

Bestimmung des frequenzabhängigen akustischen Zentrums eines Lautsprechers im Zeitbereich

Sven Franz, Christina Imbery, Menno Müller und Jörg Bitzer

Institut für Hörtechnik und Audiologie, 26121 Oldenburg, Deutschland, Email: sven.franz@jade-hs.de

Einleitung

Lautsprecher sind direktive Schallquellen mit einer charakteristischen Schallabstrahlung und einem spezifischen Schallabstrahlungsort, welcher als akustisches Zentrum bezeichnet wird. Die Position des akustischen Zentrums kann je nach Lautsprechertyp unterschiedlich sein und liegt nach Vanderkooy [1] meist vor der Lautsprechermembran. Zur Bestimmung der richtungsabhängigen Abstrahlcharakteristiken werden Lautsprecher meist um ihre Mittelachse rotiert. Folglich führt die Rotation um die Mittelachse zu einer Verschiebung des akustischen Zentrums und somit zu einer Verschiebung der Schallquelle.

Die korrekte Bestimmung der richtungsabhängigen Abstrahlcharakteristik erfordert somit, dass Rotationsachse und akustisches Zentrum übereinander liegen. Für psychoakustische Experimente zur Wahrnehmung von Quellenausrichtungen ist eine Verschiebung der Quellenposition ebenfalls zu vermeiden. In der Literatur sind unterschiedliche Methoden und Definitionen zur Bestimmung des akustischen Zentrums bekannt. Diese basieren beispielsweise auf spektralen Eigenschaften [1], der Impedanz [2] oder dem Abstandsgesetz des Schalldrucks [3]. Hier wird ein Verfahren vorgestellt, das durch Analyse von richtungsabhängigen Impulsantworten die Position des akustischen Zentrums relativ zu einer betrachteten Rotationsachsenposition bestimmt. Der folgende Abschnitt beschreibt den Versuchsaufbau und die Analyse. Anschließend wird der Einfluss unterschiedlicher Rotationsachsenpositionen auf die messtechnisch bestimmten Richtcharakteristiken und die psychoakustische Wahrnehmung von Quellenpositionsverschiebungen bei Rotation betrachtet.

Bestimmung des akustischen Zentrums eines Lautsprechers

Wie bereits erwähnt basiert in dieser Arbeit die Bestimmung des akustischen Zentrums auf der Analyse von richtungsabhängigen Impulsantworten in Abhängigkeit zur Rotationsachsenposition des Lautsprechers. Liegen Rotationsachse und akustisches Zentrum übereinander kommt es zu keiner Positionsveränderung der Quelle und somit zu keiner (wahrnehmbaren) Änderung der Pegel- und Laufzeitdifferenzen. Dies gilt vor allem für Quellenausrichtungen von -90° bis 90° . Außerhalb dieses Bereiches steigt der Einfluss des Lautsprechergehäuses und Beugungs- und Abschattungseffekte treten auf. Dieser Bereich wird daher bei der Bestimmung des akustischen Zentrums vernachlässigt. Dies führt zu der hier verwendeten Definition des akustischen Zentrums: Das akustische Zentrum ist das richtungsunabhängige, virtuelle Zentrum

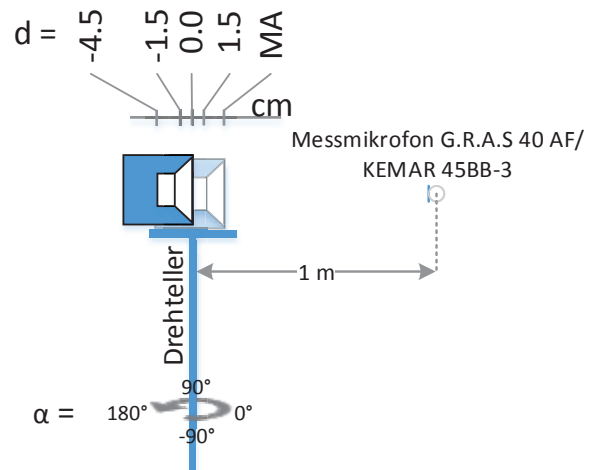


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Bestimmung des akustischen Zentrums eines Lautsprechers. Im reflexionsarmen Raum werden im Abstand von einem Meter quellenausrichtungs- und rotationsachsenpositionenabhängige Impulsantworten mit einem Messmikrofon und KEMAR Kunstkopf aufgenommen.

einer realen, direktiven Quelle ohne auditiv wahrnehmbare Positionsänderung unter Ausschluss von Anordnungen mit gehäusebedingten Beugungs- und Abschattungseffekten.

Versuchsaufbau

Um die Position des akustischen Zentrums einer realen Quelle in Form eines Ein-Wege-Lautsprechers zu bestimmen, wurden quellenausrichtungs- und rotationsachsenpositionenabhängige Impulsantworten aufgenommen und analysiert. Die Aufnahmen erfolgten in einem reflexionsarmen Raum. Der untersuchte Lautsprecher *Yamaha MS 101III* (BxHxT: $13.5 \times 21.5 \times 18 \text{ cm}^3$) wurde, entsprechend Abbildung 1, auf den Rotationsachsenpositionen $d = \text{MA}, 1.5, 0, -1.5$ und -4.5 cm (MA = Mittelachse des Lautsprechers), bezogen auf die Position der Lautsprechersicke, auf einem Drehteller montiert und die Impulsantworten für Quellenausrichtungen α von -180° bis 180° in 2.5° Schritten mittels Sinussweep (Dauer = 5 s, $f_u = 50 \text{ Hz}$, $f_o = 24 \text{ kHz}$) in einem Abstand von 1 m bestimmt.

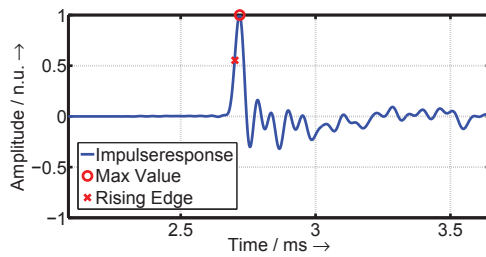


Abbildung 2: Bestimmung des Mittelpunktes der ersten ansteigenden Flanke am Beispiel einer Impulsantwort. Bestimmt wird der Zeitpunkt, wann die Impulsantwort 50 % der maximalen Auslenkung beträgt.

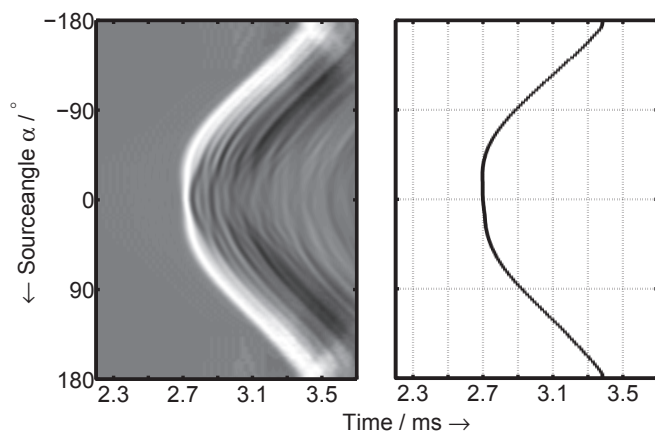


Abbildung 3: Links: Normierte quellenausrichtungsabhängige Impulsantworten des Lautsprechers *Yamaha MS 101III* bei Rotation um die Mittelachse des Gehäuses. Rechts: Aus den Impulsantworten extrahierte erste Wellenfront.

Analyse der quellenausrichtungs- und rotationsachsenpositionenabhängigen Impulsantworten zur Bestimmung der Position des akustischen Zentrums

Für jede quellenausrichtungs- und rotationsachsenpositionenabhängige Impulsantwort wurde der Zeitpunkt des Mittelpunktes der ersten ansteigenden Flanke und somit die Laufzeit der ersten Wellenfront der Impulsantwort bestimmt (siehe Abbildung 2). In Abbildung 3 sind links normierte Ausschnitte der ermittelten Impulsantworten für den Lautsprecher für die Rotation um die MA in Abhängigkeit von der Quellenausrichtung α über der Zeit dargestellt. Helle Bereiche entsprechen einer positiven Auslenkung der Impulsantwort und dunkle Bereiche einer negativen Auslenkung. Die rechte Abbildung zeigt die resultierende erste Wellenfront für die dargestellten Impulsantworten.

Die von der Rotationsachsenposition d abhängigen Laufzeiten dieser ersten Wellenfronten sind in Abbildung 4 für unterschiedliche Frequenzanteile dargestellt. Die linke Abbildung zeigt die Wellenfronten für ungefilterte, in der Mitte für tiefpassgefilterte ($f_g = 1.5 \text{ kHz}$) und rechts für hochpassgefilterte ($f_g = 1.5 \text{ kHz}$) Impulsantworten. Im Bereich $|\alpha| \leq 90^\circ$ weisen die Wellenfronten einen sinusähnlichen Verlauf mit rotationsachsenpositi-

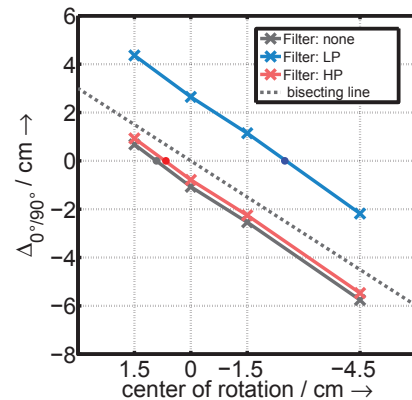


Abbildung 5: Frequenzbandabhängige, zeitliche Differenzen $\Delta_{0^\circ/90^\circ}$ der ersten Wellenfront zwischen den Quellenausrichtungen 0° und 90° . Durch den linearen Kurvenverlauf kann auf die Position des akustischen Zentrums relativ zur gemessenen Rotationsachsenposition geschlossen werden.

onsabhängigen Amplituden auf. Eine ideale Punktquelle würde sich ohne Einflüsse eines Lautsprechergehäuses kreisförmig um die Rotationsachse bewegen. Bei diesen Ausrichtungen sind Beugungs- und Abschattungseffekte durch das Lautsprechergehäuse zu vernachlässigen. Erst für Quellenausrichtungen von $|\alpha| > 90^\circ$ weisen die Kurven komplexere Verläufe auf, da durch den steigenden Einfluss des Lautsprechergehäuses die ansonsten sinusförmigen Verläufe überlagert werden. Daraus resultiert, dass die Laufzeiten der Wellenfronten bei $\alpha = \pm 90^\circ$ identisch sind und bei $\alpha = 0^\circ$ die größte Varianz untereinander aufweisen.

Die Differenz $\Delta_{0^\circ/90^\circ}$ der in Strecken umgerechneten Laufzeiten der ersten Wellenfront zwischen 0° und 90° beschreibt in erster Näherung die Position des akustischen Zentrums relativ zur betrachteten Rotationsachsenposition. Dies ergibt sich aus Abbildung 5, bei der $\Delta_{0^\circ/90^\circ}$ über die betrachteten Rotationsachsenpositionen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Frequenzanteilen der Impulsantworten dargestellt sind. Die dargestellten Kurven weisen einen zur Winkelhalbierenden parallelen Verlauf auf. Durch den linearen Kurvenverlauf kann die Position des frequenzabhängigen akustischen Zentrums abschließend mittels Steigungsdreieck bestimmt werden.

So befindet sich das akustische Zentrum des Lautsprechers für ungefilterte Signale bei 1.0 cm, für tiefpassgefilterte Signale bei -2.6 cm und für Hochpassgefilterte bei -0.7 cm relativ zur Position der Lautsprechersicke.

Einfluss unterschiedlicher Rotationsachsenpositionen eines Lautsprechers auf die gemessene Richtcharakteristik

Typischerweise wird die Richtcharakteristik eines Lautsprechers für Rotationen um die MA des Lautsprechergehäuses oder um das ggf. vorhandene Stativgewinde durchgeführt. Vanderkooy beschreibt, dass die Wahl der Rotationsachsenposition einen Einfluss auf die gemessene Richtcharakteristik hat. So erscheint eine omnidirek-

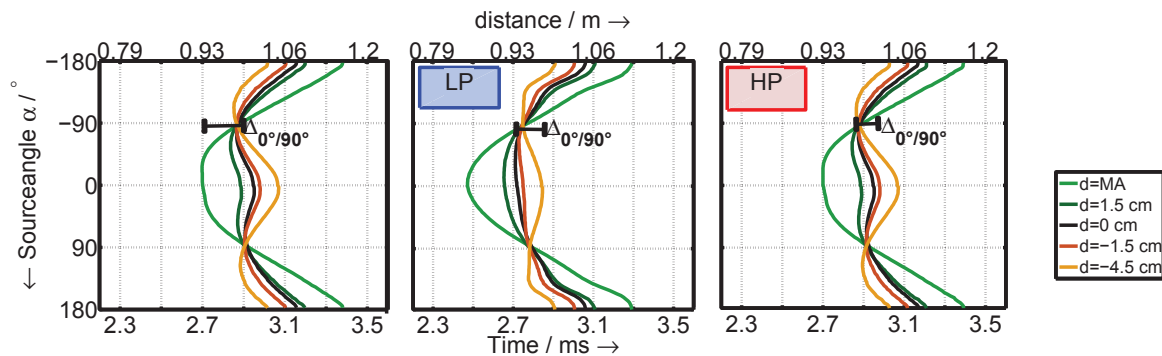


Abbildung 4: Aus den Impulsantworten extrahierte erste Wellenfront in Abhängigkeit von der Rotationsachsenposition und Frequenzbändern. Beispielhafte Darstellung zur Bestimmung der zeitliche Differenzen $\Delta_{0^\circ/90^\circ}$ der ersten Wellenfront zwischen den Quellenausrichtungen 0° und 90° .

tionale Quelle im Richtdiagramm erst omnidirektional, wenn die Drehung der Quelle um das akustische Zentrum erfolgt [1].

In Abbildung 6 sind beispielhaft die gemessenen, auf die Quellenausrichtung 0° normierten Richtcharakteristiken der Terzbänder $f_{Terz} = 0.5, 1, 2, \text{ und } 4 \text{ kHz}$ des Lautsprechers für die Rotationsachsenpositionen $d = MA, 1.5, 0, -1.5 \text{ und } -4.5 \text{ cm}$ im kartesischen Koordinatensystem dargestellt.

Während die Richtcharakteristiken für Rotationsachsenpositionen nahe am akustischen Zentrum die geringsten Varianzen untereinander aufweisen, weicht die Richtcharakteristiken für die Rotationsachsenposition $d = MA$ um bis zu 5 dB von diesen ab.

Sowohl die Untersuchungen von Vanderkooy als auch die hier dargestellten Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass eine Bestimmung der Richtcharakteristik einer Lautsprecherbox mit einer Rotation nahe um das akustische Zentrum sinnvoll ist.

Einfluss unterschiedlicher Rotationsachsenpositionen eines Lautsprechers auf die subjektive Wahrnehmung der Quellenposition

Um eine Verschiebung der Quellenposition bei psychoakustischen Experimenten mit Fokus auf die Quellenausrichtung abzuschätzen und möglichst gering zu halten, wurde der Einfluss von drei unterschiedlichen Rotationsachsenpositionen auf die subjektiv wahrgenommene Quellenposition in einem Hörversuch untersucht. Entsprechend Abbildung 1 wurden mit einem Kunstkopf (*KEMAR 45BB-3*) richtungsabhängige binaurale Impulsantworten im reflexionsarmer Raum für die Rotationsachsenpositionen bei $d_{KEMAR} = MA, 0 \text{ cm}$ und -4.5 cm aufgezeichnet. Die Quellenausrichtungen des Lautsprechers erfolgte mit einem Drehteller in 10° Schritten zwischen $\alpha_{KEMAR} = -90^\circ$ und 90° . Die resultierenden Impulsantworten wurden mit einem tiepassgefilterten, gepulsten Rauschen (5 Pulse á 333 ms, 300-1300 Hz) gefaltet und eine Entzerrung für den zur Darbietung der

Signale verwendete Kopfhörer *Sennheiser HD-800* vorgenommen.

Der Hörtest erfolgte in 57 randomisierten Durchläufen, in denen paarweise ein Referenz- und ein zu bewertendes Testsignal dargeboten wurde. Das erste Signal, das Referenzsignal, hat in jedem Trial eine Quellenausrichtung von $\alpha_{KEMAR} = 0^\circ$ und das zweite Signal, das Testsignal, eine der zu testenden Quellenausrichtung α_{KEMAR} der gleichen Rotationsachsenposition. Die Aufgabe der Probanden ($N = 15$ (7 männliche, 8 weibliche), Durchschnittsalter = 30 Jahre, nach eigenen Angaben normalhörend) bestand darin, anzugeben, ob sich die Position des Testsignals links, auf gleicher Position oder rechts vom Referenzsignal befindet.

Ergebnisse des Hörversuchs

Das Ergebnis der Hörversuche zur Wahrnehmung unterschiedlicher Rotationsachsenpositionen eines Lautsprechers sind in Abbildung 7 als relative Häufigkeiten der Probandenantworten über den Quellenausrichtungen α_{KEMAR} für unterschiedliche Rotationsachsenpositionen d_{KEMAR} dargestellt. Negative Quellenausrichtungen α_{KEMAR} entsprechen einer Rotationsrichtung des Lautsprechers im Uhrzeigersinn, d.h. nach links ausgerichtet, und umgekehrt. Blau hinterlegt sind die Urteile der Probanden für eine Positionsverschiebung nach links, pastelgrün für keine Positionsverschiebung und rot für eine Positionsverschiebung nach rechts.

Identische Referenz- und Testsignale bei einer Quellenausrichtung von $\alpha_{KEMAR} = 0^\circ$, bezogen auf alle drei Rotationsachsenpositionen, konnten von mindestens 67% der Probanden erkannt werden. Dies entspricht einer Anzahl von 10 Probanden. In der weiteren Betrachtung der Ergebnisse werden diese 67% als Grenze für eine Entscheidung der Probanden zu einer bestimmten Seite festgelegt. Anhand dieser Grenze nehmen die Probanden für eine Rotationsachsenposition bei $d_{KEMAR} = MA$ eine Verschiebung der Quelle ab einer Quellenausrichtung von ca. $\alpha_{KEMAR} \pm 30^\circ$ wahr. Befindet sich die Rotationsachsenposition bei $d_{KEMAR} = 0 \text{ cm}$ ist eine Verschiebung der Quelle erst ab einer Quellenausrichtung von ca.

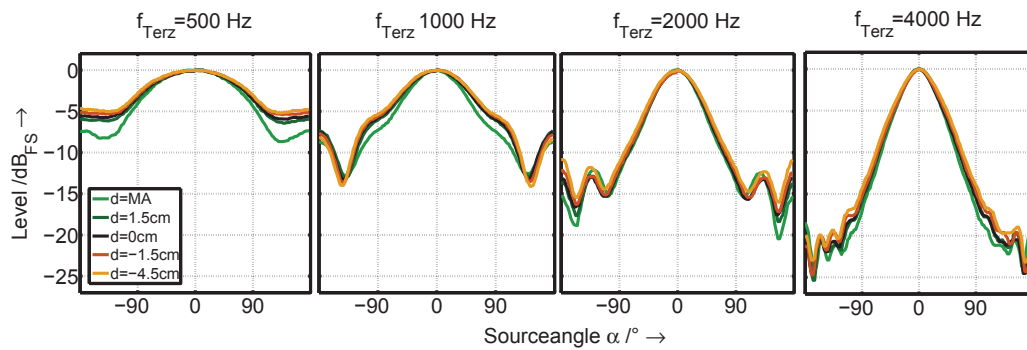


Abbildung 6: Richtcharakteristik in Terzbändern des Lautsprechers *Yamaha MS 101III* in Abhängigkeit von unterschiedlichen Rotationsachsenpositionen.

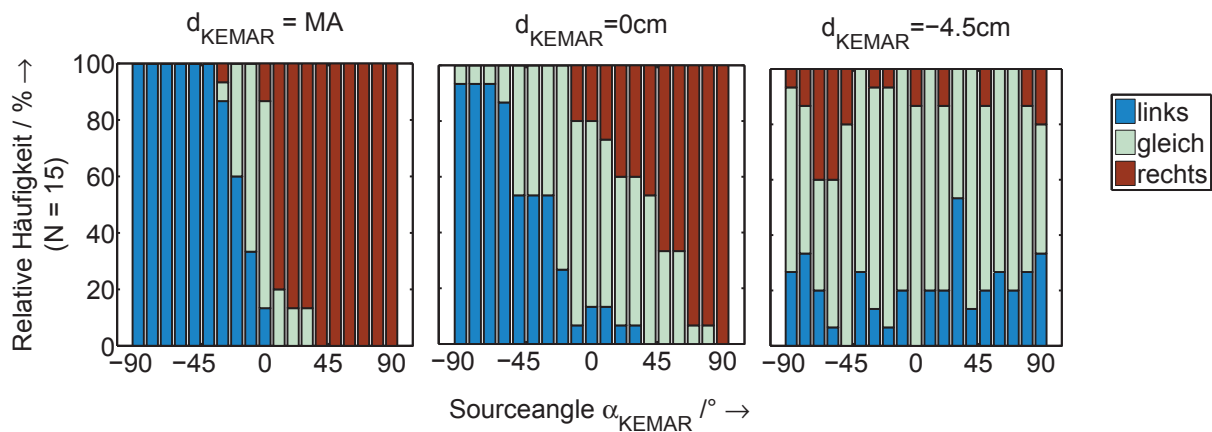


Abbildung 7: Ergebnis der Hörversuche zur Wahrnehmung unterschiedlicher Rotationsachsenpositionen eines Lautsprechers

$\alpha_{KEMAR} \pm 50^\circ$ wahrnehmbar. Bei einer Rotationsachsenposition von $d_{KEMAR} = -4.5$ cm zeigen sich für keine der Quellenausrichtungen eine Verschiebung zu einer bestimmten Seite. Bei 14 der 19 getesteten Quellenausrichtungen konnten mehr als 67% der Probanden keine Änderung der Quellenposition angeben.

Zusammenfassung

Es wurde ein Verfahren zur Bestimmung des akustischen Zentrums von Lautsprechern anhand von richtungsabhängigen Impulsantworten relativ zur Rotationsachse des Lautsprechers dargestellt. Die Bestimmung der Position des akustischen Zentrums erfolgt mithilfe der Differenz zwischen dem zeitlichen Auftreten des Direktschalls der Quellenausrichtungen 0° und 90° . Dabei zeigte sich, dass die Position des akustischen Zentrums vor der Lautsprechermembran liegt und frequenzabhängig ist.

Die Hörtestergebnisse decken sich mit den messtechnisch bestimmten Zusammenhängen. Das akustische Zentrum für die getesteten Signale befindet sich ca. 2.6 cm vor der Sickenposition und somit zwischen den getesteten Rotationsachsenpositionen $d_{KEMAR} = 0$ cm und $d_{KEMAR} = -4.5$ cm. Die deutlichste Verschiebung der Quelle für unterschiedliche Quellenausrichtungen nehmen die Probanden für das Rotationsachsenposition bei $d_{KEMAR} = MA$ wahr. Die Probanden nehmen eine Quellenverschiebung für Rotationsachsenpositionen, die sich nahe des aku-

stischen Zentrums befinden, deutlich weniger wahr als Rotationsachsenpositionen hinter der Lautsprechermembran.

Literatur

- [1] Vanderkooy, J.: "The Low-Frequency Acoustic Center: Measurement, Theory, and Application", in Audio Engineering Society Convention 128, 2010.
- [2] Barrera-Figueroa, S., Rasmussen, K., Jacobsen, F.: "A time-selective technique for free-field reciprocity calibration of condenser microphones", J. Acoust. Soc. Am. 114 (3), September 2003
- [3] Jacobsen, F., Barrera-Figueroa S., Rasmussen K.: "A note on the concept of acoustic center", J. Acoust. Soc. Am 115 (4), April 2004