

Voraussage der wahrgenommenen räumlichen Breite stereofoner Mikrofonanordnungen (*Prediction of perceived width of stereo microphone setups*)

Hans Riekehof-Böhmer*, Helmut Wittek**, Robert Mores***

* Hans_riekehof@web.de

** SCHOEPS Mikrofone, wittek@schoeps.de

*** HAW-Hamburg, mores@mt.haw-hamburg.de

Kurzfassung

Die Korrelation einer stereofonen Mikrofonanordnung im Diffusfeld steht im Zusammenhang mit der wahrgenommenen räumlichen Breite. Dabei wird meist der Korrelationsgradmesser herangezogen. Der Korrelationsgrad erweist sich bei Laufzeitstereofonie allerdings als wenig geeignet für die Voraussage einer Breite oder Umhüllung. Grund dafür ist die Frequenzabhängigkeit der Korrelationsfunktion, die sich nicht im Korrelationsgrad wiederfindet. Der Kohärenzgrad ist für diese Untersuchung ebenfalls ungeeignet. Mit dem neu eingeführten Diffuse-Field-Image-Prädiktor (DFI-Prädiktor) wird versucht, eine zuverlässige Voraussage der wahrgenommenen räumlichen Breite zu erzielen. Hörversuche zeigen, dass der DFI-Prädiktor für unterschiedliche stereofone Techniken die wahrgenommene räumliche Breite gut voraussagen kann. Somit kann nicht nur die Richtungsabbildung, sondern auch die räumliche Qualität stereofoner Mikrofonanordnungen rechnerisch ermittelt werden.

1. Einleitung

Die Diskussion über die räumliche Abbildung von verschiedenen Mikrofonaufstellungen ist immer noch aktuell. Zu diesem Thema haben sich unterdessen einige Gemeinsamkeiten und Unterschiede gefestigt.

Einigkeit besteht darüber, dass die Wahrnehmung der Räumlichkeit bei stereofoner Wiedergabe unter anderem mit der Korrelation des Diffusschalls zusammenhängt. Über den Grad der Dekorrelation des Diffusschalls und die daraus resultierenden Folgen für die Wahrnehmung existieren im Groben zwei Ansichten.

1. Der Diffusschall muss möglichst dekorreliert sein. Nur so kommt es zu einer breiten Abbildung in Stereo oder zu ausgeprägter Umhüllung in Surround (z.B. [1]).
2. Der Diffusschall muss eine gewisse Korrelation haben und darf nicht komplett dekorreliert sein. Bei zu starker Dekorrelation zerfällt das Klangbild (z.B. [2], [3]).

Dabei beschränken sich die Untersuchungen in dieser Arbeit zunächst auf Stereo. Es wird eine Verbindung zwischen der Wahrnehmung der räumlichen Breite und stereofonen Mikrofonanordnungen hergestellt. Es wird ein Wert vorgestellt, mit dem es möglich ist, die wahrgenommene räumliche Breite jeder stereofonen Mikrofonanordnung vorauszusagen.

Dieser Wert ist der DFI-Prädiktor. DFI steht für „Diffuse-Field-Image“ und „Prädiktor“ soll verdeutlichen, dass es sich um eine perzeptive Voraussage handelt. Die Grundlage für die Berechnung des DFI-Prädiktor ist die Kohärenzfunktion für eine beliebige zweikanalige Mikrofonanordnung im Diffusfeld [4].

Die Korrelation des Diffusschalls beeinflusst neben der räumlichen Abbildung auch die Klangfarbe. Möglicherweise sind die Unterschiede in der Diffusfeldkorrelation der Grund, weswegen lauffzeit- und äquivalenzbasierte Mikrofonanordnungen häufiger Anwendung finden als koinzidente. Die Korrelation des Diffusschalls von räumlich getrennten Mikrofonen ist frequenzabhängig. Diese Frequenzabhängigkeit wird in dem oft verwendeten Korrelationsgrad sowie dem Kohärenzgrad nicht berücksichtigt. Koinzidente Anordnungen sind eine Ausnahme, da bei diesen die Korrelation für alle Frequenzen gleich ist.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass eine geringe Korrelation erforderlich ist, um eine breite räumliche Abbildung zu erhalten. Die Ergebnisse des Hörversuchs bestätigen diese These.

In der Theorie können auch koinzidente Mikrofonanordnungen eine geringe Korrelation im Diffusfeld erzeugen. Die Korrelation von koinzidenten Mikrofonensignalen im Diffusfeld, hängt von der Richtcharakteristik der Mikrofone und dem Öffnungswinkel ab. Eine Blumleinanordnung hat z.B. eine Diffusfeldkorrelation von null [5].

Ein ausgeprägter räumlicher Eindruck wird generell als schön empfunden [1], weshalb es von Interesse ist, zu verstehen wie dieser Zustand durch Mikrofonierungstechnik zu erreichen ist. Ein neuer Ansatz dazu ist der DFI-Prädiktor.

Um geeignete Stimuli für einen Hörversuch zu erzeugen, die möglichst frei von unerwünschten Einflüssen sind, wurden alle Mikrofonanordnungen virtuell in Matlab simuliert.

Desweiteren wird gezeigt, dass der oft verwendete Kohärenzgrad sowie der Korrelationsgrad nicht geeignet sind, um die wirkliche Signalkorrelation von räumlich getrennten Mikrofonen zu beurteilen.

2. Methoden zur Messung der Ähnlichkeit von Signalen

In vielen psychoakustischen Untersuchungen wird für die Bestimmung der Ähnlichkeit von Signalen oft der Kohärenzgrad oder der Korrelationsgrad benutzt. Bei der Untersuchung von räumlich getrennten Mikrofonen geben allerdings weder der Kohärenzgrad noch der Korrelationsgrad eine präzise Aussage über die wirkliche Signalkorrelation. Die Korrelation von zwei räumlich getrennten Mikrofonen ist frequenzabhängig und folgt einem $\sin(x)/x$ Verlauf. Die Frequenzabhängigkeit ist genau der Aspekt, der weder in der Berechnung des Kohärenzgrads noch in der des Korrelationsgrads berücksichtigt wird.

Die Kohärenzfunktion ist eine Funktion der Frequenz und gibt somit die Ähnlichkeit von Signalen bei jeder Frequenz an. Der DFI-Prädiktor basiert auf der Kohärenzfunktion und berücksichtigt damit die Frequenzabhängigkeit der Korrelation von räumlich getrennten Mikrofonen. Im Folgenden werden die einzelnen Verfahren kurz vorgestellt.

2.1. Der Korrelationsgrad

Die bekannteste Methode zur Bestimmung der Ähnlichkeit von Signalen ist sicherlich der Korrelationsgrad. Dieser wird üblicherweise mit einem Korrelationsgradmesser bestimmt. Der Korrelationsgrad wird aus der normierten Kreuzkorrelationsfunktion $p_{sg}^E(m)$ bestimmt, welche in diskreter Form definiert ist als:

$$p_{sg}^E(m) = \frac{\sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} s^*(n) \cdot g(n+m)}{\sqrt{E_s \cdot E_g}} \quad (1)$$

Die Eingangssignale $s(n)$ und $g(n)$ werden nach der Korrelationssumme auf ihre gemeinsame Energie $\sqrt{E_s \cdot E_g}$ normiert. In der kontinuierlichen Form der Kreuzkorrelationsfunktion wird der Laufindex m durch die Signaldauer τ ersetzt. Der Korrelationsgrad ist der Wert, den die normierte Kreuzkorrelationsfunktion an der Stelle $m = 0$ bzw. $\tau = 0$ annimmt.

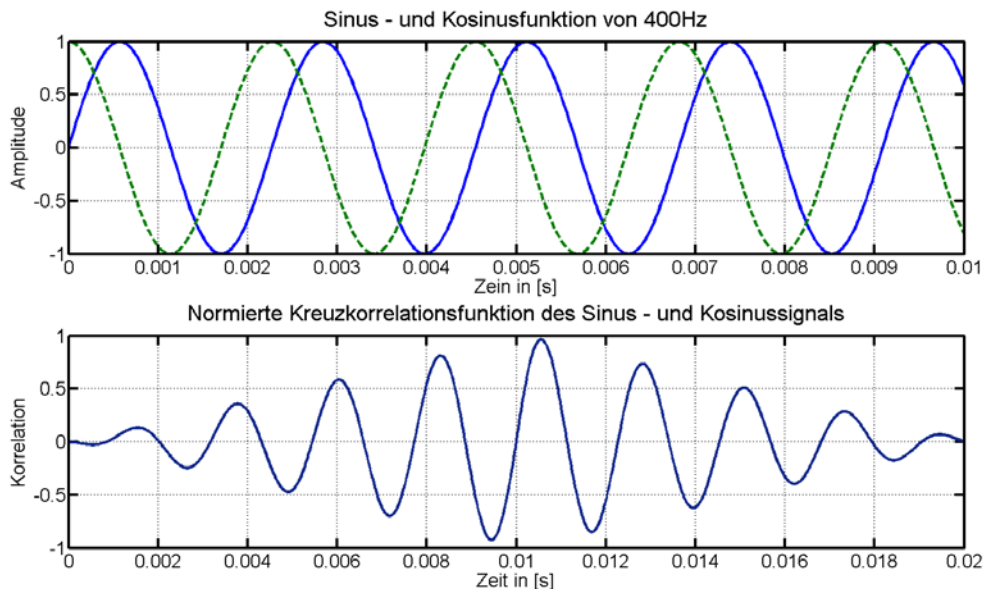


Abbildung 2-1: Oben: Sinus – und Kosinussignal. Unten: normierte Kreuzkorrelationsfunktion der beiden Signale. Man beachte, dass der Kohärenzgrad für dieses Beispiel $k = 1$ ist.

Im unteren Diagramm in Abbildung 2-1 ist die normierte Kreuzkorrelationsfunktion für ein Sinus- und Kosinussignal gleicher Frequenz zu sehen. Da diese beiden Signale orthogonal sind (90° Phasenverschiebung), ergibt sich ein Korrelationsgrad von 0 (unteres Diagramm in Abbildung 2-1). Würde das Kosinussignal zusätzlich um 90° in der Phase verschoben werden, lägen als Eingangssignale ein Sinus und ein verpolter (180° Phasenverschiebung) Sinus vor. In diesem Fall würde der Korrelationsgrad den Wert -1 annehmen. Wenn zwei Sinussignale mit derselben Phasenlage zueinander als Eingangssignale vorliegen, würde der Korrelationsgrad den Wert 1 annehmen.

Der Korrelationsgrad ist in erster Linie dafür geeignet die Phasenlage von Signalen zueinander zu beschreiben. Über die Ähnlichkeit von Signalen lässt sich mit dem Korrelationsgrad keine präzise Aussage treffen. Bei breitbandigen Signalen, ist wegen der

Normierung auf die Gesamtenergie (s. Gleichung (1)) die spektrale Leistungsverteilung der Signale von Bedeutung. Außerdem ist die Korrelation von räumlich getrennten Mikrofonen generell frequenzabhängig [4], [6].

2.2. Der Kohärenzgrad

Der Kohärenzgrad k wird ebenfalls aus der normierten Kreuzkorrelationsfunktion gebildet. Er wird von Blauert definiert als [7]:

$$k = \max |p_{sg}^E(m)| \quad (2)$$

Bei dieser Maximalwertbildung geht die Aussage über die Phasenbeziehung der Signale verloren. Für ein Sinus- und Kosinussignal der gleichen Frequenz (s. Abbildung 2-1), würde man stets einen Kohärenzgrad von 1 erhalten, unabhängig davon, wie die Phasenlage der Signale zueinander ist.

Der Kohärenzgrad hat den selben Nachteil wie der Korrelationsgrad. Er berücksichtigt nicht die Frequenzabhängigkeit der Korrelation. Dadurch ist auch der Kohärenzgrad abhängig von der spektralen Leistungsverteilung innerhalb eines breitbandigen Signals.

2.3. Die Kohärenzfunktion

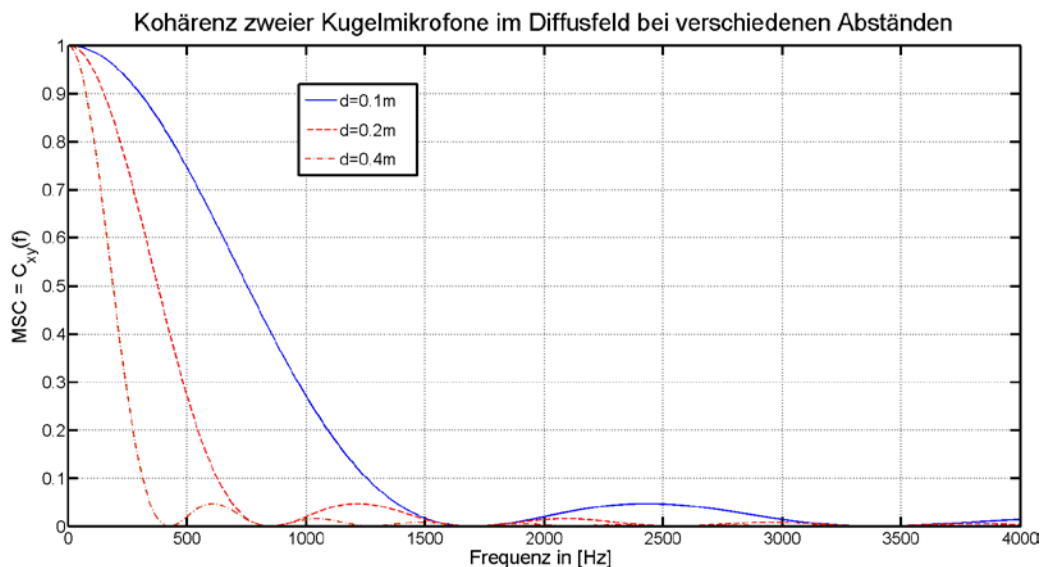


Abbildung 2-2: Quadrierte Kohärenzfunktion von zwei Kugelmikrofonen in einem optimalen Diffusfeld für verschiedene Abstände [6].

Die Kohärenzfunktion kann eine genauere Aussage über die Ähnlichkeit von Mikrofonensignalen in einem Schallfeld treffen, da sie eine Funktion der Frequenz ist. Bendat und Piersol haben gezeigt, dass sich die Kohärenzfunktion wie folgt berechnen lässt [8]:

$$C_{xy}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f) \cdot P_{yy}(f)} = \frac{|P_{xy}(f)|}{\sqrt{P_{xx}(f) \cdot P_{yy}(f)}} \quad (3)$$

Diese Form der Kohärenzfunktion $C_{xy}(f)$ wird als „Magnitude-Squared-Coherence“ bezeichnet. Sie ist definiert als das Betragsquadrat des Kreuzleistungsspektrums $|P_{xy}|^2$, das auf das Produkt der Autoleistungsspektren P_{xx} und P_{yy} normiert wird.

Die quadrierte Kohärenzfunktion lässt sich mit dem Kohärenzgrad vergleichen. Dadurch, dass der Betrag gebildet wird, lässt die quadrierte Kohärenzfunktion keine Aussage mehr über die Phasenlage von zwei Signalen zu. Ein großer Vorteil ist nun, dass man die Ähnlichkeit der beiden Signale bei jeder Frequenz beurteilen kann.

Dadurch lässt sich z.B. erklären, warum eine Groß-AB Anordnung breiter und räumlicher klingt als eine Klein-AB Anordnung. Bei einem Abstand von 10cm werden alle Frequenzen des Diffuschalls unter 400Hz Mono abgebildet. (s. Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3). Elko führt in [4] noch die nicht quadrierte Kohärenzfunktion $\gamma_{xy}(f)$ ein. Sie ist definiert als:

$$\gamma_{xy}(f) = \frac{P_{xy}(f)}{\sqrt{P_{xx}(f) \cdot P_{yy}(f)}} = \frac{P_{xy}(f)}{P_{xx}^{\frac{1}{2}}(f) \cdot P_{yy}^{\frac{1}{2}}(f)} \quad (4)$$

mit $P_{xy}(f)$ als Kreuzleistungsdichtespektrum und $P_{xx}(f)$ und $P_{yy}(f)$ als Autoleistungsspektren.

Die nicht quadrierte Kohärenzfunktion lässt im Gegensatz zu der quadrierten eine Aussage über die Phase zu (s. Abbildung 2-3). Vereinfacht könnte man sagen, dass die nicht quadrierte Kohärenzfunktion einen Korrelationsgrad für jede Frequenz angibt. Dadurch lassen sich breitbandige Signale viel präziser nach ihrer Ähnlichkeit beurteilen als mit dem Kohärenzgrad oder dem Korrelationsgrad.

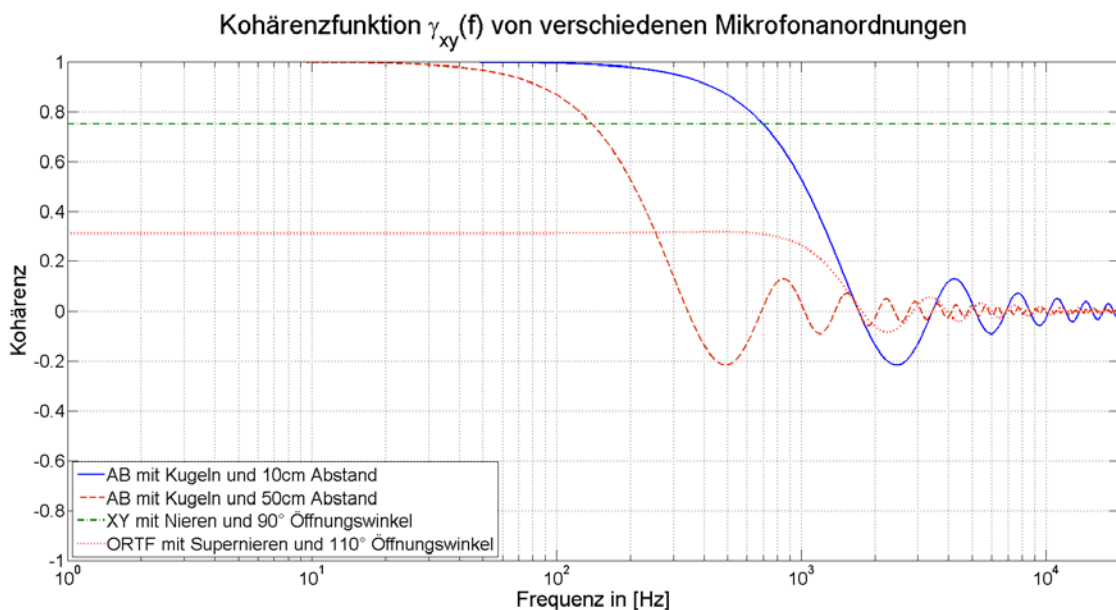


Abbildung 2-3: Kohärenzfunktionen von verschiedenen stereofonen Mikrofonanordnungen im Diffusfeld [4].

Ein weiterer Vorteil der nicht quadrierten und der quadrierten Kohärenzfunktion ist, dass die Normierung auf die Gesamtleistung für jede Frequenz durchgeführt wird. Das bedeutet, die Kohärenzfunktion ist nicht mehr abhängig von der spektralen Leistungsverteilung der Eingangssignale. Das Kreuzleistungsspektrum wird auf die Gesamtleistung der beiden Signale bei jeder Frequenz normiert.

Der Vorteil der Kohärenzfunktion gegenüber dem Korrelationsgrad und Kohärenzgrad ist, dass die Korrelation frequenzabhängig betrachtet wird [5]. Griesinger hat in [9] bereits gezeigt, dass die tiefen Frequenzen einen großen Einfluss auf die räumliche Wahrnehmung haben.

3. Berechnung des DFI-Prädiktors

Der DFI-Prädiktor basiert auf der frequenzabhängigen Korrelation von räumlich getrennten Mikrofonen. Zunächst wird die nicht quadrierte Kohärenzfunktion für eine beliebige zweikanalige Mikrofonanordnung berechnet (s. Abbildung 2-3). Anschließend wird die Kohärenzfunktion mit einer Wichtungsfunktion $\chi(f)$ gewichtet (s. Abbildung 3-1). Es werden nur die tiefen Frequenzen zur Berechnung herangezogen, da ab ca. 1,5kHz eine zunehmend natürliche Dekorrelation durch den Ohrabstand und die Abschattung des Kopfes stattfindet.

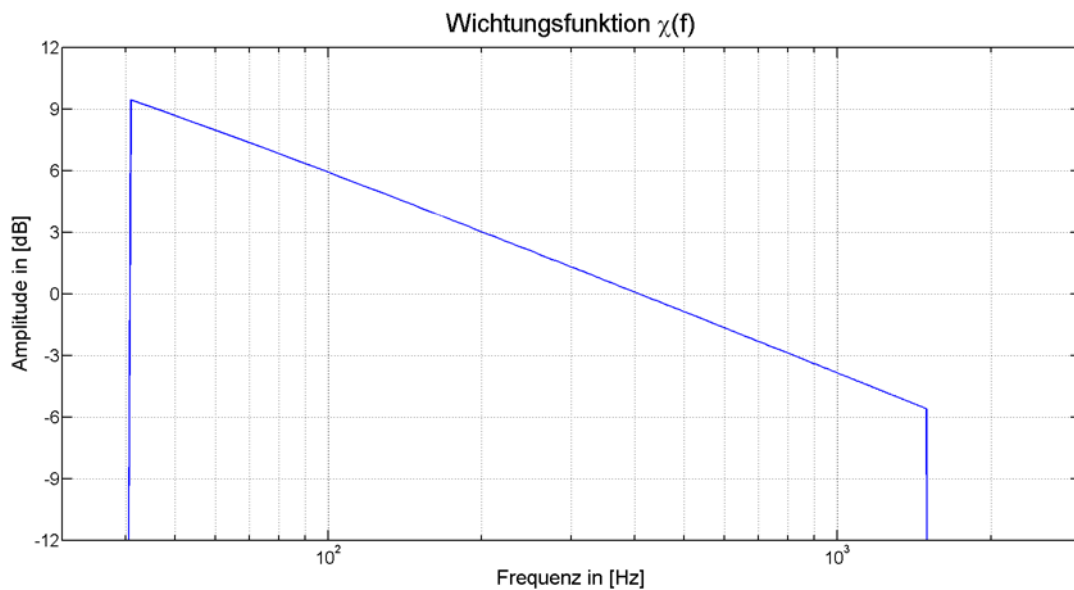


Abbildung 3-1: Mit dieser Wichtungsfunktion wird die nicht quadrierte Kohärenzfunktion gewichtet.

Wie in Abbildung 3-1 zu erkennen ist, werden die Frequenzen zwischen 40 – und 1500Hz mit -3dB pro Oktave gewichtet. Alle anderen Frequenzen fließen nicht in die Berechnung des DFI-Prädiktor ein. Genaugenommen ist der DFI-Prädiktor deshalb ein Wert, der die tieffrequente Korrelation von Signalen beschreibt. Er ist definiert als:

$$DFI_{\text{Prädiktor}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{f=40\text{Hz}}^{f=1500\text{Hz}} [\gamma_{xy}(f) \cdot \chi(f)]^2 \quad (5)$$

mit n als Anzahl Stützstellen der verwendeten FFT-Länge, $\gamma_{xy}(f)$ als nicht quadrierte Kohärenzfunktion und $\chi(f)$ als Wichtungsfunktion.

Der DFI-Prädiktor nimmt nur Werte zwischen 0 und 1 an und lässt sich dadurch ähnlich interpretieren wie ein Korrelationsgrad. Ein kleiner DFI-Prädiktor bedeutet, dass eine geringe Korrelation im Frequenzbereich 40-1500Hz vorliegt. Ein großer DFI-Prädiktor bedeutet, dass eine große Korrelation im Frequenzbereich 40-1500Hz vorliegt.

Nach der Hypothese in dieser Arbeit folgt daraus: Je größer der DFI-Prädiktor, desto enger wird ein Klangbild wahrgenommen. Umgekehrt gilt: Je kleiner der DFI-Prädiktor, desto breiter wird ein Klangbild wahrgenommen. Um dies zu überprüfen wurde ein Hörversuch durchgeführt. Da der DFI-Prädiktor für jede zweikanalige Mikrofonanordnung bestimmt werden kann, wäre es nach einem erfolgreichen Hörversuch möglich, die abgebildete Breite des Klangbilds einer stereofonen Mikrofonanordnung vorauszusagen.

4. Hörversuch

Die Stimuli für den Hörversuch werden vollständig in Matlab erzeugt. Dabei werden aus trockenen Aufnahmen aus einem schalltoten Raum, die entsprechend dekorrelierten Stimuli für den Hörversuch erzeugt.

Der schematische Ablauf der Erstellung eines Stimulus ist in Abbildung 4-1 zu sehen.

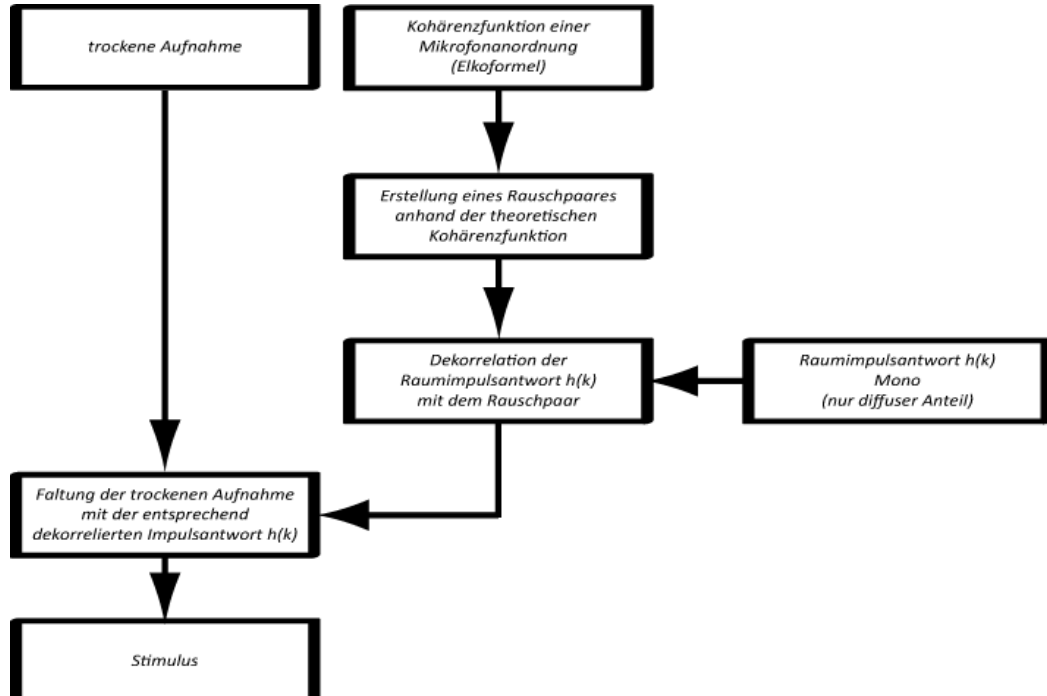


Abbildung 4-1: Prinzipschaltbild der Erstellung eines Stimulus

Zunächst wird eine Mikrofonanordnung vorgegeben. Für diese Mikrofonanordnung wird dann die theoretischen Kohärenzfunktion nach Elko berechnet [4]. Aus dieser Kohärenzfunktion wird dann auch der DFI-Prädiktor berechnet. Mit dieser Kohärenzfunktion als Vorlage wird

ein Rauschpaar erstellt, das annähernd dieselbe Kohärenz aufweist wie die berechnete Kohärenzfunktion (s. Abbildung 4-2).

Das Verfahren das hierbei verwendet wird, ähnelt der Überlagerungsmethode [10]. Die eigentliche Rauminformation wird über eine Mono-Impulsantwort aus der Laieszhalle in Hamburg zur Verfügung gestellt. Da in dem Hörversuch nur die Auswirkungen des diffusen Schallanteils untersucht werden sollen, werden die ersten 100ms der Impulsantwort entfernt. Anschließend wird der diffuse Anteil der Mono-Impulsantwort mit dem Rauschpaar gefaltet, das entsprechend der Kohärenzfunktion dekorreliert wurde. Als Ergebnis erhält man eine Stereoimpulsantwort die anhand der theoretischen Kohärenzfunktion dekorreliert ist. Der fertige Stimulus entsteht durch Faltung der Stereoimpulsantwort mit einem beliebigen trockenen Signal aus einem schalltoten Raum.

In Abbildung 4-2 ist das berechnete Rauschpaar für eine AB-Anordnung zu sehen. Im unteren Diagramm erkennt man, dass die Kohärenz des Rauschens (gestrichelte Kurve) gut mit der theoretischen (durchgezogene Kurve) übereinstimmt.

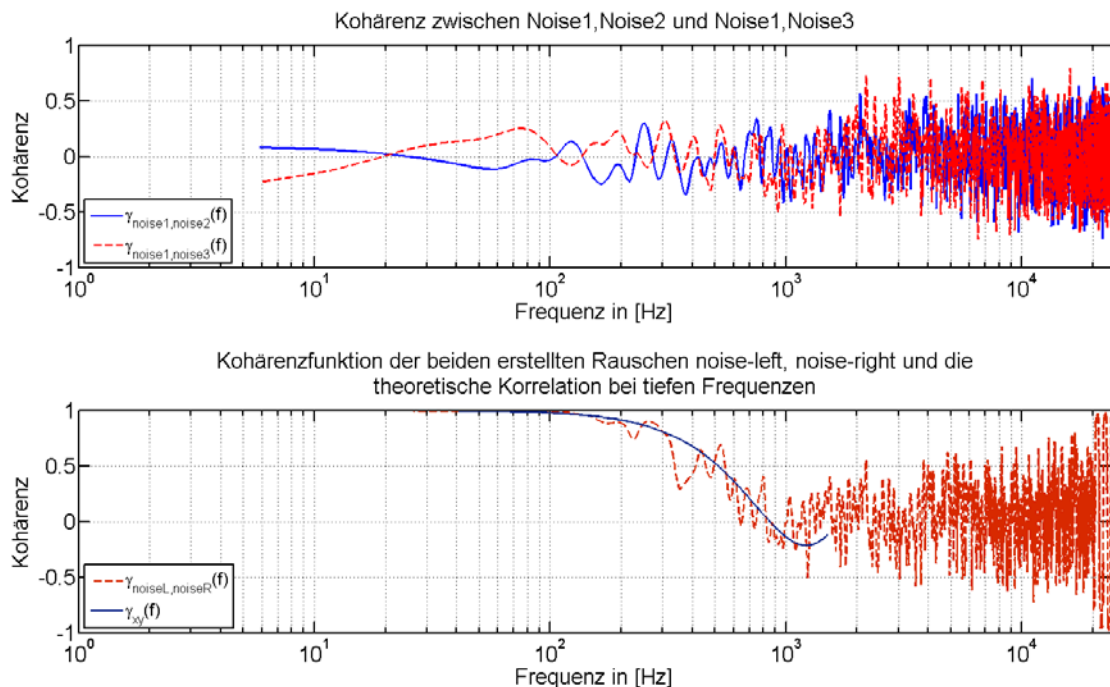


Abbildung 4-2: Oben: Kohärenz der initialen Rauschsignale (für alle Simulationen gleich). Unten: Ergebnis für eine AB-Anordnung mit Kugeln im Abstand von $r = 0.2\text{m}$. DFI-Prädiktor = 0.58

Die Probanden hören die Stimuli über Kopfhörer. Die einzelnen Stimuli werden immer gegen eine Referenz gehört. Der Proband gibt dabei an, ob er den Stimulus breiter oder enger wahrgenommen hat.

Mit der Testsoftware konnte jeder Proband den Test selbstständig durchführen (s. Abbildung 4-3). Hierzu war lediglich eine kurze Einführung erforderlich. Die Art der Testsoftware ist dabei an einen MUSHRA-Test angelehnt.

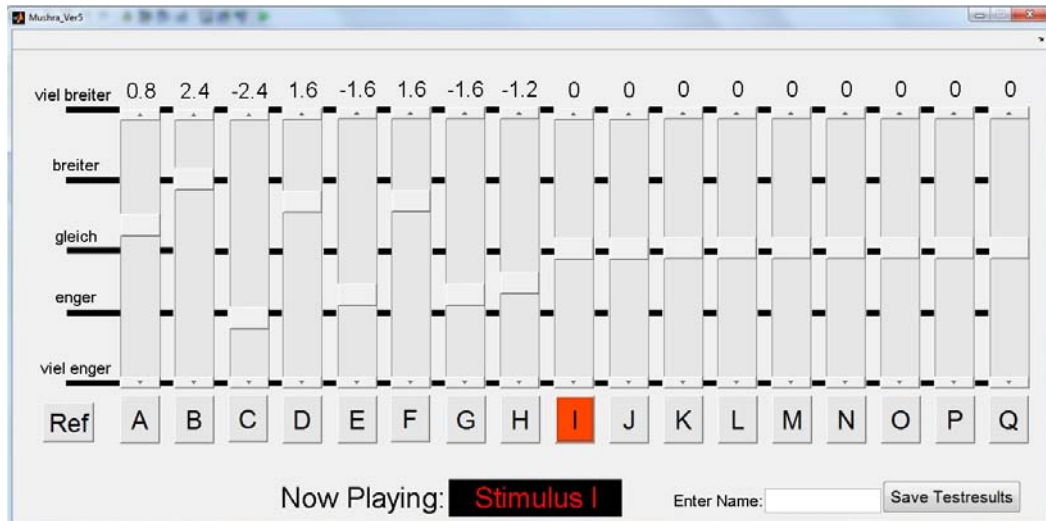


Abbildung 4-3: Die Testsoftware wurde extra für den Hörtest entwickelt.

Die Probanden mussten die Stimuli nicht nur mit der Referenz vergleichen und bewerten, sondern auch alle anderen Stimuli untereinander. Im besten Fall sollte sich dann ein gradueller Verlauf von eng bis breit ergeben.

Eine Bewertung größer als null bedeutet, dass der Stimulus breiter wahrgenommen wird als die Referenz. Eine Bewertung kleiner als null bedeutet, dass der Stimulus enger wahrgenommen wird. Die Bewertung null bedeutet, dass kein Unterschied zwischen der Referenz und dem Stimulus gehört wird. Als Referenz wurde eine XY-Anordnung mit Nieren und einem DFI-Prädiktor von 0,56 gewählt. Die Mikrofonanordnungen, die für den Hörversuch simuliert wurden, sind in Tabelle 1 zu sehen.

Mikrofonparameter A	r in [m]	Öffnungswinkel ϕ	DFI _{Predictor}
0,15	0	45°	0,073
0,4	0	45°	0,3265
0,5 Referenz	0	45°	0,5625
0,6	0	45°	0,7586
0,7	0	45°	0,8879
1	0	45°	1
1	1	0°	0,0449
1	0,5	0°	0,1701
1	0,35	0°	0,4331
1	0,2	0°	0,5845
1	0,1	0°	0,7725
1	0,02	0°	0,9859
0,5	1	30°	0,1421
0,5	0,5	30°	0,2738
0,5	0,2	30°	0,4631
0,5	0,1	30°	0,6086
0,5	0,02	30°	0,7564

Tabelle 1: Die Tabelle zeigt die Mikrofonanordnungen die für den Hörversuch simuliert wurden.

Die Hörsoftware verfügt außerdem über eine Shufflefunktion, welche die verwendeten Stimuli vor jedem Versuch anders anordnet. Damit bewertete jeder Proband eine andere Abfolge der Stimuli. Insgesamt haben acht Probanden am Hörversuch teilgenommen. Die trockene Aufnahme, die allen Stimuli zugrunde liegt, ist eine weibliche Sprachaufnahme (SQAM-CD). Für den Hörversuch wurde die Aufnahme auf fünf Sekunden gekürzt, damit ein schnelles Vergleichen der Stimuli untereinander möglich ist. In der Testsoftware ist es allerdings auch möglich, direkt zwischen den Stimuli umzuschalten.

Die Ergebnisse des Hörversuchs sind in Abbildung 4-4 zu sehen. Man erkennt, dass der DFI-Prädiktor die wahrgenommene räumliche Breite relativ gut voraussagen kann. Die versteckte Referenz wurde von allen Probanden sicher erkannt und liegt wie erwartet in der Mitte der Skala. Die Stimuli die einen kleineren DFI-Prädiktor als die Referenz haben, werden deutlich breiter wahrgenommen als die Stimuli mit einem größeren DFI-Prädiktor. Dieser Verlauf ist in allen Kurven erkennbar.

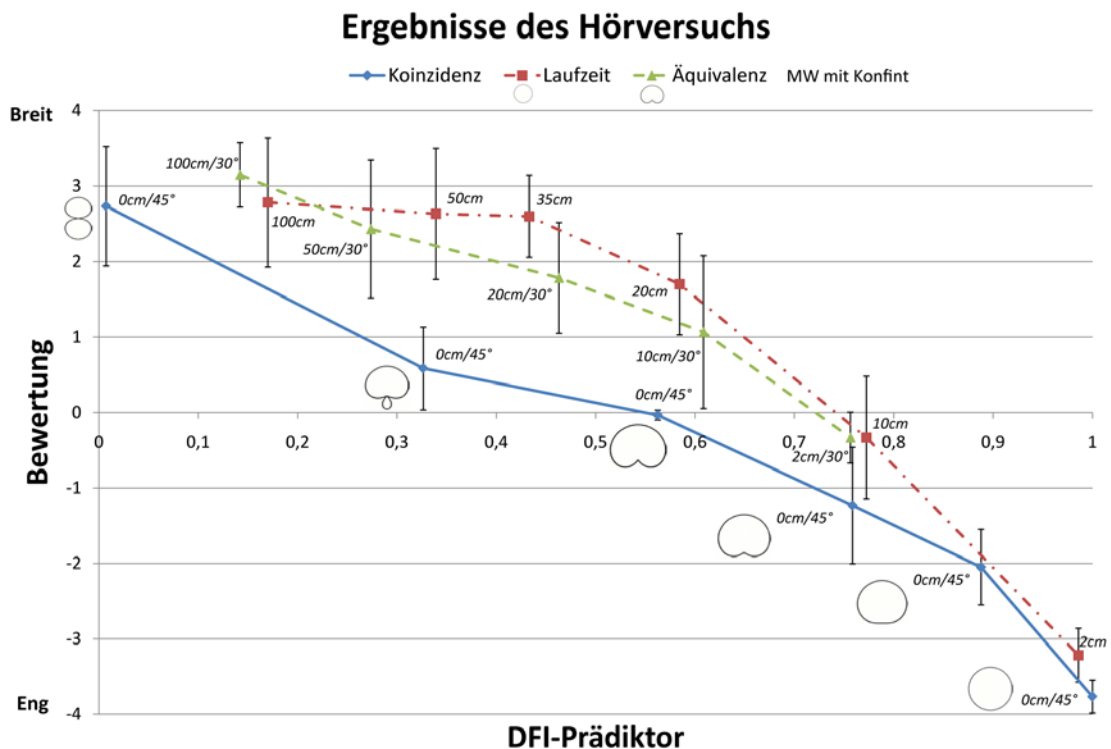


Abbildung 4-4: Der Hörversuch zeigt einen deutlichen Verlauf zwischen dem DFI-Prädiktor und der wahrgenommenen räumlichen Breite.

Der Kurvenverlauf der koinzidenten Stimuli weicht allerdings von denen der laufzeit- und äquivalenzbasierten Stimuli ab. Die laufzeit- und äquivalenzbasierten Stimuli werden bei ähnlichem DFI-Prädiktor breiter wahrgenommen als koinzidente. Die laufzeitbasierten Stimuli scheinen generell breiter wahrgenommen zu werden als die koinzidenten. Dies erkennt man besonders bei den Werten des DFI-Prädiktor, die kleiner sind als die Referenz.

Im Idealfall sollten alle drei Kurven den selben Verlauf aufweisen. Es zeigt sich, dass der DFI-Prädiktor in seiner jetzigen Form noch nicht ganz ausgereift ist. Die Ergebnisse belegen aber, dass der DFI-Prädiktor zur Voraussage der wahrgenommenen räumlichen Breite einer zweikanaligen Mikrofonanordnung benutzt werden kann.

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 4-5 die Ergebnisse des Hörversuchs über den Korrelationsgrad geplottet. Je nachdem ob das Diffusfeld mit weißem (linkes Diagramm) oder

rosa Rauschen (rechtes Diagramm) simuliert wurde, variieren die Ergebnisse. Dies ist beim DFI-Prädiktor nicht der Fall.

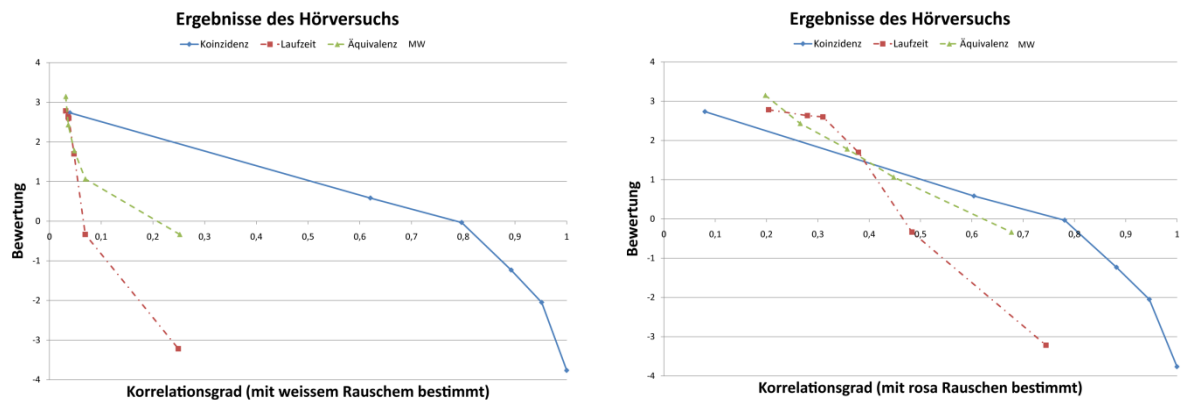


Abbildung 4-5: Die Ergebnisse variieren, je nachdem ob das Diffusfeld mit weißem oder rosa Rauschen simuliert wurde.

5. Schlussfolgerungen

Es wurde eine neue Methode vorgestellt, mit der es möglich ist die abgebildete räumliche Breite einer zweikanaligen Mikrofonanordnung vorauszusagen. Die Ergebnisse des Hörversuchs belegen, dass der DFI-Prädiktor einen guten Zusammenhang mit der räumlichen Wahrnehmung aufzeigt. Die Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der Korrelation ist wichtig und sollte bei der Beurteilung von räumlich getrennten Mikrofonen herangezogen werden.

6. Literaturverzeichnis

- [1] D. Griesinger, "The psychoacoustics of listening area, depth, and envelopment in surround recordings, and their relationship to microphone technique" in , 2001, pp. 182-200.
- [2] G. Theile, "Multichannel natural music recording based on psychoacoustic principles" in , 2001.
- [3] P. Damaske, "Subjektive Untersuchung von Schallfeldern" *Acustica*, vol. 19, no. 199, p. 68, 1967.
- [4] G. W. Elko, "4 Spatial Coherence Functions for Differential Microphones in Isotropic Noise Fields" *Microphone arrays: signal processing techniques and applications*, p. 61, 2001.
- [5] H. Riekehof-Böhmer, "Auswirkungen der Diffusfeldkorrelation auf die räumliche Wahrnehmung" *HAW-Hamburg, Germany, Bachelor*, Jul. 2010.
- [6] M. Drews, "Mikrofonarrays und mehrkanalige Signalverarbeitung zur Verbesserung gestörter Sprache" *Technische Universität Berlin, Germany, Diss*, 1999.
- [7] J. Blauert, *Spatial hearing*. MIT press Cambridge, Mass., 1997.
- [8] J. Bendat and A. Piersol, "Engineering applications of correlation and spectral analysis" 1980.
- [9] D. Griesinger, "General overview of spatial impression, envelopment, localization, and externalization" in *Proceedings of the 15th International Audio Engineering Society Conference*, Copenhagen, 1998, pp. 136-149.
- [10] S. Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*. Springer Verlag, 2008.