

# Wahrgenommene Quellbreite einer Lautsprecheranordnung in Abhängigkeit der physikalischen Quellbreite

Julian Grosse, Fabian Hungar, Stefan Klockgether, Steven van de Par  
 Exzellenzcluster Hearing4all, Dept. für Medizinische Physik und Akustik, Arbeitsgruppe Akustik,  
 Carl von Ossietzky Universität, 26111 Oldenburg, Deutschland,  
 julian.grosse@uni-ol.de, stefan.klockgether@uni-ol.de, steven.van.de.par@uni-ol.de

## Einleitung

Die Wahrnehmung von Geräuschen in Räumen wird immer durch den Raum beeinflusst. Diese Veränderung der Geräusche wird in Konzertsälen durch ihren Aufbau maßgeblich gestaltet. Jeder Raum sorgt dabei durch Reflexionen für eine Änderung der Klangfarbe und eine Veränderung der Geräusche [1]. Der Einfluss eines Raumes auf Geräusche lässt sich durch Messung der Raumimpulsantwort quantifizieren.

Die Qualität von Konzertsälen hängt mit der wahrgenommenen Quellbreite zusammen. Diese wahrgenommene Quellbreite ist dann besonders groß, wenn die interaurale Kohärenz eines, zwischen den Ohren gemessenes Geräusches, klein ist [2]. Der Direktschall eines Schallereignisses erreicht beide Ohren eines Hörers hochkorreliert, aber durch Reflexionen wird in Räumen die binaurale Raumimpulsantwort dekorreliert, was eine geringere interaurale Kohärenz und damit eine breiter wahrgenommene Quelle zur Folge hat.

Einige Studien (u.a. [2], [3]) deuten jedoch darauf hin, dass die wahrgenommene Quellbreite nicht nur durch die interauralen Kohärenz bestimmt wird. In halligen Umgebungen lässt sich jedoch beobachten, dass die wahrgenommene Quellbreite nicht mit der physikalischen Quellbreite übereinstimmt. Ziel dieser Studie war es deshalb die physikalische Quellbreite ohne den Einfluss von Reflexionen zu manipulieren, um weitere Abhängigkeiten der wahrgenommenen Quellbreite zu untersuchen. Dazu wurde ein psychoakustisches Experiment durchgeführt, bei dem die physikalische Quellbreite von Schallereignissen systematisch variiert werden konnte und Probanden die wahrgenommene Quellbreite einschätzen mussten. Um die physikalische Quellbreite kontrollieren zu können, wurde das Experiment mit einem Lautsprecherarray im reflexionsarmen Raum durchgeführt. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass wirklich nur die kontrolliert dargebotenen Schallereignisse ohne Einfluss von Reflexionen wahrgenommen werden.

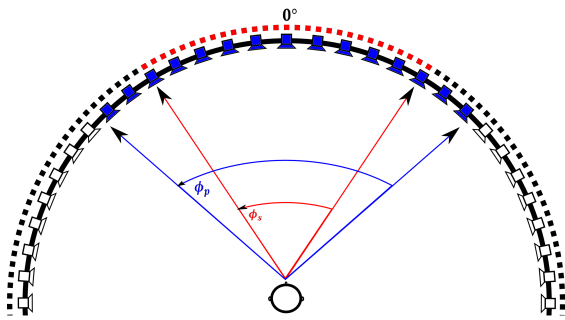
Santala und Pulkki [4] haben in einer Studie bereits Hinweise darauf gefunden, dass Probanden in einfacher akustischer Umgebung dazu tendieren, Schallquellen schmaler wahrzunehmen als sie physikalisch dargeboten werden. Die hier beschriebene Studie untersucht die wahrgenommene Quellbreite von Schallereignissen in der Azimuthebene der kompletten vorderen Hemisphäre. Dabei ist zu beachten, dass die Lokalisationsgenauigkeit von Probanden zum Einen frequenzabhängig ist und zum Anderen stark abnimmt, wenn sich die Schallquelle weiter

an der Seite befindet [5]. Die Wahrnehmung der Quellbreite scheint außerdem auch von der Dauer des Schallereignisses abzuhängen [6], weshalb die in dieser Studie dargebotenen Stimuli nicht nur in ihrer physikalischen Quellbreite, sondern auch in ihrer Frequenz und ihrer Dauer systematisch variiert wurden.

## Methode

Um den Zusammenhang zwischen physikalischer und wahrgenommener Quellbreite zu untersuchen wurde ein psychoakustisches Experiment durchgeführt. Hierzu wurde der Versuchsperson eine physikalisch definierte Quellbreite vorgespielt, die anschließend auf ihre wahrgenommene Quellbreite beurteilt werden sollte. Der Messaufbau ist schematisch in Abb.1 zu sehen. Dies wurde realisiert indem ein Lautsprecher-Halbkreis in reflexionsarmer Umgebung platziert wurde. In der Mitte des Halbkreises wurde die Versuchspersonen so platziert, dass ihre Blickrichtung zentral auf den mittleren Lautsprecher ( $0^\circ$ ) ausgerichtet war. Bei der Kalibrierung wurde darauf geachtet, dass sowohl die abgegebene Leistung der Lautsprecher, als auch die Übertragungsfunktion zwischen 100 Hz und 10 kHz zu einem Referenzmikrofon, platziert an der Abhörposition, konstant war, um mögliche Färbungseffekte zu vermeiden. Durch die Ansteuerung mit inkohärentem Rauschen lässt sich als Abhängigkeit von der Anzahl der Lautsprecher die physikalische Quellbreite  $\Phi_p$  erzeugen. Da sich die Leistung durch Hinzuschalten von inkohärenten Quellen erhöht, es jedoch essenziell ist den Schalldruckpegel am Abhörort konstant zu halten, wird auf jeden Lautsprecher ein Dämpfungsfaktor in Abhängigkeit der Anzahl der aktiven Lautsprecher angewandt. Mittels LED's, die oberhalb der Lautsprecher in einem Abstand von  $1^\circ$  angebracht waren, konnte die Versuchsperson nach der akustischen Darbietung die auditiv wahrgenommene Quellbreite  $\Phi_s$  über einen Slider zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  einstellen.

Die Darbietung der physikalischen und Bewertung der wahrgenommenen Quellbreite lässt sich für zwei Extremfälle exemplarisch beschreiben. Für den Fall, dass nur der Lautsprecher auf der  $0^\circ$  Position aktiv ist, ist die physikalische Quellbreite minimal breit und die wahrgenommene Quellbreite ist schmal. Dies zeigt sich auch in der interauralen Kohärenz die in diesem Fall sehr hoch ist. Für den Fall das alle Lautsprecher aktiv sind, ist sowohl die physikalische als auch die wahrgenommene



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des Messaufbaus im reflexionsarmen Raum. Auf einem halb-circulären Lautsprecherarray sind 31 Lautsprecher in einem Abstand von  $5.625^\circ$  angeordnet. Die Versuchsperson wird im Zentrum des Aufbaus, mit einem Radius von  $r = 3$  m, mit Blickrichtung auf den mittleren Lautsprecher bei  $0^\circ$  platziert. Ein akustisch transparenter Sichtschutz verhindert hierbei die direkte visuelle Lokalisation aktiver Schallquellen. Durch die Ansteuerung mit inkohärenten Rauschen lässt sich die physikalische Quellbreite  $\Phi_p$  als Abhängigkeit der Lautsprecheranzahl verändern. Oberhalb der Lautsprecher sind LED's im Abstand von  $1^\circ$  angebracht mittels derer die Versuchsperson den auditiv wahrgenommenen Winkel  $\Phi_s$  über die Pointer-Methode einstellen kann.

Quellbreite maximal breit und die interaurale Kohärenz geht gegen Null.

## Stimuli und Konditionen

In dieser Studie wurde als Stimuli weißes Rauschen zwischen 0.1 und 10 kHz verwendet. Zusätzlich zum breitbandigen Stimulus wurde das Rauschen auch in einzelne Bänder unterteilt dargeboten, um die wahrgenommene Quellbreite frequenzabhängig zu untersuchen. Die Unterteilung wurde wie folgt vorgenommen. *Low* war ein tieffpass gefiltertes Rauschen zwischen 0.1 kHz und 1 kHz, *mid* war ein bandpass gefiltertes Rauschen zwischen 1 kHz und 3 kHz und *high* ein Rauschen, in dem ausschließlich Frequenzen zwischen 3 kHz und 10 kHz vorhanden waren. Die Wahl der frequenzabhängigen Aufteilung wurde so ausgewählt, da das auditorische System nur bei Frequenzen kleiner ca. 1.5 kHz die interaurale Kreuzkorrelation (IACC) auswerten kann, welche maßgeblich die wahrgenommene Quellbreite beeinflusst. Dies könnte für die Bandpass-Rauschen *mid* und *high* bedeuten, dass die Performance der Versuchspersonen die Quellbreite zu bestimmen in diesen Frequenzbereichen schlechter würde. Zusätzlich wurden vier Dauern, 50, 250, 1000 und 2000 ms verwendet, um einen möglichen Effekt der Stimulusdauer auf die wahrgenommene Quellbreite zu untersuchen. Die Stimuli waren jeweils in jeder Kondition ein zufälliges weißes Rauschens, sodass die statistischen Eigenschaften der Stimuli leicht variierten, aber Trainingseffekte vermieden werden konnten. Die Stimuli wurden mit einer Hann-Flanke von 5 ms versehen, sodass An- und Abschaltartefakte bei der Schallpräsentation vermieden werden konnten. Die Stimuli wurden in Freifeldumgebung mit einem Gesamtpegel von 65 dB-SPL dargeboten.

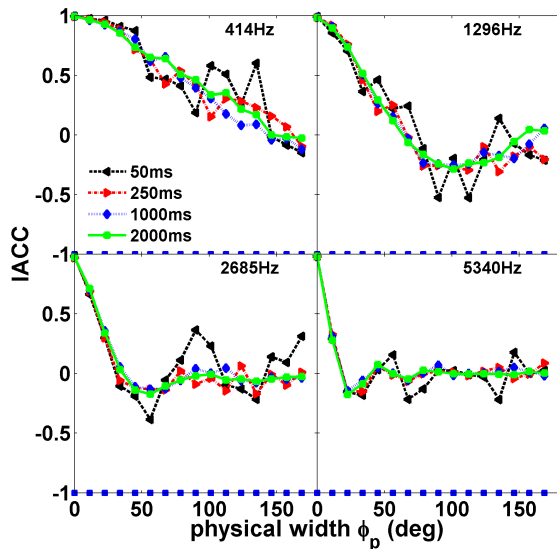
An diesem Experiment haben insgesamt 8 normalhörende Probanden teilgenommen. In jedem Durchgang wurden den Probanden insgesamt 16 unterschiedliche physikalische Quellbreiten randomisiert dargeboten. Durchgeführt wurde das Experiment für vier unterschiedliche Dauern und vier unterschiedliche Bandbreiten. Es wurden insgesamt 2 Messwiederholungen pro Versuchsperson durchgeführt.

## Objektive Evaluation

Die Stimuli wurden zusätzlich objektiv evaluiert. Die objektive Evaluation wurde mittels eines Kunstkopfes auf der Abhörposition der Versuchspersonen durchgeführt. Es wurde ein zufälliges Rauschen des jeweiligen Stimulus aufgenommen (separat für die unterschiedlichen Bandbreiten und Dauern). Die aufgenommenen Signale wurden mit einer Gammatone-Filterbank [7] mit einer kritischen Bandbreite von 1 ERB analysiert. Die auditorischen Filter wurden für die Auswertung entsprechend der verwendeten Frequenzbereiche der Stimuli ausgewählt. Die Mittenfrequenzen der Filter sind 488 Hz, 1470 Hz, 3017 Hz und 5974 Hz. Anschließend wurde in den ausgewählten Filtern der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient (IACC) berechnet. Die Ergebnisse der interauralen Kreuzkorrelation sind in Abb. 2 dargestellt. Beim Betrachten der IACC ist der Bereich  $f < 1.5$  kHz wichtig, da das auditorische System in diesem Bereich am sensitivsten ist. Ein besonderer Fokus muss hierbei auf sehr hohe IACC's nahe 1 gelegt werden, da das auditorische System sehr sensitiv auf Änderungen der IACC reagiert, wenn eine hohe Basiskorrelation vorhanden ist. Bei geringer Basiskorrelation nahe 0 ist die Sensitivität auf IACC Änderungen deutlich geringer. Abbildung 2 zeigt die IACC über den physikalischen Öffnungswinkel der Quellbreite. Es ist zu sehen, dass bei tiefen Frequenzen über die 4 Dauern die IACC bei steigendem Winkel  $\Phi_p$  einen geringen Abfall aufweist und erst bei sehr großen physikalischen Quellbreiten gegen 0 geht. Bei höheren auditorischen Filtern wird dieser Verlauf zunehmend steiler. Daraus resultiert, dass die IACC schon bei kleineren physikalischen Quellbreiten nahe 0 ist und die Quellbreite nicht nur auf Basis der IACC ausgewertet werden kann. Beim Betrachten der verschiedenen Stimuli-Dauern zeigt sich, dass mit steigender Dauer die IACC über  $\Phi_p$  weniger Fluktuationen in ihrem Verlauf aufweist. Dies ist auf eine erhöhte Varianz bei geringer Länge zurückzuführen. Diese Verläufe können bei Wiederholung der Messung leicht variieren, da die analysierten Daten, auf der Abb. 2 basiert, nur einmal gemessen wurden.

## Subjektive Evaluation

In Abb. 3 sind die Mittelwerte mit Standardfehler der auditiv wahrgenommenen Quellbreiten, gruppiert nach der Bandbreite des Stimulus, über die physikalische Quellbreite aufgetragen. Die rot gestrichelte Linie würde einen linearen Zusammenhang zwischen wahrgenommener und physikalischer Quellbreite bedeuten, d.h. dass die wahrgenommene Quellbreite immer exakt mit der physikalischen übereinstimmt. Im Folgenden wird immer

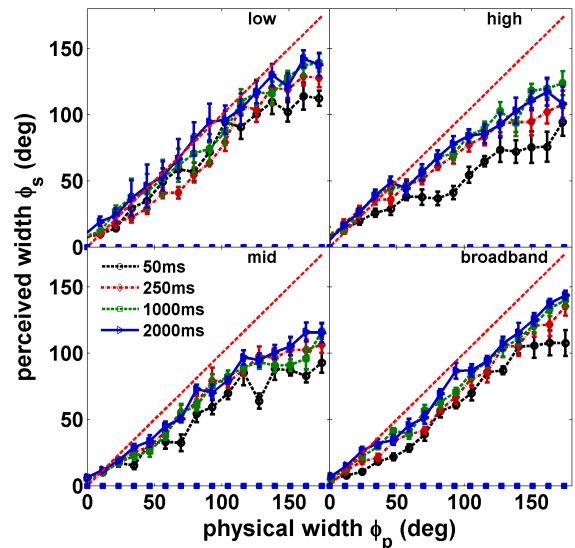


**Abbildung 2:** Interaurale Kreuzkorrelation aufgetragen über die physikalischen Quellbreite. Die vier Teilbilder zeigen vier auditorische Filter (1 ERB-Bandbreite) in Abhängigkeit der Stimuli-Dauern. Die blauen Quadrate repräsentieren die physikalischen Winkel zwischen den dargebotenen Lautsprechern.

von einer Abweichung der wahrgenommenen Quellbreite bezüglich der physikalischen Quellbreite gesprochen, wenn die wahrgenommene Quellbreite schmäler als die physikalische Quellbreite ist.

Beim Betrachten des tiefpass gefilterten Rauschens *low* fällt auf, dass gerade für die Stimuli von 1000 ms und 2000 ms die wahrgenommene Quellbreite (QB) der physikalischen QB entspricht und die Quelle erst ab ca. 120° schmäler wahrgenommen wird. Der Grund hierfür könnte an der bereits diskutierten IACC sein. Da die IACC zu großen physikalischen QB nur langsam absinkt ist es dem auditorischen System möglich diese über einen großen Bereich der physikalischen QB auszuwerten. Jedoch ist ab ca. 120° die IACC schon nahe 0 und kann bei der Wahrnehmung der Quellbreite nicht das einzige Merkmal sein, welches das auditorische System verwendet.

Ein ähnlicher Verlauf ist bei dem breitbandigem Rauschen *broadband* zu sehen. Im Vergleich zur Kondition *low* zeigt sich bei *high* und *mid*, dass die Quelle schon bei geringeren physikalischen QB deutlich größere Abweichungen aufzeigt und schmäler wahrgenommen wird als die physikalisch dargebotene Quellbreite. Bei Betrachtung der wahrgenommenen QB in Abhängigkeit der Dauer, zeigt sich für die beiden Konditionen 50 ms und 2000 ms, gerade für *high* und *mid* eine deutlich größere Abweichung der wahrgenommenen Quellbreite im Bezug zur physikalischen Quellbreite. Während bei *low* und *broadband* nur eine geringe Zeitabhängigkeit zu sehen ist, wird die Quelle für *high* und 50 ms schon bei kleinen  $\Phi_p$  deutlich schmäler wahrgenommen als die physikalische Quellbreite. Eine ähnliche Abweichung zeigt sich für *mid*, jedoch ist die Abweichung nicht so stark ausgeprägt. Generell lässt sich jedoch sagen, dass mit steigender Stimulusdauer eine breitere Quelle wahrgenommen und eingestellt wird.

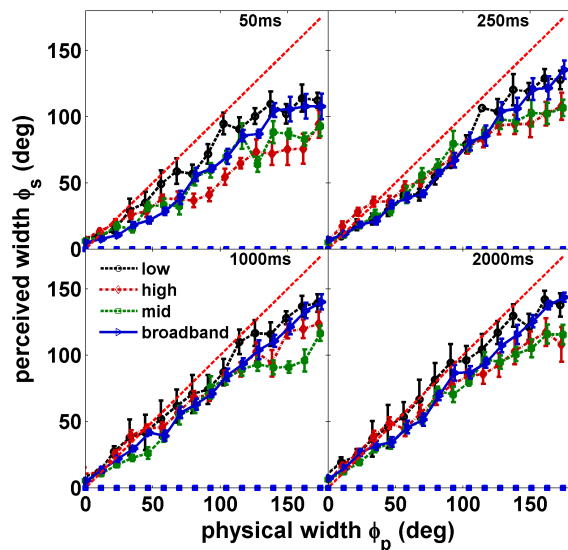


**Abbildung 3:** Subjektiv eingestellte wahrgenommene Quellbreite  $\Phi_s$  in Abhängigkeit der physikalischen Quellbreite  $\Phi_p$ . Die Daten wurden nach Bandbreite gruppiert, dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardfehler über die VP's der verwendeten Stimuli-Dauern. Die gestrichelte Linie würde einen linearen Zusammenhang zwischen wahrgenommener und physikalischer Quellbreite bedeuten.

Eine weitere Darstellung (gruppiert über die Stimulusdauer) der erhobenen subjektiven Daten ist in Abb. 4 dargestellt. Beim Vergleich der Dauern untereinander über alle Bandbreiten zeigt sich, dass gerade bei langer Stimulusdauer die wahrgenommene Quellbreite der physikalischen Quellbreite sehr ähnlich ist. Erst bei sehr kurzer Dauer wird der Unterschied zwischen den unterschiedlichen Bandbreiten größer. Zu bemerken ist jedoch, dass die Kondition *low* über die unterschiedlichen Dauern der physikalische Quellbreite ähnlich der wahrgenommenen Quellbreite ist und erst bei einer Verringerung der Dauer auf 50 ms die Quelle als schmäler wahrgenommen wird.

## Diskussion

In dieser Studie wurde die wahrgenommene Quellbreite in Abhängigkeit der physikalischen Quellbreite zwischen 0° und 180° untersucht. Hierbei war es die Aufgabe der Versuchsperson die auditiv wahrgenommene Quellbreite mit einer Pointer-Methode auf die physikalische Quellbreite einzustellen. Die Ansteuerung eines halb zirkularen Lautsprecherarrays mit inkohärentem Rauschen erlaubte es kontrolliert die physikalische Quellbreite zu variieren. Es wurden sowohl zeitliche als auch frequenzband abhängige Effekte bei der wahrgenommenen Quellbreite untersucht. Die subjektiven Daten zeigen, dass sowohl ein zeitlicher, als auch ein frequenzbandabhängiger Zusammenhang besteht. Generell zeigt sich, dass die Versuchspersonen gerade bei kleinen physikalischen Winkeln die Quellbreite sehr akkurat bewerten konnten und die Genauigkeit bei großen physikalischen Winkeln nachließ. Dies lässt sich durch die ansteigende Lokalisationsunschärfe von Quellen bei zu-



**Abbildung 4:** Subjektiv eingestellte visuelle wahrgenommene Quellbreite  $\Phi_s$  in Abhängigkeit der physikalischen Quellbreite  $\Phi_p$ . Die Daten wurden nach der Dauer der Stimuli gruppiert. Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardfehler über die VP's der verwendeten Bandbreiten.

nehmenden Azimuth-Winkel erklären [5]. Außerdem lies sich eine Frequenz- und Zeitabhängigkeit feststellen. Die Abhängigkeit von der Dauer zeigt, dass eine kürzere Präsentation des Schallereignisses eine schmalere Wahrnehmung der Quellbreite verglichen zur physikalischen Quellbreite zur Folge hat. Erst bei einer Verlängerung der Dauer, scheinen die für das auditorische System wichtigen Signaleigenschaften reliabel genug zu sein, dass die wahrgenommene Quellbreite eher der physikalischen Quellbreite entspricht. Dies zeigt sich auch in der Berechnung der interauralen Kreuzkorrelation in einzelnen kritischen Bändern der mit einem Kunstkopf aufgenommenen Signale. Die IACC zeigt bei kurzen Stimuli eine größere Varianz über die physikalische Quellbreite. Die Abhängigkeit von der Bandbreite der Stimuli zeigt, dass die Versuchspersonen gerade bei tiefen Frequenzen die physikalische Quellbreite sehr gut schätzen konnten. Dies lässt sich auf die Sensitivität des auditorischen Systems gerade in diesem Frequenzbereich zurückführen. Dennoch zeigte sich bei Verwendung anderer Bandbreiten (*mid* und *high*), dass die Versuchspersonen in der Lage waren die wahrgenommene Quellbreite ähnlich der physikalischen Quellbreite wahrzunehmen, obwohl in diesen Bereichen die IACC schon ab sehr kleinen Winkeln gleich 0 war. Dies lässt den Schluss zu, dass nicht ausschließlich die interaurale Kohärenz zur Auswertung der wahrgenommenen Quellbreite verwendet wird.

## Literatur

- [1] Beranek, L. L.: Concert hall acoustics-2008. Journal of the Audio Engineering Society 56, no. 7/8 (2008) 532-544.
- [2] Hidaka, T., Beranek, L. L., and Okano, T.: Interaural

cross-correlation, lateral fraction, and low-and high-frequency sound levels as measures of acoustical quality in concert halls. The Journal of the Acoustical Society of America 98.2 (1995) 988-1007.

- [3] Klockgether, S. and van de Par, S.: A Model for the Prediction of Room Acoustical Perception Based on the Just Noticeable Differences of Spatial Perception. Acta Acustica united with Acustica 100 (2014) 964-971.
- [4] Santala, O. and Pulkki, V.: Directional perception of distributed sound sources. The Journal of the Acoustical Society of America 129.3 (2011): 1522-1530.
- [5] Mills, A. W.: On The Minimum Audible Angle. J. Acoust. Soc. Am. 30 (1958), 237-246
- [6] Hirvonen, T. and Pulkki, V.: Perceived spatial distribution and width of horizontal ensemble of independent noise signals as function of waveform and sample length. Audio Engineering Society Convention 124. Audio Engineering Society, 2008.
- [7] Hohmann, V.: Frequency analysis and synthesis using a Gammatone filterbank. Acta Acustica united with Acustica 88.3 (2002) 433-442.