

Durch eine Angabe über die Summenleistung erweiterte Williamskurven

von Benjamin Weiss

eingereicht am 28.04.07 als

FACHARBEIT

an der

SAE FRANKFURT

Audio Engineer Diploma

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und alle wörtlich und sinngemäß übernommenen Textstellen als solche kenntlich gemacht habe. Dies gilt auch für die in der Arbeit enthaltenen Zeichnungen, Skizzen und graphischen Darstellungen.

Mainz-Kostheim, den 28.04.07

Benjamin Weiss

1. Einleitung	2
2. Hören bei Stereolautsprecherwiedergabe	4
2.1. Lautsprecheraufstellung	5
2.2. Summenlokalisierung	5
2.2.1. Summenlokalisationskurven bei Laufzeitdifferenzen	6
2.2.2. Summenlokalisationskurven bei Pegeldifferenzen	8
2.2.3. Äquivalenz und Trading bei Kombination von Laufzeit- und Pegeldifferenzen	8
2.2.4. Der Einfluss der Lautsprecher auf die Summenlokalisierung	9
3. Mathematische Vereinfachungen	11
3.1. Ideale Mikrofonrichtcharakteristik	11
3.2. Festgelegter Schallquellenabstand	12
3.3. Näherungsfunktion	12
4. Zwei-Kanal-Mikrofonanordnungen	14
4.1. Berechnung der Laufzeit- und Pegeldifferenzen	15
4.2. Lokalisationskurven	16
5. Aufnahmewinkel	18
5.1. Der Aufnahmewinkel bei Laufzeitstereofonie	19
5.2. Der Aufnahmewinkel bei Pegelstereofonie	20
5.3. Der Aufnahmewinkel bei Äquivalenzstereofonie	21
6. Summenleistung	23
6.1. Summenleistungsdifferenzpegel	24
6.2. Die Summenleistung bei reiner Pegelstereofonie	25
6.2.1. X-Y-Verfahren	25
6.2.2. MS-Verfahren	27
6.3. Die Summenleistung bei reiner Laufzeitstereofonie	28
6.4. Die Summenleistung bei der Äquivalenzstereofonie	31
7. Ausblick	33
8. Literaturverzeichnis	34
9. Abbildungsverzeichnis	36

1. Einleitung

Im Zuge meiner Auseinandersetzung mit Stereomikrofonieverfahren fiel mir bald auf, dass in der einschlägigen Forschungsliteratur die Summenleistung betreffende Veröffentlichungen rar gesät sind. Wenn sich überhaupt welche finden ließen, so schnitten diese das Thema meist nur oberflächlich an. Der in der Umgangssprache als „Loch in der Mitte“ bezeichnete Effekt der Dämpfung mittiger Signale zeugt von dem Vorhandensein dieses Desiderats, weshalb ich es mir in der hier vorliegenden Arbeit zur gemacht habe, dem Mangel abzuhelpen und weitere, sich spezifisch mit der Summenleistung befassende Untersuchungen anzustellen. Ähnlich verhält es sich mit den mathematischen Zusammenhängen, die in der Fachliteratur vernachlässigt behandelt werden. Bei Sengpiel, der einen großen Fundus an Informationen zur Stereomikrofonie auf seiner Internetseite bereitstellt, sind diese wohl ausführlich dargestellt, allerdings führt der Umstand, dass die Internetseite offenkundig jeder Strukturierung ermangelt, zu enervierenden und überflüssigen Suchereien. Aus diesem Grund diente mir letztendlich die Diplomarbeit Helmut Witteks als wichtigste Quelle für die mathematischen Zusammenhänge der Stereomikrofonie.

Bei der Einarbeitung in die Thematik stellte sich zunächst einmal die Frage, welche Hilfsmittel die Berechnungen erleichtern würden. Der Image Assistant von Wittek, ein Programm zur Berechnung der Lokalisationskurven von Mikrofonanordnungen, das im Zuge seiner Diplomarbeit entstand, stellt die Summenleistung zwar dar, es fehlt jedoch die Beschriftung der Abszisse, wodurch die Kurven für genaue Untersuchungen unbrauchbar sind. Herr Wittek empfahl mir schließlich Excel, was mich in seiner Funktionsvielfalt überraschte, zu verwenden.

Zu Beginn der Arbeit sollen kurz die Gesetzmäßigkeiten, die der Stereophonie zugrunde liegen, erläutert werden, insbesondere die Summenlokalisierung. Sie ist die Grundlage für die stereophonen Wiedergabesysteme. Danach werden die mathematischen Zusammenhänge der Stereomikrofonie behandelt. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf die Berechnung des Aufnahmewinkels gelegt, da ohne Kenntnis dessen keine sinnvolle Auswertung der Summenleistung möglich ist. Dieser wird sich dann im nächsten Kapitel zugewandt. Dabei wird

auf die vorher erläuterten mathematischen Zusammenhänge zurückgegriffen, um jenen berechnen zu können. Um die Betrachtung der Summenleistung zu vereinfachen, wird in dieser Arbeit der Summenleistungsdifferenzpegel definiert, der die Summenleistungsdiagramme in einem Wert zusammenfasst. Dies ist zum Beispiel notwendig, um eine Angabe zur Summenleistung in die Williamskurven aufnehmen zu können. Es werden separat Pegel-, Laufzeit- und Äquivalenzstereofonie betrachtet. Die Arbeit schließt mit der Auswertung der über die Summenleistung gewonnenen Erkenntnisse bei den verschiedenen Stereomikrofonieverfahren ab.

2. Hören bei Stereolautsprecherwiedergabe

Die Stereolautsprecherwiedergabe verfolgt das Ziel, eine räumliche Verteilung der Hörereignisse zu erreichen. Dazu werden mindestens 2 Lautsprecher verwendet, die nach einer standardisierten Aufstellung, welche im nachfolgenden Kapitel besprochen wird, platziert werden. Die räumliche Verteilung ist bei dieser Zwei-Kanal-Anordnung auf die Horizontalebene beschränkt. Wissenschaftliche Zusammenhänge bei dieser Aufstellung wurden ausgiebig untersucht. Strahlen die zwei Lautsprecher kohärente Signale ab, ergeben sich nach BLAUERT (1974) vor allem drei wichtige Fälle:

Im ersten Fall entsteht *ein* Hörereignisort, welcher abhängig von beiden abgestrahlten Signalen ist. Er tritt ein, wenn die Laufzeit- und/oder Pegeldifferenzen äußerst gering sind. Es entsteht eine so genannte „Phantomschallquelle“. Diese „Phantomschallquelle“ wird im Gegensatz zur realen Schallquelle auch als „gedachte Schallquelle“ verstanden. Dieser „Effekt der Summenlokalisation bildet die Grundlage der stereofonen Übertragungsverfahren mit Wiedergabe über Lautsprecher“ (BLAUERT 1974). In dieser Arbeit wird der Fokus auf diese Summenlokalisation gerichtet. Die Laufzeit- und/oder Pegeldifferenzen können entweder auf elektrischem Wege durch Verzögerungsgeräte bzw. Panoramapotiometer erzeugt oder durch eine Stereomikrofonieanordnung direkt aufgenommen werden.

Des Weiteren kann *ein* Hörereignisort entstehen, der jedoch nur von dem Signal des einen Lautsprechers abhängig ist. Dies ist der Fall, wenn beispielsweise die Laufzeitdifferenzen mehr als eine Millisekunde betragen und gemäß dem Präzedenzeffekt nur noch der zuerst eintreffende Schall den Richtungseindruck bestimmt.

Beim letzten wichtigen Fall entstehen *zwei* Hörereignisorte, die jeweils fast ausschließlich von einer Signalquelle abhängig sind. Dieser Fall tritt ein, wenn die so genannte Echschwelle überschritten wird. Deren Wert ist abhängig von der Signalart. Er „kann in praxi zwischen 5 ms und mehreren 100 ms liegen“ (BLAUERT 2007).

2.1. Lautsprecheraufstellung

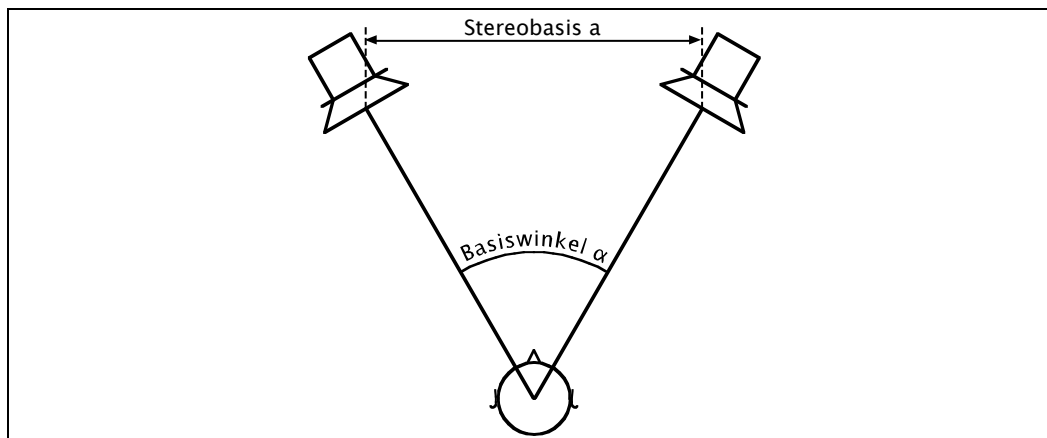


Abbildung 1

Meist werden die zwei Lautsprecher mit einem Basiswinkel von $\alpha = 60^\circ$ aufgestellt. Der optimale Abhörplatz (engl. sweet spot) bildet mit den zwei Lautsprechern ein gleichseitiges Dreieck. Der Abstand der zwei Boxen zueinander wird Stereobasis a genannt, wobei die Auslenkung der Phantomschallquellen entweder als relativer Auslenkungsgrad $\phi = 50\%$ oder als absolute Auslenkung $\Phi = 15^\circ$ angegeben werden kann. Die Umrechnung erfolgt folgendermaßen:

$$\Phi = \left(\frac{\alpha}{2} \right) \cdot \phi$$

Gleichung 1

Der Zuhörer muss sich immer genau zwischen den Lautsprechern befinden, da sich bei Bewegungen nach rechts oder links sich das ganze Klangbild verschiebt. Auf der Mittelachse kann sich der Zuhörer dagegen zwischen den beiden Lautsprechern bewegen, ohne dass sich die relative Auslenkung ändert. Deshalb wird sie meist relativ angegeben. Der Blick sollte immer nach vorne gerichtet sein.

2.2. Summenlokalisation

Die Summenlokalisation ist eine Theorie zur Erklärung der Lokalisation von Phantomschallquellen. Sie wird von PLATTE (1980) folgendermaßen beschrieben:

Als Summenlokalisierung bezeichnet man bekanntlich den Effekt, dass bei Beschallung einer Versuchsperson mit zwei räumlich getrennten Schallquellen, die kohärente Signale abstrahlen, ein resultierendes Hörereignis auftritt, dessen räumliche Merkmale von der Position beider Schallquellen und den von beiden Schallquellen abgestrahlten Signalen abhängen.

Durch unterschiedliche Pegel- und/oder Laufzeitdifferenzen kann die „Phantomschallquelle“ auf der Stereobasis verschoben werden. Kommen Pegel- und Laufzeitdifferenzen gleichsinnig vor, spricht man von Äquivalenz. Das Gegenteil, also das gegenseitige Kompensieren der Auslenkung, wird Trading genannt. Für die Mikrofonaufnahmep Praxis ist das Trading nicht zu gebrauchen, denn es „führt zu einer instabilen und verwaschenen Lokalisation der Phantomschallquelle“ (SENGPIEL 1994).

Wie und warum das Ohr die aus den beiden Schallquellen zusammengesetzten Signale zu nur einem Hörereignis zusammenführt, ist noch nicht vollständig geklärt. Hauptkritikpunkt an der Theorie zur Summenlokalisierung sind die Kammfiltereffekte und somit Klangfarbenveränderungen, die bei der Überlagerung der zwei zeitverzögerten Signale entstehen müssten, welche aber nur beim Hören mit einem Ohr wahrgenommen werden (THEILE 1980). Aus diesem Grund wurde von THEILE (1980) das Assoziationsmodell entwickelt. Es „erklärt eine[n] Reihe von weiteren, verwandten Klangeffekten. Eine weitergehende Evidenz für [die] ... Gültigkeit steht noch aus.“ (BLAUERT/BRAASCH 2007)

2.2.1. Summenlokalisationskurven bei Laufzeitdifferenzen

Werden bei einer Lautsprecheraufstellung nach Abbildung 1 die aus Hörversuchen ermittelten Richtungen der Hörereignissorte als Auslenkung Φ^1 über die Laufzeitdifferenz Δt aufgetragen, so ergeben sich die Summenlokalisationskurven. Die in der Literatur für eine maximale Auslenkung von $\Phi_{\max} = 30^\circ$ angegebenen Verzögerungszeiten schwanken laut SENGPIEL (1995) zwischen 1ms und 2ms. Je nach Signalart erhält man teils deutlich

¹ In den Abbildungen von WENDT (1961) wird für die Auslenkung Φ das Formelzeichen φ verwendet.

unterschiedliche Ergebnisse. Je impulshaftiger die Signale, desto niedriger ist die Laufzeitdifferenz die für eine 100%ige Auslenkung ausreicht. Je sinusförmiger die Signale, desto größer sind die nötigen Laufzeitdifferenzen.

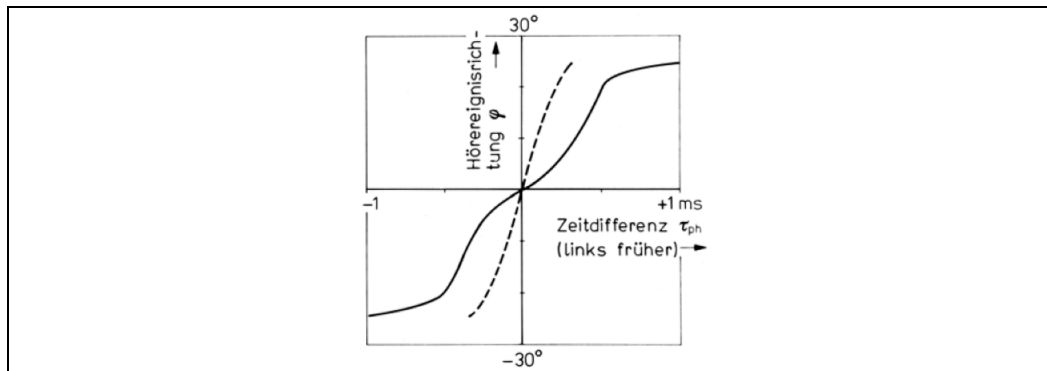


Abbildung 2

Die in Abbildung 2 dargestellten Kurven nach WENDT (1961) zeigen die Summenlokalisationskurven für Laufzeitdifferenzen. Die durchgezogene Linie stellt die Messergebnisse dar, bei denen der Kopf der Versuchspersonen fixiert wurde, die gestrichelte Linie hingegen die Ergebnisse, bei denen der Kopf frei beweglich war. Die Kurven verlaufen nicht linear. Besonders die Kurven bei fixiertem Kopf weisen einen deutlichen Knick auf. Ist der Kopf frei beweglich, lässt sich zumindest im mittleren Bereich ein einigermaßen linearer Verlauf feststellen. BLAUERT (1974) bemerkt für das Räumliche Hören bei einer Schallquelle:

Kopfbewegungen bieten die Möglichkeit, die Richtung einer Schallquelle mit hoher Sicherheit zu bestimmen. Nach vollzogenen Kopfbewegungen befindet sich das Hörereignis fast ausnahmslos in der Schalleinfallsrichtung.

Dieser Mechanismus führt beim Hören mit einer Stereostandartaufstellung offensichtlich zu einer Linearisierten Summenlokalisationskurve. In den äußeren Bereichen ist trotzdem noch ein leichter Knick erkennbar. Zur Verschiebung einer „Phantomschallquelle“ um einen bestimmten Betrag werden in den äußeren Bereichen der Stereobasis größere Laufzeitunterschiede benötigt als in der Mitte.

2.2.2. Summenlokalisationskurven bei Pegeldifferenzen

Entsprechend gibt es auch Summenlokalisationskurven, bei welchen die Auslenkung ϕ über die Pegeldifferenz ΔL aufgetragen wurde. Abbildung 3 zeigt die wieder von WENDT (1961) ermittelten Kurven zur Summenlokalisation für Pegeldifferenzen. Der Einfluss von Kopfbewegungen auf die Lokalisation fällt bei Pegeldifferenzen sichtlich geringer aus. In der Mitte der Stereobasis verläuft selbst bei fixiertem Kopf die Summenlokalisationskurve einigermaßen linear. Im äußeren Bereich der Stereobasis sind jedoch analog zu den Summenlokalisationskurven bei Laufzeitdifferenzen deutlich größere Pegeldifferenzen notwendig.

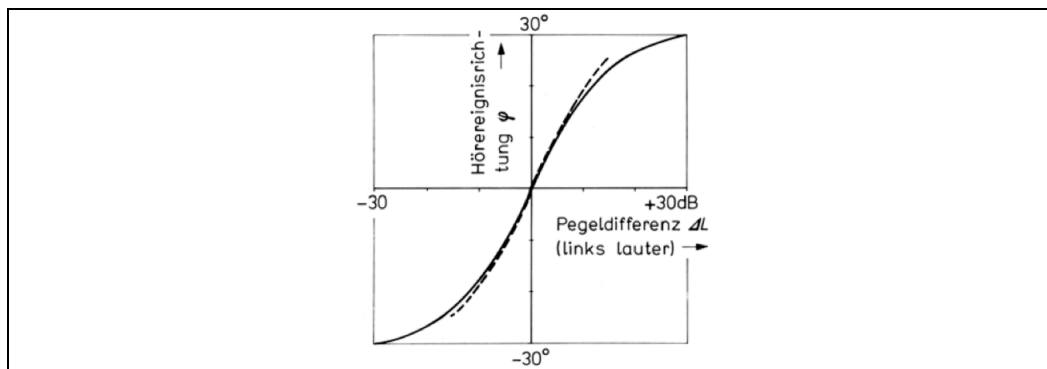


Abbildung 3

Für eine Auslenkung von $\phi = 100\%$ wurde laut SENGPIEL (1995) „eine Pegeldifferenz zwischen 16 bis 20dB ermittelt.“ Diese Pegeldifferenz ist wie bei Laufzeitdifferenzen von der Signalart abhängig.

2.2.3. Äquivalenz und Trading bei Kombination von Laufzeit- und Pegeldifferenzen

Kommen Laufzeit- und Pegeldifferenzen gleichsinnig vor, addieren sich die beiden Hörereignisrichtungen. Man spricht von Äquivalenz. In Abbildung 4 (SENGPIEL 1998) ist dies in den Quadranten I und III der Fall. Die R- und L-Kurven zeigt die Kombinationen von Laufzeit und Pegeldifferenzen, die zu einer Auslenkung von $\phi = 100\%$ auf der Stereobasis führen.

Treten Laufzeit- und Pegeldifferenzen gegenseitig auf, kompensieren sie sich in gewissem Maße. Man spricht in diesem Fall von Trading. Dies ist in der Abbildung von SENGPIEL (1998) in den Quadranten II und IV der Fall. Die M-Kurve zeigt, welche Kombinationen von Laufzeit und Pegeldifferenzen zu einer Ortung in der Mitte der Stereobasis führen.

Die Strecke zwischen Punkt E und Punkt F stellt die Werte der Lautsprecher Signale einer ORTF-Anordnung dar.²

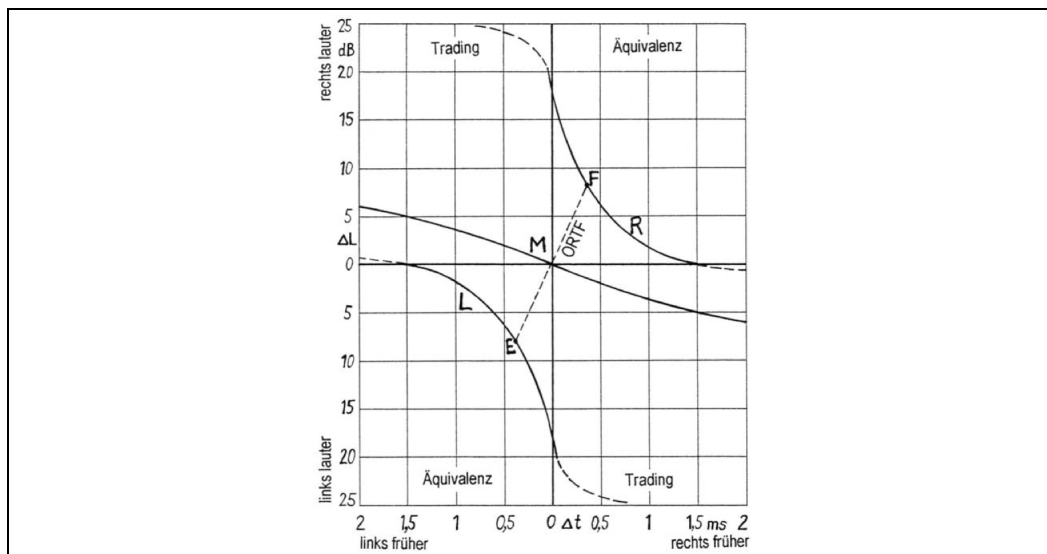


Abbildung 4

2.2.4. Der Einfluss der Lautsprecher auf die Summenlokalisierung

Laut GERNEMANN/RÖSNER (1998) hat die Qualität der Abhöre einen entscheidenden Einfluss auf die Summenlokalisationskurven. Da sich der Frequenzgang bei modernen Studiolautsprechern kaum unterscheidet, wurde die Sprungantwort und somit das Zeitliche Verhalten bei den Untersuchungen als Qualitätsmerkmal herangezogen. Lautsprecher A (LS A) weist eine deutlich schlechtere Sprungantwort auf als Lautsprecher B (LS B). Alle anderen Faktoren, die die Lokalisation beeinflussen können, wurden so weit wie möglich ausgeschlossen. So wurden die Untersuchungen im reflexionsarmen Raum durchgeführt, um die lokalisationsbeeinflussenden Reflexionen zu

² Zur ORTF-Anordnung siehe Kapitel 5.3

unterdrücken und den Einfluss der unterschiedlichen Richtwirkungen der Lautsprecher auszuschalten. Außerdem wurde auf geringe Paarabweichungen bei den Lautsprechertypen und nahezu exakter Paargleichlauf der Verstärker-Elektronik geachtet. Abschließend konnte festgestellt werden:

Grundsätzlich ist der Phantomschallquellenort bei dem präziseren LS B bei gleichen Laufzeit- bzw. Pegeldifferenzen weiter aus der Mitte herausgelenkt als bei LS A. Dieser erstaunliche Unterschied ist bei den Knack-Signalen am größten) ... Bei den Musik-Signalen ... ist er weniger deutlich, jedoch auch vorhanden (GERNEMANN/RÖSNER 1998)

3. Mathematische Vereinfachungen

Es lässt sich nicht vermeiden, bei der Berechnung von Williamskurven einige Sachverhalte zu vereinfachen. Das folgende Kapitel erläutert aus diesem Grund die notwendigen mathematischen Vereinfachungen.

3.1. Ideale Mikrofonrichtcharakteristik

Gleichung 2 zeigt die allgemeine Mikrofongleichung (SENGPIEL 1995). Sie wurde als Richtwert für Mikrofonhersteller definiert, damit die Richtwirkung Herstellerunabhängig abgeschätzt werden kann. s_θ ist der Dämpfungsfaktor, abhängig vom Schalleinfallswinkel θ , ausgehend von der 0° -Achse des Mikrofons. A und B sind richtcharakteristikspezifische Werte, die in Tabelle 1 aufgelistet sind (BALLOU 2002). A wird auch die Kugelkomponente der Richtcharakteristik genannt und $B \cdot \cos\theta$ auch die Achterkomponente der Richtcharakteristik (SENGPIEL 1995).

$$s_\theta = A + B \cdot \cos\theta$$

Gleichung 2

Die allgemeine Mikrofongleichung kann jedoch nur ein Kompromiss darstellen, da die Richtwirkung eines Mikrofons nicht über den ganzen Frequenzbereich gleich ist. Im mittleren Frequenzbereich stimmen die realen Werte mit denen der allgemeinen Mikrofongleichung meist annähernd überein. Bei tiefen Frequenzen jedoch nimmt die Richtwirkung von Mikrofonen ab und bei hohen Frequenzen zu. Wie stark dieser Effekt auftritt, ist zum einen von der Qualität der Mikrofone, aber auch vom Wandlerprinzip abhängig. Beispielsweise haben „Reine‘ Druckgradientenempfänger mit Achtercharakteristik ... wegen ihres einfachen Kapselaufbaus meist ein besonders frequenzunabhängiges Richtverhalten.“ (GÖRNE 2004)

	Kugel	Niere	Superniere	Hypernieren	Acht
A	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}-1}{2}$	$\frac{1}{4}$	0
B	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{3-\sqrt{3}}{2}$	$\frac{3}{4}$	1

Tabelle 1

Um den Einfluss der Abweichungen von der Idealform der Richtcharakteristiken möglichst gering zu halten, sollten für Stereomikrofonieanordnungen am besten immer zwei Mikrofone mit ausgesuchtem Frequenzgang verwendet werden. Dies gilt insbesondere bei günstigeren Mikrofonen.

3.2. Festgelegter Schallquellenabstand

Um möglichst allgemein gültige Angaben zu erhalten, wird der Schallquellenabstand R auf 5m festgelegt, sodass er immer groß gegenüber der Mikrofonbasis ist. Dadurch fließt das $1/r$ -Gesetz nicht so stark in die Berechnung mit ein. Die Werte behalten somit aber nur für Aufnahmesituationen, bei denen die Mikrofonanordnung weit genug von der Schallquelle entfernt aufgestellt ist, ihre Gültigkeit.

3.3. Näherungsfunktion

Die Auslenkung Φ kann nur aus Hörversuchen gewonnen werden. Aus diesem Grund muss für Berechnungen eine Näherungsfunktion definiert werden, welche natürlich nur ein Kompromiss darstellen kann. Der Einfluss des Lautsprechers und des Abhörraums kann beispielsweise nicht in die Berechnungen einbezogen werden.

Eine dieser Näherungsfunktionen für Laufzeitdifferenzen ist nach WITTEK (2000) folgendermaßen definiert: Der Kurvenverlauf ist bis zu einer Auslenkung von $\Phi = 15^\circ$ bzw. einer Verzögerung von rund 0,4 ms linear. Danach nimmt die Steigung der Kurve kontinuierlich ab, bis bei ungefähr 1ms die Kurve konstant verläuft. Für die entsprechenden Lokalisationskurven bei Pegeldifferenzen wurde von WITTEK (2000) ebenfalls eine Näherungsfunktion definiert. Diese verläuft bis zu einem Auslenkungsgrad von 50% linear, entsprechend einem Pegelunterschied von 7dB. Danach nimmt die Steigung der Kurve stetig ab und verläuft ab rund 18dB konstant.

Da laut WITTEK (2000) „Pegel- und Zeitkurven kongruent verlaufen, lässt sich eine gemeinsame Näherungsfunktion für beide Zusammenhänge definieren.“ Er geht dabei davon aus, „daß die ineinandergerechneten Pegel- und Laufzeitdifferenzen (Umrechnungsfaktor ca. $58\mu\text{s}/\text{dB}$) denselben Verlauf

haben wie die rein pegel- oder laufzeitbasierten Lokalisationskurven.“ Im linearen Bereich addieren sich nach THEILE (1984) gleichsinnige Pegel- und Laufzeitdifferenzen. Um die Werte addieren zu können, müssen jedoch zuerst die Laufzeitdifferenzen in Pegeldifferenzen umgerechnet werden (oder umgekehrt). Als Umrechnungsfaktor ergibt sich (WITTEK 2000),

$$z = \left(\frac{15}{2,2 \cdot t_{50\%}} \right) \frac{dB}{ms}$$

Gleichung 3

wobei $t_{50\%}$ die Laufzeitdifferenz ist, die zu einer Auslenkung von $\phi = 50\%$ auf der Stereobasis führt. $t_{50\%}$ wird auf 0,395ms festgelegt. Setzt man diesen Wert in die Gleichung ein, erhält man ein Umrechnungsfaktor von $z = 17,3dB/ms$ oder $1/z = 58\mu s/dB$. Damit im nichtlinearen Bereich keine Auslenkungen über $\phi = 100\%$ entstehen, müssen die Pegeldifferenzen und die umgerechneten Laufzeitdifferenzen zuerst addiert und dann in die Näherungsfunktion eingesetzt werden.

$$\Delta_{ges} = \Delta L + z \cdot \Delta t$$

Gleichung 4

Die dreiteilige Näherungsfunktion lautet nach WITTEK (2000) mathematisch:

$$\begin{aligned} |\Delta_{ges}| \leq 6k : \phi(\Delta_{ges}) &= \frac{|\Delta_{ges}|}{12 \cdot k} \\ 6k < |\Delta_{ges}| < 16k : \phi(\Delta_{ges}) &= \frac{\text{sgn}(\Delta_{ges})}{6000k^3} \left[-|\Delta_{ges}| + 8k(\Delta_{ges})^2 + 512k^2|\Delta_{ges}| - 144k^3 \right] \\ |\Delta_{ges}| \geq 16 \cdot k : \phi(\Delta_{ges}) &= \text{sgn}(\Delta_{ges}) \end{aligned}$$

Gleichung 5

Dabei ist $k = 9/8$ und „sgn(x) [ist] die Signum-Funktion, liefert also das Vorzeichen des Arguments.“ (WITTEK 2000)

Um den von GERNEMANN/RÖSNER (1999) festgestellten Einfluss der Qualität der Abhöre auf die Lokalisationskurven besser untersuchen zu können, wäre es sinnvoll je nach Qualität der Abhöre unterschiedliche Näherungsfunktionen zu definieren.

4. Zwei-Kanal-Mikrofonanordnungen

Je nach dem ob eine Stereomikrofonanordnung nur Laufzeitdifferenzen, Pegeldifferenzen oder beides aufzeichnet, wird zwischen reiner Laufzeitstereofonie, reiner Pegelstereofonie und Äquivalenzstereofonie unterschieden. Alle diese Anordnungen lassen sich zur Berechnung in einer allgemeinen Zwei-Kanal-Mikrofonanordnung zusammenfassen. Diese ist mit ihren Parametern in Abbildung 5 dargestellt. Eine Ausnahme stellt die MS-Stereomikrofonie dar (siehe Kapitel 6.2.2).

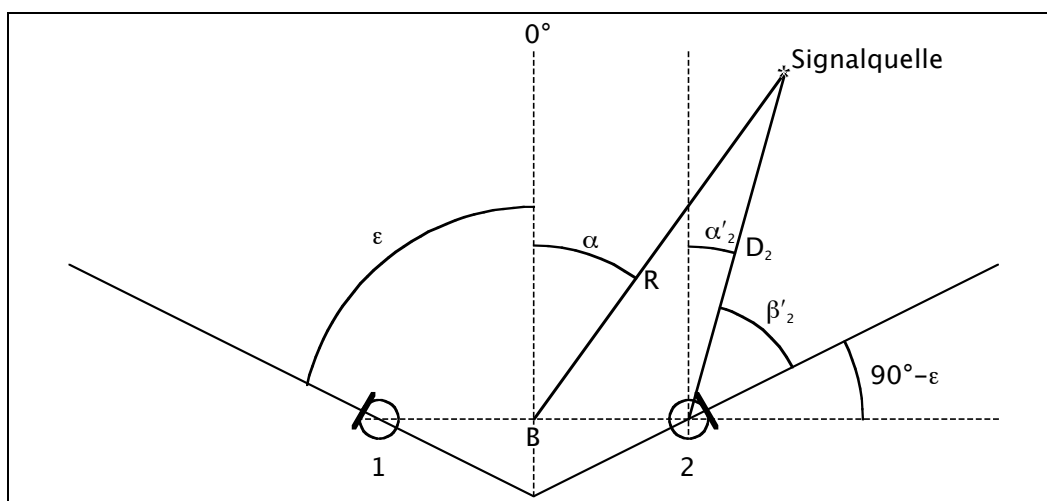


Abbildung 5

Laut GÖRNE (2004) wird Räumliche Tiefe von Laufzeitstereofonieverfahren am besten abgebildet wohingegen bei Pegelstereofonieverfahren die Richtungsabbildung besonders gut ist. Außerdem ist „das Laufzeitverfahren [ist] nur bedingt monokompatibel“ (GÖRNE 2004), da beim zusammenmischen der beiden Signale Kammfiltereffekte entstehen. Eine Äquivalenzstereomikrofonanordnung weist entweder eine bessere Tiefenstaffelung oder Lokalisationsschärfe auf, je nachdem ob hauptsächlich Laufzeit- oder Pegeldifferenzen an der Bildung der Hörereignisrichtung beteiligt sind.

Die Mikrofonbasis B ist der Abstand zwischen den zwei Mikrofonen, welche bei allen Betrachtungen in dieser Arbeit die gleiche Richtcharakteristik besitzen. Der Versatzwinkel ε ist der Winkel, um den die zwei Mikrofone symmetrisch aus der Mitte der Stereomikrofonanordnung herausgedreht

werden. Bei reiner Laufzeitstereofonie ist $\varepsilon = 0^\circ$. Bei reiner Pegelstereofonie ist $B = 0\text{cm}$. Der Abstand R der Signalquelle wird zur Mikrofonbasismitte angegeben. Der Einfallswinkel der Signalquelle auf die Mikrofonanordnung sei α und die unterschiedlichen Schalleinfallswinkel auf die Mikrofone α'_1 und α'_2 .

4.1. Berechnung der Laufzeit- und Pegeldifferenzen

Um die Laufzeit- und Pegeldifferenzen berechnen zu können, müssen zuerst die Eintreffwinkel auf die Mikrofone ebenso die Weglängen zu den Mikrofonen bekannt sein. Die Mikrofonbasis B , der Versatzwinkel ε und der Abstand R werden vorgegeben. Über den Kosinussatz lassen sich die unterschiedlichen Weglängen D_1 und D_2 von der Signalquelle zum Mikrofon 1 bzw. 2 abhängig vom Einfallswinkel α berechnen.

$$D_1 = \sqrt{R^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2 - R \cdot B \cdot \cos(90^\circ + \alpha)}$$

Gleichung 6

$$D_2 = \sqrt{R^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2 - R \cdot B \cdot \cos(90^\circ - \alpha)}$$

Gleichung 7

Davon ausgehend, kann man nun abhängig von den Weglängen D_1 und D_2 die Schalleinfallswinkel auf die Mikrofone α'_1 und α'_2 berechnen, bzw. die daraus resultierenden Schalleinfallswinkel β'_1 und β'_2 bezogen auf die 0° -Einsprechrichtung der Mikrofone.

$$\alpha'_1 = \arccos\left(\frac{R \cdot \sin\alpha + B/2}{D_1}\right) \Rightarrow \beta'_1 = 90 - \alpha'_1 + \varepsilon$$

Gleichung 8

$$\alpha'_2 = \arcsin\left(\frac{R \cdot \sin\alpha - B/2}{D_2}\right) \Rightarrow \beta'_2 = \varepsilon - \alpha'_2$$

Gleichung 9

Die resultierenden Laufzeitdifferenzen Δt die bei der Wiedergabe die Auslenkung auf der Stereobasis hervorrufen, können nun berechnet werden.

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= D_1 \div c_{\text{Luft}, 20^\circ\text{C}} \\ t_2 &= D_2 \div c_{\text{Luft}, 20^\circ\text{C}} \end{aligned} \right\} \Delta t = t_1 - t_2$$

Gleichung 10

Zur Bildung der Pegeldifferenzen ΔL muss noch ein weiterer Aspekt betrachtet werden. Nach dem 1/r-Gesetz fällt der Schalldruckpegel reziprok-linear, also z.B. um 6dB pro Entfernungsverdoppelung (SENGPIEL 2000). Dieser Faktor soll auch in die Berechnungen einfließen. Die durch den unterschiedlichen Abstand zur Schallquelle hervorgerufene Pegeländerung ΔL_D zwischen dem Mikrofonbasismittelpunkt und dem jeweiligen Mikrofon berechnet sich dementsprechend durch

$$\Delta L_{D_n} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{R}{D_n} \right)$$

Gleichung 11

Um die Pegeldifferenzen ΔL zwischen den zwei Mikrofonen bilden zu können, werden über die allgemeine Mikrofongleichung die beiden Dämpfungsfaktoren s_1 und s_2 abhängig von den Schalleinfallswinkeln β'_1 und β'_2 berechnet. Die Pegel der beiden Mikrofone L_1 und L_2 erhält man, wenn man die Dämpfungsfaktoren in Pegel umrechnet und dazu die Pegeländerungen ΔL_{D1} und ΔL_{D2} addiert.

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= A + B \cdot \cos(\beta'_1) \rightarrow L_1 = 20 \cdot \log_{10}(s_1) + \Delta L_{D1} \\ s_2 &= A + B \cdot \cos(\beta'_2) \rightarrow L_2 = 20 \cdot \log_{10}(s_2) + \Delta L_{D2} \end{aligned} \right\} \Delta L = L_1 - L_2$$

Gleichung 12

4.2. Lokalisationskurven

Die Lokalisationskurven geben den Zusammenhang zwischen dem Schalleinfallswinkel α und der Auslenkung Φ auf der Stereobasis wieder. Dazu werden die berechneten Laufzeit- und Pegeldifferenzen in die gemeinsame Näherungsfunktion eingesetzt und in einem Diagramm über den Schalleinfallswinkel α aufgetragen. Abbildung 6 zeigt drei Beispiele für unterschiedliche Lokalisationskurven. Aus den Lokalisationskurven lassen sich verschiedene Aspekte ablesen. Zum einen der Aufnahmewinkel, der im nächsten Kapitel ausführlich besprochen wird. Zum anderen wird erkenntlich

in wie weit die Phantomschallquellen maßstabsgerecht verteilt werden. Von den drei Beispielkurven in Abbildung 6 hat die X-Y-Anordnung mit einem Versatzwinkel von $\varepsilon = 70^\circ$ die maßstabsgreueste Verteilung, da ihr Kurvenverlauf am linearsten ist. Bei der ORTF- und NOS-Anordnung³ dagegen werden Schallquellen, die im äußeren Bereich des Aufnahmewinkels platziert wurden, zusätzlich zusammengestaucht.

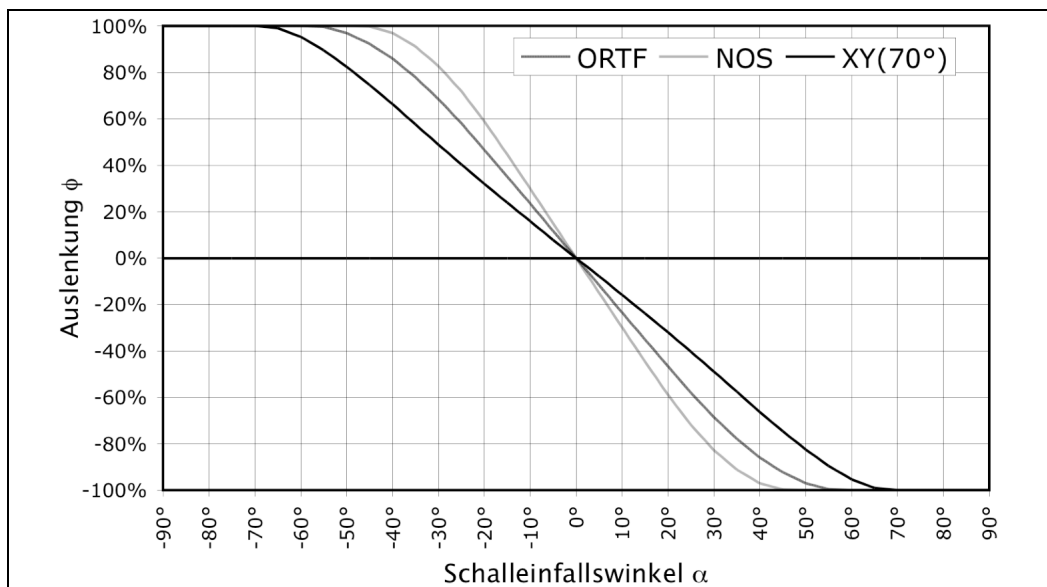


Abbildung 6

³ Genaueres zu ORTF und NOS findet sich in Kapitel 5.3

5. Aufnahmewinkel

In der Aufnahmepraxis mit Stereomikrofonen spielt der Aufnahmewinkel eine wichtige Rolle. Er ist die Differenz der beiden Schalleinfallswinkel $\alpha_{\max}$, welche zu einer maximalen Auslenkung von $\phi = 100\%$ auf der Stereobasis links und rechts führen. Stimmen Aufnahmewinkel und Basiswinkel α nicht überein, ist die Wiedergabe in der Abbildung gestaucht oder gestreckt. Abbildung 7 zeigt dies schematisch bei einer angenommenen linearen Lokalisationskurve. Der Aufnahmewinkel ist abhängig von der Mikrofonbasis B und dem Versatzwinkel ε der Mikrofonanordnung. Wird die Mikrofonbasis B oder der Versatzwinkel ε vergrößert, verkleinert sich der Aufnahmewinkel und umgekehrt. Die Schallquellen sollten in einem Kreisbogen angeordnet werden, da der Aufnahmebereich polar orientiert ist. Dies kann in der Praxis unter Umständen problematisch sein, wenn sich an der Anordnung der Schallquellen nichts ändern lässt, wie dies zum Beispiel bei den Saiten eines Klaviers der Fall ist.

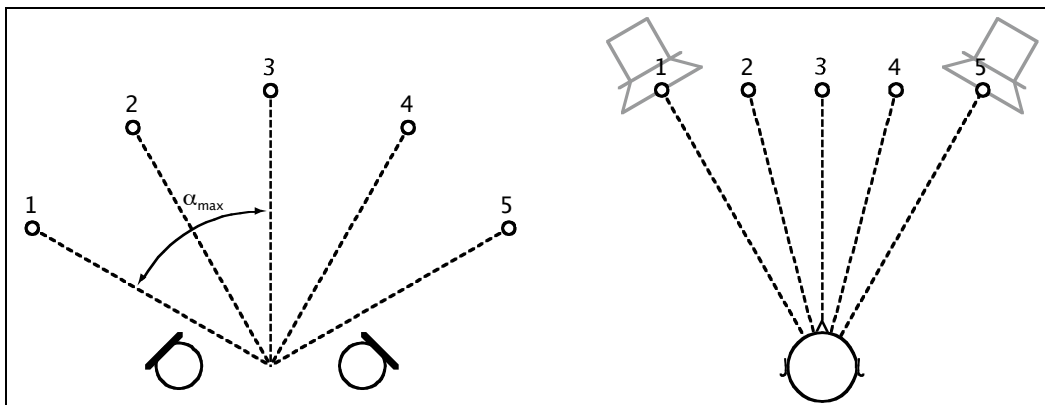


Abbildung 7

Für reine Laufzeitstereofonieranordnungen lässt sich der Aufnahmewinkel näherungsweise einfach berechnen (vgl. Kapitel 5.1). Bei reiner Pegelstereofonie ist die Berechnung deutlich aufwändiger (vgl. Kapitel 5.1). Der Aufnahmewinkel einer Äquivalenzstereofonieranordnung lässt sich quasi nur noch aus den Lokalisationskurven ablesen.

Die in der Literatur angegebenen Werte zum Aufnahmewinkel unterscheiden sich, da die Summenlokalisationskurven unterschiedlich ausgewertet werden (WITTEK/THEILE 2002). Beispielsweise wird für den Aufnahmewinkel einer ORTF-Anordnung (vgl. Kapitel 5.3) von HUGONNET 90° , von SENGPIEL 96° ,

von WILLIAMS 100° und von WITTEK 102° angegeben. In dieser Arbeit werden bei Berechnungen die Werte aus WITTEK (2002) herangezogen.

Da die Lokalisationskurven nicht immer durchgängig linear verlaufen, führt der in den äußeren Bereichen vorhandene Knick dazu, dass der äußere Bereich zusätzlich gestaucht wird. In Abbildung 7 würde der Punkt (2) weiter links und der Punkt (4) weiter rechts geortet.

Daraus folgt auch, dass Mikrofonanordnungen, die den gleichen Aufnahmewinkel_100% haben, eine deutlich unterschiedliche Verteilung der Schallquellen aufweisen können. Um verschiedene Mikrofonanordnungen besser vergleichen zu können, wird von THEILE und WITTEK (2002) der Aufnahmewinkel_75% angeraten. Mikrofonanordnungen mit dem gleichen Aufnahmewinkel_75% weisen, da die Lokalisationskurven bis zu einer Auslenkung von $\phi = 75\%$ immer recht linear verlaufen,⁴ in dem angegebenen Winkelbereich eine sehr ähnliche Verteilung der Schallquellen auf.

5.1. Der Aufnahmewinkel bei Laufzeitstereofonie

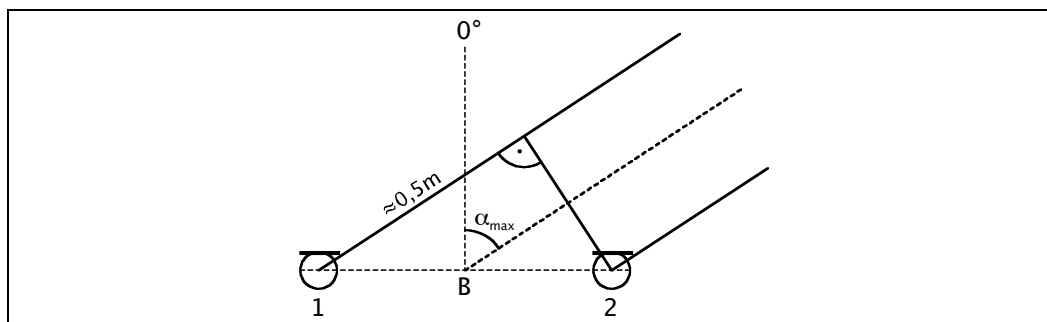


Abbildung 8

Setzt man voraus, dass keine Pegeldifferenzen⁵ zwischen den zwei Mikrofonen entstehen und der Schall parallel in einer ebenen Welle⁶ auf die Mikrofonanordnung trifft, lässt sich eine einfache Gleichung herleiten, mit der

⁴ Vgl. hierzu Abbildung 6

⁵ Auch bei reiner Laufzeitstereofonie mit Druckempfängern werden ausgehend vom $1/r$ -Gesetz bei geringen Abständen zur Schallquelle Pegeldifferenzen aufgezeichnet. (SENGPIEL 1994)

⁶ Näherungsweise im Fernfeld einer Schallquelle der Fall. (DICKREITER 1997)

man näherungsweise den halben Aufnahmewinkel $\alpha_{\max}$ abhängig von der Mikrofonbasis B berechnen kann (SENGPIEL 1995). Außerdem wird die zu einer maximalen Auslenkung von $\phi = 100\%$ führende Laufzeitdifferenz auf $\Delta t_{\max} = 1,5\text{ms}$ festgelegt. Man beachte, dass WITTEK (2000) von einem anderen Wert ausgeht.⁷

$$B = \frac{\Delta t \cdot c_{\text{Luft}, 20^\circ\text{C}}}{\sin \alpha_{\max}} = \frac{0,0015\text{s} \cdot 343,8\text{ms}^{-1}}{\sin \alpha_{\max}} \approx \frac{1\text{m}}{2 \cdot \sin \alpha_{\max}}$$

Gleichung 13

Aus der voraus gehenden Gleichung wird auch deutlich, dass mit größer werdender Mikrofonbasis B der Aufnahmewinkel $2 \cdot \alpha_{\max}$ kleiner wird. Zu dem lässt sich aus dieser Gleichung auch die kleinste sinnvolle Mikrofonbasis berechnen. Dazu wird $\alpha_{\max} = 90^\circ$ gesetzt. Je nach dem welchen Wert man für $\Delta t_{\max}$ zugrunde legt erhält man eine minimale Mikrofonbasis von 34cm (WITTEK 2000) oder 52cm (SENGPIEL 1995).

Nähert man eine Laufzeitstereofonieranordnung der Schallquelle an, werden abhängig vom 1/r-Gesetz zusätzlich Pegeldifferenzen aufgezeichnet und der Aufnahmewinkel_100% wird kleiner. In diesem Fall sollte man auf die Lokalisationskurven zurückgreifen, um dort den Aufnahmewinkel_100% abzulesen. Hierzu ein kleines Beispiel, wie stark sich die Änderungen des Radius auswirken können. Der Aufnahmewinkel_100% nach WITTEK (2002) einer Laufzeitstereofonieranordnung mit einem Mikrofonbasis von $B = 40\text{cm}$ beträgt bei einem Radius von 5m 98° und bei einem Radius von 1m lediglich 84° .

5.2. Der Aufnahmewinkel bei Pegelstereofonie

Die nachfolgende Gleichung zeigt den mathematischen Zusammenhang zur Berechnung des Aufnahmewinkels_100% einer Pegelstereofonieranordnung. Die Pegeldifferenz, die zu einer maximalen Auslenkung von $\phi = 100\%$ führt sei $\Delta L_{\max} = 18\text{dB}$.

⁷ Vgl. hierzu auch Kapitel 3.3

$$\Delta L_{\max} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{A + B \cdot \cos(\varepsilon + \alpha_{\max})}{A + B \cdot \cos(\varepsilon - \alpha_{\max})} \right)$$

Gleichung 14

Da die Umstellung der Gleichung nach α sehr aufwändig ist, erstellt man am besten mit einer Tabellenkalkulation eine Tabelle, die abhängig vom Schalleinfallswinkel und dem Versatzwinkel die daraus resultierenden Pegeldifferenzen berechnet. Nun sucht man in jeder Spalte den Wert von $\Delta L_{\max}$ und kann den maximalen Schalleinfallswinkel $\alpha_{\max}$ ablesen. Eine solche Tabelle befindet sich im Anhang unter „Pegel_Aufnahmewinkel.xls“. Dort lässt sich die Richtcharakteristik mittels der beiden Felder A und B einstellen. Der Bereich um $\Delta L = 18\text{dB}$ wird automatisch Grün markiert. Es zeigt sich, dass der Aufnahmewinkel_100% mit größer werdendem Versatzwinkel ε kleiner wird. Mit dieser Erkenntnis und den Werten aus Tabelle 3 kann man in der Praxis auch ohne Berechnungen schnell den Aufnahmewinkel einer X-Y-Mikrofonanordnung ungefähr abschätzen. Der Aufnahmewinkel_100% einer X-Y-Anordnung kann niemals kleiner als 92° (WITTEK 2002) werden, und dies bei dem ungünstigen Versatzwinkel von $\varepsilon = 90^\circ$.

Der Weg über die Lokalisationskurven ist selbstverständlich auch bei der Pegelstereofonie möglich.

5.3. Der Aufnahmewinkel bei Äquivalenzstereofonie

Da die Berechnung des Aufnahmewinkel_100% einer Äquivalenzstereofoniemikrofonanordnung noch deutlich aufwändiger ist als bei der Pegelstereofonie, wurden die ersten Äquivalenzstereofonieverfahren auf empirischem Weg gefunden. Beispielsweise hat der französische Rundfunk (Office de Radiodiffusion Télévision Française) 1960 ein System mit zwei Nierenmikrofonen, einer Mikrofonbasis von $B = 17\text{cm}$ und einem Versatzwinkel von $\varepsilon = 55^\circ$ festgelegt (SENGPIEL 1998). Es wird meist kurz als ORTF-Anordnung bezeichnet. Analog dazu stellte zur gleichen Zeit der niederländischen Rundfunk (Nederlandse Omroep Stichting) ein ähnliches System vor (2 Nierenmikrofone, Mikrofonbasis $B = 30\text{cm}$, Versatzwinkel $\varepsilon = 45^\circ$). Rechnerisch wurde von SENGPIEL ein interessantes Verfahren festgelegt, kurz EBS (2 Nierenmikrofone, Mikrofonbasis $B = 25\text{cm}$, Versatzwinkel $\varepsilon =$

45°). Hier zeigen die beiden Mikrofone auf die beiden Aussenkanten des Aufnahmebereichs. Es ist in diesem Fall $\varepsilon = \alpha_{\max}$.

Mit definierten Äquivalenzstereofonieverfahren ist man immer auf einen bestimmten Aufnahmewinkel festgelegt. Deshalb wurden von WILLIAMS (2003) die „stereofonic recording angle diagrams“ erstellt, die ihm zu Ehren meist Williamskurven genannt werden. Sie geben Kurven für verschiedene Aufnahmewinkel_100% in Abhängigkeit vom Versatzwinkel ε und der Mikrofonbasis B an. Damit hat der Tontechniker die Möglichkeit für einen gewünschten Aufnahmewinkel_100% sehr schnell alle möglichen Kombinationen von Versatzwinkel ε und Mikrofonbasis B abzulesen. Dies schließt natürlich auch die reine Laufzeit- oder Pegelstereofonie mit ein, deren Aufnahmewinkel man am Schnittpunkt der Kurven mit der X- bzw. Y-Achse ablesen kann. Abbildung 9 zeigt Williamskurven für zwei Nierenmikrofone erstellt aus den Werten von WITTEK (2002).

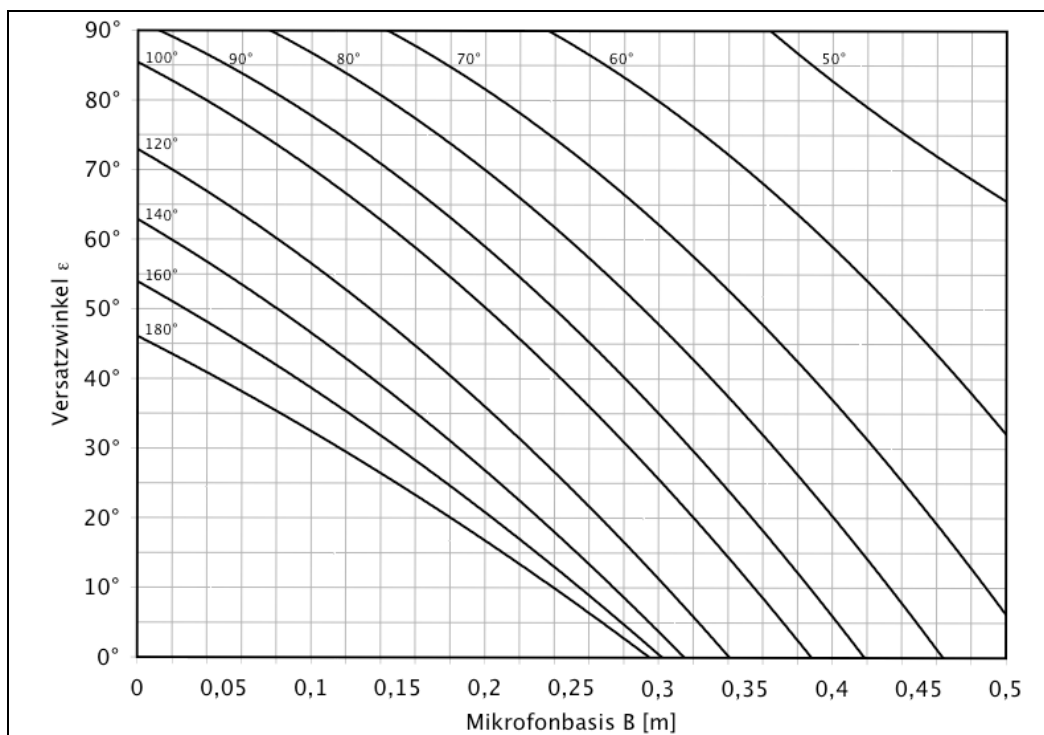


Abbildung 9

6. Summenleistung

Ein Panoramapotiometer dient der Richtungsverteilung durch Pegelunterschiede eines Monoeingangssignals auf einem Stereoausgang. Die Summenleistung, also die Gesamtlautstärke, sollte dabei über die ganze Stereobasis konstant sein. Daraus ergibt sich in Mittelstellung – also bei gleichem Pegel von L und R – eine Dämpfung der beiden Kanäle von ungefähr 3dB. Die gleichen Bedingungen gelten auch für die Summenleistung einer Mikrofonanordnung, die dem entsprechend auch über den ganzen Aufnahmebereich konstant sein sollte. Anders ausgedrückt: Egal in welchem Winkel innerhalb des Aufnahmebereichs eine Schallquelle platziert wird, sie sollte bei der Wiedergabe immer gleich laut sein. Der Summenleistungspegel P lässt sich folgendermaßen berechnen:

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

Gleichung 15

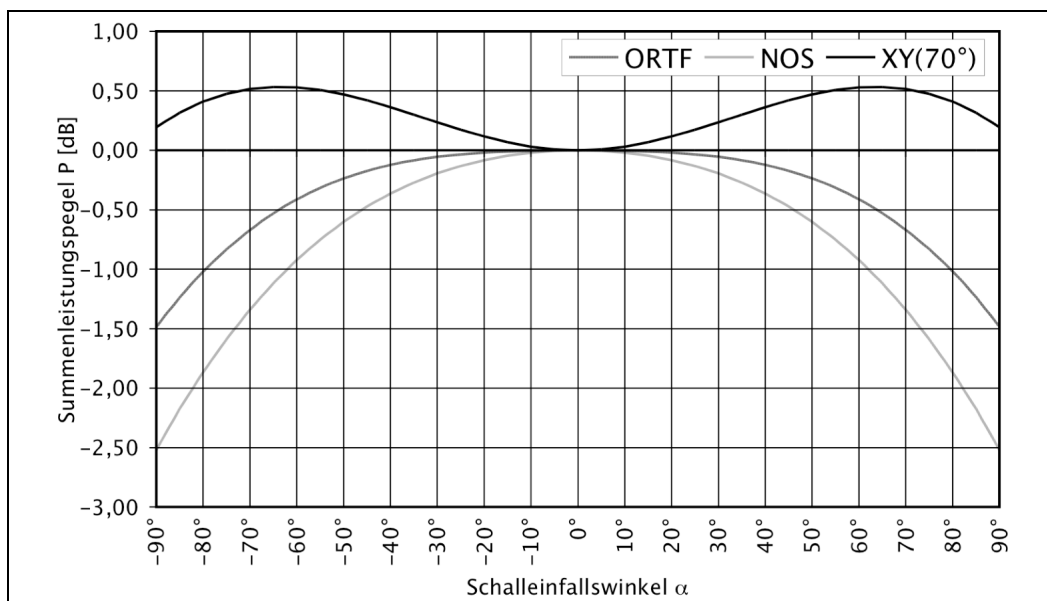


Abbildung 10

Um den Summenleistungspegel einer Mikrofonanordnung darzustellen, kann man diesen abhängig vom Schalleinfallswinkel in einem Diagramm auftragen. Die Abbildung 10 zeigt dies am Beispiel dreier Mikrofonanordnungen. Die

Werte sind relativ zu P_{0° dargestellt. Die Berechnungen wurden mit der Exceldatei „Summenleistungsdiagramme.xls“ im Anhang durchgeführt.

Bei der Betrachtung des Summenleistungsdiagramms fällt zuerst einmal der symmetrische Verlauf auf. Es ist dies in der vorliegenden Arbeit immer der Fall, da ausschließlich symmetrische Mikrofonanordnungen (vgl. Abbildung 5) besprochen werden. Zur Analyse der Summenleistung reicht also der positive oder negative Bereich alleine vollkommen aus.

Die ORTF- und NOS-Anordnung weisen eine leichte Überbetonung der Mitte auf. Somit ist bei $\alpha = 0^\circ$ der Summenleistungspegel am höchsten. Die X-Y-Anordnung mit einem Versatzwinkel von $\varepsilon = 70^\circ$ ist ein Beispiel für den umgekehrten Fall, bei welchem der Summenleistungspegel bei $\alpha = 0^\circ$ am niedrigsten ist. Die Mitte wird also gedämpft. Mikrofonanordnungen haben im Idealfall einen über den ganzen Aufnahmebereich⁸ gleichen Summenleistungspegel. Anderenfalls kann man immer entweder eine Überbetonung oder eine Dämpfung der Mitte ablesen.

6.1. Summenleistungsdifferenzpegel

Da bei symmetrischen Mikrofonanordnungen der Summenleistungspegel entweder in der Mitte oder zur Seite des Aufnahmebereichs am höchsten ist, kann man die Summenleistungspegelkurven in einem Wert zusammenfassen. Dazu wird in dieser Arbeit der Summenleistungsdifferenzpegel ΔP definiert. Er sei der Pegelunterschied zwischen dem Summenleistungspegel mit dem Schalleinfallswinkel $\alpha = 0^\circ$ und dem Summenleistungspegel mit dem Schalleinfallswinkel $\alpha_{\max}$.

$$\Delta P = P_{0^\circ} - P_{\alpha_{\max}}$$

Gleichung 16

⁸ Vergleicht man die Summenleistung von unterschiedlichen Mikrofonanordnungen, sollte man nicht den ganze Schalleinfallsbereich von $\alpha = \pm 90^\circ$ betrachten, sondern lediglich den Aufnahmebereich, da nur von dort Direktschall zu erwarten ist.

Betrachtet werden soll die Summenleistung über die ganze Stereobasisbreite. Daher ist nicht der Aufnahmewinkel_75%, sondern der Aufnahmewinkel_100% zu verwenden. Im Idealfall ist der Summenleistungsdifferenzpegel $\Delta P = 0\text{dB}$. Ist er positiv, wird die Mitte gegenüber der Seite überbetont und umgekehrt.

6.2. Die Summenleistung bei reiner Pegelstereofonie

Da eine ungleichmäßige Summenleistung hauptsächlich durch die Pegelstereofonie entsteht, soll in diesem Kapitel zuerst einmal die Summenleistung bei reiner Pegelstereofonie besprochen werden.

6.2.1. X-Y-Verfahren

Für reine Pegelstereofonie nach dem X-Y-Verfahren kann man Abbildung 5 und die dazugehörigen Berechnungen deutlich vereinfachen. Die Mikrofonbasis B wird gleich 0. Und damit, $\beta'_1 = \varepsilon - \alpha$, $\beta'_2 = \varepsilon + \alpha$ und $R = D_1 = D_2$. Da also die Mikrofone annähernd dieselbe Position einnehmen, wird $\Delta L_D = 0\text{dB}$ und das Abstandsgesetz fließt nicht mehr in die Berechnungen mit ein.

In der Literatur wird oft ein Verfahren zur Berechnung eines optimalen Versatzwinkels ε_{opt} beschrieben (GÖRNE 2004) bei dem die Summenleistung scheinbar am ausgeglichensten ist. Winkel kleiner als ε_{opt} führen dazu, dass Signale aus der Mitte lauter aufgenommen werden. Bei Winkeln größer als ε_{opt} geschieht genau das Gegenteil, das heißt, Signale aus der Mitte werden gegenüber seitlichen Signalen gedämpft. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Summenleistung dann optimal ist, wenn sich die beiden Richtcharakteristiken im -3dB -Punkt schneiden. Diesen optimalen Versatzwinkel ε_{opt} kann man mit einfachen mathematischen Mitteln berechnen. Dazu setzt man die Allgemeine Mikrofongleichung gleich -3dB . Damit wird der Schalleinfallswinkel θ zum optimalen Versatzwinkel ε_{opt} . Die folgende Gleichung zeigt die nach ε_{opt} umgestellte allgemeine Mikrofongleichung.

$$\varepsilon_{\text{opt}} = \arccos \frac{10^{\frac{3\text{dB}}{20}} - A}{B}$$

Gleichung 17

In Tabelle 2 sind einige Richtcharakteristiken und ihre nach Gleichung 16 berechneten optimalen Versatzwinkel ε_{opt} aufgeführt. Um in der Praxis schnell eine passende X-Y-Anordnung mit einer ausgeglichenen Summenleistung aufbauen zu können, sind diese Winkel zusammen mit den dazugehörigen Aufnahmewinkeln äußerst wichtig. Aus diesem Grund wird in der Tabelle zusätzlich der dazugehörige Aufnahmewinkel_100% nach WITTEK (2002) aufgeführt.

Richtcharakteristik	ε_{opt}	Aufnahmewinkel_100%
Niere	65,5°	134°
Superniere	57,5°	104°
Acht	44,9°	72°

Tabelle 2

Näherungsweise stimmen die nach der einfachen Formel berechneten Werte, wobei durch die Angabe von Zehntelgrad eine Genauigkeit vorgetäuscht wird die eigentlich nicht vorhanden ist. Definiert man den optimalen Versatzwinkel ε_{opt} über einen idealen Summenleistungsdifferenzpegel ΔP , ergeben sich jedoch leicht abweichende Ergebnisse. Dies deutet schon darauf hin, dass beim Aufstellen der Formel ein kleiner Denkfehler begangen wurde. Der Wert -3dB wurde aus dem Dämpfungsverlauf des linken und rechten Signals in Abhängigkeit von der Panoramastellerstellung übernommen, bei welchem in Mittelstellung beide Signale um 3dB gedämpft werden. Damit die Summenleistung optimal ist, muss aber die Dämpfung des einen Kanals bei einer Auslenkung von $\phi = 100\%$ 0dB betragen. Bei einer Mikrofonanordnung kann man jedoch nicht davon ausgehen, dass der Dämpfungsverlauf dem eines Panoramapotiometers entspricht, und somit die Dämpfung des einen Signals bei $\alpha_{\text{max}} L_1 = 0\text{dB}$ und die des anderen $L_2 = \infty$ beträgt. Genauer gesagt ist dies nur bei dem speziellen Fall der Blumlein-Anordnung der Fall (SENGPIEL 1992). Aus diesem Grund stimmt auch der über ΔP berechnete Wert mit dem nach der einfachen Formel berechneten Wert bei der Achterrichtcharakteristik ziemlich genau überein. Der Verlauf von ΔP über ε ist in Abbildung 11 dargestellt. Am Schnittpunkt mit der X-Achse kann man den optimalen Versatzwinkel ε_{opt} ablesen. Dieser ist mit dem entsprechenden

Aufnahmewinkel_100% aus den oben beschriebenen Gründen noch einmal in Tabelle 3 aufgelistet.

Richtcharakteristik	ε_{opt}	Aufnahmewinkel_100%
Niere	64°	138°
Superniere	56,5°	104°
Acht	45°	72°

Tabelle 3

Einschränkend muss noch erwähnt werden, dass diese Versatzwinkel auf Grundlage der allgemeinen Mikrofongleichung berechnet wurden und deshalb nur im mittleren Frequenzbereich ihre Gültigkeit behalten. Für sehr hohe oder tiefe Frequenzen kann sich ein deutlich anderer Wert ergeben. Zur Berechnung der Werte wurde die im Anhang angefügte Exceltabelle „Pegel_deltaP.xls“ verwendet.

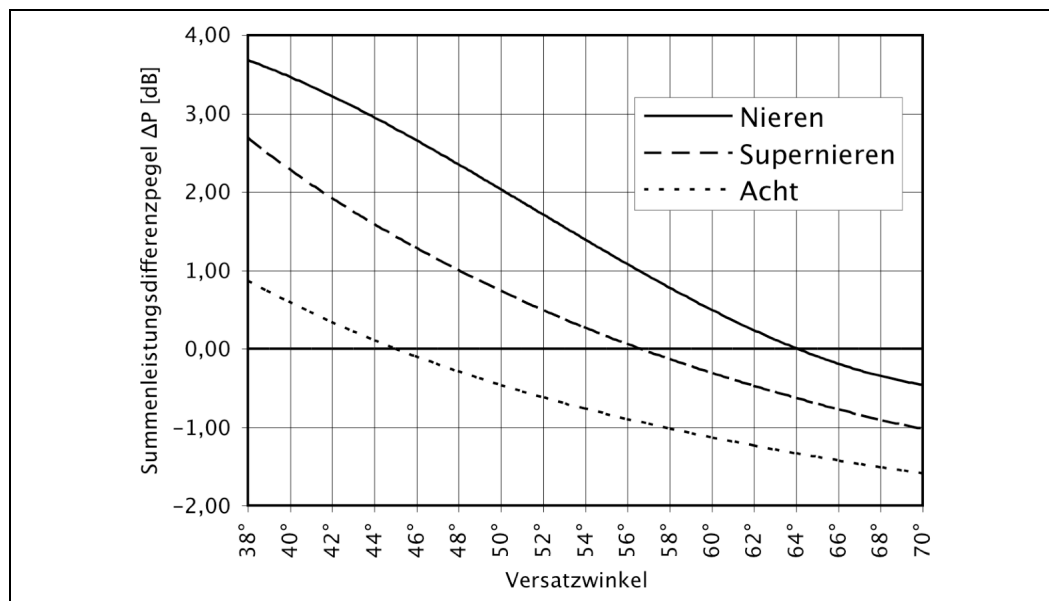


Abbildung 11

6.2.2. MS-Verfahren

Da das Mitte-Seite-Verfahren eine Ausnahmeerscheinung darstellt, kann es hier nur als Marginalie behandelt werden. Es nutzt ein Mittenmikrofon, das auf die Schallquelle ausgerichtet wird und ein vollwertiges Monosignal

aufzeichnet. Für das Mittensignal kann jede beliebige Richtcharakteristik verwendet werden. Zusätzlich wird an der gleichen Stelle ein Gradientenempfänger mit Achterrichtcharakteristik um 90° nach links aus der Vorwärtsrichtung der Anordnung herausgedreht aufgestellt, der die Richtungsinformationen aufzeichnet. Um das so aufgezeichnete Signal über eine Stereo-Lautsprecheranordnung nach Abbildung 1 wiedergeben zu können, muss es zuerst über eine Mitte-Seite-Matrix in ein Links-Rechts-Signal umgewandelt werden.

*„Wollte man ein MS-Stereosignal direkt wiedergeben, so bräuchte man zwei Lautsprecher in der Mitte des Hörraumes. Ein ‚herkömmlicher‘ Lautsprecher müsste das Mittensignal wiedergeben und der andere querliegende Lautsprecher, der eine achtförmige Abstrahlcharakteristik bräuchte, das Seitensignal.“
GÖRNE (2004)*

Die Umrechnungsvorschriften lauten mathematisch:

$L = M + S$ $R = M - S$

Gleichung 18

Über das Mischungsverhältnis von Mitten- und Seiten-Signal kann man in der Matrix den Aufnahmewinkel einstellen. Wird als Mittenmikrofon ein Druckempfänger verwendet, ergibt sich eine perfekte Summenleistung. Dies lässt sich mathematisch beweisen, indem man in Gleichung 17 für M und S die allgemeine Mikrofongleichung einsetzt. Beim S-Signal muss jeweils noch 90° vom Schalleinfallswinkel abgezogen werden. Berechnet man über L und R den Summenleistungspegel P, fällt der Schalleinfallswinkel raus. Somit ist die Summenleistung über den ganzen Schalleinfallsbereich konstant.

Wird als Mittenmikrofon ein Gradientenempfänger verwendet, ist der Summenleistungsdifferenzpegel von dem eingestellten Mischungsverhältnis von Mitten- und Seiten-Signal abhängig.

6.3. Die Summenleistung bei reiner Laufzeitstereofonie

Sollen lediglich Laufzeitunterschiede aufgezeichnet werden, wird $\varepsilon = 0^\circ$ und somit $\beta'_1 = 90^\circ - \alpha'_1$ und $\beta'_2 = \alpha'_2$.

Für Laufzeitstereofonieranordnungen mit Druckempfängern ergibt sich oberflächlich betrachtet nach der allgemeinen Mikrofonleichung eine perfekte Summenleistung. Dabei werden allerdings zwei Aspekte ignoriert. Zum einen das $1/r$ -Gesetz, das jedoch nur bei einem geringen Radius R ins Gewicht fällt (siehe unten). Und die Anomalien bei sehr hohen Frequenzen, welche durch den Einsatz von Grenzflächenmikrofonen mit Druckempfängern, da diese eine „halbkugelförmige frequenzunabhängige Richtwirkung“ (DICKREITER 2003) besitzen, beseitigt werden können.

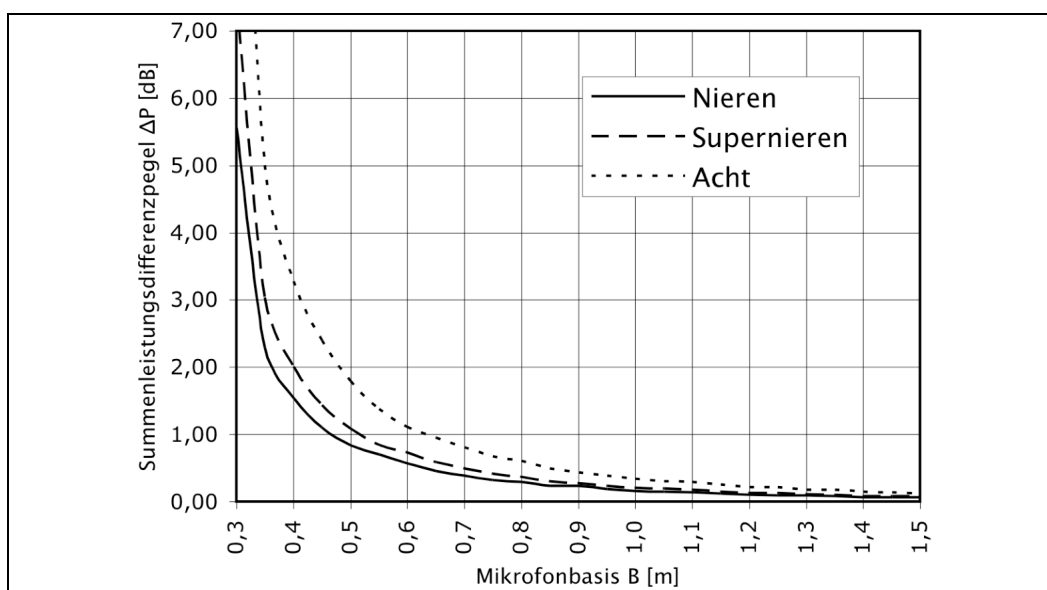


Abbildung 12

Es soll nun untersucht werden, wie sich die Summenleistung verhält, wenn man anstatt Druckempfängern Druckgradientenempfänger verwendet. Versucht man gemäß dem optimalen Versatzwinkel ε_{opt} bei der Pegelstereofonie eine optimale Mikrofonbasis B_{opt} zu berechnen, ist dies nicht möglich. Dies wird deutlich wenn man erneut den Summenleistungsdifferenzpegel ΔP in einem Diagramm aufträgt. In diesem Fall natürlich über die Mikrofonbasis B . Das Diagramm beginnt mit $B = 0,3\text{m}$, da kleinere Mikrofonbasen bei reiner Laufzeitstereofonie nicht sinnvoll sind.⁹ Es gibt keinen Schnittpunkt mit der X-Achse. Der

⁹ Vgl. hierzu auch Kapitel 5.1

Summenleistungsdifferenzpegel ΔP nähert sich lediglich der X-Achse mit zunehmender Mikrofonbasis B immer weiter an. Reine Laufzeitstereofonieranordnungen mit Druckgradientenempfängern weisen folglich immer eine Überbetonung der Mitte auf, die umso stärker ist je kleiner die Mikrofonbasis B wird.

Da bei hohen Frequenzen ein Druckempfänger keine perfekte Kugelcharakteristik besitzt, sondern Schall gerichtet aufnimmt, kann man die Abbildung 12 auch als Anhaltspunkt sehen, wie sich die Summenleistung bei hohen Frequenzen entwickelt. Das heißt man kann davon ausgehen, dass bei sehr geringen Abständen B , hohe Frequenzen aus der Mitte lauter aufgenommen werden.

Um den Einfluss des Abstands zur Schallquelle auf die Summenleistung bei der Laufzeitstereofonie deutlich zu machen, wurde ausnahmsweise der Radius R in der Abbildung 13 auf $R = 1\text{m}$ herabgesetzt. Bei geringen Abständen zur Schallquelle besitzt auch ein Druckempfänger keine optimale Summenleistung, deshalb wurden diese in diesem Fall auch in das Diagramm aufgenommen.

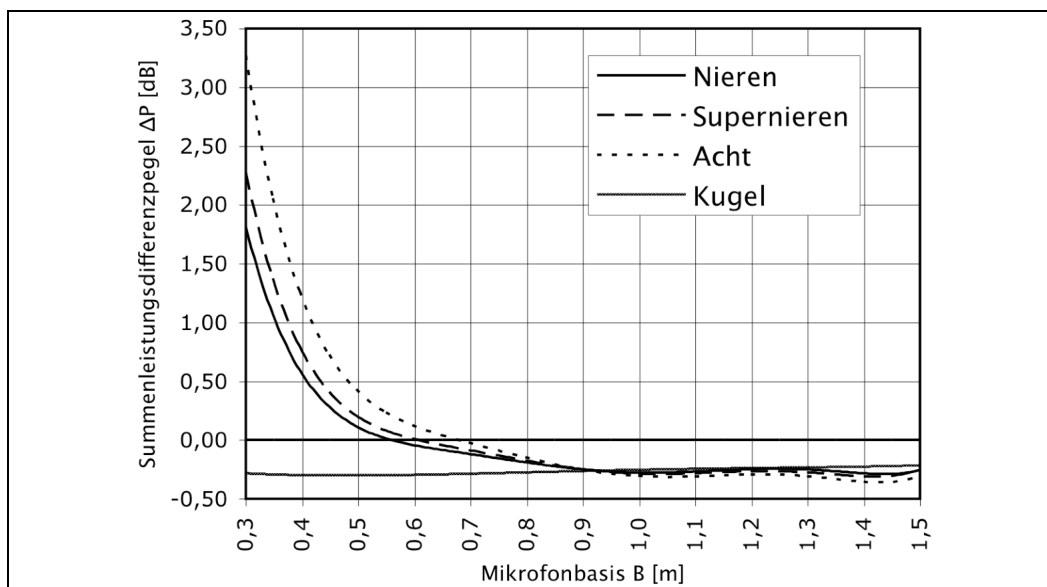


Abbildung 13

Der Verlauf der Kurven für Druckgradientenempfänger ist ähnlich wie bei einem Radius von $R = 5\text{m}$. Der Anstieg des Summenleistungsdifferenzpegels

bei geringen Abständen B ist jedoch nicht so stark ausgeprägt. Bei größeren Abständen B wird ΔP außerdem negativ. Es gibt folglich in diesem Fall nun einen Schnittpunkt mit der X-Achse. Da dieser jedoch vom Radius R abhängig ist, ist die Berechnung einer optimalen Mikrofonbasis B_{opt} trotzdem nicht praktikabel. Die Kurve von ΔP für Druckempfänger verläuft immer noch annähernd linear, jetzt jedoch im negativen Bereich. Das heißt, nähert man eine Stereoanordnung mit zwei Druckempfängern der Schallquelle immer weiter an, wird die Mitte immer stärker gedämpft.

Zur Berechnung der Werte wurden die im Anhang angefügten Exceltabellen „Laufzeit_deltaP_5m.xls“ und „Laufzeit_deltaP_1m.xls“ verwendet.

6.4. Die Summenleistung bei der Äquivalenzstereofonie

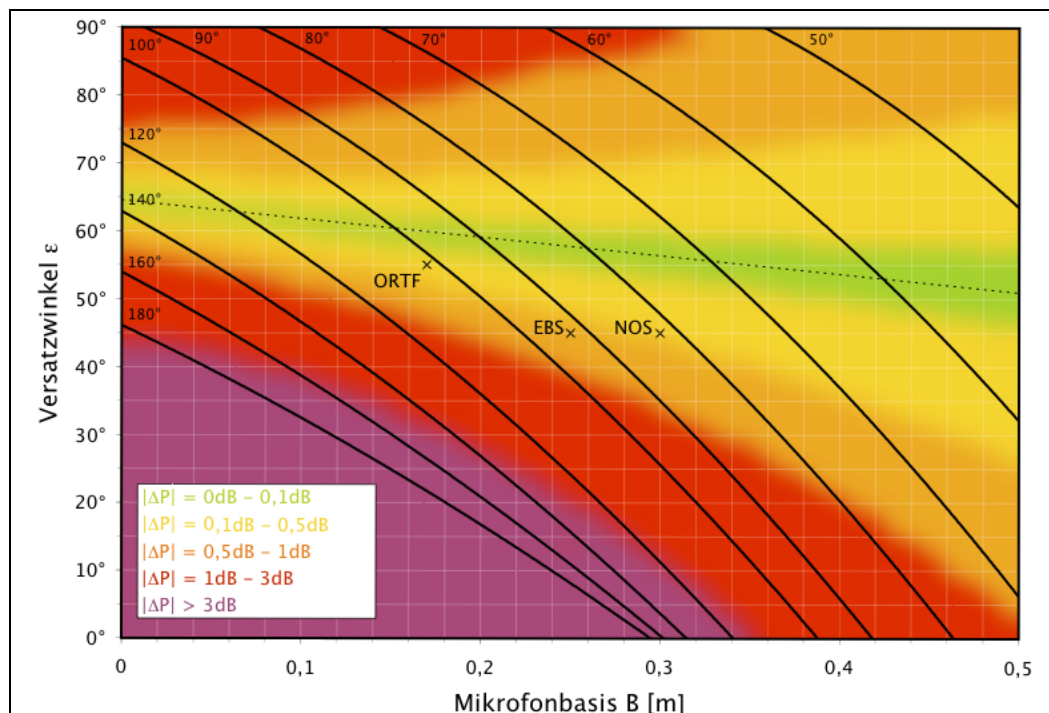


Abbildung 14

Zuletzt soll nun die Summenleistung der Äquivalenzstereofonie, am Beispiel von zwei Nierenmikrofonen, betrachtet werden. Dazu wurde zuerst für alle möglichen Kombinationen von Mikrofonbasis B und Versatzwinkel ε der Summenleistungsdifferenzpegel ΔP berechnet. Durch verschiedenfarbige Flächen wurden die Werte dann in die Williamskurven aufgenommen. In

Abbildung 14 sind die durch die Angabe des Summenleistungsdifferenzpegels ΔP erweiterten Williamskurven für zwei Nierenmikrofone dargestellt. Die Werte des Aufnahmewinkel_100% wurden aus WITTEK (2002) übernommen. Die gestrichelte Linie zeigt die Kurve für $\Delta P = 0\text{dB}$. Oberhalb dieser Linie ist ΔP negativ und unterhalb positiv. Zur Berechnung von ΔP und Erstellung der Kurven wurde die Exceltabelle „Äquivalenz_deltaP.xls“ im Anhang verwendet.

Es wird deutlich, dass für einen optimalen Summenleistungsdifferenzpegel ΔP hauptsächlich der Versatzwinkel ε der beiden Mikrofone ausschlaggebend ist. Die Kurve für ΔP_{opt} hat einen annähernd linearen Verlauf mit einer negativen Steigung. Außerdem können mit zunehmender Mikrofonbasis B die Abweichungen von der Ideallinie größer sein, ohne dass sich die Summenleistung gravierend verschlechtert. Wie auch bei den „normalen“ Williamskurven lässt sich an der X-Achse der Aufnahmewinkel und in diesem Fall auch der Summenleistungsdifferenzpegel von reiner Laufzeitstereofonie ablesen. Und an der Y-Achse die entsprechenden Parameter von reiner Pegelstereofonie. Betrachtet man zusätzlich die Abbildungen 11 und 12, lässt sich schlussfolgern, dass bei zunehmender Richtwirkung der Mikrofone die Kurve für ΔP_{opt} niedriger verläuft, dafür aber kein so großes Gefälle aufweist. Um eine sichere Aussage abgeben zu können, sollten jedoch noch entsprechend Abbildung 14 „erweiterte“ Williamskurven für mindestens eine weitere Mikrofoncharakteristik berechnet werden.

Der Einfluss des Abstands zur Schallquelle R sollte ebenfalls noch einmal Bestandteil einer genauen Untersuchung sein. Da sich bei der Kombination von Laufzeit- und Pegeldifferenzen, je nach Verhältnis der zwei Parameter, der Abstand zu Schallquelle einen mehr oder weniger großen Einfluss hat, lässt sich das Ergebnis nur schwierig voraussagen.

Interessanterweise haben ORTF ($\Delta P_{\text{ORTF}} = 0,25\text{dB}$), NOS ($\Delta P_{\text{NOS}} = 0,38\text{dB}$) und EBS ($\Delta P_{\text{EBS}} = 0,53\text{dB}$) einen leicht positiven Summenleistungsdifferenzpegel. Scheinbar wirkt eine Mikrofonanordnung mit einer leichten Verstärkung der Mitte subjektiv besser.

7. Ausblick

In dieser Arbeit wurden elementare Untersuchungen bezüglich der Summenleistung angestellt. Doch ist der Forschung im Allgemeinen immanent, dass jede beantwortete Frage neue aufwirft und so musste manches, was von Interesse gewesen wäre, ausgespart werden. Der begrenzte, mir in der Facharbeit zur Verfügung stehende Raum, erlaubte keine tiefer gehenden Exkursionen in die Materie. Nichtsdestotrotz wurden einige, für noch ausstehende Untersuchungen basale Erkenntnisse gewonnen:

1. Die Summenleistung von Pegelstereofonieranordnungen ist je nach Richtcharakteristik bei einem bestimmten Versatzwinkel ε_{opt} optimal. Ist der Versatzwinkel kleiner wird ΔP positiv und umgekehrt.
2. Die Summenleistung von Laufzeitstereofonieranordnungen ist sehr stark vom Abstand zur Schallquelle R abhängig. Somit ist es nicht möglich, eine dem optimalen Versatzwinkel ε_{opt} entsprechende, optimale Mikrofonbasis B_{opt} zu berechnen. Grundlegend lässt sich jedoch feststellen, dass bei zu kleinen Mikrofonbasen die Summenleistung von reinen Laufzeitstereofonieranordnungen immer eine starke Überbetonung der Mitte aufweist.
3. Mit den durch den Summenleistungsdifferenzpegel ΔP erweiterten Williamskurven lässt sich die Summenleistung von Äquivalenzstereofonieranordnungen sehr schnell beurteilen. Es steht jedoch noch aus weitere, für andere Richtcharakteristiken oder Abstände R zur Schallquelle, „erweiterte“ Williamskurven zu erstellen.

Insbesondere die Summenleistung des Mitte-Seite-Verfahren sollte noch einmal Bestandteil einer genauen Untersuchung sein. Sicher ist es auch eine Überlegung wert, den Summenleistungsdifferenzpegel auf Surround-mikrofonanordnungen auszuweiten. Da der Verlauf der Summenleistung jedoch nicht so einfachen Gesetzen folgt wie bei der Zwei-Kanal-Stereomikrofonie, ist in diesem Fall eine Definition etwas schwieriger. Das Potential des Summenleistungsdifferenzpegels ist also noch nicht ausgeschöpft.

8. Literaturverzeichnis

- BALLOU, G. M. (2004): *Handbook for Sound Engineers*, Third Edition, Chapter 16: Microphones, Focal Press
- BLAUERT, J. (1974): *Räumliches Hören*, Hirzel Verlag, Stuttgart
- BLAUERT, J. und BRAASCH, J. (2007): *Räumliches Hören*, Beitrag für Handbuch der Audiotechnik (Stefan Weinzierl, Hrsg.), Springer Verlag
http://www.acoustics.hut.fi/teaching/lectures/blauert/SpatHear_1a/BlauertBraasch.pdf
- DICKREITER, M. (1997): *Handbuch der Tonstudioteknik*, Band 1, 6. Auflage, Verlag K.G. Saur
- DICKREITER, M. (2003): *Mikrofon-Aufnahmetechnik*, 3. Auflage, Hirzel Verlag, Stuttgart
- GERNEMANN, A. und RÖSNER, T. (1999): *Die Abhängigkeit der stereofonen Lokalisation von der Qualität der Wiedergabelautsprecher*, aus Bericht 20. Tonmeistertagung 1998, Verlag K.G. Saur, Seite 828 bis 846
- GÖRNE, Thomas (2004): *Mikrofone in Theorie und Praxis*, 7. Auflage, Elektor-Verlag GmbH, Aachen
- PLATTE, H.J. (1980): *Ein Beitrag zum Verständnis der Summenlokalisation*
<http://www.sengpielaudio.com/ZumVerstaendnisDerSummenlokalisation.pdf>
- SENGPIEL, E. (1992): *Ausgangsspannung: Panpot und Blumlein-Mikrofonanordnung*,
<http://www.sengpielaudio.com/AusgangsspannungPanpotUndBlumlein.pdf>
- SENGPIEL, E. (1994): *Was hat Äquivalenz-Stereophonie mit "Trading" zu tun?*,
<http://www.sengpielaudio.com/WasHatAequivalenzStereoMitTrading.pdf>
- SENGPIEL, E. (1994): *Bestimmen der Hörereignisrichtung bei Laufzeit-Stereophonie*,
<http://www.sengpielaudio.com/BestHoerereignLaufz1Linear.pdf>
- SENGPIEL, E. (1995): *Theoriegrundlagen: Laufzeit-Stereophonie*,
<http://www.sengpielaudio.com/TheorieGrundlaLaufzeit.pdf>
- SENGPIEL, E. (1995): *Theoriegrundlagen: „Intensitäts“-Stereophonie*,
<http://www.sengpielaudio.com/TheorieGrundlaIntensitaet.pdf>

- SENGPIEL, E. (1995): *Panoramaregler = Panpot*,
<http://www.sengpielaudio.com/Panoramaregler-Panpot.pdf>
- SENGPIEL, E. (1998): *Das Stereo-Mikrofonsystem ORTF*,
<http://www.sengpielaudio.com/DasStereo-MikrofonsystemORTF.pdf>
- SENGPIEL, E. (1998): *Lokalisation der Lautsprecher-signale bei Laufzeit- und Pegeldifferenz*,
<http://www.sengpielaudio.com/LokalisationDerLautsprecher-signale.pdf>
- SENGPIEL, E. (2000): *Abstandsgesetz für Feldgrößen und für Energiegrößen*
<http://www.sengpielaudio.com/AbstandsgesetzFuerSchallgroessen.pdf>
- THEILE, G. (1980): *Über die Lokalisation im überlagerten Schallfeld*,
 Dissertation, TU Berlin
- THEILE, G. (1984): *Neuere Erkenntnisse zur Wahrnehmung der Richtung und Entfernung von Phantomschallquellen und Konsequenzen für die stereofone Aufnahmepraxis*, in: VDT-Informationen, 1/2-1984
- THEILE, G. und WITTEK H. (2002): *The recording angle – based on localisation curves*, AES Convention Paper, Presented at the 112th Convention
- WENDT, K. (1961): *Das Richtungshören bei der Überlagerung zweier Schallfelder bei Intensitäts- und Laufzeitstereofonie*, Dissertation,
 TH Aachen
- WILLIAMS, M. (2003): *The stereofonic zoom*,
<http://www.microphone-data.com/pdfs/Stereo%20zoom.pdf>
- WITTEK, H. (2000): *Untersuchungen zur Richtungsabbildung mit L-C-R Hauptmikrofonen*. Diplomarbeit Institut für Rundfunktechnik /
 FH Düsseldorf
- WITTEK, H. (2002): *Image Assistant 2.0* [online], Programm zur automatischen Errechnung von Lokalisationskurven. <http://www.hauptmikrofon.de>

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stereostandartaustellung	5
Abbildung 2: Summenlokalisationskurve für Δt (WENDT 1961)	7
Abbildung 3: Summenlokalisationskurve für ΔL (WENDT 1961)	8
Abbildung 4: Äquivalenz-/Trading-Kurve (SENGPIEL 1998)	9
Abbildung 5: Zwei-Kanal-Mikrofonanordnung	14
Abbildung 6: Rechnerische Lokalisationskurven	17
Abbildung 7: Aufnahmewinkel	18
Abbildung 8: Laufzeitstereofonie Aufnahmewinkel	19
Abbildung 9: Williamskurven für Nierenmikrofone	22
Abbildung 10: Summenleistungsdiagramme	23
Abbildung 11: ΔP -Diagramme für Pegelstereofonie	27
Abbildung 12: ΔP -Diagramme für Laufzeitstereofonie ($R = 5\text{m}$)	29
Abbildung 13: ΔP -Diagramme für Laufzeitstereofonie ($R = 1\text{m}$)	30
Abbildung 14: Um ΔP erweiterte Williamskurven	31

Alle Abbildungen ohne Quellenangabe wurden vom Autor selbst erstellt.