

## Evaluierung eines Verfahrens für psychoakustische Lateralisationsexperimente

Jörg Encke<sup>1</sup>, Jasmin Kreh<sup>1</sup>, Werner Hemmert<sup>1</sup>, Florian Völk<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Bioanaloge Informationsverarbeitung, Technische Universität München, 85748 Garching, Deutschland

<sup>2</sup>WindAcoustics UG, 86949 Windach, Deutschland

Email: voelk@tum.de

### Einleitung

Unter gewissen Bedingungen, insbesondere bei diotischer Kopfhörerwiedergabe, können Hörempfindungen im Kopf auftreten. Durch dichotische Wiedergabe kann dabei Lateralisation ausgelöst werden: Verzögerung eines der Kopfhöhereingangssignale oder Reduzierung seiner Amplitude führt meist zu Verschiebung der Hörempfindung zur kontralateralen Seite innerhalb des Kopfes. Systematische Zusammenhänge zwischen Stimulusparametern und Positionen der Hörempfindungen können Aufschluss über auditive Lokalisationsmechanismen geben und bei deren Modellierung unterstützen [1].

Da typische Verfahren für psychoakustische Lateralisationsstudien, z. B. Größenschätzung oder Zeigerverfahren, von systematischen Antwortverschiebungen betroffen sein können [2], wird in dieser Studie die Eignung eines 2 AFC-Verfahrens adressiert: acht normalhörende Probanden erhielten die Aufgabe, durch Drücken einer von zwei Tasten anzugeben, ob die zu einer reinen interauralen Pegeldifferenz (interaural level difference, ILD)  $\Delta L$  korrespondierende Hörempfindung „links oder rechts“ auftrat; ohne externe Referenz und ohne weitere Anweisungen. Insbesondere durch die relativ einfache Aufgabe, die keine interne Abbildung und keine extern/intern-Abbildung erfordert, erscheint dieses Verfahren vorteilhaft hinsichtlich systematischer Antwortverschiebungen.

Die prinzipielle Tauglichkeit dieses als links/rechts-Task (LRT) bezeichneten Verfahrens wurde bereits gezeigt [3, 4, 5]; in diesem Beitrag sollen insbesondere die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und mögliche Lerneffekte diskutiert werden. Dafür wurde ein Lateralisationsexperiment zweimal im Abstand von zwei Monaten mit unveränderten Parametern, identischem Ablauf und denselben Versuchspersonen durchgeführt. Die Ergebnisse davon werden hier gezeigt und verglichen. Obwohl ein ILD-Experiment dargestellt wird, eignet sich das LRT-Verfahren prinzipiell, um Experimente zum Richtungshören unabhängig von der die Lateralisation/Lokalisation verursachenden physikalischen Größe durchzuführen [5, 6].

### Methode und Verfahren

Ein LRT ist ein 1-Intervall, 2-AFC-Verfahren (two-alternatives, forced choice), bei dem der Versuchsperson jeweils ein Stimulus dichotisch präsentiert wird, verbunden mit der Aufgabe, durch Drücken einer von zwei Tasten anzugeben, ob die entsprechende Hörwahrnehmung *links oder rechts* auftrat. Ist die Versuchsperson unsicher, muss sie raten.

Das Experiment wurde in zwei Teile mit einer Dauer von jeweils etwa 30 min aufgeteilt. Die beiden Teile waren typischerweise mehrere Stunden (mindestens 30 Minuten) zeitlich voneinander getrennt. Des Weiteren enthielt jeder Teil zur Erholung nach der Hälfte der Stimuli eine kurze Pause von etwa 5 min. Jede Kondition wurde zehn Mal in pseudo-zufälliger Reihenfolge beurteilt. Die Reihenfolge wurde individuell so festgelegt, dass in jedem Teil alle Konditionen gleich oft enthalten waren und zusätzlich über die Probanden hinweg eine möglichst ausgeglichene Reihenfolge der Konditionen, insbesondere hinsichtlich der Frequenzen, gewährleistet war.

### Stimuli

Als Stimuli kamen gaußförmige Tonimpulse mit Frequenzen von 125 Hz und 500 Hz, einer Dauer von 700 ms und Anstiegs- und Abfallzeiten von 160 ms zwischen 10 und 90 % der Maximalamplitude zum Einsatz. Die über die korrespondierenden Dauersignale definierten Pegel  $L$  der Stimuli wurden mit dem Ziel etwa gleiche Lautheit zu erreichen in Anlehnung an die Kurven gleicher Lautheit [7] auf etwa 72 dB (125 Hz) bzw. 59.5 dB (500 Hz) eingestellt. Um Lateralisation zu erreichen, wurden die Stimuli dichotisch mit verschiedenen symmetrisch um  $L$  definierten ILDs  $\Delta L = [-15 \text{ dB}, -14 \text{ dB}, \dots, 15 \text{ dB}]$  präsentiert (zur Definition der ILD vgl. [8]).

### Versuchsaufbau und -ablauf

Zur Steuerung des Experiments, zur Stimulussynthese und zur Wiedergabe der Stimuli kam ein Computer mit externem Audio-Interface (Babyface; RME, Haimhausen, Deutschland), das als D/A-Umsetzer und Kopfhörerverstärker diente, zum Einsatz. Die Wortlänge des D/A-Umsetzers lag bei 24 Bit, die Abtastrate war auf 96 kHz festgelegt. Die Stimuli wurden mit Matlab R2016b (MathWorks, Natick, Massachusetts, USA) generiert und über die ASIO-Architektur (Steinberg, Hamburg, Deutschland) unter Benutzung einer Matlab/ASIO-Schnittstellensoftware (WindAcoustics UG, Windach, Deutschland) wiedergegeben.

Dasselbe Paar zirkumauraler Kopfhörer (Sennheiser HD 650, Sennheiser electronic GmbH, Wedemark, Deutschland) wurde für alle Probanden verwendet. Diese Kopfhörer wurden aufgrund der guten inter- und intra-individuellen Reproduzierbarkeit ihrer Übertragungsfunktionen basierend auf [9] gewählt. Die Kopfhörer wurden elektrisch mittels der Nennempfindlichkeit bei einer Frequenz von 1 kHz kalibriert und so entzerrt, dass die durch die linke und rechte Kapsel erzeugten relevanten Zeitfunk-

tionen des Schalldrucks in einem Kuppler nach DIN 60318 [10] auf beiden Seiten im Rahmen der Messgenauigkeit identisch waren (vgl. [11]).

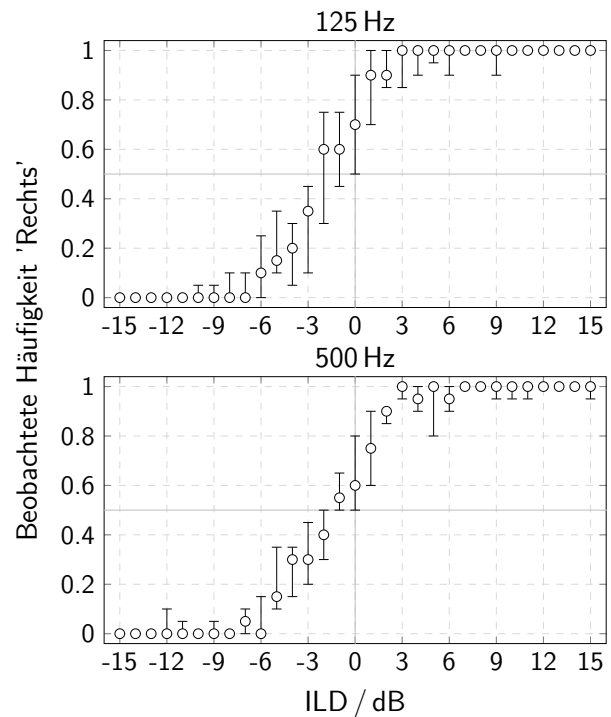
Die Probanden saßen während des Experiments in einer LED-beleuchteten, schalldämmenden Kabine (IAC 350; IAC Acoustics, Winchester, UK) mit einem verdunkelten Fenster, um mögliche Störeinflüsse wie Hintergrundgeräusche oder visuelle Ablenkung zu reduzieren. Sie wurden instruiert, aufrecht zu sitzen und den Blick zum Fenster zu richten. Die Probanden nutzten ein Funk-Eingabegerät mit Links/Rechts-Pfeiltasten (Logitech R400; Logitech Europe S.A., Lausanne, Schweiz), um ihre Antworten nach jeder Stimuluspräsentation anzugeben.

Vor der Durchführung des Experiments wurden die Probanden mittels einer schriftlichen Versuchsanleitung instruiert, anschließend wurde in einem kurzen Gespräch das Verständnis der Aufgabe wie folgt adressiert: Jeder Proband hatte die Möglichkeit, dem Versuchsleiter während eines Beispielexperiments 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.

## Probanden und Wiederholung

Acht Freiwillige stellten sich als Probanden zur Verfügung (4m/4w; 24 bis 52 Jahre, Durchschnitt 31.1 Jahre; alle Rechtshänder). Die Teilnehmer berichteten keine Beeinträchtigungen des Gehörs; ihre Reintonruhehörschwellen zeigten bei den betrachteten Frequenzen keine Auffälligkeiten. Ein Proband hatte vor Beginn der Experimente erhebliche Erfahrung, alle anderen waren gänzlich unerfahrene Hörversuchsteilnehmer. Alle Probanden erfuhren kein über das beschriebene Vorgehen hinausgehendes Training für das vorliegende Experiment und waren hinsichtlich des Untersuchungsgegenstandes naiv (Ausnahmen: zwei unerfahrene und die erfahrene Versuchsperson waren über den Inhalt des Experiments zumindest teilweise informiert).

Da ein wesentlicher Inhalt der vorliegenden Studie die Prüfung der Wiederholbarkeit der Ergebnisse ist, wurde das komplette Experiment mit allen Probanden im zeitlichen Abstand von etwa zwei Monaten (individuell um bis zu eine Woche abweichend) wiederholt. Die beiden Durchgänge werden hier als Durchgang 1 (DG 1) und Durchgang 2 (DG 2) bezeichnet. In der Zwischenzeit nahmen alle Probanden im Umfang von mindestens vier Stunden pro Woche an Lateralisationsexperimenten verschiedener Art, aber hauptsächlich mit dem LRT-Verfahren, teil. Dadurch sammelten alle Probanden Erfahrung und wurden zwar nicht gezielt aber als Nebeneffekt für die Durchführung der LRT-Aufgabe basierend auf interauralen Zeit- und Pegeldifferenzen sowie Kombinationen davon trainiert. Während der gesamten Dauer erhielten die naiven Probanden keine Rückmeldung oder weitere Informationen über das Experiment und Ergebnisse.



**Abbildung 1:** Ergebnisse des ersten Durchgangs (DG 1) eines links/rechts-Tasks (*Hörwahrnehmung links oder rechts?*) für 700 ms-Tonimpulse mit interauralen Pegeldifferenzen bei 125 Hz (oben) und 500 Hz (unten) als Funktion der interauralen Pegeldifferenz (ILD). Die Daten wurden von acht Probanden mit zehn Wiederholungen pro Kondition und Person erhoben und sind als interindividuelle Mediane (Kreise) mit Interquartilbereichen (vertikale Linien) der individuellen Häufigkeiten der Antwort *rechts* dargestellt.

## Ergebnisse Durchgang 1

Die erhaltenen Ergebnisse sind jeweils als Mediane mit Interquartilbereichen der individuellen Häufigkeit der Antwort *rechts* über alle Probanden dargestellt. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse des initialen Experiments DG 1 mit weitgehend unerfahrenen Versuchspersonen. Das obere Teilbild enthält dabei die Ergebnisse für Tonimpulse einer Frequenz von 125 Hz, das untere die Daten für 500 Hz. Auf der Abszisse sind in beiden Teilbildern die ILDs dargestellt, auf der Ordinate die Häufigkeit der Antwort *rechts*. Die in den Teilbildern gezeigten Datensätze ähneln sich, was durch eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit kompletter Messwiederholung bestätigt wird, da kein signifikanter Haupteffekt des Faktors Frequenz vorliegt [ $F(1,7) = 0.23$ ;  $p = 0.6450$ ]. Dem Faktor ILD hingegen wird ein signifikanter Effekt [ $F(30,210) = 156.11$ ;  $p < 0.0001$ ] attestiert, bei beiden Frequenzen in ähnlicher Weise, da keine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren gefunden wurde [ $F(30,210) = 1.12$ ;  $p = 0.3195$ ].

Wie zu erwarten tendiert die Mehrheit der Probanden bei beiden untersuchten Frequenzen zunehmend dazu, der Hörwahrnehmung die Kategorie *rechts* zuzuweisen, wenn der Pegel des rechten Kopfhörers im Vergleich zum linken ansteigt (positive ILDs, rechts in Abbildung 1). Für die umgekehrte Situation (negative ILDs) zeigen sich erwartungsgemäß in etwa umgekehrte Ergebnisse. Bei ILDs

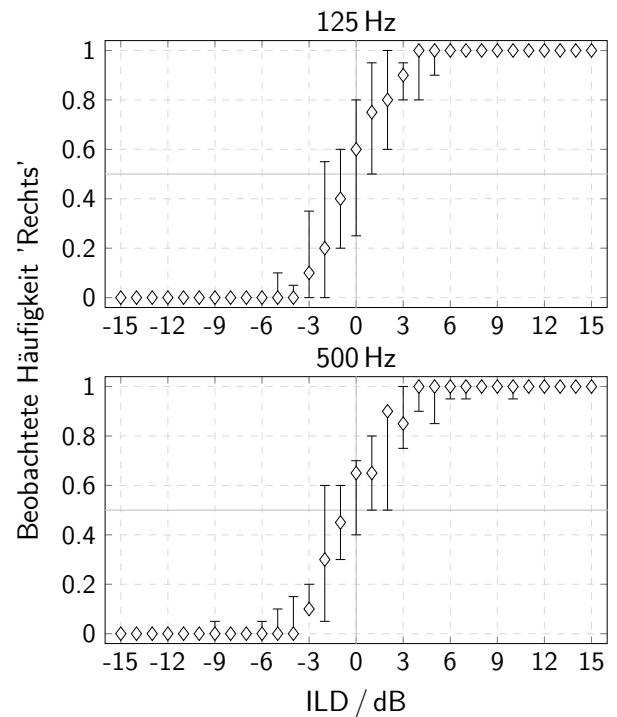
mit großem Betrag (ab etwa  $\pm 6$  dB) zeigt die betrachtete Versuchspersonengruppe weitgehend Einigkeit (geringe Interquartilbereiche) und ordnet die Hörwahrnehmung eindeutig einer Seite (links oder rechts) zu (Häufigkeiten 0 oder 1). Bei betragsmäßig kleineren ILDs sind sich die Probanden bei der Seitenzuordnung weniger sicher (Häufigkeiten nicht nahe 0 oder 1) und auch weniger einig (größere Interquartilbereiche).

Der Bereich der größten Unsicherheit liegt bei beiden untersuchten Frequenzen etwa bei einer ILD von  $-2$  dB, nicht exakt bei der intuitiv erwarteten ILD von  $0$  dB. Während die beiden Kopfhörerausgangssignale zumindest auf einem Kuppler identisch waren, sind neben einem tatsächlich für die Gruppe von  $0$  dB verschiedenen Lateralisationsmittelpunkt weitere Ursachen für die Abweichung denkbar, z. B. eine Asymmetrie der verwendeten Kopfhörer, die sich auf Köpfen, nicht aber im Kuppler bemerkbar macht, ein raumakustischer Einfluss der verwendeten Hörkabine oder eine Antworttendenz der Probanden in den Fällen, in denen sie keinen oder nur wenig Unterschied hören und sich daher nicht sicher sind oder raten müssen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass keiner der unerfahrenen und/oder naiven Probanden Probleme hatte, das LRT-Experiment durchzuführen. Hinsichtlich der Ergebnisse sind sich die Antworten der einzelnen Probanden strukturell ähnlich, mit etwas verschobenen Lateralisationsmittelpunkten. Dennoch lässt sich ein etwa  $3$  dB breiter ILD-Bereich festlegen, in dem alle Lateralisationsmittelpunkte liegen.

## Ergebnisse Durchgang 2

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der Wiederholung des Experiments DG 2, also des zweiten Durchgangs, der im Mittel zwei Monate nach dem ersten Durchgang DG 1 stattfand. Global unterstützt sowohl der optische Eindruck als auch die Varianzanalyse die Aussagen von DG 1: während kein signifikanter Einfluss des Faktors Frequenz [ $F(1,7) < 0.01$ ;  $p = 0.9702$ ] und keine Interaktion zwischen den Faktoren [ $F(30,210) = 0.37$ ;  $p = 0.9990$ ] sichtbar ist, liegt ein signifikanter Einfluss des Faktors ILD [ $F(30,210) = 221.54$ ;  $p < 0.0001$ ] vor. Auch im Detail bleiben die Aussagen von DG 1 für DG 2 gültig, mit im Mittel etwas geringerer inter-individueller Streuung als in DG 1. Außerdem ist in DG 2 der Punkt der größten Unsicherheit (Häufigkeit  $0.5$ ), der bei etwa  $-1$  dB liegt, etwas näher am erwarteten Wert von  $0$  dB als in DG 1. Dies deutet darauf hin, dass die Probandengruppe nach dem indirekten Training die Aufgabe etwas einheitlicher erfüllt hat (kleinere Interquartilbereiche), möglicherweise mit geringerer Antworttendenz und/oder erhöhter Sicherheit, v. a. bei dem Betrage nach kleinen ILDs (Verschiebung des Lateralisationsmittelpunkts). Da sich weder die Probandengruppe noch der Versuchsaufbau und -ablauf zwischen den Durchgängen verändert hat, können methodische und Hardwareinflüsse auf die Unterschiede weitgehend ausgeschlossen werden.

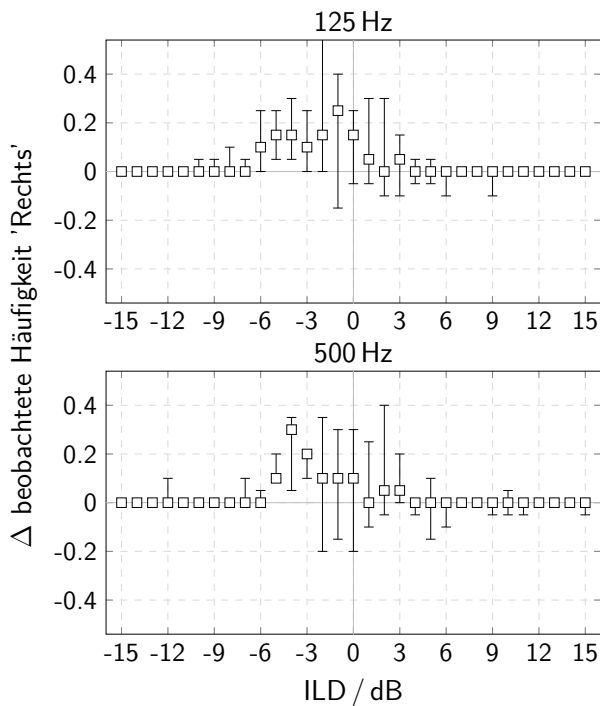


**Abbildung 2:** Ergebnisse des zweiten Durchgangs (DG 2) eines links/rechts-Tasks (*Hörwahrnehmung links oder rechts?*) für  $700$  ms-Tonimpulse mit interauralen Pegeldifferenzen bei  $125$  Hz (oben) und  $500$  Hz (unten), als Funktion der interauralen Pegeldifferenz (ILD). Die Daten sind als interindividuelle Mediane (Diamanten) mit Interquartilbereichen über die individuellen Häufigkeiten der Antwort *rechts* dargestellt und wurden zwei Monate später von denselben acht Probanden mit zehn Wiederholungen pro Kondition und Person erhoben, wie die in Abbildung 1 gezeigten Ergebnisse.

## Diskussion

Die Ähnlichkeit der Ergebnisse zwischen DG 1 und DG 2 deutet darauf hin, dass der LRT-Versuch bei Wiederholung nach zwei Monaten für die betrachtete Probandengruppe reproduzierbare Ergebnisse liefert und deshalb im Mittel relativ robust gegen Effekte der Erfahrung und der Tagesform der Probanden ist. Trainingseffekte bewirken primär eine Verringerung der interindividuellen Streuung und kaum eine Änderung der mittleren Ergebnisse. Dies deutet auch eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit kompletter Messwiederholung über die Faktoren Durchgang, Frequenz und ILD an: der Faktor Durchgang zeigt keinen signifikanten Haupteffekt [ $F(1,7) = 2.52$ ;  $p = 0.1565$ ], während die Haupteffekte der Faktoren Frequenz [ $F(1,7) = 0.04$ ;  $p = 0.8395$ ] und ILD [ $F(30,210) = 301.86$ ;  $p < 0.0001$ ] gegenüber den Einzelanalysen der jeweiligen Durchgänge hinsichtlich des 5%-Signifikanzniveaus unverändert bleiben.

Um die individuelle Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu quantifizieren, zeigt Abbildung 3 Mediane und Interquartilbereiche der individuellen Differenzen der Häufigkeiten aus DG 1 und DG 2. Die Mediane der Abweichungen sind alle positiv, im Bereich zwischen  $0\%$  und  $30\%$ . Dies lässt sich vermutlich, wie auch die Gesamtform der Differenzen, auf eine durch die zunehmende Erfahrung im Mittel



**Abbildung 3:** Differenz der Ergebnisse des ersten (DG 1) und des zweiten (DG 2) Durchgangs eines links/rechts-Tasks (Hörwahrnehmung links oder rechts?) für 700 ms-Tonimpulse mit interauralen Pegeldifferenzen bei 125 Hz (oben) und 500 Hz (unten), als Funktion der interauralen Pegeldifferenz (ILD). Die Daten sind als interindividuelle Mediane mit Interquartilsbereichen über die individuellen Differenzen der Häufigkeiten der Antwort *rechts* dargestellt. Die Durchgänge wurden im zeitlichen Abstand von zwei Monaten mit denselben acht Probanden und je zehn Wiederholungen pro Kondition und Person durchgeführt (vgl. Abbildungen 1 und 2).

verringerte Antworttendenz der Probanden in DG 2 und den dadurch verschobenen Messwert für die dem Lateralisationsmittelpunkt entsprechende ILD zurückführen.

Eine mögliche Ursache für die hohe Reproduzierbarkeit und die relativ geringen Trainingseffekte ist möglicherweise die Einfachheit des LRT-Experiments, die sich sowohl aufgrund der verglichen z. B. mit Diskriminationsaufgaben schnellen Versuchsdurchführung als auch anhand empirischer Berichte beinahe aller Versuchspersonen andeutet. Damit scheint die LRT-Methode auch für Studien mit unerfahrenen und/oder nicht trainierten Probanden und evtl. auch Schwerhörigen geeignet zu sein.

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Studie zum links/rechts-Task (LRT) weisen auf eine hohe intra-individuelle Reproduzierbarkeit und eine plausible inter-individuelle Übereinstimmung der Ergebnisse von zwei Durchgängen im Abstand von etwa zwei Monaten hin. Keiner der Teilnehmer zeigte oder berichtete Schwierigkeiten, die inhärent angenommene „interne Mitte“ im Entscheidungsprozess zu verwenden. Damit erscheint das Verfahren prinzipiell geeignet, die links/rechts-Zuordnung (bezüglich einer „mittleren internen Repräsentation der Medianebene“) zu erheben.

Aufgrund der einfachen Aufgabenstellung lassen sich auf diese Weise auch von naiven und/oder unerfahrenen Versuchspersonen intuitiv und schnell Daten erheben, die in dieser Studie individuell und im Mittel über der Zeit wenig veränderlich sind und kaum Trainingseffekte zeigen. Darüber hinaus erfordert das Vorgehen keine interne Abbildung der Position einer Hörwahrnehmung auf eine Antwortskala, wodurch systematische Antwortverschiebungen reduziert werden können. Die Ergebnisse dieser Studie lassen die Existenz eines interindividuell ähnlichen Entscheidungskriteriums vermuten. Anschaulich gesprochen deuten die Daten auf die Existenz eines für alle Probanden ähnlichen Lateralisationsmittelpunkts hin.

## 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] Encke J., D. Reimann, W. Hemmert, F. Völk: Ein Zweikanalmodell der neuronalen Verarbeitung interauraler Phasendifferenzen. Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin (2018)
- [2] Pick, H. L. Jr. D. H. Warren, J. C. Hay: Sensory conflict in judgments of spatial direction. *Percept. & Psychophys.* 4, 203-205, 1969
- [3] Cherry E. C., B. McA. Sayers: “Human ‘Cross-Correlator’ ” – A Technique for Measuring Certain Parameters of Speech Perception. *J. Acoust. Soc. Am.* 28 (1956), 889-895
- [4] Sayers B. McA.: Acoustic-Image Lateralization Judgments with Binaural Tones. *J. Acoust. Soc. Am.* 36 (1964), 923-926
- [5] Völk F., J. Encke, J. Kreh, W. Hemmert: Pure-Tone Lateralization Revisited. 174<sup>th</sup> Meeting of the Acoust. Soc. Am., 2017
- [6] Kreh J., J. Encke, W. Hemmert, F. Völk: IPD, nicht ITD: Psychoakustische Hinweise auf phasennormierte Feinstrukturverarbeitung bei der Lateralisation. Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin (2018)
- [7] DIN ISO 226: Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel, Dt. Norm, Beuth, Berlin (2006)
- [8] Reimann D., J. Encke, W. Hemmert, F. Völk: Lateralisation bei symmetrisch und asymmetrisch definierten interauralen Pegeldifferenzen. Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin (2018)
- [9] 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
- [10] 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)
- [11] Völk F., J. Encke, J. Kreh, W. Hemmert: Relevance of headphone characteristics in binaural listening experiments: A case study. 143<sup>rd</sup> Convention of the Audio Engineering Society (2017)