

# Spektrale Gewichtung von interauralen Zeit- und Pegelunterschieden zur Lateralisierung von Breitbandsignalen

Axel Ahrens, Suyash N. Joshi, Bastian Epp

Technical University of Denmark, Hearing Systems, DK-2800 Kgs. Lyngby, Email: aahr@elektro.dtu.dk

## Einleitung

Zur Lokalisation von Schallquellen nutzt das menschliche Gehör sowohl die Zeit- als auch Pegel-Unterschiede zwischen beiden Ohren (auch interaural time differences - ITD und interaural level differences - ILD, genannt). Aus der Literatur ist bereits bekannt, dass ITDs bei hohen, und ILDs bei niedrigen Frequenzen eine entscheidende Rolle bei der Lokalisation spielen [1]. Die ITDs kommen durch Laufzeitunterschiede zwischen den Ohren zustande, während ILDs eine Konsequenz von akustischer Abschattung durch den Kopf bei höheren Frequenzen ist. Verschiedene Studien haben bereits gezeigt, dass Diskriminationsschwellen für ITDs mit steigender Frequenz steigen [2], wobei Diskriminationsschwellen für ILDs jedoch konstant über die Frequenz sind, wenn sie über Kopfhörer präsentiert werden [3].

Frühere Studien untersuchten den Einfluss von ITD und ILD in verschiedenen Frequenzbereichen auf die Lokalisation von Schallquellen, durch Messung von ITD- und ILD Detektionsschwellen, unter der Annahme, dass die Gewichtung der jeweiligen Frequenz invers zur Detektionsschwelle ist [4, 5]. Diese Ergebnisse beruhen auf der Messung von Detektionsschwellen von Schmalbandsignalen in Isolation, also ohne Störgeräusche in anderen Frequenzbändern, und berücksichtigen somit keine Interaktionseffekte zwischen verschiedenen Frequenzbereichen. Es wurde gezeigt, dass auch spektral weit entfernte Signale die Detektionsschwellen von interauralen Unterschieden beeinflussen [6]. Das bedeutet, dass die Gewichtung verschiedener Frequenzbereiche nach [4, 5] möglicherweise nicht für breitbandige Signale generalisiert werden kann.

In dieser Studie wird der Einfluss der spektralen und "binauralen" Bandbreite auf die Gewichtung von ITD und ILD untersucht. Unter der Annahme, dass zeitliche Information bei niedrigen Frequenzen verfügbar ist, und diese graduell nach hohen Frequenzen abnimmt, wird ein gradueller Abfall der Gewichtungen mit steigender Mittenfrequenz erwartet. Analog dazu ist die ILD Information dominant bei hohen Frequenzen und verringert sich aufgrund des Verhältnisses von Wellenlänge zur Dimension des Kopfes graduell mit sinkender Frequenzen.

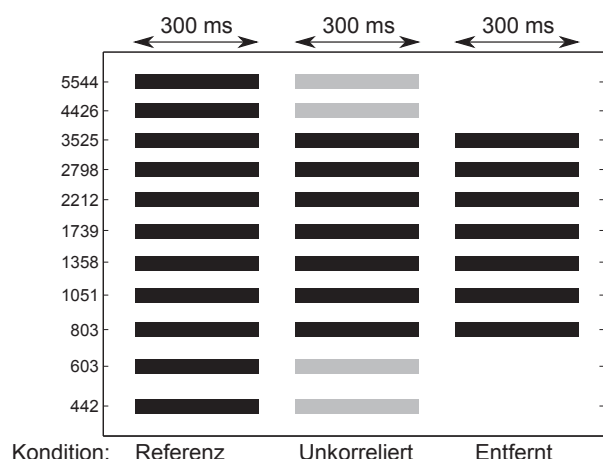
## Stimuli und Methode

Der Stimulus bestand aus elf 1-ERB (Equivalent Rectangular Bandwidth, [7]) breiten Rauschbändern. Die niedrigste Mittenfrequenz war 442 Hz und die höchste 5544 Hz mit einem spektralen Abstand von 1-ERB (siehe Abbildung 1, Referenz Kondition). Jedes der Bänder hatte einen Pegel von 60 dB SPL, eine Dauer von 300 ms

und wurde mit einem Tukey Fenster mit 2 ms Rampen gefenstert.

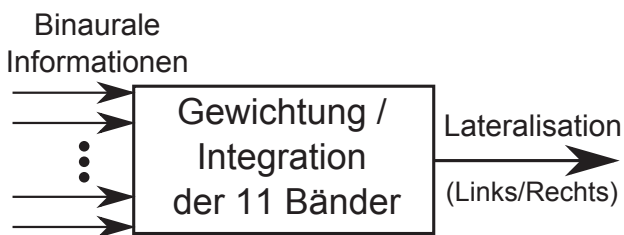
Es wurden elf ITDs zwischen  $-500$  und  $+500 \mu\text{s}$  in  $100 \mu\text{s}$  Schritten, oder ILDs von  $-5$  dB bis  $+5$  dB in 1 dB Schritten verwendet. In jedem Durchgang wurden 121 Stimuli, aufgeteilt in elf Blöcke mit je elf Stimuli, dargeboten. In jedem der Blöcke wurden die elf ITD bzw. ILD Werte für jedes Frequenzband zufällig über die Stimuli permutiert und auf die Rauschbänder aufgeprägt. Die Stimuli wurden über Sennheiser HDA200 Kopfhörer präsentiert. Die Probanden bekamen die Aufgabe nach jedem Stimulus die Richtung (links oder rechts) anzugeben aus der das Rauschen wahrgenommen wurde (1-Intervall-2-AFC Verfahren). Jeder der Durchläufe wurde 5 mal mit randomisierten Stimuli Darbietungen präsentiert. Die Permutation von ITD und ILD der jeweiligen Stimuli wurde jedoch beibehalten.

Abbildung 1 zeigt die drei untersuchten Konditionen (Referenz, Unkorreliert und Entfernt). In der Referenzkondition wurden ITDs bzw. ILDs auf alle elf Rauschbänder aufgeprägt. In Kondition (a), *Unkorreliert*, wurde die binaurale Information der äußersten beiden Rauschbänder durch Darbietung von unkorreliertem Rauschen entfernt. Das bedeutet, dass die Bandbreite mit binauralen Informationen verringert wird. In Kondition (b), *Entfernt*, wurden die äußersten beiden Rauschbänder auf beiden Seiten des Spektrums entfernt und somit die Gesamtbandbreite verringert.



**Abbildung 1:** Übersicht über die Stimuli in den Konditionen im Frequenz-/Zeitbereich. Die Referenz- bzw. Ausgangskondition besteht aus elf Rauschbändern die je 1-ERB breit sind mit 1-ERB spektralem Abstand. Die weiteren Konditionen entsprechen der Referenz, mit dem Unterschied von zwei unkorrelierten Randbändern (Unkorreliert) bzw. schmalerer Bandbreite (Entfernt).

Die spektrale Gewichtung der interauralen Unterschiede wurde mit einem logistischen Regressionsmodell ermittelt (vgl. [8]). Die Eingangsinformationen der Regressionsanalyse waren die elf ITD- bzw. ILD Werte in den Rauschbändern. Die Ausgangsinformation war die Antwort des Probanden (links/rechts). Dies wurde für alle 121 Stimuli und den fünf Wiederholungen durchgeführt. Daraus folgend gab es elf Gewichtungsfaktoren für die elf Frequenzbänder. In Abbildung 2 ist die Analyse, wie zuvor beschrieben, schematisch dargestellt. Die Gewichtungen, die aus dem Regressionsmodell folgen wurden mit dem Mittelwert der jeweiligen Gewichtungen normalisiert. Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen den Mittelwert und Standardfehler über alle Versuchspersonen.



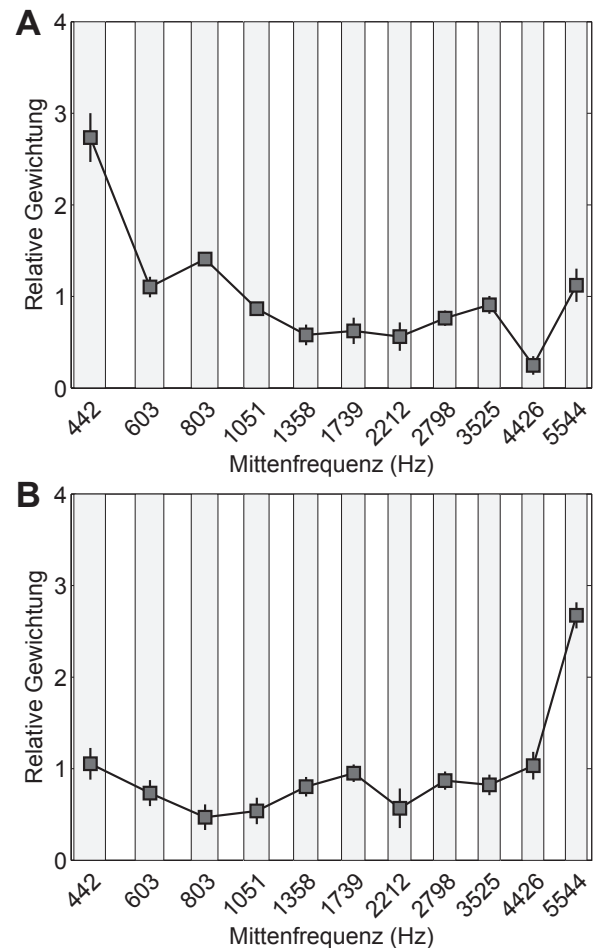
**Abbildung 2:** Schematische Darstellung des Regressionsmodells. Der Eingang entspricht den elf binauralen Unterschieden (ITD bzw. ILD) und der Ausgang der Antwort des Probanden. Aus den Daten über die Stimuli und Wiederholungen kann die Gewichtung berechnet werden.

Das Experiment wurde mit 10 normalhörenden ( $\leq 20$  dB HL, 125 Hz-8 kHz) Probanden durchgeführt. Die Probanden waren zwischen 24 und 30 Jahre alt (4 weiblich, 6 männlich) und im Mittel 25,2 Jahre. Vier der Probanden hatten bereits Erfahrung mit psychoakustischen Tests und vier waren Musiker.

## Ergebnisse

Abbildung 3, **A** zeigt die spektrale Gewichtung der ITDs über den Frequenzbereich des Stimulus (Referenzkondition). Die Ergebnisse zeigen eine deutlich höhere Gewichtung des Frequenzbands mit der niedrigsten Mittenfrequenz verglichen mit den anderen Bändern ( $F(10, 90)=19.53$ ,  $p<0.0001$ ). Mit steigender Frequenz verringerten sich die Gewichtungen leicht. Die Gewichtung der ILDs (Abb. 3, **B**) haben den höchsten Wert für das Frequenzband mit der höchsten Mittenfrequenz ( $F(10, 90)=16.12$ ,  $p<0.0001$ ). Die Gewichtung der ILD war relativ konstant für die Mittenfrequenzen der anderen Bänder. Für sowohl ITD als auch ILD sind die Gewichtungen aller Frequenzbänder größer als Null und hatten somit einen Einfluss auf die wahrgenommene Lateralisierung.

Abbildung 4 zeigt die Kondition "Unkorreliert" für ITD (**A**) und ILD (**B**), in der zwei Rauschbänder als unkorreliertes Rauschen dargeboten wurden. Beide interauralen Unterschiede hatten keine höheren Gewichtungen der Randbänder, wie in der Referenzkondition zu sehen. Zu-



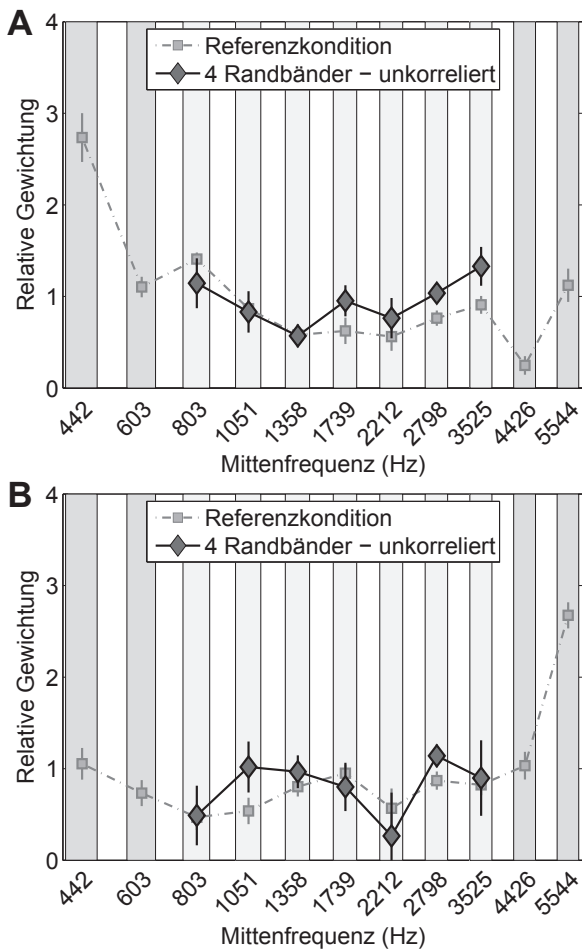
**Abbildung 3:** Mittlere relative Gewichtung und Standardfehler von interauraler Zeit- (**A**) und Pegeldifferenz (**B**) über die Mittenfrequenzen für die Referenzkondition. Die hellen Balken im Hintergrund symbolisieren die Rauschbänder mit binauralen Informationen. Die Gewichtungen sind mit dem Mittelwert der Gewichtungsfunktion normalisiert.

dem waren beide Gewichtungsfunktionen ähnlich der Referenz.

Abbildung 5 zeigt die "Entfernt-Kondition" mit verringerter spektraler Bandbreite des Stimulus für ITD (**A**) und ILD (**B**). Analog zur Referenzkondition zeigten die Bänder mit der niedrigsten (ITD) bzw. höchsten (ILD) Mittenfrequenz (803 Hz und 3525 Hz) die höchste Gewichtung. Die übrigen Bänder zeigten ähnliche Gewichtungen wie in der "Referenz" Kondition. Ausgenommen das tiefste Frequenzband für ILD, das ebenfalls höher ist als die mittleren Bänder.

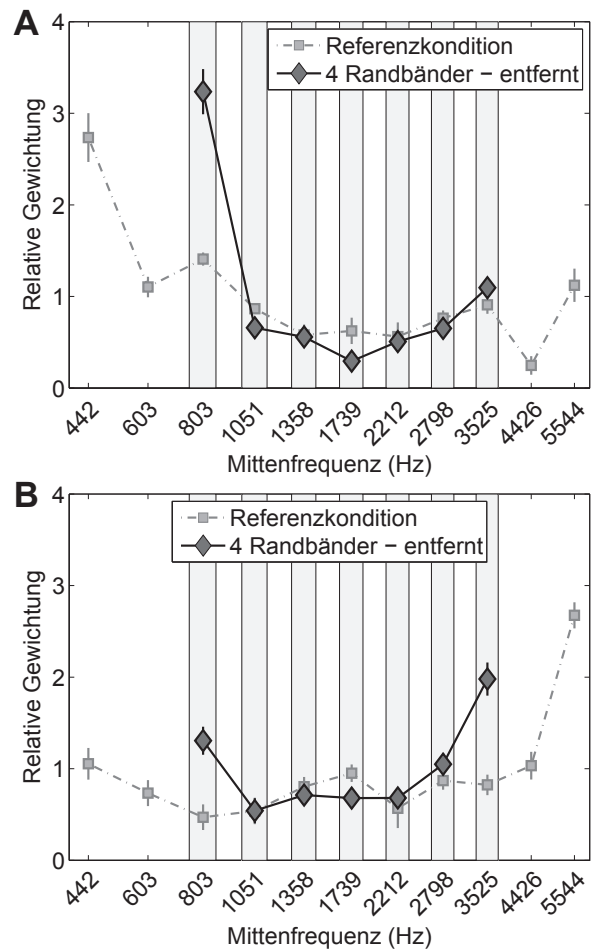
## Diskussion

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen spektrale Gewichtungen von ITD bzw. ILD Informationen für breitbandige Signale. Die relative Gewichtung war in allen Konditionen am höchsten für die Rauschbänder mit niedrigster Mittenfrequenz für ITD und für die Rauschbänder mit höchster Mittenfrequenz für ILD. Unter der Annahme, dass zeitliche Information bei niedrigen Frequenzen verfügbar ist, und diese graduell nach hohen Fre-



**Abbildung 4:** Mittlere relative Gewichtung und Standard Fehler von interauraler (A) Zeit- und (B) Pegeldifferenz über die Mittenfrequenzen mit den Randbändern als unkorreliertes Rauschen im Vergleich zur Referenzkondition. Die hellen Balken im Hintergrund symbolisieren die Rauschbänder mit binauralen Informationen. Die dunklen Balken symbolisieren unkorreliertes Rauschen in den jeweiligen Bändern. Die Gewichtungen sind mit dem Mittelwert der Gewichtungsfunktion normalisiert.

quenzen abnimmt, würde man einen graduellen Abfall der Gewichtungen mit steigender Mittenfrequenz erwarten. Analog dazu ist die ILD Information dominant bei hohen Frequenzen und verringert sich aufgrund des Verhältnisses von Wellenlänge zur Dimension des Kopfes graduell mit kleineren Frequenzen. Für ILD würde man somit einen graduellen Anstieg der Gewichtungen mit steigender Frequenz erwarten. Die aktuellen Daten lassen vermuten, dass zwar alle Frequenzen zur Lateralisation beitragen, jedoch die Anteile mit der niedrigsten bzw. höchsten Mittenfrequenz einen dominanten Einfluss haben. Verglichen mit der "Referenz" Kondition zeigen die Ergebnisse der Kondition "Unkorreliert" unveränderte Gewichte für die Mittenfrequenzen mit binauraler Information. Im Zusammenhang mit den Gewichtungen der Kondition "Unkorreliert" deutet dieses Ergebnis darauf hin, dass die spektrale, und nicht die binaurale Bandbreite entscheidend ist für die Bestimmung der Gewichtung. Dies ist auch konsistent mit den Ge-



**Abbildung 5:** Mittlere relative Gewichtung und Standard Fehler von interauraler (A) Zeit- und (B) Pegeldifferenz über die Mittenfrequenzen mit den entfernten Randbändern im Vergleich zur Referenzkondition. Die hellen Balken im Hintergrund symbolisieren die Rauschbänder mit binauralen Informationen. Die Gewichtungen sind mit dem Mittelwert der Gewichtungsfunktion normalisiert.

wichtungen der Kondition "Entfernt" in der die spektrale Bandbreite verringert wurde. In dieser Kondition waren die Gewichtungen für die Rauschbänder mit niedrigster (ITD) bzw. höchster (ILD) Mittenfrequenz am höchsten. Im Vergleich mit der Konditionen "Referenz" haben sich nur die Gewichte verändert welche die spektral niedrigste bzw. höchste Mittenfrequenz hatten, unabhängig vom absoluten Wert. So unterscheiden sich für ITD die Gewichtungen des Bandes mit einer Mittenfrequenz von 803 Hz stark voneinander, abhängig davon, ob dieses Band das Band mit der niedrigsten Mittenfrequenz ("Entfernt") oder nicht ("Referenz") war.

Diese Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit [1, 4], dass Zeitunterschiede hauptsächlich in tiefen Frequenzen genutzt werden und Pegeldifferenzen in hohen Frequenzen. In vorherigen Studien, in denen die Sensitivität durch Inversion der Detektionsschwellen abgeleitet wurden, zeigen einen graduellen Verlauf der Gewichtung mit der Frequenz [5]. Die aktuelle Studie zeigt jedoch, dass für Breitbandsignale die spektralen Komponenten mit niedrigster bzw. höchster Mittenfrequenz den größten Beitrag

zur Lateralisation hatten, und die restlichen spektralen Komponenten niedriger, aber zueinander ähnlich gewichtet wurden. Ein Grund für diese Diskrepanz könnte die Berücksichtigung von frequenzübergreifenden Effekten in der aktuellen Studie sein, welche bei der Messung von Schmalbandsignalen nicht berücksichtigt wurde.

Die Dominanz der Randbänder kann anhand der Ergebnisse einer Studie von Van de Par und Kohlrausch erklärt werden [9]. Es wurde gezeigt das binaurale kritische Bänder, zwei- bis viermal breiter sind, im Vergleich zu monauralen kritischen Bändern wie in [7]. Das bedeutet, dass Randbänder geringere Interferenzen aufweisen als andere Bänder, da sie nur ein direkt benachbartes Band haben. Diese Hypothese wird durch beide in dieser Studie gemessenen Konditionen gestützt. Wenn sich keine Energie im benachbarten Frequenzband befindet, ist die Gewichtung dieses Bandes am höchsten und die Interferenz am niedrigsten ("Entfernt-Kondition", Abb. 5). Wenn jedoch unkorreliertes Rauschen auf diesen Bändern ist, ist die Interferenz groß und die Gewichtung somit niedrig (vgl. Abb. 4). Der Effekt der Randbänder tritt jedoch nur auf wenn für das auditorische System nutzbare interaurale Informationen verfügbar sind. Dies ist hauptsächlich in tiefen Frequenzen für ITDs und in hohen Frequenzen für ILDs der Fall. In Kondition (b), "Entfernt-Kondition", ist jedoch zusätzlich im tiefsten Frequenzband für ILDs ein erhöhtes Randband zu sehen, da vermutlich genügend Informationen für das auditorische System auch in tiefen Frequenzen nutzbar sind.

## Zusammenfassung

In der aktuellen Studie wurde eine Methode aufgezeigt welche es ermöglicht, die spektrale Gewichtung von interauraler Zeit- und Pegeldifferenz (ITD und ILD) effizient und für breitbandige Signale zu ermitteln. Im Gegensatz zu bisher verwendeten Methoden, wird zudem der Einfluss von Interferenzen mit anderen spektralen Komponenten ("binaural interference") in Betracht gezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Randbänder der Stimuli einen besonders hohen Einfluss auf die Lateralisierung haben. Die Gewichtung der Randbänder ist deutlich höher als die aller anderen Bänder, in tiefen Frequenzen für ITD und in hohen Frequenzen für ILD. Dies gilt jedoch nur wenn sich kein Störsignal ohne Lokalisationsinformationen (unkorreliertes Rauschen) am Rande des Signales befindet. Unter der Annahme, dass die Ergebnisse generalisiert werden können, könnten breitbandige Signale effizient lateralisiert werden durch hinzufügen von binauraler Information in ausschließlich den spektralen Bereichen mit niedrigster (ITD) bzw. höchster (ILD) Mittenfrequenz.

## Literatur

- [1] Lord Rayleigh. (1907). On our Perception of Sound Direction. *Philosophical Magazine*, 13, 214.
- [2] Colburn, H.S., Shinn-Cunningham, B., Kidd, G., & Durlach, N. (2006). The perceptual consequences of binaural hearing. *International Journal of Audiology*, 45(1), 34.
- [3] Yost, W. A. (1988). Discrimination of interaural differences of level as a function of frequency. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83(5), 1846.
- [4] Raatgever, J. (1980). On the Binaural Processing of Stimuli with Different Interaural Phase Relations. *Acta Radiologica [Old Series]*. Delft University.
- [5] Stern, R. M., Zeiberg, A. S., & Trahiotis, C. (1988). Lateralization of complex binaural stimuli: A weighted-image model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(1), 156.
- [6] McFadden, D., & Pasanen, E. G. (1976). Lateralization of high frequencies based on interaural time differences. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 59(3), 634.
- [7] Glasberg, B. R., & Moore, B. C. (1990). Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data. *Hearing Research*, 47(1-2), 103.
- [8] Lutfi, R. A. (1995). Correlation coefficients and correlation ratios as estimates of observer weights in multiple-observation tasks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(2), 1333.
- [9] Van de Par, S., & Kohlrausch, A. (1999). Dependence of binaural masking level differences on center frequency, masker bandwidth, and interaural parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(4), 1940.