

Einfluss der Rotationsachse auf die wahrgenommene Ausrichtung einer Schallquelle

Christina Imbery,¹ Steven van de Par², Joerg Bitzer¹

¹ *Institut für Hörtechnik und Audiologie, 26121 Oldenburg, Deutschland, Email: christina.imbery@jade-hs.de*

² *Universität Oldenburg, Arbeitsgruppe Akustik, 26129 Oldenburg, Deutschland*

Einleitung

In einem Gespräch mit mehreren Sprechern ist der Mensch in der Lage zu entscheiden, ob er angesprochen wird oder nicht. Dazu können von ihm visuelle aber auch akustische Informationen ausgenutzt werden. Neben dem Augenkontakt zum Gesprächspartner kann auch die Ausrichtung des Kopfes entscheidend sein, ob sich der Mensch angesprochen fühlt oder nicht. Auf akustischer Ebene kann die Wahrnehmung der Kopfausrichtung beispielsweise durch winkelabhängige spektrale Unterschiede der Sprechenden Person, Zeit- und Pegelunterschiede zwischen den Ohren des Hörenden oder auch akustische Eigenschaften des Raums beeinflusst werden [3] [5].

Es ist allerdings noch nicht vollständig verstanden, welche akustischen Eigenschaften hauptsächlich für die Wahrnehmung der Kopfausrichtung verantwortlich sind. Dies ist auch mit der hohen Anforderung bei der Durchführung der Hörexperimente auf Ebene der Signalerzeugung begründet. Wird ein menschlicher Sprecher verwendet, sollte die Aussprache und die Position bei einer Rotation der Sprechenden Person kontrolliert werden, um keine zusätzlichen akustischen Informationen zu liefern. Wird ein Lautsprecher zur Signalerzeugung verwendet, sollte die menschliche Stimme nachgebildet werden. Außerdem könnte die Wahl der Rotationsachse einen zusätzlichen Beitrag bei der wahrgenommenen Ausrichtung einer Schallquelle liefern.

Üblicherweise wird ein Lautsprecher um die Mittelachse gedreht. Diese Vorgehensweise ist eine gängige Methode bei der Bestimmung der Richtcharakteristik eines Lautsprechers. Die Mittelachse eines Lautsprechers ist jedoch nicht der Quellpunkt der Schallabstrahlung. Dieser frequenzabhängige Quellpunkt wird auch als akustisches Zentrum bezeichnet und befindet sich nach Vanderkooy (2010) [6] in der Nähe der Membran. Eine Rotation des Lautsprechers um die Mittelachse führt daher zu einer Verschiebung der Schallquelle. Diese Verschiebung kann sich auch auf die subjektiv wahrgenommene Quellposition auswirken, da der Mensch sehr sensitiv auf Schallergebnisse von vorne, durch die Auswertung von interauralen Zeit- und Pegelunterschieden, reagiert [4]. Den Einfluss unterschiedlicher Rotationsachsen eines Lautsprechers auf die subjektiv wahrgenommene Quellposition hat Franz et al. (2015) [2] in einem Hörexperiment untersucht. Eine Quellverschiebung konnte nicht mehr eindeutig erkannt werden, wenn sich die Rotationsachse in der Nähe des akustischen Zentrums befindet.

In einem Hörexperiment soll die Quellausrichtungswahrnehmung eines Sprachsignals mit einem standardisierten Lautsprecher als Schallquelle bestimmt werden. Dieser

Lautsprecher dreht sich zum einen um das gemessene akustische Zentrum, um den Einfluss der Quellverschiebung zu minimieren und zum anderen um die Mittelachse, ohne Kontrolle der Quellverschiebung. Ziel dieser Studie ist es den Einfluss der Quellverschiebung auf die mittlere wahrgenommene Quellausrichtung und die mittlere Abweichung zur getesteten Quellausrichtung zu untersuchen.

Hörexperiment

Signalerzeugung

Der verwendete Lautsprecher *NTi Audio Talkbox* ist ein Einweg-Lautsprecher und besitzt kopf-ähnliche Abmessungen (WxHxD: 150 cm x 150 cm x 175 cm). Außerdem entspricht die Richtcharakteristik weitestgehend der Richtcharakteristik eines menschlichen Sprechers und ist daher geeignet für die realitätsnahe Erzeugung von Sprachsignalen. Mit einer eingebauten DSP-Echtzeitverzerrung hat der Lautsprecher zwischen 100 – 10000 kHz einen flachen Frequenzgang. Vom Lautsprecher wird ein standardisierter Text eines männlichen Sprechers abgespielt. Der Text umfasst den ersten Satz der Fabel Nordwind und Sonne aus [1]. Das Sprachsignal dauert ca. 10 Sekunden und erzeugt bei einem Meter Abstand einen L_{Aeq} von ca. 65 dBA.

Rotationsachsen

Um den Einfluss der Rotationsachse auf die Quellausrichtungswahrnehmung für Sprache zu untersuchen, wird die Position des akustischen Zentrums auf Sprache optimiert. Die größte Energie eines Sprachsignals befindet sich im tieffrequenten Bereich, somit ist die Wahrnehmung einer Quellverschiebung durch interaurale Zeitunterschiede dominiert [4]. Unter Verwendung der Methode von Franz et al. (2015) [2] wird das frequenzabhängige akustische Zentrum im Zeitbereich gemessen. Diese Methode berücksichtigt Quellausrichtungen im Bereich von -90° bis $+90^\circ$, bei dem der Lautsprecher dem Probanden zugewandt ist. Für Quellausrichtungen bei denen der Lautsprecher vom Probanden abgewandt ist, steigt der Einfluss des Lautsprechergehäuses und es kommt zu Beugungs- und Abschattungseffekten, die für die Bestimmung des akustischen Zentrums nicht berücksichtigt werden.

Die Position der Rotationsachse befindet sich beim gemessenen akustischen Zentrum 1,5 cm vor der Vorderwand des Gehäuses und bei einer Rotation um die Mittelachse 7,5 cm hinter der Vorderwand des Gehäuses, siehe Abb. 1.

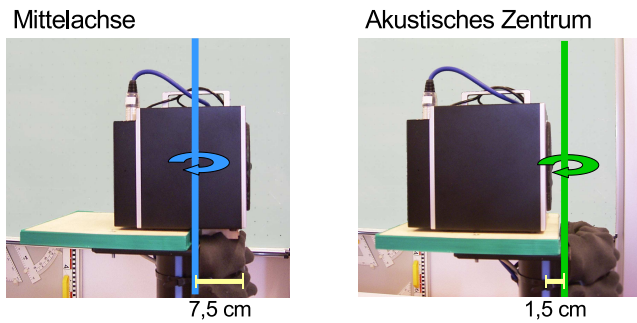


Abbildung 1: Rotationsachsen im Hörexperiment für eine Drehung um die Mittelachse (links, blau) und um das gemessene akustische Zentrum (rechts, grün)

Methode

Das Hörexperiment fand in einem mittelgroßen Raum (10m x 7,75m x 3m) mit einer Nachhallzeit von $T60=0,4s$ statt. Auf einem Drehteller wurde der Lautsprecher platziert, der 16 Quellausrichtungen ansteuerte, $\varphi_{real} = 0^\circ, \pm 25^\circ, \pm 45^\circ, \pm 65^\circ, \pm 90^\circ, \pm 115^\circ, \pm 135^\circ, \pm 155^\circ, 180^\circ$. Um Drehgeräusche des Drehtellers zu maskieren wurde bei jedem Wechsel der Quellausrichtung rosa Rauschen aus zwei weiteren Lautsprechern abgespielt. Das Maskierungsrauschen dauerte 45 Sekunden, damit die Probanden keinen Bezug zwischen Rotationsdauer und Quellausrichtung herstellen konnten. Die Position des Lautsprechers befand sich schräg im Raum und ist in Abb. 2 dargestellt. Für negative Quellausrichtungen zeigte der Lautsprecher weitestgehend in den Raum, und für positive Quellausrichtungen zur Wand. Die kürzeste Entfernung zwischen Lautsprecher und Wand betrug ca. 1 m. Die Entfernung zwischen Lautsprecher und Boden betrug 1,5m. Die Probanden saßen in einer Entfernung von 90 cm zum Lautsprecher, der sich hinter einem akustisch transparenten Stoff befand. Als Rotationsachse des Lautsprechers wurde zum einen die Mittelachse und zum anderen das akustische Zentrum gewählt.

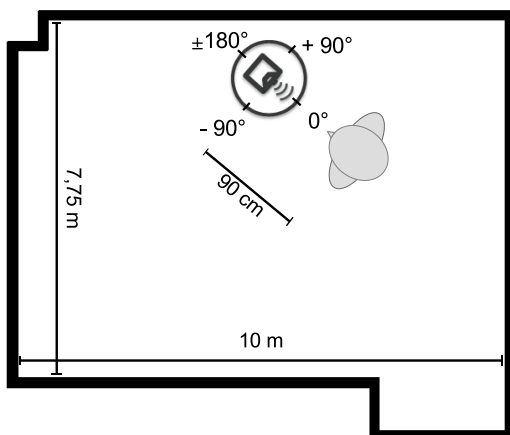


Abbildung 2: Skizze des Versuchsaufbaus im Raum: Die Entfernung zwischen Rotationsachse und Ohren der Probanden betrug 90 cm.

Versuchsteilnehmer

An den Hörversuchen nahmen 19 normal-hörende Probanden teil (Hörschwelle ≤ 20 dB HL bei den Audiometriefrequenzen im Bereich zwischen 250 Hz und 8 kHz). Sie hatten ein durchschnittliches Alter von 32 Jahren (von 25 bis 54).

Durchführung

Während des Experiments saßen die Probanden vor dem Lautsprecher, der für den Probanden nicht sichtbar war. Von jeder zu testenden Quellausrichtung spielte der rotierende Lautsprecher ein Sprachsignal ab. Die Aufgabe der Probanden war es, die von ihnen wahrgenommene Quellausrichtung des künstlichen Sprechers anzugeben. Die Eingabe erfolgte über einen Bildschirm. Der Bildschirm zeigte einen Kopf von oben, der in die von ihnen wahrgenommene Ausrichtung eingestellt werden konnte, siehe Abb. 3. Die Auflösung bei der Eingabe betrug 5° . Das Hörexperiment gliederte sich in eine Orientierungsphase und ein Hauptexperiment. In der Orientierungsphase machte sich der Proband mit dem Sprecher und der Fragestellung vertraut. Dem Proband wurde beispielhaft das Sprachsignal für acht Quellausrichtungen dargeboten. Als visuelle Rückmeldung zeigte der Kopf auf dem Eingabe-Bildschirm in die dargebotene Quellausrichtung. Im Anschluss an die Orientierungsphase fand das Hauptexperiment statt, bestehend aus zwei Teilen. Einmal für eine Rotation um die Mittelachse und einmal um das akustische Zentrum. Die Reihenfolge dieser beiden Teile wechselte zwischen den Probanden, sodass die eine Hälfte der Probanden mit einer Rotation um die Mittelachse beginnen und die andere Hälfte mit einer Rotation um das akustische Zentrum konnte. Die 16 Quellausrichtungen wurden jeweils in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Im Hauptexperiment erhielten die Probanden keine visuelle Rückmeldung über die Quellausrichtung des dargebotenen Sprachsignals.

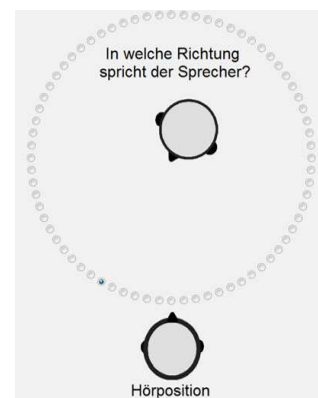


Abbildung 3: Eingabemaske für die vom Probanden wahrgenommene Quellausrichtung

Ergebnisse

Aus den Antworten der 19 Probanden wurde die mittlere wahrgenommene Quellausrichtung $\bar{\varphi}_{PB}$ aus

dem Mittelwert über die Einzelantworten φ_{PB} für jede getestete Quellausrichtung φ_{real} und Rotationsachse berechnet. In Abb. 4 sind Mittelwert und Standardfehler der getesteten über die mittlere wahrgenommenen Quellausrichtungen, einmal für eine Rotation um die Mittelachse (blau, \diamond) und einmal um eine Rotation um das akustische Zentrum (grün, \diamond) dargestellt. Die Datenpunkte sind auf der x-Achse zur Besseren Darstellung mit einer Verschiebung von 3° versehen. Die gestrichelte diagonale Linie entspricht einer richtigen Erkennung der vorgegebenen Ausrichtung.

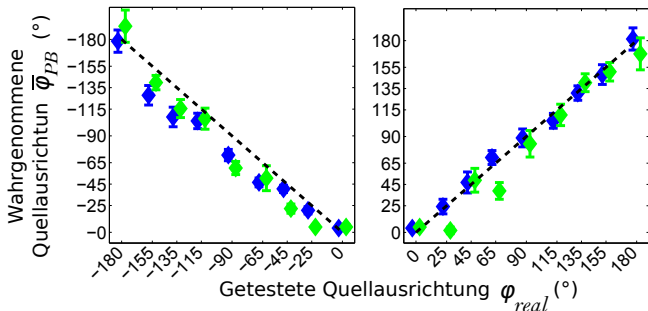


Abbildung 4: Mittlere wahrgenommene Quellausrichtung (Mittelwert und Standardfehler) als Funktion der getesteten Quellausrichtung für eine Rotation um die Mittelachse (blau, \diamond) und das akustische Zentrum (grün, \diamond).

Die Abweichung zwischen der mittleren wahrgenommenen Quellausrichtung und der getesteten Quellausrichtung ist bei einer Rotation des Lautsprechers um die Mittelachse für elf der 16 getesteten Quellausrichtungen kleiner als 10° . Bei einer Rotation um das akustische Zentrum ist die Abweichung nur noch für sieben der getesteten Quellausrichtungen kleiner als 10° . Somit liegt die mittlere wahrgenommene Quellausrichtung häufiger in der Nähe der getesteten Quellausrichtung bei einer Rotation um die Mittelachse als bei einer Rotation um das akustische Zentrum. Besonders für Quellausrichtungen bei denen der Lautsprecher zur Wand ausgerichtet ist, liegen die Mittelwerte auf der gestrichelten Linie. Es scheint als würde die mittlere wahrgenommene Quellausrichtung näher an der getesteten Ausrichtung liegen als bei einer Quellausrichtung des Lautsprechers in den Raum. Im direkten Vergleich zwischen beiden Rotationsachsen unterscheiden sich die wahrgenommenen Quellausrichtungen für Winkel bei denen der Lautsprecher vom Probanden abgewandt und dem Probanden zugewandt ist. Für Quellausrichtungen bei denen der Lautsprecher vom Probanden abgewandt ist sind die Unterschiede zwischen beiden Rotationsachsen meistens kleiner als für Quellausrichtungen bei dem der Lautsprecher dem Probanden zugewandt ist. Die Differenzen für Winkel im Bereich $+115^\circ \leq \varphi \leq -115^\circ$ liegen zwischen 2° und 14° und liegen in der Größenordnung des Standardfehlers. Im Gegensatz dazu sind die Differenzen für Winkel im Bereich $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ größer als 12° , mit Ausnahme von $\varphi = 90^\circ; -65^\circ; +45^\circ; 0^\circ$. Somit zeigt sich vor allem ein Unterschied in der mittleren wahrgenommenen Quellausrichtung zwischen beiden

Rotationsachsen, wenn der Lautsprecher dem Probanden zugewandt ist. Für Quellausrichtungen im Bereich $-25^\circ \leq \varphi \leq 25^\circ$ entspricht die wahrgenommene Quellausrichtung bei einer Rotation um das akustische Zentrum die eines direkt auf den Probanden gerichteten Lautsprechers. Daraus lässt sich ableiten, dass für kleine Quellausrichtungen, in diesem Fall keine akustischen Informationen zur Quellausrichtungswahrnehmung zur Verfügung stehen.

Für eine Einschätzung der Genauigkeit der wahrgenommenen Quellausrichtung wird in einer weiteren Analyse für jede getestete Quellausrichtung und Rotationsachse der Mittelwert über die absoluten Fehler der Probandenantworten angegeben, siehe Formel 1. Der absolute Fehler berechnet sich aus dem Betrag der Differenz zwischen der Antwort eines Probanden (φ_{PB}) und der getesteten Quellausrichtung (φ_{real}). Die Mittelwerte über die absoluten Fehler $\bar{\varphi}_{Fehler}$ für jede Quellausrichtung sind in Abb. 5 dargestellt, einmal für eine Rotation um die Mittelachse (blau, \diamond) und einmal um eine Rotation um das akustische Zentrum (grün, \diamond). Die Fehlerbalken geben den Standardfehler an.

$$\bar{\varphi}_{Fehler} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\varphi_{PB} - \varphi_{real}| \quad (1)$$

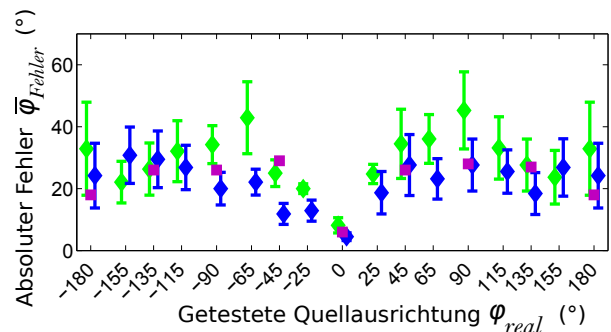


Abbildung 5: Mittelwert und Standardfehler der absoluten Fehler als Funktion der getesteten Quellausrichtung für eine Rotation um die Mittelachse (blau, \diamond) und das akustische Zentrum (grün, \diamond). Die Datenpunkte in pink (\square) entsprechen dem Mittelwert der absoluten Fehler für ein Rotation um den Mund eines menschlichen Sprechers aus der Studie von Kato et al. (2010) [3].

Die kleinste Abweichung zwischen getesteter und wahrgenommener Quellausrichtungen liegt bei einer Quellausrichtung von $\varphi = 0^\circ$. In diesem Fall ist der Lautsprecher bei beiden Rotationsachsen direkt auf den Probanden gerichtet und kann im Mittel mit einem absoluten Fehler von weniger als 8° eingestellt werden. Der Unterschied zwischen beiden Rotationsachsen zeigt sich bei dieser Analyse ebenfalls für Quellausrichtungen bei denen der Lautsprecher dem Probanden zugewandt ist, $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$. Zum einen sind die mittleren absolute Fehler bei einer Rotation um die Mittelachse kleiner als bei einer Rotation um das akustische Zentrum. Die Unterschiede zwischen liegen zwischen 6° und 21° , mit Ausnahme von $\varphi = 0^\circ$. Die begünstigte Wahrnehmung

der Quellausrichtung bei einer Rotation um die Mittelachse scheint durch die zusätzlichen akustischen Informationen, geprägt durch wahrnehmbare interaurale Zeit- und Pegelunterschiede, ermöglicht worden zu sein. Zum anderen sind die Fehler für Quellausrichtungen bei denen der Lautsprecher zur Wand ausgerichtet ist größer als für Ausrichtungen bei denen der Lautsprecher vor allem in den Raum zeigt. Somit verringert sich die Genauigkeit der wahrgenommenen Quellausrichtung für Winkel bei denen die frühen Reflektionen stärker ausgeprägt sind als bei Quellausrichtungen in den Raum. Im Gegensatz dazu sind die Unterschiede für Quellausrichtungen im Bereich von $+115^\circ \leq \varphi \leq -115^\circ$ kleiner als 10° und liegen in der Größenordnung des Standardfehlers. Hieraus ergibt sich ein vernachlässigbarer Unterschied zwischen den Rotationsachsen, sowohl bei der hier dargestellten Abweichung zur getesteten Quellausrichtung als auch bei der mittleren wahrgenommenen Quellausrichtung in Abb. 4.

In Abb. 5 sind für acht der getesteten Quellausrichtungen die Ergebnisse von Kato et al. (2010) [3] aufgetragen. Diese Ergebnisse werden ebenfalls aus den Mittelwerten über die absoluten Fehler berechnet (pink, □). Im Gegensatz zu der hier vorgestellten Studie wurde deren Hörexperiment in einem reflektionsarmen Raum mit einem menschlichen Sprecher als Schallquelle durchgeführt. In die Berechnung fließen zudem zwei unterschiedliche Entfernungen (90 cm, 190 cm) mit ein. Der Sprecher (männlich) drehte sich um den Mund und ist somit mit der Rotationsachse des akustischen Zentrums vergleichbar. Die von Kato et al. (2010) [3] ermittelten Ergebnisse liegen im selben Wertebereich wie in dieser Studie, mit der genauesten Quellausrichtungswahrnehmung bei $\varphi = 0^\circ$.

Fazit

In einem Hörexperiment wurde die Quellausrichtungswahrnehmung eines Sprachsignals mit einem standardisierten Lautsprecher als Schallquelle bestimmt. Es zeigt sich, dass die Wahl der Rotationsachse die wahrgenommene Quellausrichtung beeinflussen kann. Die gilt vor allem für Quellausrichtungen bei denen der Lautsprecher dem Probanden zugewandt ist. Wird der Lautsprecher um die Mittelachse gedreht, stehen den Probanden im Vergleich zu einer Rotation um das akustische Zentrum anscheinend zusätzliche akustische Informationen zur Verfügung. Diese akustischen Informationen sind geprägt durch interaurale Zeit- und Pegelunterschiede und verringern zum einen den Fehler zwischen getesteter und wahrgenommener Quellausrichtung. Zum anderen liegt größtenteils die mittlere wahrgenommene Quellausrichtung näher bei der getesteten Quellausrichtung als bei einer Rotation um das akustische Zentrum. Für Quellausrichtungen bei denen der Lautsprecher vom Probanden abgewandt ist, sind die Unterschiede in der mittleren wahrgenommenen Quellausrichtung und in den absoluten Fehlern vernachlässigbar. Im Einzelnen schätzen die Probanden am sichersten die Quellausrichtung, wenn der Lautsprecher direkt auf sie ausgerichtet ist, bei $\varphi = 0^\circ$. Der absolute Fehler ist im Mittel kleiner als 8° und mit den Ergebnissen von Kato et al. (2010) [3] vergleichbar. Im Gegensatz dazu fühlen sich die Probanden bei einer

getesteten Quellausrichtung von $\varphi = 25^\circ$ und Rotation um das akustische Zentrum im Mittel ebenfalls direkt angesprochen. Neben der fehlenden Quellverschiebung stehen den Probanden keine weiteren akustischen Informationen zur Verfügung um eine Quellausrichtung wahrzunehmen. Sobald den Probanden jedoch akustische Informationen in Form von interaurale Zeit- und Pegelunterschiede der Quellverschiebung zur Verfügung stehen, wird die Quellausrichtungswahrnehmung genauer.

Literatur

- [1] Bergauer, Ute G., and Susanne Janknecht: „Praxis der Stimmtherapie: Logopädische Diagnostik, Behandlungsvorschläge und Übungsmaterialien“, Springer-Verlag, 2011.
- [2] Franz, S., Imbery, C., Müller, M. and Bitzer, J.: „Bestimmung des frequenzabhängigen akustischen Zentrums eines Lautsprechers im Zeitbereich“, In Daga 2015, 2015.
- [3] Kato, H., Takemoto, H., Nishimura, R., and Mokhtari, P: „Spatial acoustic cues for the auditory perception of speaker's facing direction“, In In Proc. of 20th International Congress on Acoustics, 2010.
- [4] Moore, Brian C. J.: „An introduction to the psychology of hearing“, (2007).
- [5] Neuhoff, J. G.: „Twist and shout: Audible facing angles and dynamic rotation“, In Ecolog. Psychol. 15, 2003.
- [6] Vanderkooy, J.: „The Low-Frequency Acoustic Center: Measurement, Theory, and Application“, in Audio Engineering Society Convention 128, 2010.