

Lateralisation bei symmetrisch und asymmetrisch definierten interauralen Pegeldifferenzen

Diana Reimann¹, Jörg Encke¹, Werner Hemmert¹, Florian Völk^{1,2}

¹Bioanaloge Informationsverarbeitung, Technische Universität München, 85748 Garching, Deutschland

²WindAcoustics UG, 86949 Windach, Deutschland

Email: voelk@tum.de

Einleitung

Neben dem gesagten Wort verarbeitet das Gehör eine Vielzahl akustischer Informationen. Die Fähigkeit, räumliche Gegebenheiten zu erfassen und die Positionen von Schallquellen zu schätzen, ermöglicht beispielsweise das „Ausblenden“ von Störgeräuschen in lauter Umgebung. In dieser Studie wurden psychoakustische Experimente zur Lateralisation, also zur seitlichen Auslenkung von Hörwahrnehmungen im Kopf [1], durchgeführt.

Um den Einfluss interauraler Pegeldifferenzen (ILDs) auf die Lateralisation zu untersuchen, wurden Hörversuchsdaten mit zwei unterschiedlichen Konfigurationen von ILDs erfasst und verglichen. Für die asymmetrische Konfiguration in Teilversuch A wurde eine unilaterale Dämpfung eingesetzt. Für die symmetrische Konfiguration in Teilversuch B wurde die ILD in eine unilaterale Verstärkung auf der einen und eine unilaterale Dämpfung auf der anderen Seite aufgeteilt, wodurch sich die Lautheit bei Variation der ILD weniger ändert, als in der asymmetrischen Konfiguration. Acht normalhörende Probanden wurden gebeten, mit Hilfe eines links/rechts-Tasks (LRT, [2, 3]) die Hörwahrnehmung der linken oder rechten Seite zuzuordnen. In dieser Studie werden die Ergebnisse beider ILD-Konfigurationen, deren Unterschiede sowie die Reproduzierbarkeit des Verfahrens diskutiert.

Versuchsaufbau und -durchführung

Die Hörversuche wurden in Matlab R2016b erstellt und mittels einer ASIO-Interface Software (WindAcoustics, Windach) an ein externes Audiointerface (Babyface; RME, Haimhausen) übertragen. Letzteres setzte die digitalen Signale mit 24 Bit Wortbreite und einer Abtastrate von 96 kHz in analoge Audiosignale um und diente außerdem als Kopfhörerverstärker.

Die Stimuli wurden über ohrumschließende Kopfhörer (HD 650, Sennheiser electronic GmbH, Wedemark) präsentiert (ausgewählt basierend auf [4]), die elektrisch mittels der Nennempfindlichkeit bei 1 kHz kalibriert waren. Zusätzlich wurden der rechte und der linke Kopfhörer per Software an einem Kuppler nach [5] bezüglich Amplituden und zeitlicher Verzögerungseigenschaften für die versuchsrelevanten Frequenzen aneinander angeglichen (vgl. [6]). Alle Versuche wurden innerhalb einer Hörkabine (IAC 350; IAC Acoustics, Winchester, UK) durchgeführt, um Störgeräusche der Umgebung zu dämpfen und visuelle Einflüsse zu reduzieren.

Eine Gruppe von acht freiwilligen Probanden (4m/4w; 24 bis 52 Jahre, Durchschnittsalter 31.1 Jahre) wurde gebeten, in aufrechter Haltung mit Blick zum Fenster in der Hörkabine Platz zu nehmen und mittels des LRT die Stimuli zu beurteilen. Hierfür erhielten die Probanden ein Eingabegerät („Präsenter“ R400, Logitech Europe S. A., Lausanne, Schweiz) mit zwei Pfeiltasten, links und rechts, zur Eingabe der Hemisphäre des Hörereindrucks.

Vor der Durchführung des Experiments wurden die Probanden mittels einer schriftlichen Versuchsanleitung instruiert. Außerdem wurde in einem kurzen Gespräch das Verständnis der Aufgabe wie folgt adressiert: Jeder Proband hatte die Möglichkeit, dem Versuchsleiter während eines Beispielerperiments auftretende Fragen zu stellen, die nur mit *Ja* oder *Nein* beantwortet wurden. Die exemplarisch präsentierten Stimuli wurden so lange abgespielt, bis der jeweilige Proband sich in der Lage fühlte, den Ablauf durchzuführen. Es wurden keine weiteren Anweisungen oder Hinweise gegeben.

Innerhalb der Teilversuche A und B wurde jede Stimuluskonfiguration zehnmal dargeboten, wobei die Teilversuche in zwei Termine mit je der Hälfte der Stimuli aufgeteilt wurden. Die Reihenfolge der Konfigurationen innerhalb eines Hörversuchs wurde zufällig gewählt. Zwischen den Versuchssitzungen wurde stets eine Pause von mindestens zwei Stunden eingehalten (für weitere Details des Verfahrens vgl. [3]).

Stimuli

Die Menge der untersuchten Stimuli bestand aus gaußförmigen Tonimpulsen der Frequenzen 125 Hz und 500 Hz, jeweils kombiniert mit einer Anzahl ILDs. Alle Impulse hatten jeweils eine Dauer von 700 ms und wurden mit einer Flankendauer von 160 ms ein- und ausgeblendet. Zwischen den Präsentationen der Stimuli wurde je eine Pause von mindestens 0.2 s eingehalten, um zeitliche Maskierungseffekte weitgehend zu verhindern.

In beiden Teilversuchen wurde ILDs zwischen -15 dB und $+15$ dB mit einer Schrittweite von 1 dB verwendet. Um Schalle bei den verschiedenen Frequenzen annähernd gleich laut zu präsentieren, wurde zusätzlich zur ILD eine frequenzabhängige Pegeldifferenz ΔL in Anlehnung an die Kurven gleicher Lautheit nach ISO226:2006 [7] auf einen für den jeweiligen Teilversuch definierten Referenzpegel L_{ref} angewendet, um die Darbietungspegel zu bestimmen. Das genaue Vorgehen ist in Gleichung 1 zusammen mit

Tabelle 1: Pegel zur frequenzabhängigen Anpassung der Referenzpegel in Anlehnung an die Kurven gleicher Lautheit nach ISO226:2006 [7].

f / Hz	125	500
$\Delta L / \text{dB}$	14.2	1.8

Tabelle 1 und dem dem jeweiligen Teilversuch entsprechenden der folgenden beiden Unterkapitel formuliert.

$$L_{\text{ref,iso}}(f) = L_{\text{ref}} + \Delta L(f) \quad (1)$$

Teilversuch A: Asymmetrisch applizierte ILDs

Eine asymmetrisch applizierte ILD entspricht hier einer unilateralen Dämpfung, wobei die zu dämpfende Seite entsprechend dem Vorzeichen der ILD festgelegt wurde. Zur Einstellung des Präsentationspegels wurde ein Referenzpegel von $L_{\text{ref}} = 65 \text{ dB}$ gewählt und frequenzabhängig gemäß Tabelle 1 angepasst. Für negative ILDs wurde der rechtsseitig dargebotene Pegel L_{R} mit einer Dämpfung versehen, während der linksseitig präsentierte Pegel L_{L} dem Referenzpegel entsprach. Dies ist mit der oben eingeführten Nomenklatur in Gleichung 2 formuliert.

$$\forall \text{ILD} \leq 0 \begin{cases} L_{\text{L}}(f) = L_{\text{ref,iso}}(f) \\ L_{\text{R}}(f) = L_{\text{ref,iso}}(f) - |\text{ILD}| \end{cases} \quad (2)$$

Die erwartete Hörereignisposition liegt dabei typischerweise auf der linken Seite der Medianebene.

Für positive ILDs wurde Gleichung 3 entsprechend der linksseitig präsentierte Pegel L_{L} dem Betrag der ILD entsprechend gedämpft und der rechtsseitig dargebotene Pegel L_{R} dem Referenzpegel gleichgesetzt.

$$\forall \text{ILD} > 0 \begin{cases} L_{\text{L}}(f) = L_{\text{ref,iso}}(f) - |\text{ILD}| \\ L_{\text{R}}(f) = L_{\text{ref,iso}}(f) \end{cases} \quad (3)$$

In diesem Teilversuch ändert sich die wahrgenommene Lautstärke abhängig vom Betrag der ILD. Um etwaige Auswirkungen dieses Sachverhalts zu adressieren, wurde der im Folgenden beschriebene Teilversuch durchgeführt.

Teilversuch B: Symmetrisch applizierte ILDs

Die symmetrisch applizierte ILD entspricht hier einer unilateralen Verstärkung auf der einen und einer unilateralen Dämpfung auf der anderen Seite. Eine Verringerung des Referenzpegels auf $L_{\text{ref}} = 57.5 \text{ dB}$ ermöglicht dabei den direkten Vergleich der Ergebnisse der symmetrischen mit denen der asymmetrischen ILD-Konfigurationen, da so der Wertebereich der unilateralen Pegel gleich bleibt.

Die rechtsseitig und linksseitig präsentierten Pegel wurden gemäß Gleichung 4 bestimmt. Dies führt bei negativen ILDs zu einer unilateralen Verringerung des rechtsseitigen und einer unilateralen Erhöhung des linksseitigen Pegels

um jeweils die Hälfte des Betrags der interauralen Pegeldifferenz. Analog hierzu wurden positive ILDs durch eine Verstärkung des rechtsseitigen und eine Dämpfung des linksseitigen Pegels implementiert.

$$\begin{aligned} L_{\text{L}}(f) &= L_{\text{ref,iso}}(f) - \text{ILD}/2 \\ L_{\text{R}}(f) &= L_{\text{ref,iso}}(f) + \text{ILD}/2 \end{aligned} \quad (4)$$

In beiden Teilversuchen wurden über Kopfhörer dem rechten und linken Ohr simultan Schalle präsentiert. Diese Schallpaare hatten stets die gleiche Frequenz und wiesen keine interaurale Zeit- oder Phasendifferenz auf.

Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse wurden für beide Teilversuche A und B zunächst getrennt betrachtet. Hierbei wurde individuell pro Kondition die Häufigkeit bestimmt, mit der die rechte Taste gedrückt wurde, und anschließend der interindividuelle Median der 8 Probanden gebildet. Zusätzlich wurde der Interquartilbereich zwischen den Quartilen bei 25 % und 75 % bestimmt, in dem 50 % der individuellen Datenpunkte liegen, um eine Aussage über die Streuung treffen zu können. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse beider ILD-Konfigurationen, Teilversuch A (●) in schwarz, Teilversuch B (◊) in grau.

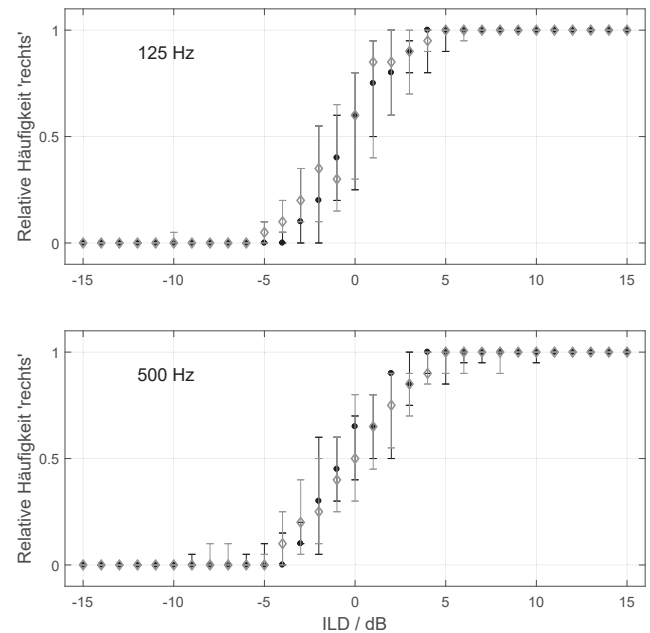


Abbildung 1: Ergebnisse der Hörversuche (*Hörwahrnehmung links oder rechts?*) mit Tonimpulsen. Dargestellt ist die relative Häufigkeit der Antwort 'rechts' im Mittel über 8 Probanden (10 Wiederholungen pro Kondition). Symbole zeigen Mediane an, vertikale Linien Interquartilbereiche. Teilversuch A (●) ist in schwarz, Teilversuch B (◊) in grau dargestellt.

In Abbildung 1 sind im oberen Teilbild die Ergebnisse für Stimuli der Frequenz 125 Hz dargestellt, während im unteren Teilbild die Ergebnisse für Stimuli der Frequenz 500 Hz zu sehen sind. Es ist zu erkennen, dass ab einer ILD von ca. 5 dB die Hörwahrnehmung bei beiden Frequenzen

eindeutig einer Seite zugeordnet wurde. Die resultierende Kurve sättigt daher für größere ILDs. Zusätzlich ist zu beachten, dass geringe ILDs von ± 1 dB bereits eine Tendenz zu einer Seite aufweisen. Die Interquartilbereiche deuten Unterschiede zwischen den einzelnen Probanden bei ILDs mit geringem Betrag an.

Die Ergebnisse beider Kondition stimmen visuell im Rahmen der Messgenauigkeit für die untersuchten Frequenzen im Mittel für die betrachtete Gruppe im Wesentlichen überein. Eine dreifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit kompletter Messwiederholung unterstützt diese Aussage insofern, als dass sie keine signifikanten Effekte der Faktoren „Teilversuch“ und „Frequenz“, sowie keine Interaktionen dieser Faktoren andeutet.

Zusätzlich wurden die individuellen Differenzen zwischen den aus den Teilversuchen resultierenden Häufigkeiten gebildet. Die entsprechenden Mediane und Interquartilbereiche der Probandengruppe zeigt Abbildung 2.

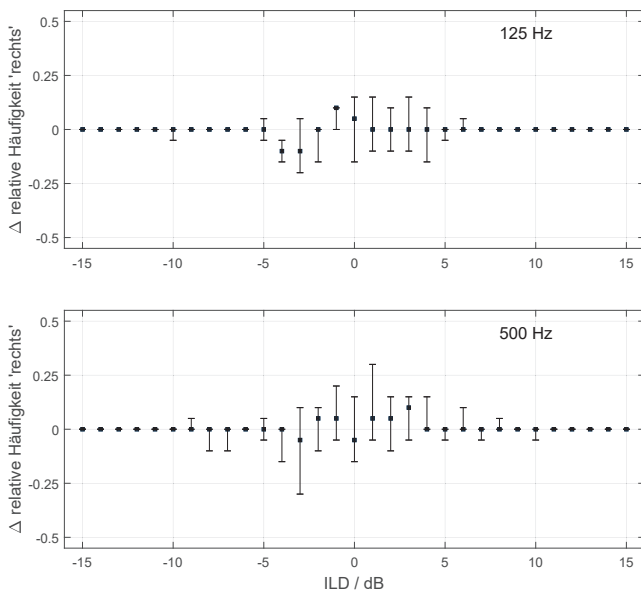


Abbildung 2: Differenz der individuellen Ergebnisse der beiden in Abb. 1 gezeigten Teilversuche (*Hörwahrnehmung links oder rechts?*) mit Tonimpulsen. Symbole zeigen Mediane an, vertikale Linien Interquartilbereiche für 8 Probanden.

In Abbildung 2 wird deutlich, dass die Beträge der Differenzmediane bei allen ILDs unterhalb von 10%, die der 25%- und 75%-Quartile unterhalb von 20% liegen. Ferner berücksichtigend, dass bei zehn Darbietungen pro Kondition die Häufigkeiten individuell pro Durchgang auf Schritte von 10% beschränkt sind, lässt sich im Mittel auch individuell eine starke Übereinstimmung zwischen den Teilversuchen A und B feststellen.

Diskussion

Außer den hier primär untersuchten Hörereignisorten ändert sich bei gewissen ILD-Konditionen die wahrgenommene Lautstärke im Vergleich zur diotischen Kondition bei der asymmetrischen ILD-Definition (Teilversuch A).

Stimuli mit kleiner ILD werden meist lauter wahrgenommen. Durch Vorversuche und Befragungen einiger Probanden nach den jeweiligen Hörversuchen konnte festgestellt werden, dass die Lautheitsunterschiede zwischen einem diotisch präsentierten Stimulus und einem mit der maximal untersuchten ILD von 15 dB insbesondere bei tiefen Frequenzen (125 Hz) wahrgenommen wurden. Bei 500 Hz wurden geringe Differenzen der wahrgenommenen Lautheit abhängig von der ILD festgestellt.

Da beide ILD-Definitionen zu ähnlichen Ergebnissen führen, obwohl sich die Lautheit bei der symmetrischen ILD-Definition (Teilversuch B) weniger als bei der asymmetrischen über der ILD ändert, scheint die Auswirkung der zur Lateralisation korrelierten Lautheitswahrnehmung der durch unilaterale Dämpfung erzeugten ILDs auf das Experiment vernachlässigbar. Hierbei ist zu beachten, dass für beide Konfigurationen der unilaterale Pegelbereich zwischen 50 dB und 65 dB (durch die Anpassung des Referenzpegels) konstant gehalten wurde.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Studie zeigten sich individuell und im Mittel ähnliche Ergebnisse beider Teilversuche. Hieraus lässt sich schließen, dass die Definition der ILD (asymmetrisch bzw. symmetrisch) geringen Einfluss auf die links/rechts-Zuordnung hat. Deshalb scheinen Effekte der Änderung der Lautheit bei asymmetrisch definierter ILD vernachlässigbar. Der links/rechts-Task (LRT) ergibt offensichtlich reproduzierbare Ergebnisse.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen von PP 1608 “Ultrafast and temporally precise information processing: normal and dysfunctional hearing” (HE 6713/1-2) von der deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. Die Software zur Stimulussynthese und Audiowiedergabe wurde von der Firma WindAcoustics zur Verfügung gestellt.

Literatur

- [1] Jeffress L. A., R. W. Taylor: Lateralization vs Localization. *J. Acoust. Soc. Am.* 33 (1961), 482-483
- [2] Völk F., J. Encke, J. Kreh, W. Hemmert: Pure-Tone Lateralization Revisited. 174th Meeting of the Acoust. Soc. Am., 2017
- [3] Encke J., J. Kreh, W. Hemmert, F. Völk: Evaluierung eines Verfahrens für psychoakustische Lateralisationsexperimente. Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin (2018)
- [4] Völk F.: Inter- and Intra-Individual Variability in the Blocked Auditory Canal Transfer Functions of Three Circum-Aural Headphones. *Journal of the Audio Engineering Society* 62 (2014), 315-323
- [5] DIN EN 60318-1: Akustik – Simulatoren des menschlichen Kopfes und Ohres – Teil 1: Ohrsimulator zur Kalibrierung von supra-auralen und circumauralen Kopfhörern, Dt. Norm, Beuth, Berlin (2010)
- [6] Völk F., J. Encke, J. Kreh, W. Hemmert: Relevance of headphone characteristics in binaural listening experiments: A case study. 143rd Convention of the Audio Engineering Society (2017)
- [7] DIN ISO 226: Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel, Dt. Norm, Beuth, Berlin (2006)