 3). Für die seitlichen Segmente, und insbesondere für das hintere Segment, sind die auftretenden Winkelverzerrungen dagegen deutlich stärker. Da diese Segmente aber „nur“ den reflektierten Schall, also den Raumanteil aufnehmen, sieht Williams auch diesen Umstand als hinnehmbar an. Dies gilt natürlich nur dann, wenn die aufzunehmenden Schallquellen lediglich im Bereich der vorderen Segmente liegen. Diese Beurteilungen decken sich für die vorderen Segmente mit Untersuchungen von Theile [14] und Wittek [11].

⁹ Auch als „Stereo-Dreieck“ bezeichnet

Zusammenfassend bleibt also festzustellen, dass die SRA-Kurven, trotz unterschiedlicher Winkel der Lautsprecher bei der Wiedergabe, zumindest für die Berechnung der vorderen Segmente als zweckmäßige Grundlage dienen können. Was nun genau passiert, wenn nicht nur Raumanteil, sondern auch Direktschall von den hinteren Segmenten aufgenommen werden sollen, d.h. eine Anordnung der Schallquellen um das gesamte Array herum gewünscht ist, bleibt fraglich und müsste durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

3.4. Hörversuch zur Lokalisationsqualität

Nachdem die bisherigen Betrachtungen zur Qualität der Wiedergabe eher theoretischer Natur waren, wird an dieser Stelle nun auf Hörversuche eingegangen, die praxisbezogene Einschätzungen erlauben.

Von Segar und Rumsey¹⁰ wurde ein Hörversuch [15] durchgeführt, der Aussagen über die Wahrnehmung der Lokalisationsrichtung und Lokalisationsschärfe von verschiedenen 5-Kanal-Mikrofonanordnungen möglich machen soll. Die Wiedergabe erfolgte dabei über eine 3/2 Lautsprecheranordnung nach ITU-Standard.

In diesem Hörversuch wurden unter anderem zwei Anordnungen mit Mikrofonen mit nierenförmiger Richtcharakteristik verwendet. Diese beiden Anordnungen sind symmetrisch zum vorderen Mikrofon aufgebaut und unterscheiden sich im Abdeckungswinkel der Segmente. Abbildung 26 zeigt die Parameter der als „schmal“ bezeichneten Anordnung mit einem Abdeckungsbereich von 50° für das FRS und FLS, Abbildung 27 die Parameter der als „weit“ bezeichnete Anordnung mit einem Abdeckungsbereich von 65° für die beiden vorderen Segmente. Beide Anordnungen basieren auf den SRA-Kurven von Williams. Die Arrays wurden so ausgelegt, dass weder physikalische, noch elektronische Offsets verwendet werden müssen, um „Critical Linking“ zu erreichen. Der Abdeckungswinkel entspricht also dem Öffnungswinkel eines Mikrofonpaares des Arrays. Auch wenn dies nur eine der wenigen Möglichkeiten für ein WMA darstellt, entspricht es den Vorgaben von Williams und wird auch von Ihm als mögliche Variante vorgeschlagen. Die beiden Anordnungen lassen sich daher heranziehen, um qualitative Aussagen zur Lokalisationsqualität zu ermöglichen und eventuelle Unterschiede herauszustellen.

¹⁰ Paul Segar und Francis Rumsey: Institute of Sound Recording, University of Surrey, Guildford, UK

Front coverage segment				
Front centre to L or R coverage angle (deg)	50	Psychoacoustics		
Front centre to L or R pair angle (deg)	50	Max intensity diff (dB)	14.89	
Front centre to L or R spacing (cm)	70.0	Max time diff. (ms)	1.13	
Lateral coverage segment				
Lateral coverage angle (deg)	114	Psychoacoustics		
Lateral mic angle (deg)	114	Max intensity diff (dB)	14.89	
Lateral mic spacing (cm)	9.4	Max time diff. (ms)	1.13	
Rear coverage segment				
Rear coverage angle (deg)	32	Psychoacoustics		
Rear mic angles (deg)	32	Max intensity diff (dB)	14.89	
Rear mic spacing (cm)	124.8	Max time diff. (ms)	1.13	
Coordinates				
<i>(NB All reference front centre)</i>				
	X (cm)	Y (cm)	Angle (deg)	
Centre Front	0.0	0.0	0	
Left front	-63.4	29.6	-50	
Right front	63.4	29.6	50	
Left surround	-60.7	38.6	-164	
Right surround	60.7	38.6	164	

Abbildung 26: Parameter der „schmalen“ Mikrofon-Anordnung mit einem Abdeckungswinkel der vorderen Segmente von $50^{\circ}+50^{\circ}$

Front coverage segment				
Front centre to L or R coverage angle (deg)	65	Psychoacoustics		
Front centre to L or R pair angle (deg)	64	Max intensity diff (dB)	14.89	
Front centre to L or R spacing (cm)	47.2	Max time diff. (ms)	1.13	
Lateral coverage segment				
Lateral coverage angle (deg)	88	Psychoacoustics		
Lateral mic angle (deg)	88	Max intensity diff (dB)	14.89	
Lateral mic spacing (cm)	26.5	Max time diff. (ms)	1.13	
Rear coverage segment				
Rear coverage angle (deg)	54	Psychoacoustics		
Rear mic angles (deg)	56	Max intensity diff (dB)	14.89	
Rear mic spacing (cm)	62.3	Max time diff. (ms)	1.13	
Coordinates				
<i>(NB All reference front centre)</i>				
	X (cm)	Y (cm)	Angle (deg)	
Centre Front	0.0	0.0	0	
Left front	-39.8	25.3	-64	
Right front	39.8	25.3	64	
Left surround	-30.7	50.3	-152	
Right surround	30.7	50.3	152	

Abbildung 27: Parameter der „weitem“ Mikrofon-Anordnung mit einem Abdeckungswinkel der vorderen Segmente von $65^{\circ}+64^{\circ}$

In Abbildung 28 sind nun die Ergebnisse des Hörversuchs dargestellt, bei dem das Verhalten von Aufnahmewinkel zu Wiedergabewinkel bei der „schmalen“ Anordnung untersucht wurde. Die Hörer sollten die wahrgenommene Lokalisationrichtung einer Schallquelle mit bestimmten Einfallswinkel angeben. Obwohl die Ergebnisse bei knapp 70° Quellwinkel eine hohe Streuung aufweisen, kann grundsätzlich eine vergleichsweise gute Linearität bis 120° festgestellt werden. Die in Abbildung 29 dargestellten Ergebnisse für die „weite“ Anordnung zeigen bis zu einem Quellwinkel von etwa 30° so gut wie keine wahrgenommene Auslenkung, während von 40° bis 90° des Quellwinkels eine überproportional große Auslenkung mit im Anschluss folgender Sättigung stattfindet. Die Winkelverzerrungen sind hier deutlich stärker als im ersten Fall.

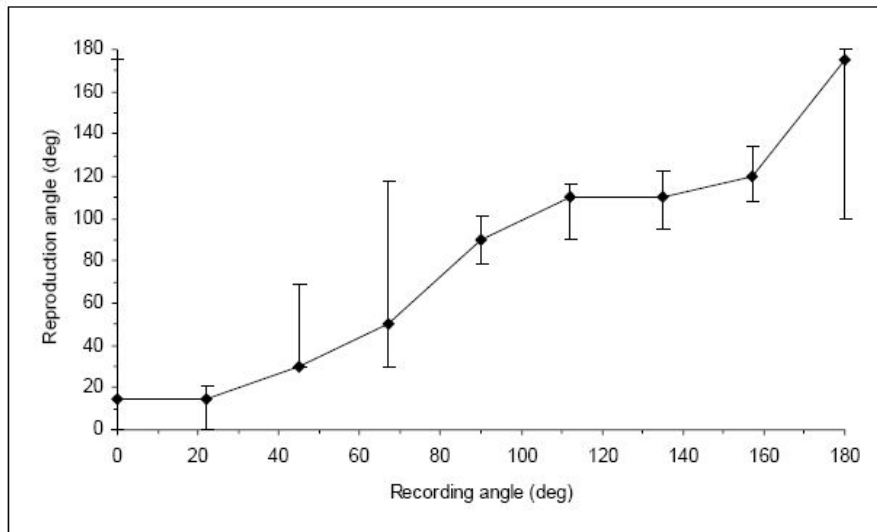


Abbildung 28: Ergebnisse des Hörversuchs zum Verhalten von Aufnahmewinkel zu Wiedergabewinkel bei der „schmalen“ Anordnung; vergleichsweise gute Linearität bis 120°

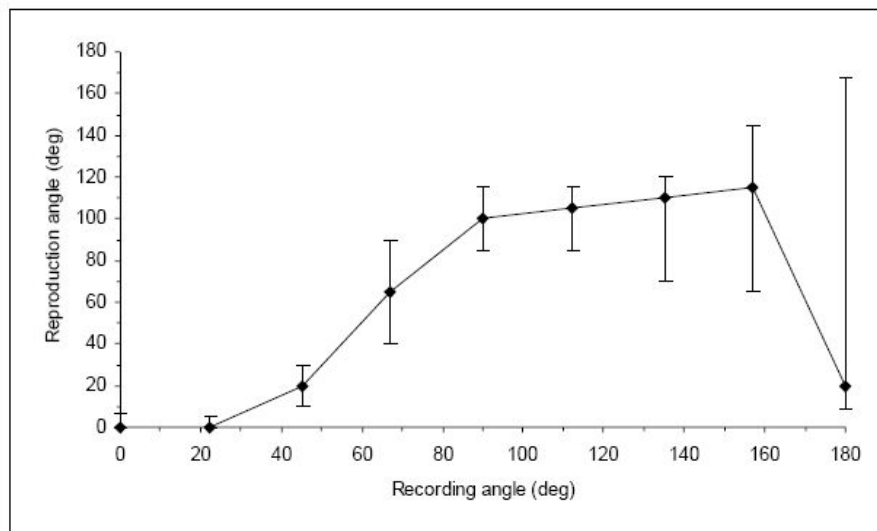


Abbildung 29: Ergebnisse des Hörversuchs zum Verhalten von Aufnahmewinkel zu Wiedergabewinkel für die „weite“ Anordnung; vergleichsweise schlechte Linearität bis 120°

Die Versuchsergebnisse zeigen also, dass die Lokalisationqualität für den größeren Aufnahmebereich des WMA, in Hinblick auf die Linearität des Aufnahme- zum Wiedergabewinkel, abnimmt. Um eine gute Linearität zu erhalten, scheint der optimale Winkel für die beiden vorderen Segmente nahe bei 50° zu liegen. Die signifikante Änderung der Winkelverzerrungen bei einem Unterschied von 30° (100° zu 130°) des Abdeckungsbereiches der vorderen Segmente, scheint eindeutig gegen die qualitative Gleichwertigkeit der einzelnen Möglichkeiten des WMA zu sprechen.

3.5. Übersprechen zwischen den Kanälen / Mehrfachabbildungen

Segar und Rumsey beobachteten in Ihren Versuchen ferner, dass das Übersprechen von einer Seite zur gegenüberliegenden Seite der Mikrofonanordnung für die Qualität der Lokalisation in der Praxis eine eher untergeordnete Rolle zu spielen scheint. Der Unterschied zwischen Mikrofonen mit nierenförmiger Richtcharakteristik und den im Versuch [15] ebenfalls verwendeten Kugelmikrofonen, stellte sich in Hinblick auf die Lokalisationsqualität als gering heraus. Die Lokalisationsschärfe bei ausgeschalteten hinteren Lautsprechern wurde allerdings, unabhängig von der Mikrofonanordnung, geringfügig besser.

Ein durch Übersprechen verursachtes Problem, was nun ausführlicher betrachtet werden soll, sind die sogenannten Mehrfachabbildungen. Sie bezeichnen zusätzliche Phantomschallquellen, die durch Übersprechen auf nicht an der Abbildung beteiligte Mikrofone entstehen. Dieses Problem gibt es bei der stereofonen Wiedergabe einer Aufnahme mit zwei Mikrofonen naturgemäß nicht.

Eine Schallquelle, die zwischen zwei benachbarten Mikrofonen liegt, wird auch von allen weiteren Mikrofonen mehr oder weniger stark aufgenommen. Jede Kombination zweier Mikrofone erzeugt dabei eine Phantomschallquelle unterschiedlicher Position und Intensität. Im Idealfall sollte natürlich nur eine erzeugt werden. Die zusätzlichen Phantomquellen erschweren eine Lokalisation der eigentlichen Quelle. Die Lokalisationsschärfe und Stabilität der Abbildung wird verringert. Auch die Klangfarbe kann sich durch Interferenzen ändern.

Dies ist vor allem ein Problem bei der Wiedergabe einer Schallquelle über die drei vorderen Lautsprecher einer 3/2-Anordnung, die von der vorderen Dreiergruppe aufgenommen wurde, da die Lokalisationsqualität einer von den vorderen drei Lautsprechern erzeugten Phantomschallquelle natürlich wichtiger erscheint, als die korrekte Lokalisation des einhüllenden Raumanteils, die aufgrund der Lautsprecheranordnung prinzipbedingt schon schlechter ist (vgl. Kap. 3.3., [13]).

Ziel sollte nun also bei Mehrkanal-Anordnungen sein, das Übersprechen zwischen den an der Abbildung einer Quelle beteiligten, und den nicht beteiligten Mikrofonen, möglichst gering zu halten.

Wie gut oder schlecht ist nun das Übersprechverhalten eines WMA?

Auch hier kann nur auf zwei Varianten eines WMA eingegangen werden. Ferner wird in den Untersuchungen lediglich die vordere Dreiergruppe betrachtet. Trotzdem lässt sich eine Tendenz in Hinblick auf das Übersprechverhalten erkennen.

Die von Wittek als „approach by Williams“-1 bezeichnete Anordnung besitzt entsprechend der beschreibenden Parameter aus Kapitel 1.1. folgende Größen:

$$X1 = 50,05\text{cm}, Y2 = 22,81\text{cm}, \alpha=75^\circ$$

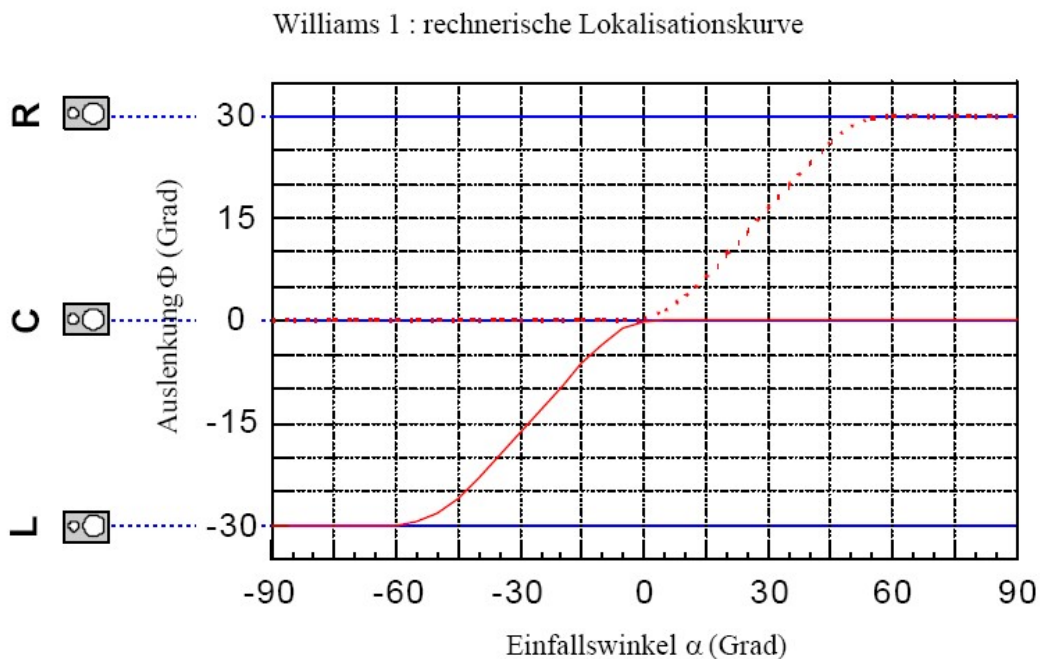


Abbildung 30: „approach by Williams“ - 1: rechnerische Lokalisationskurve; Einfallswinkel zu Auslenkung, Aufnahmebereich etwa 110° , Mikrofonparameter: $X1 = 50,05\text{cm}, Y2 = 22,81\text{cm}, \alpha=75^\circ$

Abbildung 30 zeigt die rechnerisch aus Pegel- und Laufzeitdifferenzen ermittelte Lokalisationskurve der genannten Mikrofonanordnung. Die Auslenkung einer Phantomschallquelle in Abhängigkeit eines Einfallswinkels ist dabei dargestellt. Dieses Diagramm ist lediglich eine andere Form der Darstellung für die bereits in Kapitel 2.4. ausführlicher beschriebenen Funktionen der Intensität-/Laufzeitdifferenzen. Hier sind nun drei Mikrofone beteiligt und die zugrunde liegenden Intensität-/Laufzeitdifferenzen werden nicht mehr dargestellt.

Wittek merkt folgende Beobachtungen an:

Aufnahmebereich: ca. 110°

Verlauf: etwas mittig

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

„Mittiger Verlauf“ meint dabei die Häufung der Abbildung um den mittleren Lautsprecher herum. Der erhöhte Übersprechpegel (→Phantomschallquellen) verursacht diese „Mittigkeit“. Der große Anteil von Laufzeitdifferenzen kann aus der Abbildung nicht entnommen werden, er lässt aber aus den zur Darstellung der Auslenkung nötigen Intensität- und Laufzeitdifferenzen erkennen.

Im späteren Hörversuch wurde nun von Versuchspersonen die Lokalisationsrichtung in Abhängigkeit des Quellwinkel ermittelt. Dabei kamen verschiedene Mikrofonanordnungen zum Einsatz. Wichtig erscheint an dieser Stelle aber hauptsächlich die im Vergleich zu den rechnerischen Kurven gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Der durch Winkelverzerrungen verursachte „mittige“ Verlauf kann also auch in der Praxis bestätigt werden. Eine weitere untersuchte, als „approach by Williams“-2 bezeichnete Anordnung mit etwa 120° Aufnahmebereich, besitzt dabei einen noch stärker „mittigen“ Verlauf.

Diese Ergebnisse korrespondieren mit den Hörversuchen von Segar und Rumsey [15], bei denen die „weite“ Anordnung auch eine Häufung der Abbildung um den mittleren Lautsprecher erkennen lässt (siehe Abb. 29). Die Vermutung einer allgemeinen Zunahme der Winkelverzerrungen bei Vergrößerung des Aufnahmebereiches scheint also naheliegend.

Die bereits geäußerte These der unterschiedlichen Lokalisationsqualität der einzelnen Varianten des WMA kann damit untermauert werden und lässt die Verwirklichung des Zieles, durch „Critical Linking“ für alle Arrays die Vermittlung eines homogenen Schallfeldes bei der Wiedergabe zu erreichen, fraglich erscheinen.

4. Zusammenfassung

Mit dem Konzept des WMA verfolgt Williams das Ziel, den Toningenieur bei der Suche nach der optimalen Mikrofon-Anordnung für die jeweilige Aufnahmesituation zu unterstützen. Durch die vielen Varianten und die damit verbundene Flexibilität soll eine Anpassung an verschiedenste Gegebenheiten (unterschiedliche Klangkörper / Raumakustik) ermöglicht werden. Alle Arrays sollen dabei ein homogenes Schallfeld bei der Wiedergabe vermitteln. Eine möglichst gleichmäßige Abdeckung des gesamten Aufnahmebereiches wird daher angestrebt (vgl. „Critical Linking“, Kap 1.1. / 1.3.).

Diese Arbeit kann nun aufgrund ihres Umfangs keine umfassende Abhandlung aller Aspekte der Möglichkeiten und potentiellen Probleme des WMA darstellen, dennoch lassen die grundsätzlichen Betrachtungen und ausgewählten Beispiele aus Hörversuchen allgemeinere Schlüsse in Hinblick auf prinzipielle Vor- und Nachteile des WMA zu.

Was sind nun abschließend betrachtet die Vorteile, wo liegen die Nachteile des WMA?
Inwiefern wurden die von Williams angestrebten Ziele erreicht?

Vorteile

Sehr viele verschiedene Anordnungen werden zu Verfügung gestellt. Mit entsprechender Kenntnis der Gestaltungsprinzipien lässt sich eine individuelle Anpassung an eine Aufnahmeumgebung erreichen. Dies ist durch die in einem weiten Bereich wählbare Größe der Aufnahmewinkel der einzelnen Segmente möglich (vgl. Kap. 2).

Nachteile

Die wenigen vorgestellten Beispiele zeigen bereits deutliche Unterschiede hinsichtlich der korrekten Reproduktion des Schallfeldes, so kann es je nach Wahl des Aufnahmebereiches zu Verzerrungen zwischen Quellwinkel und Lokalisationswinkel kommen (vgl. 3.4., 3.5.).

Die Benutzung von Offsets kann aus psychoakustischer Sicht als problematisch angesehen werden. Durch Veränderung von Laufzeit- und/oder Intensitätsdifferenzen kann die Lokalisationqualität

verschlechtert werden. Eine mögliche Minimierung Offset-bezogener Probleme durch Kombinationen verschiedener Offsets (Laufzeit / Pegel) erscheint in der Praxis eher aufwendig (vgl. 3.2.).

Bei der Wiedergabe des hinteren Segments sind die Verzerrungen zwischen Quellwinkel und Lokalisationswinkel besonders stark. Das WMA scheint daher nur für Aufnahmesituationen sinnvoll, bei denen die aufzunehmenden Schallquellen lediglich im Bereich der vorderen Segmente liegen, sofern eine korrekte Abbildung der hinteren Quellen wichtig ist (vgl. 3.3.).

Fazit

Die Auswahl eines WMA allein anhand der gewünschten Größe des Abdeckungswinkels der einzelnen Segmente erfolgen zu lassen, erscheint nicht sinnvoll. Die geeignete Wahl des Öffnungswinkels zum Abdeckungswinkel erscheint dagegen geeignet, schon im Vorfeld potentielle Probleme durch Offsets zu minimieren.

Ob die vielen Möglichkeiten des WMA dem Toningenieur bei der Suche nach der optimalen Mikrofonanordnung für die jeweilige Aufnahmesituation nun helfen, oder durch die Vielzahl der ebenfalls möglichen Probleme dieser Anspruch nicht erfüllt werden kann, bleibt fraglich und müsste vor allem im Vergleich zu anderen Mikrofonierungskonzepten untersucht werden.

In jedem Fall erfordert das WMA vom Toningenieur ein umfassendes Verständnis der Prinzipien und einen kritischen Umgang mit den zur Verfügung gestellten Anordnungen.

Quellenverzeichnis

- [1] Michael Williams: „*Microphone Arrays for Natural Multiphony*“, 91st AES Convention in New York, Preprint 3157, 1991
- [2] Michael Williams, Guillaume Le Dû: „*Microphone Array Analysis for Multichannel Sound Recording*“, 107th AES Convention in New York, Preprint 4997, 1999
- [3] Michael Williams, Guillaume Le Dû: „*Multichannel Microphone Array Design*“, 108th AES Convention in Paris, Preprint 5157, 2000
- [4] Michael Williams: „*The Stereophonic Zoom, A Practical Approach to determining the Characteristics of a Spaced Pair of Microphones*“, 74th AES Convention in Paris, Preprint 2072, 1984
- [5] Michael Williams: „*The Stereophonic Zoom*“, This version of the Stereophonic Zoom ©2003 Rycote Microphone Windshields Ltd
- [6] Michael Williams, Guillaume Le Dû: „*The Quick Reference Guide to Multichannel Microphone Arrays, Part 1: using Cardioid Microphones*“, 110th AES Convention in Amsterdam, Convention Paper 5336, 2001
- [7] Michael Williams, Guillaume Le Dû: „*The Quick Reference Guide to Multichannel Microphone Arrays , Part 2: using Supercardioid and Hypocardioid Microphones*“, 116th AES Convention in Amsterdam, Convention Paper 6059, 2004
- [8] Michael Williams: „*The Whys and Wherefores of Microphone Array Crosstalk in Multichannel Microphone Array Design*“, 118th AES Convention in Barcelona, Convention Paper 6373, 2005
- [9] Michael Williams: „*Magic Arrays - Multichannel Microphone Array Design applied to Multiformat Compatibility.*“, 2007 122th AES Convention in Wien, Convention Paper 7057, 2007
- [10] Michael Williams: „*Early Reflections and Reverberant Field Distribution in Dual Microphone Stereophonic Sound Recording Systems*“, 91st AES Convention in New York, Preprint 3155, 1991
- [11] Helmut Wittek: „*Untersuchungen zur Richtungsabbildung mit L-C-R Hauptmikrofonen*“ Institut für Rundfunktechnik, Fachhochschule Düsseldorf, Studiengang Ton- und Bildtechnik: Diplomarbeit, 2000
- [12] Günter Theile: „*Neuere Erkenntnisse zur Wahrnehmung der Richtung und Entfernung von Phantomschallquellen und Konsequenzen für die stereofone Aufnahmepraxis*“, Tonmeisterinformationen, Jan. / Febr. 1984
- [13] Michael Williams: „*Multichannel Sound Recording Practice using Microphone Arrays*“, 24th international AES Conference, 2003
- [14] Günther Theile: „*Multichannel Natural Recording Based on Psychoacoustic Principles*“, 108th AES Convention, Preprint 5156, 2000

[15] Paul Segar, Francis Rumsey: „*Optimisation and Subjective Assessment of Surround Sound Microphone Arrays*“, 110th AES Convention, Preprint 5368, 2001

[16] Günther Theile: „*Hauptmikrofon und Stützmikrofon – neue Gesichtspunkte für ein bewährtes Aufnahmeverfahren*“, 13. Tonmeistertagung, München, 1984

[17] Jens Blauert: „*Spatial Hearing – The Psychophysics of Human Sound Localization*“, The MIT Press, Cambridge/MA, London/UK, 1997

Anhang

Ausgewählte Tabellen für verschiedene mögliche Mikrofonanordnungen eines WMA [6]:

TABLE 1a				
FRONT TRIPLET COVERAGE $72^\circ + 72^\circ$				
Microphone Orientation	Distance between microphones	X coordinates	Y1 coordinates (for both left and right microphones)	Microphone Position Time Offset (MPTO)
90° (R)	35 cms	+ 30.5 cms	17 cms	-15.6°
270° (L)		- 30.5 cms		
80° (R)	37 cms	+ 31 cms	20.5 cms	-6°
280° (L)		- 31 cms		
72° (R)	39 cms	+ 31.5 cms	23 cms	No Offset
288° (L)		- 31.5 cms		
60° (R)	42.5 cms	+ 33 cms	26.5 cms	+9°
300° (L)		- 33 cms		
50° (R)	45 cms	+ 34 cms	29.5 cms	+15.5°
310° (L)		- 34 cms		
40° (R)	48.5 cms	+ 36.5 cms	31.5 cms	+20.9°
320° (L)		- 36.5 cms		

Abbildung 31: Parameter für div. vordere Dreiergruppen eines WMA mit einem Abdeckungswinkel von $72^\circ+72^\circ$; Ausrichtung und Abstand der Mikrofone sowie benötigter physikalischer Laufzeitoffset (MPTO)

TABLE 1b						
LATERAL PAIRS		BACK PAIR				
Lateral Segment Coverage	Electronic Time Offset ETO	Back Segment Coverage	Mic Orient.	Angle between mics	Distance between mics	Y2 Coord
72°	No Offset	72°	160°(R) 200°(L)	40°	48 cms	58.5 cms
72°	No Offset	72°	155°(R) 205°(L)	50°	45 cms	59 cms
72°	No Offset	72°	144°(R) 216°(L)	72°	39 cms	60 cms
72°	No Offset	72°	135°(R) 225°(L)	90°	34.5 cms	62 cms
72°	No Offset	72°	130°(R) 230°(L)	100°	32 cms	63.5 cms

Abbildung 32: Parameter für div. seitliche und hintere Paare eines WMA mit einem Abdeckungswinkel von 72° ; Ausrichtung und Abstand der Mikrofone sowie benötigte Offsets

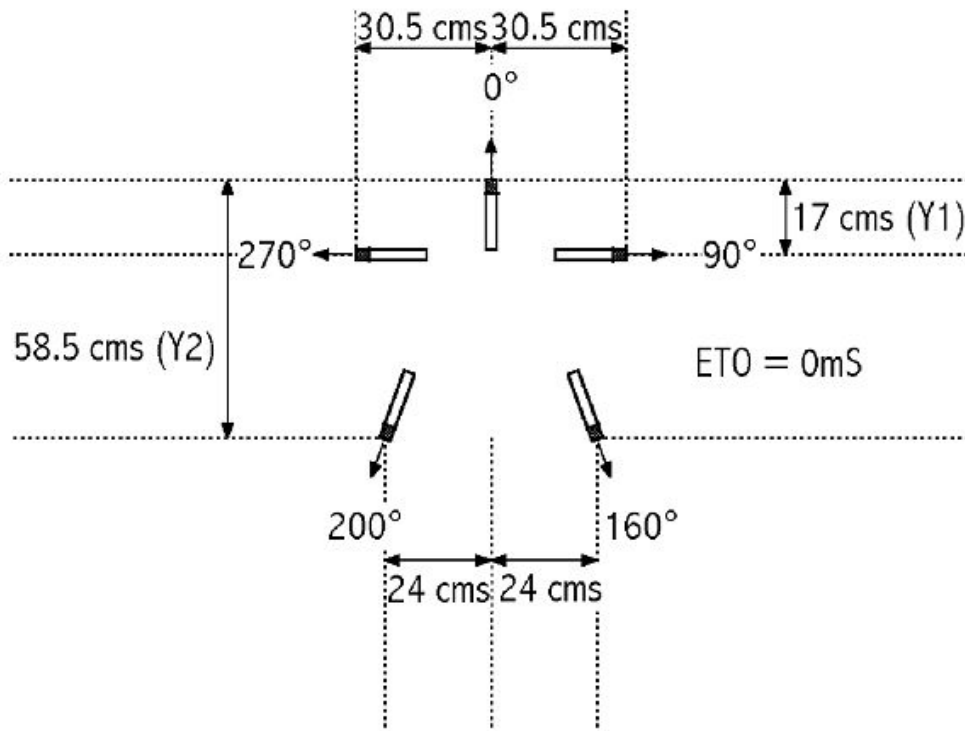


Abbildung 33: Anordnung der Mikrofone mit beschreibenden Größen; Tabelle 1a und 1b (Abb. 31), Zeile 1

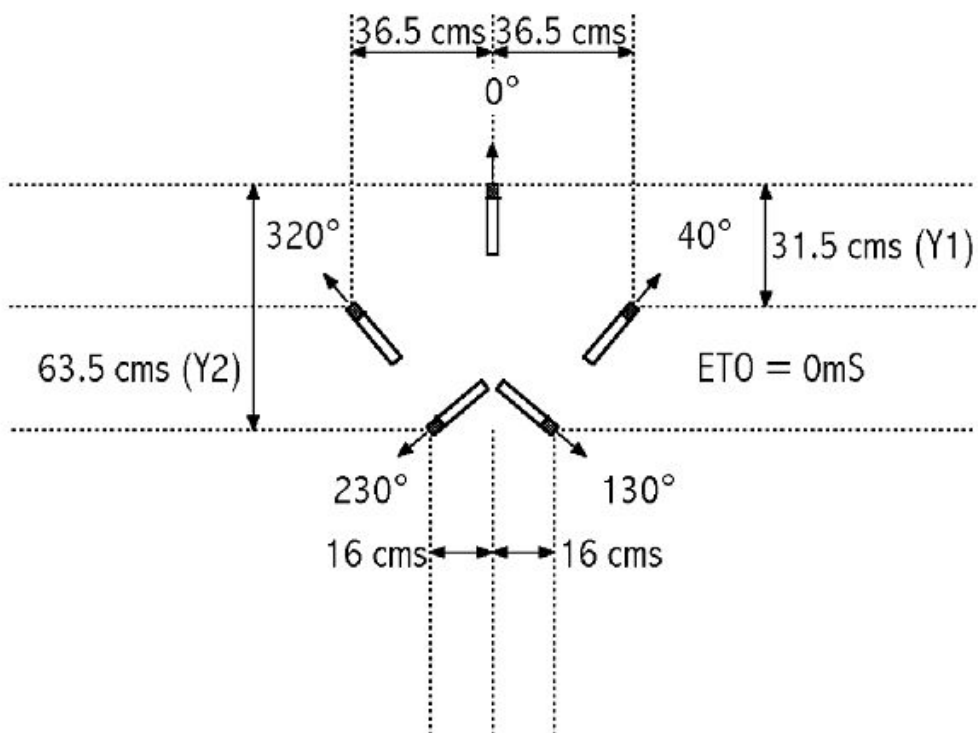


Abbildung 34: Anordnung der Mikrofone mit beschreibenden Größen; Tabelle 1a und 1b (Abb. 31), Zeile 6

TABLE 7a				
FRONT TRIPLET COVERAGE 60° + 60°				
Microphone Orientation	Distance between microphones	X coordinates	Y1 coordinates (for both left and right microphones)	Microphone Position Time Offset (MPTO)
90° (R)	46 cms	+ 42.5 cms	17 cms	-23°
270° (L)		- 42.5 cms		
80° (R)	48 cms	+ 43.5 cms	20.5 cms	-15°
280° (L)		- 43.5 cms		
70° (R)	50.2 cms	+ 44.5 cms	23.5 cms	- 7°
288° (L)		- 44.5 cms		
60° (R)	53 cms	+ 46 cms	26.5 cms	No Offset
300° (L)		- 46 cms		
50° (R)	56 cms	+ 47.5 cms	29.5 cms	+7°
310° (L)		- 47.5 cms		
40° (R)	59 cms	+ 50 cms	31.5 cms	+12°
320° (L)		- 50 cms		

Abbildung 35: Parameter für div. vordere Dreiergruppen eines WMA mit einem Abdeckungswinkel von 60°+60°; Ausrichtung und Abstand der Mikrofone sowie benötigter physikalischer Laufzeitoffset (MPTO)

TABLE 7b						
LATERAL PAIRS		BACK PAIR				
Lateral Segment Coverage	Electronic Time Offset ETO	Back Segment Coverage	Mic Orient.	Angle between mics	Distance between mics	Y2 Coord
75°	+ 0.69 mS	90°	140°(R) 220°(L)	80°	27 cms	57 cms
80°	+ 0.56 mS	80°	140°(R) 220°(L)	80°	32 cms	53 cms
85°	+ 0.42 mS	70°	135°(R) 225°(L)	90°	36 cms	51 cms
90°	+ 0.28 mS	60°	135°(R) 225°(L)	90°	45 cms	49 cms
95°	+ 0.1 mS	50°	130°(R) 230°(L)	100°	55 cms	49 cms
100°	- 0.1 mS	40°	120°(R) 240°(L)	120°	68 cms	52 cms

Abbildung 36: Parameter für div. seitliche und hintere Paare eines WMA mit einem Abdeckungswinkel von 75° bis 100° bzw. 90° bis 40°; Ausrichtung und Abstand der Mikrofone sowie benötigte Offsets

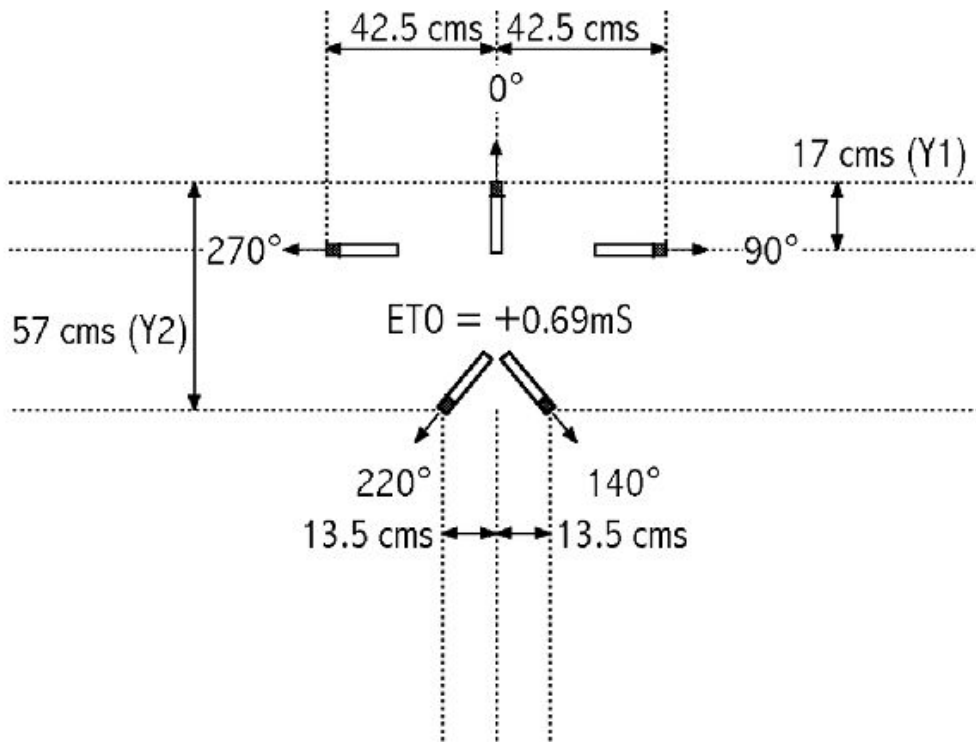


Abbildung 37: Anordnung der Mikrofone mit beschreibenden Größen; Tabelle 7a und 7b (Abb. 36), Zeile 1

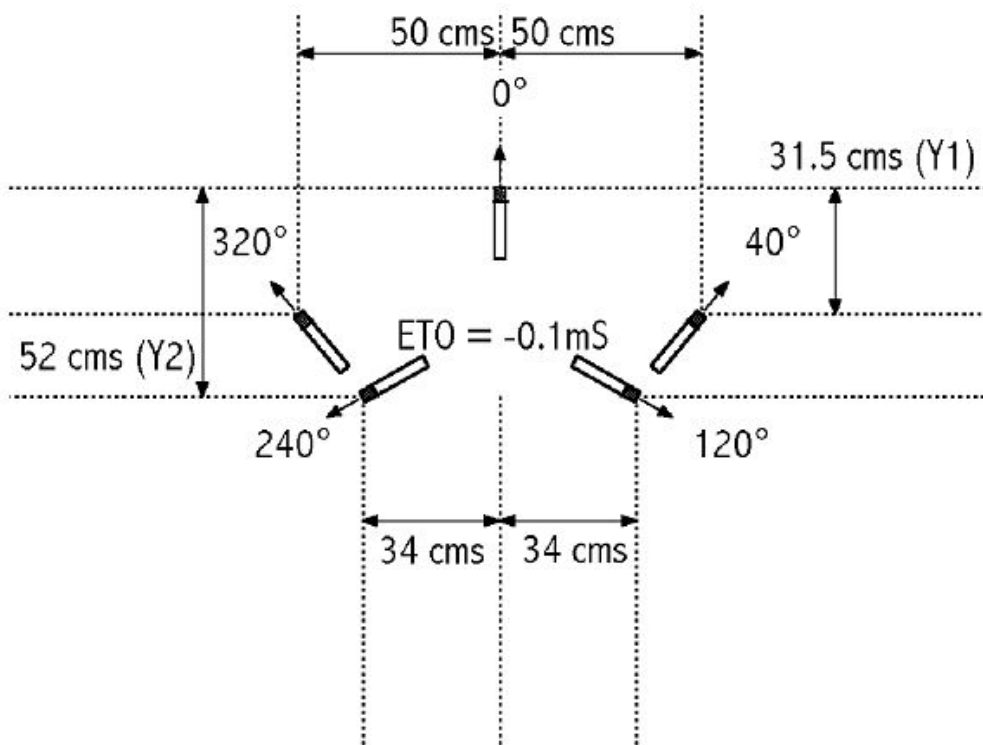


Abbildung 38: Anordnung der Mikrofone mit beschreibenden Größen; Tabelle 7a und 7b (Abb. 36), Zeile 6