

## Einfluss von Modulationstiefe und Einhüllendenform auf die Wahrnehmung interauraler Zeitdifferenzen

Torben Wendt<sup>1</sup>, Mathias Dietz<sup>1</sup>, Stephan D. Ewert<sup>1</sup>, Bernhard Laback<sup>2</sup>, Volker Hohmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Medizinische Physik, Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg, 26111 Oldenburg, Deutschland, torben.wendt@uni-oldenburg.de

<sup>2</sup>Institut für Schallforschung, Österr. Akademie d. Wissenschaften, A-1040 Wien, Österreich, Bernhard.Laback@oew.ac.at

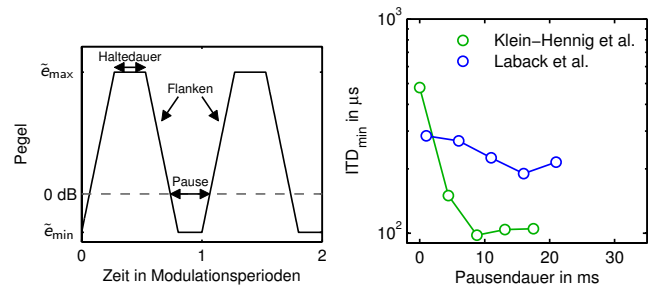
### Einleitung

Interaurale Zeitdifferenzen (ITDs) sind wichtige Signaleigenschaften bei der Lateralisation akustischer Stimuli. Bei Trägerfrequenzen oberhalb von etwa 1500 Hz werden aufgrund abnehmender Trägerphasenkopplung der neuronalen Antworten ITDs mittels der Signaleinhüllenden ausgewertet.

Der sinusförmig amplitudenmodulierte Ton (SAM-Ton) ist ein häufig verwendeter Stimulus in psychoakustischen Lateralisationsexperimenten und der Einfluss von Parametern wie beispielsweise Träger- und Modulationsfrequenz auf die eben merkbare Einhüllenden-ITD (nachfolgend  $ITD_{\min}$ ) ist ausführlich untersucht worden (z. B. Henning [1]). Jedoch verursacht die Variation bestimmter Einhüllendenparameter des SAM-Tons stets Kovariationen anderer Parameter. So beeinflusst beispielsweise die Wahl der Modulationsfrequenz die Steilheit der An- und Abstiegsflanken sowie die Dauer des Modulationstals.

Klein-Hennig et al. [2] sowie Laback et al. [3] haben mittels speziell generierter Einhüllendenformen durch unabhängige Variation der Einhüllendenparameter Pausendauer und Anstiegsdauer bzw. Flankensteilheit deren isolierten Einfluss auf die  $ITD_{\min}$  getestet. Die An- und Abstiegsflanken bei [2] waren  $\cos^2$ -förmig, die bei [3] linear auf einer dB-Skala, so dass eine trapezförmige Einhüllende entsteht (s. Abb. 1, links). Die Pausendauer wurde bei [3] definiert als der zeitliche Abstand zwischen Ab- und Anstiegsflanke bei 0 dB SL (Wahrnehmungsspiegel), entsprechend der Ruheshörschwelle des unmodulierten Trägersignals. Die Ergebnisse beider Studien zeigen, dass längere Pausen und steilere (bzw. kürzere) Flanken höhere ITD-Sensitivitäten, also kleinere  $ITD_{\min}$ -Werte, hervorrufen. Im Detail gibt es jedoch qualitative und quantitative Unterschiede zwischen den Ergebnissen beider Studien, wie in Abb. 1 (rechts) gezeigt. Die weitestgehend kleineren  $ITD_{\min}$ -Werte bei [2] können teilweise durch die Wahl verschiedener Modulationsfrequenzen begründet werden, welche bei [2] 50 Hz betrug, bei [3] hingegen nur 27,3 Hz. Ebenfalls unterschiedlich waren die Trägerfrequenzen: 4000 Hz bei [2] und 8727,3 Hz bei [3].

In dieser Studie soll mit einem einheitlichen Parametersatz ein entsprechender Trapezstimulus, der auf der logarithmischen Achse gemäß [3] parametrisiert wurde, mit einem Stimulus verglichen werden, der wie bei [1] und [2] auf einer linearen Achse parametrisiert wurde. Unterschiede, die sich dann bei gleicher Träger- und Modulationsfrequenz zeigen, können Aufschluss über die perzeptiv relevante Achse geben. Im Idealfall können die Pausen-



**Abbildung 1:** Links: Einhüllende der trapezförmigen Amplitudenmodulation wie bei [3] verwendet, mit Minimal- und Maximalpegel  $\tilde{e}_{\min}$ ,  $\tilde{e}_{\max}$ ; Pause bei 0 dB SL. Rechts: Ergebnisse  $ITD_{\min}$  über Pausendauer aus [2] und [3] im Vergleich.

und Anstiegsdauern, die bislang von der Art der Stimuluserzeugung abhängen, durch ein universelles perzeptiv motiviertes Maß beschrieben werden um verbleibende Unterschiede zwischen den Stimulustypen zu erklären.

### Experimente

#### Stimuli und Messprozedur

Mittels eines links/rechts-Diskriminationstests wurden eben merkbare Einhüllenden-ITDs ( $ITD_{\min}$ ) von trapezförmig modulierten Tönen (siehe Abb. 1, links) und SAM-Tönen bei 5 normalhörenden Versuchspersonen gemessen. Die Trägerfrequenz betrug 4 kHz, die Modulationsfrequenz 27,3 Hz. Der Trapezstimulus wurde überdies durch seine Flankensteilheit und Pausendauer (hier zeitlicher Flankenabstand bei 0 dB SPL) charakterisiert, wodurch sich eine Kovariation der Haltedauer (s. Abb. 1, links) ergab. Der Einfluss der Haltedauer auf die  $ITD_{\min}$  kann jedoch nach Ergebnissen aus [2] als vernachlässigbar betrachtet werden.

Die in der Beschreibung der trapezförmigen Einhüllenden per se nicht gegebene Modulationstiefe wurde allgemein für beliebige Einhüllendenformen als *relative Modulationstiefe*  $m_{\text{rel}}$  durch das Minimum  $e_{\min}$  und Maximum  $e_{\max}$  der Einhüllenden (auf einer linearen Skala) definiert:

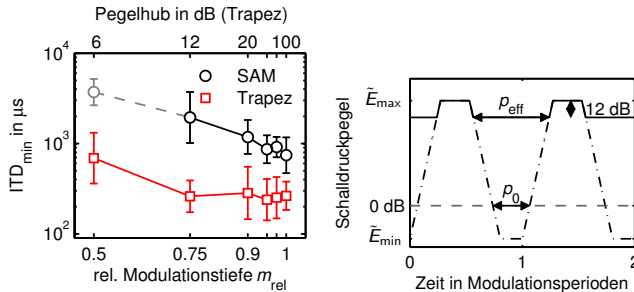
$$m_{\text{rel}} = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{E_{\max}}, \quad (1)$$

wobei  $E_{\max}$  das Maximum der Einhüllenden des voll durchmodulierten Signals ( $e_{\min} = 0$ ,  $m_{\text{rel}} = 1$ ) bezeichnet. Beim SAM-Ton stimmt die relative Modulationstiefe mit der für diesen Stimulus definierten Modulationstiefe überein. Die Variation der relativen Modulationstiefe erfolgte beim Trapezstimulus durch Variation von  $e_{\min}$ , so dass stets gilt:  $e_{\max} = E_{\max}$ .

## Ergebnisse

### Variation der Modulationstiefe

Für Trapezstimuli mit einer Flankensteilheit von 10 dB/ms und Pausendauer von 1 ms sowie für den SAM-Ton wurde die  $ITD_{\min}$  in Abhängigkeit von  $m_{\text{rel}}$  gemessen. Abb. 2 (links) zeigt die über 5 Versuchspersonen gemittelten Ergebnisse.



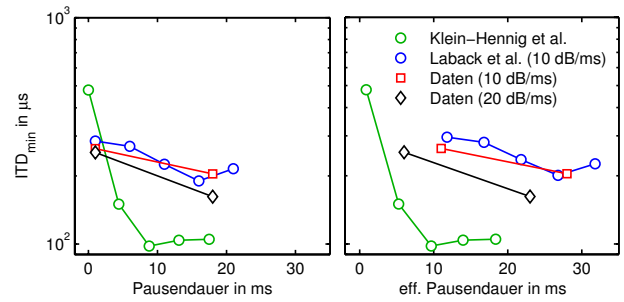
**Abbildung 2:** Links: Messergebnisse  $ITD_{\min}$  über relativer Modulationstiefe; Mittelung über 5 Versuchspersonen. Rechts: Definition der effektiven Pausendauer  $p_{\text{eff}}$ . Trapezförmige Einhüllende bei  $m_{\text{rel}} = 0,75$  (durchgezogene Linie) und voll durchmodulierte trapezf. Einhüllende (gestrichelte Linie), mit Minimal- und Maximalpegel  $\tilde{E}_{\min}$  und  $\tilde{E}_{\text{max}}$ .

Im Ergebnis zeigt sich, dass die  $ITD_{\min}$  für die trapezförmige Einhüllende durchweg deutlich unter der des SAM-Tons liegt. Während sich für den SAM-Ton eine sinkende  $ITD_{\min}$  für steigende Modulationstiefe über den gesamten Messbereich zeigt, bleibt die  $ITD_{\min}$  der Trapezstimuli bereits ab der relativen Modulationstiefe  $m_{\text{rel}} = 0,75$  im Mittel über alle Versuchspersonen gleich. Dieses Verhalten motiviert die Einführung eines neuen Maßes für die Pausendauer. Diese als *effektive Pausendauer*  $p_{\text{eff}}$  bezeichnete Größe wird definiert als der zeitliche Abstand zwischen Ab- und Anstiegsflanke bei dem  $e_{\min}$  des mit  $m_{\text{rel}} = 0,75$  modulierten Signals. Mit dem entsprechenden Pegelwert  $\tilde{e}_{\min} = 20 \cdot \lg(e_{\min} / 20 \mu\text{Pa})$  dB, welcher gerade 12 dB unter dem Maximalpegel liegt (s. Abb. 2, rechts), und der nominalen Pausendauer  $p_0$  sowie der Flankensteilheit  $s$  gilt dann:  $p_{\text{eff}} = p_0 + 2 \cdot \tilde{e}_{\min} / s$ .

### Variation der Pausendauer

Die Messung der  $ITD_{\min}$  unter Variation der Pausendauer wurde für den Trapezstimulus mit Flankensteilheiten von 10 und 20 dB/ms bei einer Trägerfrequenz von 4 kHz durchgeführt. Abb. 3 zeigt die Ergebnisse (links), zusammen mit den Ergebnissen aus [2] und [3]. Es ist zu erkennen, dass eine größere Pausendauer für beide Steilheiten kleinere  $ITD_{\min}$ -Werte hervorruft. Eine ANOVA liefert jedoch das Ergebnis, dass der Einfluss der Pausendauer nur für die Einhüllendenform mit den steileren Flanken signifikant ist ( $p < 0,05$ ), während dies für die Form mit 10 dB/ms Steilheit nicht der Fall ist ( $p = 0,18$ ).

Abb. 3 (rechts) zeigt dieselben Daten in Abhängigkeit der effektiven Pausendauer. Während sich die Steilheiten der  $ITD_{\min}$ -Kurven von Klein-Hennig [2] und Laback [3] (jeweils Kreise) links stark unterscheiden und der Einfluss der Flankensteilheit auf die Signifikanz des Einflusses der



**Abbildung 3:** Gegenüberstellung von  $ITD_{\min}$ -Messergebnissen aus [2], [3] und vorliegender Studie als Funktion der nominalen Pausendauer (links) und effektiven Pausendauer (rechts).

Pausendauer in den gemessenen Daten unklar ist, lösen sich die Unterschiede in der Darstellung über der effektiven Pausendauer auf: Die flachere Kurve von [3] liegt nun vollständig im Sättigungsbereich von [2]. Die Kurven der Messwerte dieser Studie (Quadrate, Rauten) verschieben sich dahingehend, dass die Kurve der 10-dB/ms-Flanken ohne signifikanten Einfluss der Pausendauer ebenfalls im Bereich der Sättigung bei [2] liegt, während die Kurve der 20-dB/ms-Flanken im Bereich des starken Einflusses der Pausendauer in [2] liegt.

Weitere Messungen sind nötig, um das Verhalten der Trapezflanken bei kleinen effektiven Pausendauern zu untersuchen, sowie die  $\cos^2$ -Flanken von [2] mit den gleichen effektiven Parametern wie bei den Trapezflanken zu vermessen. Durch den sich aus dem ersten Experiment ergebenden Umstand, dass die  $ITD_{\min}$  für sämtliche Pausenpegel unterhalb von 12 dB unter Maximalpegel praktisch gleich ist, konnte mit der Einführung der effektiven Pausendauer jedoch ein erster wichtiger Aufschluss über die Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen von [2] und [3] gegeben werden.

## Danksagung

Diese Studie wurde von der DFG (SFB TRR31 „Das aktive Gehör“) gefördert.

## Literatur

- [1] Henning, G. B.: Detectability of interaural delay in high-frequency complex waveforms. *J. Acoust. Soc. Am.* 55 (1974), 84–90
- [2] Klein-Hennig, M., Dietz, M., Ewert, S. D., Hohmann, V.: The effect of envelope waveform on lateralization. In: *Proceedings of the International Conference on Acoustics NAG/DAGA 2009*, M. M. Boone Ed., DEGA e. V., Berlin (2009), 1119–1121
- [3] Laback, B., Zimmermann, I., Majdak, P.: Perception of interaural time differences in electric and acoustic hearing. In: *ISAAR 2010 Binaural Processing and Spatial Hearing*. Buchholz, Dau, Dalsgaard, Poulsen, Eds. (2010), 403–415