

# IPD, nicht ITD: Psychoakustische Hinweise auf phasennormierte Feinstrukturverarbeitung bei der Lateralisation

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

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

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

*Email: voelk@tum.de*

## Einleitung

In natürlichen Hörumgebungen wertet der Mensch zur Schätzung der Richtung einer Schallquelle unter anderem physikalische Parameter des an beiden Ohren ankommenden Schalles aus. Hierfür spielen insbesondere zwischen den Ohren auftretende Pegel- und Ankunftszeitunterschiede des ankommenden Schalles eine Rolle. Um diese Parameter unabhängig von anderen Umwelteinflüssen zu untersuchen, besteht die Möglichkeit, in einem künstlichen, von Umgebungsgeräuschen abgeschirmten Umfeld, Lateralisationsexperimente durchzuführen, beispielsweise indem Probanden Tonimpulse über Kopfhörer präsentiert werden. Während diotisch präsentierte Tonimpulse meist mittig im Kopf wahrgenommen werden [1, 2], führt eine Änderung der Startphase  $\varphi_0$  eines der beiden Tonimpulse zu einer lateralen Auslenkung der Position der Hörwahrnehmung. Frühere Studien zeigen, dass eine Phasenverschiebung nur im Frequenzbereich unterhalb von etwa 2 kHz eine seitliche Auslenkung der Position der Hörwahrnehmung bewirkt [1, 3]. Bei höheren Frequenzen nimmt auch auf neuronaler Ebene die Codierung zeitlicher Feinstrukturinformationen ab [4].

Ziel der nachfolgend beschriebenen Studie war es, Informationen über die Position von Hörwahrnehmungen zu erhalten, die durch eine bestimmte interaurale Phasendifferenz (IPD) induziert werden. Anhand von dichotisch präsentierten Tonimpulsen der Frequenzen 125 Hz und 500 Hz wurde die Abhängigkeit der Seite bzgl. der Medianebene, in der die Hörwahrnehmung auftrat, von der IPD untersucht. In einem links/rechts-Task (LRT, [2]) wurden Stimuli mit IPDs zwischen  $-\pi$  und  $\pi$  präsentiert. Die Probanden urteilten nach jedem Stimulus durch Tastendruck, ob sie die Hörwahrnehmung links oder rechts vermuteten. Auf diese Weise wurde der IPD-Bereich, in dem Tonimpulse eher links oder eher rechts der Medianebene wahrgenommen werden, frequenzabhängig bestimmt.

## Versuchsaufbau

Ein Computer mit einem externen Audio-Interface (Babyface; RME, Haimhausen, Deutschland) wurde zur Steuerung des Experiments und zum Generieren und Abspielen von Tonimpulsen verwendet. 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

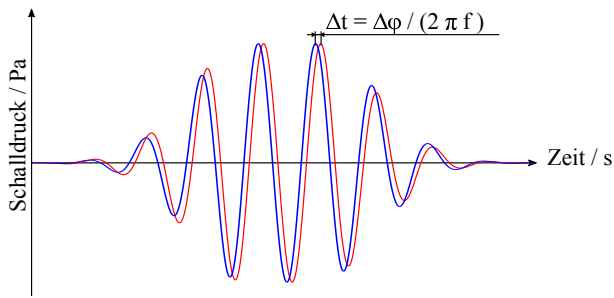
Matlab/ASIO-Schnittstellensoftware (WindAcoustics UG, Windach, Deutschland), die eine direkte Kommunikation zwischen Matlab und dem Audiointerface-Treiber ermöglicht, wiedergegeben. Dasselbe Paar zirkumauraler Kopfhörer (Sennheiser HD 650, Sennheiser electronic GmbH, Wedemark, Deutschland) wurde für alle Probanden verwendet. Diese Kopfhörer wurden aufgrund der guten inter- und intra-individuellen Reproduzierbarkeit ihrer Übertragungsfunktionen basierend auf [5] gewählt. Die Kopfhörer wurden elektrisch mittels der Nennempfindlichkeit bei einer Frequenz von 1 kHz kalibriert. Der linke und rechte Kopfhörer wurden so entzerrt, dass die relevanten Zeitfunktionen des Schalldrucks in einem Kuppler nach DIN 60318 [6] auf beiden Seiten im Rahmen der Messgenauigkeit identisch waren [7].

Die Probanden saßen während des Experiments in einer LED-beleuchteten, schalldämmenden Kabine (IAC 350; IAC Acoustics, Winchester, UK) mit einem abgedeckten Fenster, um mögliche Störeinflüsse wie Hintergrundgeräusche und visuelle Ablenkung zu reduzieren. Sie wurden instruiert, aufrecht zu sitzen und den Blick zum Fenster zu richten. Die Probanden nutzten einen Presenter (Logitech R400; Logitech Europe S.A., Lausanne, Schweiz), also ein Funk-Eingabegerät mit Links/Rechts-Pfeiltasten, um die im Experiment abgefragte Hemisphäre der Hörwahrnehmung anzugeben.

## Stimuli

Als Stimuli wurden 700 ms-Tonimpulse mit den Frequenzen 125 Hz und 500 Hz verwendet. Jeder Impuls wurde mit einem gaußförmigen Fenster mit einer Flankendauer von 160 ms gefenstert. Die Flankendauer ist hier definiert als die Zeit, in der die Amplitude des Signals von 10 % auf 90 % des Maximums ansteigt oder abfällt. Die Pegel der Stimuli wurden mit dem Ziel eine etwa gleiche Lautheit aller Stimuli zu erreichen in Anlehnung an die Kurven gleicher Lautheit nach [8] auf 72 dB SPL (125 Hz) bzw. 59.5 dB SPL (500 Hz) eingestellt.

Um eine phaseninduzierte Lateralisation zu erzielen, wurde jeder Stimulus mit einer IPD  $\Delta\varphi$  aus 51 verschiedenen IPD-Konditionen, die gleichabständig zwischen  $-\pi$  und  $+\pi$  festgelegt wurden, beaufschlagt. Unter Beibehaltung der Hüllkurve wurde die Startphase des rechten Kopfhörersignals um  $\Delta\varphi/2$  und die des linken um  $-\Delta\varphi/2$  verschoben, so dass die beiden Signale insgesamt die IPD  $\Delta\varphi$  aufwiesen (vgl. Abbildung 1). Dabei zeigt eine positive IPD an, dass das am rechten Ohr anliegende Signal



**Abbildung 1:** Schema eines dichotisch präsentierten Stimulus mit interauraler Phasendifferenz (IPD)  $\Delta\varphi$ . Ein Stimulus besteht in diesem Sinne aus zwei Tonimpulsen, wobei einer am linken (blau) und einer am rechten Ohr (rot) präsentiert wird. Beide haben die gleiche Frequenz und zueinander eine der IPD entsprechend zeitlich verschobene Feinstruktur, wohingegen die Hüllkurven identisch bleiben.

in der Phase vorausläuft, wohingegen eine negative IPD anzeigt, dass das am linken Ohr anliegende Signal in der Phase vorausläuft, jeweils in Bezug auf das am anderen Ohr anliegende Signal.

## Methode

Als Versuchsverfahren wurde hier ein links/rechts-Task (LRT) angewandt, da in früheren Studien gezeigt wurde, dass auf diese Weise intuitiv und schnell Lateralisationsexperimente durchgeführt werden können [2, 9], die zu reproduzierbaren Ergebnissen führen [10]. Ein LRT ist ein 1-Intervall, 2-AFC-Verfahren (two-alternative forced choice), bei dem die Versuchsperson in jedem Intervall einen dichotisch präsentierten Stimulus hört und anschließend die Seite von der Medianebene anzeigt, auf der sie die entsprechende Wahrnehmung vermutet. Ist die Versuchsperson unsicher, so muss sie raten.

Das Experiment wurde in zwei Teile mit einer Dauer von jeweils etwa 35 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 Stimuluskondition wurde zehn Mal präsentiert. Die Präsentationsreihenfolge der verschiedenen IPD-Konditionen und Frequenzen wurde vorab individuell pseudo-zufällig so festgelegt, dass in jedem Teil alle Konditionen gleich oft enthalten waren.

## Ablauf

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 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.

**Tabelle 1:** Information über die Probanden: Anzahl je Geschlecht, Alter und Händigkeit (rechts-, links-, beidhändig).

	Anzahl (m/w)	Alter / Jahre	Händigkeit (r/l/b)
Probanden	4/4	24 bis 52 (Median: 29.5)	8/0/0

## Probanden

Acht Freiwillige stellten sich als Probanden zur Verfügung. Details zu Geschlecht, Alter und Händigkeit können Tabelle 1 entnommen werden. Die Teilnehmer hatten keine bekannten Beeinträchtigungen des Gehörs und die Reintonruhehörschwellen zeigten keine Auffälligkeiten.

Alle Probanden hatten bereits Erfahrung mit Hörversuchen anhand von vorausgehenden Experimenten im Umfang von mindestens 2 h gesammelt, erfuhren aber kein über das oben genannte Vorgehen hinausgehendes Training für das vorliegende Experiment und waren hinsichtlich des Untersuchungsgegenstandes naiv.

## Ergebnisse

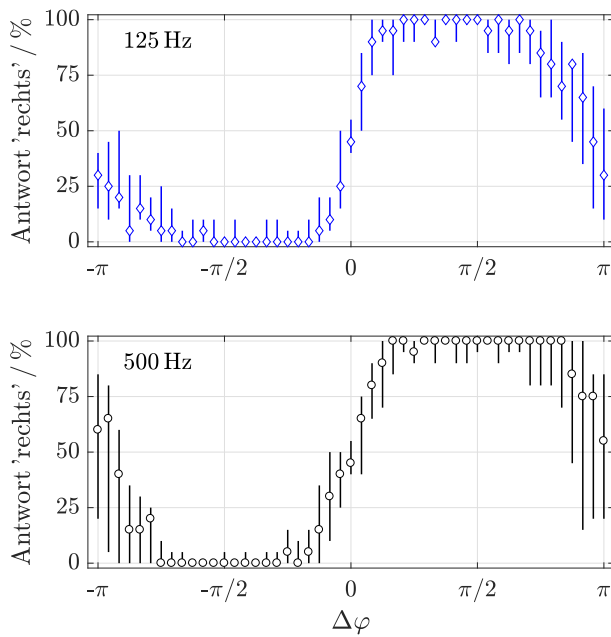
Aus den individuellen LRT-Ergebnissen der Probanden wurde die Häufigkeit dafür berechnet, dass die rechte Taste (entsprechend der Angabe einer Wahrnehmung rechts der Medianebene) gedrückt wurde. 100 % bedeutet daher, dass alle zehn Antworten einer IPD-Kondition *rechts* lauteten. Entsprechend bedeutet 0 %, dass alle Hörwahrnehmungen der linken Seite zugeordnet wurden. Über diese individuellen Häufigkeiten der acht Probanden wurden Median und Interquartilbereiche (IQR) berechnet. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse.

Die Mediane (Symbole) erreichen ihr Maximum bei IPDs von etwa  $\Delta\varphi = \pi/2$  und ihr Minimum bei IPDs von etwa  $\Delta\varphi = -\pi/2$ , was jeweils einer eindeutigen lateralen Zuordnung (zur rechten bzw. linken Seite) entspricht. Die IPD bei der die Wahrnehmung im Median zu 50% rechts beurteilt wurde, also keiner Seite eindeutig zugeordnet wurde, liegt bei  $\Delta\varphi \approx 0$ .

## Diskussion: Bezug zwischen interauraler Phasendifferenz und Hörwahrnehmung

Die Ergebnisse des LRT-Experiments zeigen für die beiden untersuchten Frequenzen  $f$  einen ähnlichen, jeweils etwa zu  $\Delta\varphi = 0$  punktsymmetrischen Verlauf. Dies legt nahe, dass frequenzunabhängig der Parameter IPD der die links/rechts-Zuordnung bestimmende Parameter ist.

Werden die Ergebnisse dagegen über der zu  $\Delta\varphi$  korrespondierenden zeitlichen Verschiebung der Feinstruktur, d. h. über der interauralen Zeitdifferenz (ITD)  $\Delta t = \Delta\varphi / (2\pi f)$ , betrachtet, so ist der Verlauf der Daten von Frequenz zu Frequenz deutlich verschieden, was in Abbildung 3 anhand der Mediane der hier erhobenen Messergebnisse dargestellt ist.



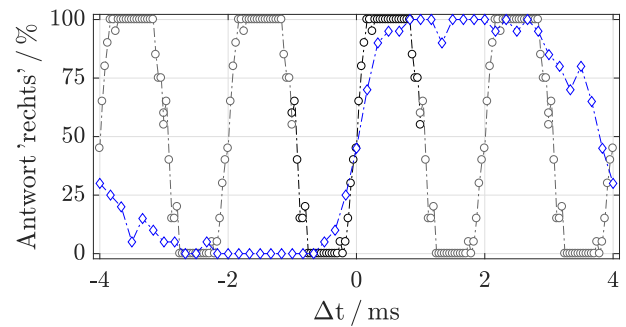
**Abbildung 2:** Ergebnisse des links/rechts-Tasks (*Hörwahrnehmung links oder rechts?*) für 700 ms-Tonimpulse mit interauralen Phasendifferenzen bei 125 Hz (oben) und 500 Hz (unten) als Funktion der interauralen Phasendifferenz  $\Delta\varphi$ . Die Daten wurden von acht Probanden mit zehn Wiederholungen pro Kondition und Person erhoben und sind jeweils als interindividuelle Mediane (Symbole) und Interquartilbereiche (vertikale Linien) dargestellt.

Abbildung 3 zeigt die erhobenen Daten als Funktion der interauralen Zeitdifferenz  $\Delta t$  bei 125 Hz (blaue Rauten) im Vergleich zu 500 Hz (schwarze und graue Kreise). Dabei stellen die grauen Symbole die entlang der x-Achse verschobenen, bereits durch die schwarzen Symbole gekennzeichneten Daten dar, da diese im Rahmen der Messgenauigkeit so wieder auftreten würden, weil sich die Phasendifferenz periodisch wiederholt.

Das Abweichen der Kurvenformen der als Funktionen der interauralen Zeitdifferenz gezeigten Mediane zwischen den Frequenzen (Rauten versus Kreise in Abbildung 3) legt nahe, dass die binaurale Feinstrukturverarbeitung im betrachteten Bereich frequenzunabhängig mit der Stimulusphase (d. h. der IPD) als ausschlaggebendes Kriterium erfolgt, nicht auf Grundlage der ITD.

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde die Lateralisation von dichotisch präsentierten Tonimpulsen bei unterschiedlichen interauralen Phasendifferenzen und unterschiedlichen Frequenzen untersucht. Die Probanden wurden aufgefordert, einzelne Hörwahrnehmungen links oder rechts einzuordnen. Die Ergebnisse deuten auf einen frequenzunabhängigen Zusammenhang der phaseninduzierten Lateralisation mit der interauralen Phasendifferenz hin. Umgekehrt konnte kein frequenzunabhängig ähnlicher Zusammenhang mit der entsprechenden interauralen Zeitdifferenz festgestellt werden.



**Abbildung 3:** Ergebnisse des links/rechts-Tasks (*Hörwahrnehmung links oder rechts?*) für 700 ms-Tonimpulse mit interauralen Phasendifferenzen bei 125 Hz (blaue Rauten) und 500 Hz (schwarze und graue Kreise) als Funktion der interauralen Zeitdifferenz  $\Delta t$ . Die Daten wurden von acht Probanden mit zehn Wiederholungen pro Kondition und Person erhoben und sind als interindividuelle Mediane (schwarze Kreise aus Abbildung 2) dargestellt. Zusätzlich sind die Daten für 500 Hz in den physikalisch identischen Bereich  $|\varphi| > \pi$  extrapoliert (graue Kreise).

## 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] Zwillocki J. und R. S. Feldman: Just noticeable differences in dichotic phase. *J. Acoust. Soc. Am.* 28 (1956), 860-864
- [2] Völk F., J. Encke, J. Kreh, W. Hemmert: Pure-Tone Lateralization Revisited. 174<sup>th</sup> Meeting of the Acoust. Soc. Am., 2017
- [3] Klumpp R. G. und H. R. Eady: Some measurements of interaural time difference thresholds. *J. Acoust. Soc. Am.* 28 (1956), 859-860
- [4] Johnson D. H.: The relationship between spike rate and synchrony in responses of auditory-nerve fibers to single tones. *J. Acoust. Soc. Am.* 68 (1980), 1115-1122
- [5] 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
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] DIN ISO 226: Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel, Dt. Norm, Beuth, Berlin (2006)
- [9] 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)
- [10] 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)