

Zur Äquivalenz von interauralen Zeit- und Pegelunterschieden bei kurzen Stimuli

Jörg Damaschke, Michael Granzow, Helmut Riedel, Birger Kollmeier
AG Medizinische Physik Universität Oldenburg, 26111 Oldenburg

Zusammenfassung Für Pulsfolgen (0,1 ms Dauer mit 50 ms Interstimulus-Intervall) wurden auf zwei Arten interaurale Pegeldifferenzen (ILD: *Interaural Level Difference*) und zugehörige interaurale Zeitdifferenzen (ITD: *Interaural Time Difference*) bestimmt, die zu dem gleichen subjektiven Lateralisationseffekt führen, d. h. in Bezug auf ihre wahrgenommene binaurale Komponente als äquivalent anzusehen sind. Dieses Verhältnis zwischen ILD und ITD wird auch als TIR (*Time-Intensity-Ratio*) bezeichnet. Zum einen wurden »matching«-Experimente durchgeführt, bei denen ILD und ITD so eingestellt wurden, dass die Stimuli eine vergleichbare Lateralisation hatten (ILD und ITD wirken in die gleiche Richtung). Zum anderen wurden »trading«-Experimente durchgeführt, bei denen ILD und ITD so eingestellt wurden, dass die Stimuli jeweils in der Mitte des Kopfes wahrgenommen wurden (ILD und ITD wirken genau einander entgegen).

Es stellt sich heraus, dass sich die beiden Arten der Bestimmung von sich entsprechenden ILDs und ITDs unterscheiden. Während es bei trading-Experimenten zu unnatürlichen Höreindrücken kommt, was z. T. zu Verwirrungen der Versuchspersonen führt, sind matching-Experimente zur Bestimmung der TIR eher geeignet. So erhält man je nach Methode unterschiedliche Werte für die angestrebten TIRs. Bei matching-Experimenten ergeben sich z. B. bei einem Pegel von 60 dB nHL (*Normal Hearing Level*¹) TIRs von etwa 90 bis 100 $\mu\text{s}/\text{dB}$, bei trading-Experimenten liegen diese Werte zwischen 53 und 61 $\mu\text{s}/\text{dB}$.

Schlüsselwörter: binaurales Hören
Pegeldefinitionen
Lateralisation von Pulsfolgen
matching-time-intensity-ratio
trading-time-intensity-ratio

Corresponding author: Jörg Damaschke
AG Medizinische Physik
Carl von Ossietzky-Universität Oldenburg
Carl von Ossietzky-Str. 9-11, D-26111 Oldenburg
Phone +49 441 798 5470, Fax +49 441 798 3902
E-mail: joerg@medi.physik.uni-oldenburg.de

¹ Die Ruheshwelle des verwendeten Stimulus wird für alle Versuchspersonen bestimmt. Als Referenz 0 dB nHL dient dann die gemittelte Ruheshwelle (siehe auch Abschnitt »Methoden – Stimulus«).

The equivalence relation between interaural time and level differences for short stimuli

Jörg Damaschke, Michael Granzow, Helmut Riedel, Birger Kollmeier
AG Medizinische Physik, University of Oldenburg, D-26111 Oldenburg

Abstract *Two measurement methods were used to determine the time-intensity ratio (TIR), i. e. the interaural level difference (ILD) that produces the same lateralization effect as a given interaural time difference (ITD) and vice versa. 950 ms trains of pulses (each having 0.1 ms duration with 50 ms interstimulus interval) were used. The first method used to obtain the TIR was a matching experiment, where ILD and ITD were adjusted in order, to yield the same lateralization effect. The second method was a trading experiment, where ILD and ITD were adjusted in an opposite direction so that the combination of both yielded a lateralization effect in the middle of the head (i. e., ILD and ITD cancel each other out). In addition, two different definitions of the reference level were used, namely level definition A: test and reference signals had the same RMS value (arithmetical mean of the power across both ears) and B: symmetrical level change (i. e., geometrical mean of the signal power across both ears). Five normal listeners participated voluntarily in this experiment. While the choice of reference level definition had virtually no influence on the results, a significant difference was shown for the time-intensity relation between the matching experiments and the trading experiments. Also, the interindividual variation in the time-intensity relation was very large compared to that of the intraindividual relation. The trading experiments led to unnatural localization events due to the unnatural combination of interaural time and level differences that in some cases confused the subjects. The matching experiments, on the other hand, use interaural time and level differences that provide a more natural lateralization cue and thus appear to be more appropriate for estimating the time-intensity ratio. For matching experiments at a level of 60 dB nHL, the time-intensity ratios obtained were between 90–100 $\mu\text{s}/\text{dB}$, while these values varied between 53 and 61 $\mu\text{s}/\text{dB}$ for the trading experiments.*

Although an individual estimation of the TIR appears to be the preferred method, the average TIR for matching experiments is useful for a variety of binaural experiments. One particular example are EEG recordings with binaural stimuli as a function of appropriate interaural parameter changes, where the stimuli employed are very useful.

Key words: *binaural hearing
time-intensity ratio (TIR)
trading experiments
lateralization of click trains*

Einleitung

Das binaurale Hören (das Hören mit beiden Ohren) ermöglicht es, Schallquellen im Raum zu orten und unterschiedliche Schallquellen voneinander zu trennen. Zusätzlich ist es uns möglich, uns auf eine bestimmte Schallquelle zu konzentrieren und störende Nebengeräusche zu unterdrücken, wie es zum Beispiel bei einem Gespräch auf einer Party geschieht. Möglich werden diese Leistungen durch einen Vergleich der an beiden Ohren anliegenden Signale auf zentraler Ebene. Dort werden unter anderem interaurale (zwischen beiden Ohren auftretende) Pegel- und Laufzeitdifferenzen ausgewertet (im folgenden als **ILD**: Interaural Level Difference und **ITD**: Interaural Time Difference bezeichnet). Sie stellen die wesentlichen physikalischen Parameter dar, die zur Lokalisation eines Signals auf zentraler Ebene benutzt werden können.

In unserer natürlichen akustischen Umgebung (d. h. im Freifeld) treten beide Parameter in bestimmten Kombinationen auf, die dazu führen, dass die zugehörigen Schallquellen im allgemeinen außerhalb des Kopfes geortet werden. Man spricht dabei von Lokalisation dieser externen Quellen.

Im Labor, bei der Darbietung akustischer Reize über Kopfhörer, können interaurale Zeit- und Pegeldifferenzen dagegen unabhängig voneinander variiert werden, so dass i. Allg. keine natürlichen, außerhalb des Kopfes lokalisierten Schallereignisse mehr wahrgenommen werden, sondern eine im Kopf lokalisierte Wahrnehmung resultiert. Um diese beiden Situationen voneinander zu unterscheiden, spricht man bei letzterer von Lateralisation im Gegensatz zur Lokalisation. Lateralisiert wird ein Signal mit einer aufgeprägten ILD und/oder ITD in der Regel auf einer Linie zwischen beiden Ohren. Bietet man einer Versuchsperson (VP) ein Signal zum Beispiel auf dem rechten Ohr etwas lauter (ILD) oder etwas früher (ITD) als auf dem linken Ohr an, so verschiebt sich die Wahrnehmung aus der Mitte des Kopfes zur rechten Seite. Die Wirkungen von ILD und ITD können sich je nach Einstellung addieren oder einander entgegenwirken.

Die den im Folgenden beschriebenen Versuchen zu Grunde liegende Fragestellung war, welche ITD und ILD dieselben Lateralisationen bewirken und welche interindividuellen Unterschiede dabei auftreten. Diese Abhängigkeiten werden in der Literatur häufig als sogenanntes **time-intensity-ratio (TIR)** angegeben, d. h. als Verhältnis zwischen ITD und dazu äquivalenter ILD und wird im allgemeinen in $\mu\text{s}/\text{dB}$ angegeben. Die Ergebnisse der hier durchgeführten Versuche sind Voraussetzung für die Konstruktion von Stimuli später durchgeführter EEG-Messungen mit verschiedenen Kombinationen binauraler Parameter. Dabei sollten Stimuli verwendet werden, welche die VPen psychoakustisch möglichst gleich wahrnehmen, das hieß in diesem Falle, gleich lateralisieren. Da in der Literatur eine breite Streuung der Ver-

läufe von TIRs bei unterschiedlichen VPen für transiente Signale beschrieben wird (z. B. bei *David et al. (1959)*, *Furst et al. (1985)*, *Kinkel (1990)* oder *Moushegian und Jeffress (1959)*), liegt eine eigene Bestimmung dieser Abhängigkeiten für die beteiligten VPen und Stimuli nahe.

Methoden

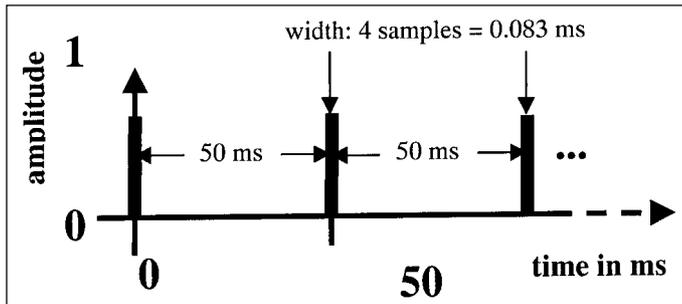
Versuchspersonen: Es nahmen fünf männliche, audiologisch unauffällige (Audiogramm im Bereich zwischen 0,125 und 8 kHz unter 20 dB Hörverlust) Versuchspersonen im Alter von 25 bis 35 Jahren an den Messungen teil. Alle hatten Erfahrungen mit psychoakustischen Experimenten.

Messapparatur: Alle Messungen wurden mit der Signalverarbeitungssoftware SI (Signalverarbeitung Interaktiv, entwickelt am 3. Physikalischen Institut in Göttingen) gesteuert, mit der auch die Signale mit einer Abtastrate von 48 kHz generiert wurden.

Die VP saß während der Messung in einer doppelwandigen akustisch abgeschirmten Kabine (Typ: IAC 1200 A-CJ). Über abgeschirmte Einsteckhörer der Firma Etymotic Research, Typ ER-2, bekam die VP die Stimuli angeboten. Ihre Antwort gab sie per Tastatur ein. Bei der Ruhehörschwellenmessung (das ist die Messung zur Bestimmung der Schwelle, bei der die VP den Stimulus gerade noch wahrnimmt) wurde zur Anzeige des gegebenenfalls zu erwartenden akustischen Signals der eine Kanal eines Audiometrieverstärkers auf eine LED gelegt, über den anderen Kanal wurde der Stimulus angeboten.

Stimulus: Gemessen wurde mit einer Druckpulsfolge von insgesamt 950 ms Länge und einem Pegel von 50, 60 bzw. 70 dB nHL. Diese enthielt 20 Rechteckpulse von etwa 0,1 ms Länge (die genaue Länge eines Einzelpulses beträgt 4 samples, was bei einer Abtastfrequenz von 48 kHz einer Dauer von 83 μs entspricht), die jeweils 50 ms voneinander getrennt waren. Ein Schema dieser Pulsfolge ist in Abb. 1 zu sehen.

Im Vergleich zu einem 1 kHz Sinuston hat bei gleicher digitaler Vollaussteuerung die Pulsfolge einen um 2,4 dB geringeren Pegel. Zur Kalibrierung der Apparatur wurde ein Messverstärker (B&K Measuring Amplifier TYPE 2610 (Skala SA 0253) mit einem Kalibriertongenerator (B&K Acoustical Calibrator TYPE 4231: 94 dB SPL, 1000 Hz) kalibriert. Über den benutzten ER-2-Kopfhörer, ein künstliches Ohr (B&K Ear Simulator TYPE 4157) und einen Vorverstärker (B&K Preamplifier TYPE 2669 No. 2025805) wurde die Pulsfolge an den Messverstärker gegeben und der zugehörige Pegel in dB SPL nach einer Mittelungszeit von 20 s (dies entspricht der Verstärkereinstellung: »averaging time«: »slow«) vom Messverstärker abgelesen.



Die Kalibrierung auf dB nHL wurde aufgrund der Ruhehörschwellenmessung mit 5 normalhörenden Versuchspersonen durchgeführt (s. u.). Dabei entsprechen 0 dB nHL = 12,6 dB SPL.

Messverfahren: Bestimmung der Ruhehörschwelle: Für alle 5 VPen wurde insgesamt dreimal, an drei unterschiedlichen Tagen, monaural für beide Ohren die Ruhehörschwelle für den benutzten Stimulus mit einem adaptiven 3-AFC (alternative-forced-choice: Eine von drei Alternativen muss gewählt werden) one-up-two-down² Verfahren bestimmt. »Adaptiv« bedeutet, dass sich die Schrittweite während der Messung ändert. Den VPen wurde dreimal ein optisches Signal angeboten. Mit einem dieser drei Signale wurde synchron der Stimulus abgespielt. Die VPen mussten angeben, bei welchem Signal dies der Fall war. Die Schrittweite zu Beginn der Messung betrug 8 dB und wurde während der Messung dreimal halbiert. Bei einer Schrittweite von 1 dB begann die sogenannte Messphase, in der über die Werte der folgenden 6 Umkehrpunkte gemittelt wurde.

Matching- und trading-Versuche: Die vier psychoakustischen Messungen wurden mit einem adaptiven 2-AFC-Verfahren durchgeführt. Bei den Messungen, bei denen die ITD variiert wurde, wurde mit einer Schrittweite von 83,3 μ s begonnen (dies entspricht bei einer Abtastrate von 48 kHz gerade 4 samples, da 1 Abtastpunkt = 20,83 μ s). Diese wurde beim ersten und dritten Umkehrpunkt halbiert. Bei einer Schrittweite von einem sample begann die sogenannte Messphase, ab der die folgenden sechs Umkehrpunkte zur Bestimmung des Messwertes herangezogen wurden. Die Schrittweite betrug bei den Messungen, bei denen die ILD variiert wurde, am Anfang 4 dB, wurde ebenfalls bei den Umkehrpunkten eins und drei halbiert und endete in der Messphase bei 1 dB. Die Bestimmung des Messwertes war dieselbe wie bei den Messungen mit der Variation der ITD.

² One-up-two-down: Dies bedeutet, dass nach einer falschen Antwort der Pegel angehoben wird und nach zwei richtigen Antworten der Pegel verringert wird (siehe z. B. Levitt 1971).

Abb. 1: Schema des Stimulus der psychoakustischen Versuche. Eine 950 ms lange Druckpulsfolge, die 20 Pulse von etwa 0,1 ms Länge enthielt, die jeweils 50 ms voneinander getrennt waren. Die Pulsfolge wurde bei einem Pegel von 50, 60 und 70 dB nHL angeboten.

Fig. 1: Schematic plot of the stimulus employed: A 950 ms pulse train consisting of 20 pulses was employed. Each pulse had a duration of 0.1 ms and an interstimulus interval of 50 ms. The pulse train was presented at a level of 50, 60, and 70 dB nHL. To obtain this level definition, a threshold in quiet of the stimulus was obtained in a pre-measurement and the level of the pulse train was obtained with a level meter set at »slow«.

Jede der vier im folgenden Abschnitt beschriebenen psychoakustischen Versuche wurde von jeder der 5 VPen dreimal pro Pegel durchgeführt. Bei drei unterschiedlichen Pegeln ergaben sich somit 36 Messungen. Wie im Abschnitt »Messparadigmen« erläutert, gab es zwei unterschiedliche binaurale Pegeldefinitionen. Somit verdoppelt sich die Anzahl der Messungen auf insgesamt 72. Jede Pegeldefinition wurde separat gemessen, d. h. es gab zwei große Blöcke à 36 Messungen. Diese großen Blöcke wurden unterteilt in drei kleinere Blöcke à 12 Messungen, in denen in randomisierter Reihenfolge jede der vier Messungen einmal pro Pegel vorkam.

Messparadigmen: Bei den im folgenden beschriebenen psychoakustischen Messungen werden den VPen unterschiedliche Kombinationen von ILD und ITD angeboten. Diese sind in Abb. 2 dargestellt. Eine positive ILD bedeutet, dass der Pegel auf dem rechten Ohr höher war als auf dem linken. Eine positive ITD besagt, dass der Stimulus früher am rechten Ohr ankam. In beiden Fällen kommt es zu einer Lateralisation zur rechten Seite.

Es wurden zwei verschiedene Messparadigmen durchgeführt: Zum einen sollten zwei Signale jeweils durch die Variation von ILD oder ITD so abgestimmt werden, dass sie gleich lateralisiert werden, zum anderen wurden ILD und ITD so aufeinander abgestimmt, dass sich ihre Wirkungen bezüglich der Lateralisation genau aufheben. Im ersten Fall spricht man von »matching«, letzteres wird als »trading« bezeichnet.

Bei allen Versuchen gab es zwei Signale – das Referenz- und das Testsignal – die in randomisierter Reihenfolge nacheinander der VP angeboten wurden. Zwischen den beiden Signalen gab es eine 500 ms lange Pause. Somit ergibt sich eine Gesamtlänge von 2,4 s für die gesamte Sequenz (2 x 950 ms + 500 ms). Die VP sollte angeben, ob sie das Referenz- oder das Testsignal weiter rechts lateralisiert hatte. Im folgenden werden die vier Versuche beschrieben:

- 1. matching mit vorgegebener ILD:** Es wurde die interaurale Zeitdifferenz des Testsignals ermittelt, welche die gleiche Lateralisation hervorruft wie eine positive interaurale Pegeldifferenz des Referenzsignals von 10 dB. Der Wert von 10 dB wurde gewählt, da dieser im allgemeinen eine deutliche, aber nicht extreme Lateralisation bewirkt (siehe *Furst et al. (1985)*, *Kinkel (1990)* oder *Zwicker und Fastl (1999)*). Aufgrund der Antworten der VP wurde die ITD des Testsignals so eingeregelt, dass Referenz- und Testsignal gleich lateralisiert wurden.
- 2. matching mit vorgegebener ITD:** Es wurde die ILD bestimmt, welche die gleiche Lateralisation hervorruft wie eine positive ITD von 400 μ s. Der Wert von 400 μ s wurde aus demselben Grund gewählt wie der 10 dB-Pegel der ILD. Aufgrund der Antworten der VP wurde die ILD so eingeregelt, dass Referenz- und Testsignal gleich lateralisiert wurden.
- 3. trading mit vorgegebener ILD:** ILD und ITD des Referenzsignals waren Null ($ILD = ITD = 0$), so dass dieses Signal psychoakustisch idealerweise zentral wahrgenommen wird. Es wurde die ITD bestimmt, die benötigt wird, um eine ILD von 10 dB zu kompensieren. Die VP regelte durch ihre Antworten für dieses Signal zusätzlich eine ITD ein, die so groß war, dass Test- und Referenzsignal gleich lateralisiert wurden.
- 4. trading mit vorgegebener ITD:** Es wurde die ILD bestimmt, die benötigt wird, um eine ITD von 400 μ s zu kompensieren. Wieder waren die Werte für ILD und ITD beim Referenzsignal gleich Null ($ILD = ITD = 0$). Dem Testsignal wurde eine positive ITD von 400 μ s aufgeprägt. Aufgrund der Antworten der VP wurde die zusätzlich aufgeprägte ILD so eingestellt, dass sich die Lateralisationen von Test- und Referenzsignal entsprachen.

Da nicht ausreichend geklärt ist, ob binaurale Reize über die Leistungen beider Kanäle (lineare Summation) oder mittels der jeweiligen Pegel (logarithmische Summation) psychoakustisch summiert werden, musste ausgeschlossen werden, dass die VPen die Stimuli aufgrund von Lautheitsunterschieden bei nicht adäquater Wahl der Referenzpegel unterscheiden konnten. Daher wurden diese vier Versuche mit zwei unterschiedlichen Pegeldefinitionen durchgeführt:

- A. Test- und Referenzsignal haben identischen RMS (root-mean-square)-Werte:** Vor der Verstärkung auf den gewünschten Pegel von 50, 60 oder 70 dB nHL wurden der linke und der rechte Kanal so skaliert, dass die Summen beider Kanäle von Test- und Referenzsignal gleich waren. Dies bedeutet, dass die arithmetischen Mittel der Leistungen von Test- und Referenzsignal gleich waren.

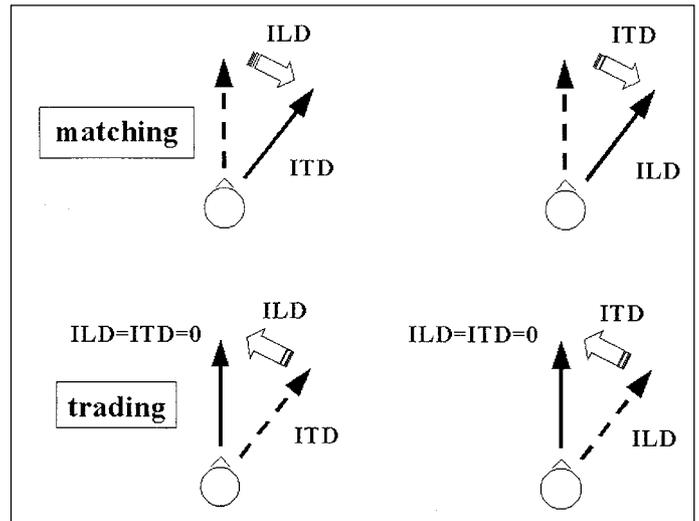


Abb. 2: Die vier Kombinationen von ILD und ITD der psychoakustischen Versuche. In allen vier Fällen gab es ein zu beurteilendes Signal (gestrichelte Linie) und ein Referenzsignal (durchgezogene Linie): Oben: **Matching:** links: Eine ITD von 400 μ s wurde vorgegeben und die ILD wird adaptiv so eingeregelt, bis die Lateralisationen gleich waren. Rechts: Eine ILD von 10 dB wurde vorgegeben und die ITD so eingeregelt, bis die Lateralisationen gleich waren. Unten: **Trading:** links: Eine 400 μ s ITD wurde vorgegeben und die ILD so eingeregelt, bis die Wahrnehmung der des Referenzsignals entsprach. Rechts: Eine 10 dB ILD wurde vorgegeben und die ITD so eingeregelt, bis die Wahrnehmung der des Referenzsignals entsprach. Die Werte für ILD und ITD waren für das Referenzsignal gleich Null ($ILD = ITD = 0$).

Fig. 2: Schematic plot of the four experimental conditions employed. The matching experiments are given in the upper row and the trading experiments in the lower row. The probe signal is sketched by a broken line, the reference signal by a solid line. In the upper left experiment, an ITD of 400 μ s was fixed as a reference and the subject's task was to adjust the interaural level difference to match the subjective lateralization. Similarly, the interaural level difference of 10 dB was prefixed in the upper right panel, where the interaural time difference had to be adjusted to match the subjective impression. In the trading experiment a reference interaural time and interaural level difference of 0 was used. In the left experiment, an ITD of 400 μ s was fixed and the ILD had to be adjusted so that a combination of both yielded the same lateralization effect as the reference. In the right experiment, an ILD of 10 dB was predetermined and the ITD was adjusted to obtain a combined effect that matched the reference condition.

B. »Symmetrische Pegelschere«: Die ILD des angebotenen Signals wurde symmetrisch (in dB) um den gewünschten Pegel verteilt. Dies entspricht dem geometrischen Mittel der Leistung, das größer oder gleich dem arithmetischen Mittel ist. Fall B führte daher zu etwas höheren Pegeln als Fall A.

Beispiel: Bei einem Pegel von 60 dB nHL und einer ILD von 10 dB wurde das Signal des linken Kanals im Fall »A« auf etwa 52,6 dB nHL und das des rechten Kanals auf etwa 62,6 dB nHL verstärkt. Wenn man den linken und den rechten Kanal addiert, resultiert ein Pegel von 63 dB. Im Fall »B« wurde das Signal des linken Kanals auf 55 dB nHL und das Signal des rechten Kanals auf 65 dB nHL (Summe: 65,4 dB) verstärkt. Zwischen beiden Pegeldefinitionen unterscheiden sich die RMS-Werte und somit die summierten Pegel für Referenz- bzw. Testsignal (in diesem Beispiel um circa 2,4 dB), während das jeweilige Signal ohne ILD den summierten Pegel von 63 dB aufweist.

Ergebnisse

Ruhehörschwellen

Die Ruhehörschwellen der VPen sind in Tab. 1 aufgeführt und in Abb. 3 graphisch dargestellt. Angegeben sind die einzelnen Messwerte der Schwellenpegel in dB SPL. Die Abweichungen zwischen linkem und rechtem Ohr sind nicht in der Apparatur zu suchen, da derselbe Einsteckhörer für beide Ohren benutzt wurde. Da die Reihenfolge der Messungen für das linke und rechte Ohr randomisiert wurden, kommen die Abweichungen auch nicht durch Ermüdung der VPen zustande. Die VPen 2 und 3 hören links besser als rechts (VP 2 etwa 3 dB, VP 3 etwa 4 dB). Der Mittelwert von 12,6 dB SPL wurde bei der Pegelfestlegung der weiteren Experimente als 0 dB nHL zu Grunde gelegt.

Tab. 1: Die Einzelergebnisse der ermittelten Ruhehörschwellen der fünf VPen in Ruhe. Die drei Werte wurden an drei unterschiedlichen Tagen bestimmt und sind in dB SPL angegeben.

Table 1: Individual absolute threshold in quiet for the test stimulus employed. The three values were obtained on three different days.

subject	first value in dB SPL	Second value in dB SPL	third value in dB SPL
1 left ear 1 right ear	19.5 18.5	14.5 13.0	16.5 15.0
2 left ear 2 right ear	12.5 15.0	11.5 15.5	14.0 17.0
3 left ear 3 right ear	7.5 11.0	5.5 11.0	8.5 12.5
4 left ear 4 right ear	17.0 15.5	10.0 13.0	13.0 13.5
5 left ear 5 right ear	9.5 11.5	9.5 8.5	9.5 10.0

Ergebnisse der matching- und trading-Versuche

Die Ergebnisse der interauralen Vergleichsversuche sind in den Abbildungen 4 bis 6 zusammengefasst. Die Daten der matching-Versuche wurden in den Abbildungen mit durchgezogenen Linien verbunden, die der trading-Versuche mit gestrichelten Linien, um die pegelabhängigen Tendenzen aufzuzeigen.

Abb. 4 zeigt die Ergebnisse der matching- und trading-Versuche beider Pegeldefinitionen bei Vorgabe einer ILD von 10 dB, Abb. 5 die Ergebnisse bei Vorgabe einer ITD von 400 μ s. In der oberen Reihe sind jeweils die Ergebnisse der matching-Versuche, in der mittleren Reihe die Ergebnisse der trading-Versuche und in der unteren Reihe die Mittelwerte beider Experimente im Vergleich dargestellt. Aufgetragen ist jeweils der Absolutwert der entsprechenden ILD oder ITD über den Pegel, da strenggenommen ILDs und ITDs entgegengesetzte Vorzeichen aufweisen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Vorzeichen jedoch weggelassen.

Die Werte der einzelnen VPen sind gut reproduzierbar. Sie weichen unter den verschiedenen VPen aber wesentlich voneinander ab. Dies wird deutlich in allen Plots der Abb. 4 und 5. Auffällig sind dort die großen interindividuellen Standardabweichungen (Standardabweichungen zwischen den verschiedenen VPen). Sie reichen bei den ITDs bis zu 264 μ s (vgl. Abb. 4) und bei den ILDs bis zu 2,9 dB (vgl. Abb. 5). Die intraindividuellen Standardabweichungen (Standardabweichungen innerhalb einer VP) sind dagegen bei allen Messungen deutlich kleiner als die interindividuellen Standardabweichungen. Bei den ITDs liegen erstere meist unter 100 μ s, oft sogar unter 30 μ s, bei den ILDs meist unter 1 dB, oft sogar unter 0,5 dB.

In Abb. 4 zeigen sowohl die Kurven für Pegeldefinition »A« als auch die für Pegeldefinition »B« einen Abwärtstrend. Die

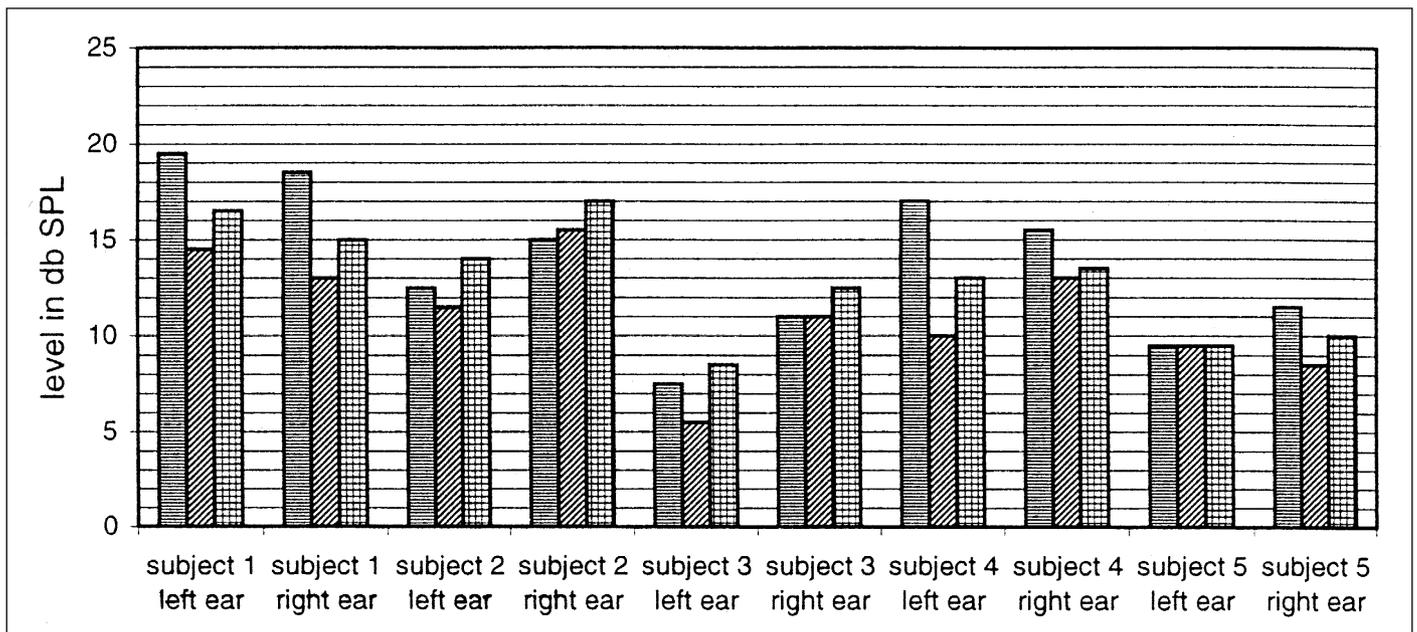


Abb. 3: Graphische Darstellung der Ergebnisse des Detektionsversuchs in Ruhe für den verwendeten Stimulus. Siehe auch Tab. 1.

Fig. 3: Graphic of results of the detection experiment in quiet for the stimulus used. See also Table 1.

Abweichungen der jeweiligen Kurven zwischen den beiden Pegeldefinitionen sind sehr klein (Abweichungen $\leq 52 \mu\text{s}$, eine Ausnahme mit $123 \mu\text{s}$). Die Kurven der matching-Experimente liegen unterhalb der Kurven der trading-Experimente.

Für beide Pegeldefinitionen hat der Abwärtstrend beim trading eine flachere, negative Steigung als beim matching. Der Abfall beträgt bei Pegeldefinition »A« beim matching etwa $190 \mu\text{s}$ pro 20 dB Pegeländerung und $60 \mu\text{s}$ pro 20 dB Pegeländerung beim trading. Bei Pegeldefinition »B« betragen diese Werte etwa $330 \mu\text{s}$ bzw. $50 \mu\text{s}$ pro 20 dB Pegeländerung.

Die Mittelwertkurven in Abb. 5 beider Experimente zeigen für beide Pegeldefinitionen eine ansteigende Tendenz, wobei genau wie in Abb. 4 kein großer Unterschied zwischen den Pegeldefinitionen, dafür aber ein Unterschied zwischen den Werten für das matching- und das trading-Experiment auftritt. Die matching-Kurve liegt im Mittel bei Pegeldefinition »A« 1,8 dB unter der trading-Kurve, wobei sich die Standardabweichungen überschneiden. Dieser Trend zeigt sich auch für Pegeldefinition »B«, wo die matching-Kurve im Mittel etwa 3 dB unter der trading-Kurve liegt.

Mit Ansteigen des Pegels wurden immer größere ILDs benötigt, um eine gleichwertige Lateralisation zu realisieren oder um die vorgegebene ITD von $400 \mu\text{s}$ zu kompensieren. Der Anstieg beträgt im Fall gleicher RMS-Werte für Test- und Referenzsignal (Pegeldefinition »A«) für beide Kurven 2,4 dB pro 20 dB Pegeländerung. Im Fall der »symmetrischen Pegelschere« (Pegeldefinition

»B«) sind die Steigungen unterschiedlich – etwa 2 dB pro 20 dB Pegeländerung bei den matching-Versuchen und etwa 4 dB pro 20 dB Pegeländerung bei den trading-Versuchen.

Verknüpft man jeweils die beiden matching- und die beiden trading-Experimente zu einer Darstellung, so kann man die ILD über die ITD auftragen und erhält pro Pegel zwei Messwerte. Dies ist in Abb. 6 zu sehen. Bei den Messungen wird einmal eine ILD, ein anderes Mal eine ITD vorgegeben. Bei dieser Art der Darstellung geht man davon aus, dass die Messungen symmetrisch sind. Dies bedeutet, dass man sowohl für den Fall einer Vorgabe der ILD als auch für den Fall einer Vorgabe der ITD zu denselben time-intensity-ratios gelangt. Dies ist bei den Daten von Furst et al. (1985) und Kinkel (1990) der Fall.

Das linke Bild der Abb. 6 zeigt **matching-time-intensity-ratios (MTIR)**, das rechte **trading-time-intensity-ratios (TTIR)**. Pro Bild ergeben sich nach den durchgeführten Versuchen zwölf Messpunkte, d. h. vier Messpunkte pro Pegel (Raute = 50 dB nHL, Quadrat = 60 dB nHL, Dreieck = 70 dB nHL, leere Symbole zeigen Pegeldefinition »A«, ausgefüllte Symbole Pegeldefinition »B«).

Bei der Vorgabe einer ILD wird die zugehörige ITD eingestellt und umgekehrt. Deshalb wurden die interindividuellen Standardabweichungen einmal horizontal und einmal vertikal eingezeichnet. Zur leichteren Veranschaulichung der Standardabweichungen sind die Symbole versetzt dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Vorgabe immer eine ILD von 10 dB oder eine ITD von $400 \mu\text{s}$ war.

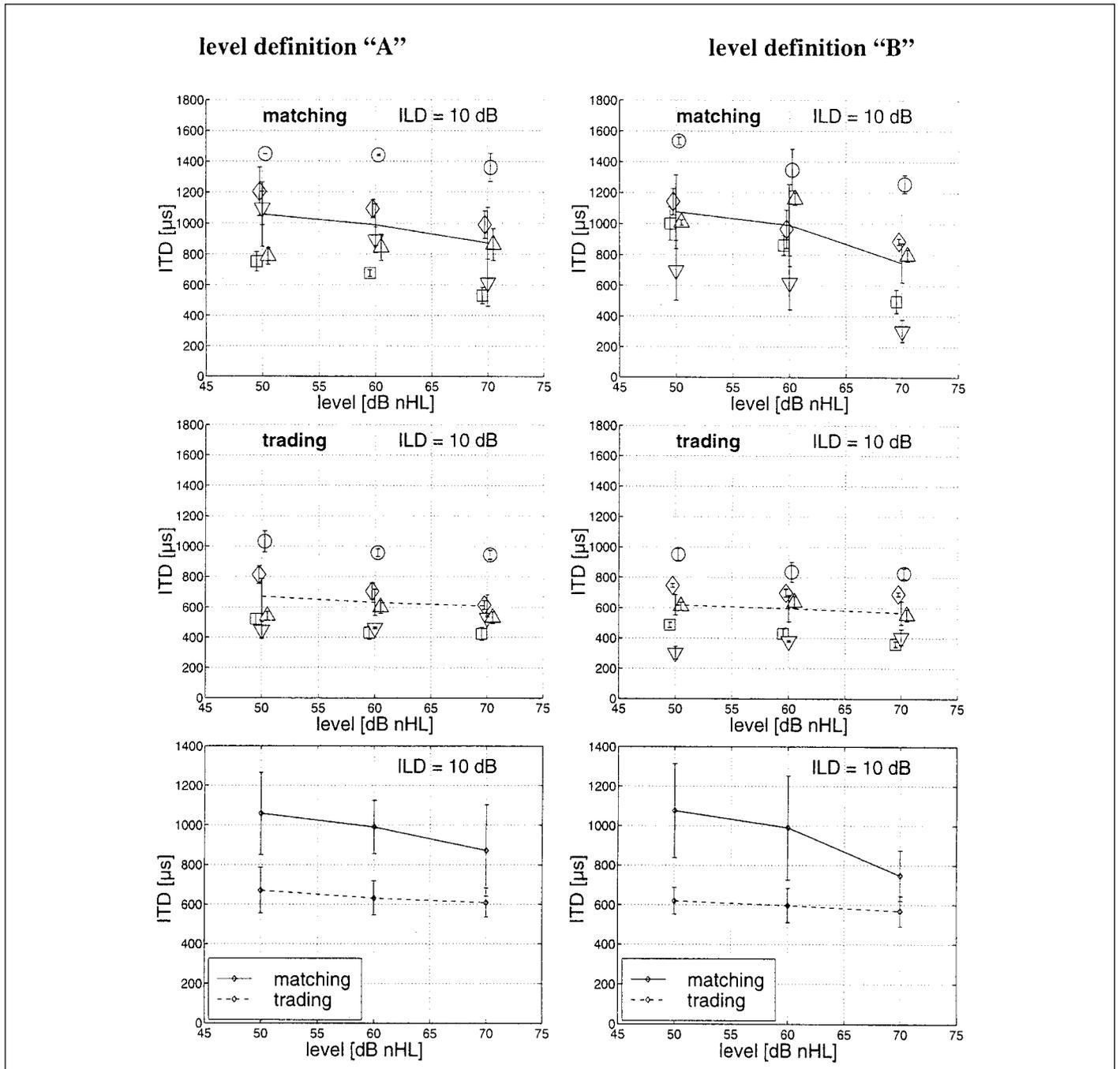


Abb. 4: Die Ergebnisse der einzelnen VPen für die matching- und trading-Versuche bei der Vorgabe einer ILD von 10 dB. **Oben:** Ergebnisse der matching-Versuche. **Mitte:** Ergebnisse der trading-Versuche. **Unten:** Vergleich der Mittelwerte der matching- und trading-Versuche (**Vorsicht:** Anderer Maßstab). **Links:** Verwendung der Pegeldefinition »A« (gleiche RMS-Werte). **Rechts:** Verwendung der Pegeldefinition »B« (symmetrische Pegelschere).

Fig. 4: Individual results for five subjects in both the matching and trading experiments for a prefixed interaural level difference of 10 dB. Upper panels: results of the matching experiments. Middle panels: results of the trading experiments. Lower panels: comparison of the average value of the matching and trading experiments including the interindividual standard deviation (note: the y axis is expanded). Left panels: results obtained with level definition »A« (arithmetical mean of power at both ears). Right panels: results obtained with level definition »B« (geometrical mean across the signal power at both ears).

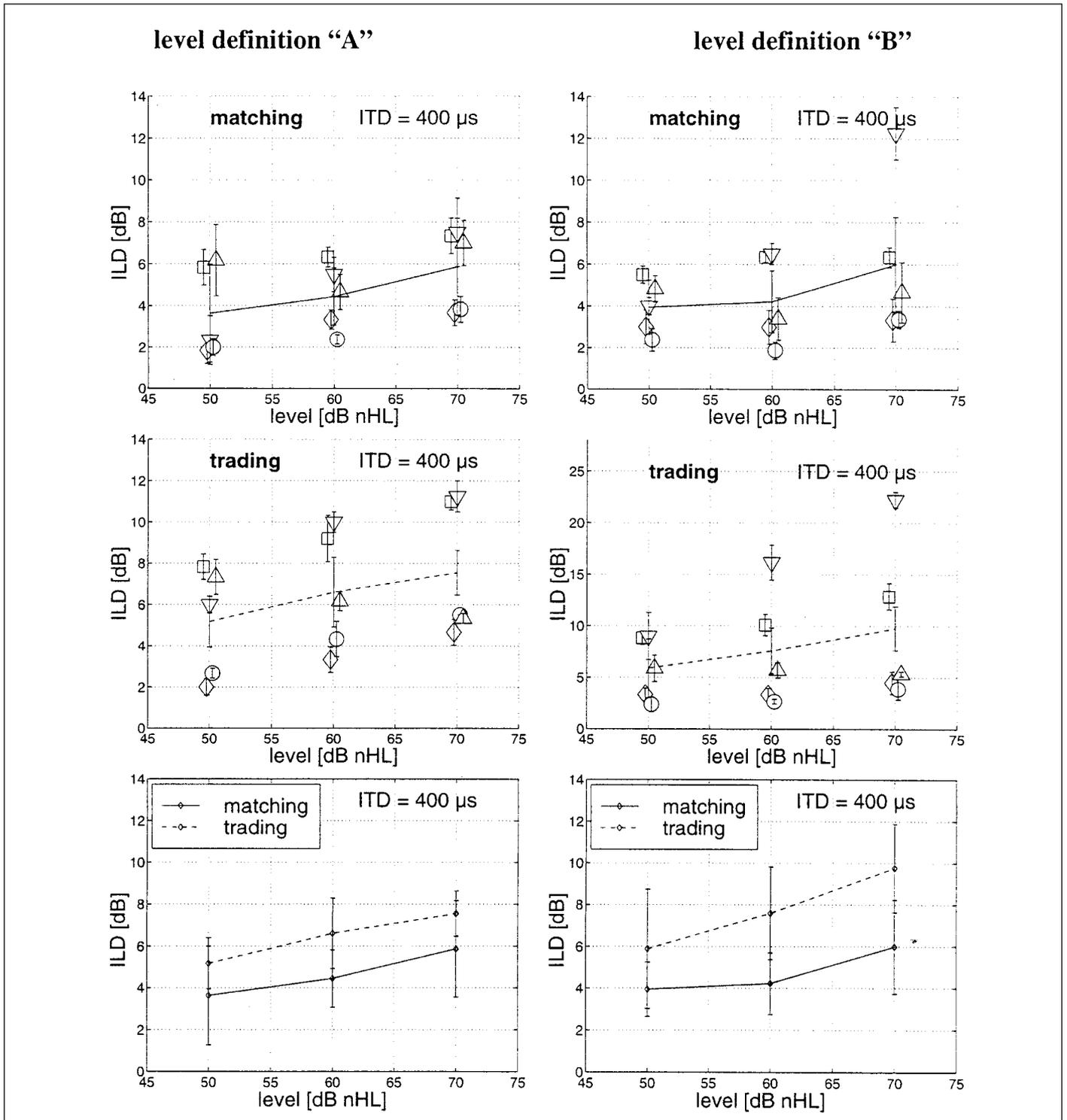


Abb. 5: Die Ergebnisse der einzelnen VPen für die matching- und trading-Versuche bei der Vorgabe einer ITD von 400 μ s. **Oben:** Ergebnisse der matching-Versuche. **Mitte:** Ergebnisse der trading-Versuche (**Vorsicht:** Abweichender Maßstab im rechten Bild). **Unten:** Vergleich der Mittelwerte der matching- und trading-Versuche. **Links:** Verwendung der Pegeldefinition »A« (gleiche RMS-Werte). **Rechts:** Verwendung der Pegeldefinition »B« (symmetrische Pegelschere).

Fig. 5: Same as Fig. 4, but using a predetermined interaural time difference of 400 μ s.

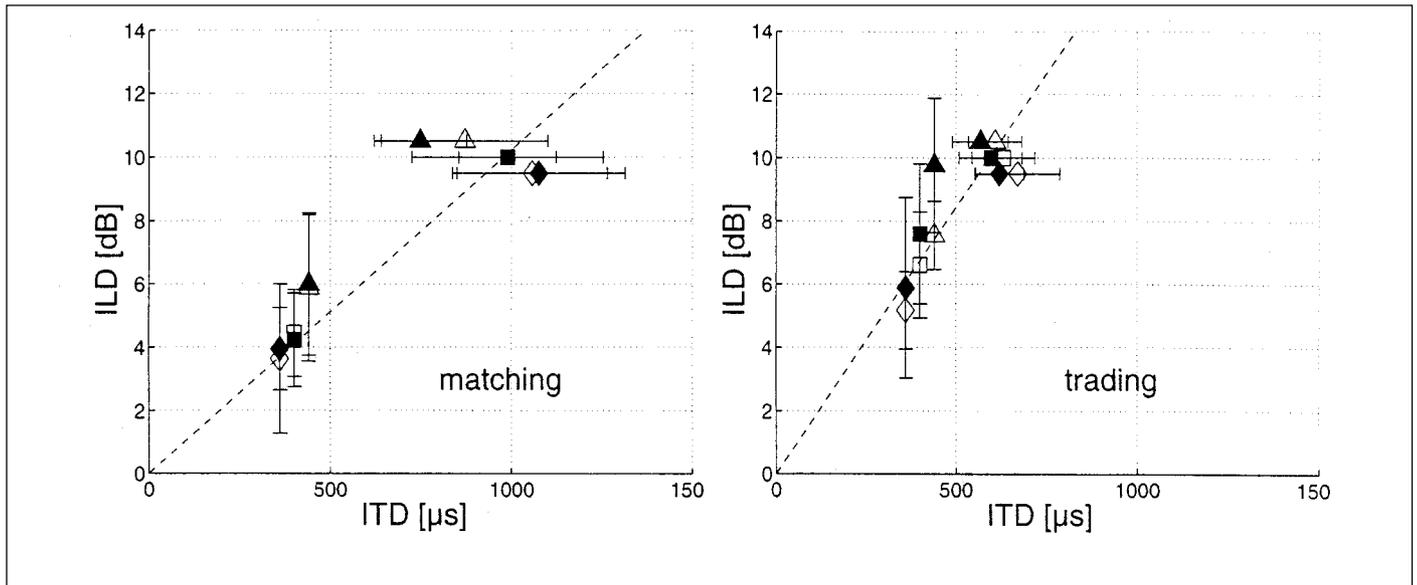


Abb. 6: **time-intensity-ratios**: Aufgetragen ist die jeweilige ILD über die dazugehörige ITD bei drei unterschiedlichen Pegeln (Raute = 50 dB nHL, Quadrat = 60 dB nHL, Dreieck = 70 dB nHL). Die offenen Symbole zeigen Pegeldefinition »A«, die ausgefüllten Symbole Pegeldefinition »B«. Die linken Symbole liegen alle bei 400 μ s (Abszisse). Sie sind leicht versetzt gezeichnet, damit man die Standardabweichungen besser sieht. Dasselbe gilt für die rechten Symbole. Sie liegen alle bei 10 dB (Ordinate). **Links**: Die Abhängigkeit von ILD und ITD bei den matching-Versuchen. **Rechts**: Die Abhängigkeit von ILD und ITD bei den trading-Versuchen.

Die gestrichelten Geraden zeigen eine lineare Annäherung an die jeweiligen 60 dB nHL-Daten, um den Unterschied zwischen den beiden Messmethoden zu verdeutlichen.

Fig. 6: Time intensity ratios: The interaural level difference (ILD) is plotted as a function of the related interaural time difference for three different stimulus levels (rhombs: 50 dB nHL, squares: 60 dB nHL, triangles: 70 dB nHL). The open symbols denote level definition »A« (arithmetical mean), whereas the filled symbols denote level definition »B«, i.e., geometrical mean. In each panel, the values obtained for a fixed interaural level difference of 10 dB and the values for a predetermined interaural time difference of 400 μ s are both plotted. Note that the trading experiment (right panel) yields very different average results than the matching experiment (left panel). Also note that for reasons of clarity, the data points have been shifted slightly across the ordinate or abscissa respectively.

Zur Veranschaulichung, dass sich die Verhältnisse zwischen ILD und äquivalenter ITD zwischen den matching- und den trading-Versuchen unterscheiden, sind die jeweiligen 60 dB nHL Daten mit einer Ursprungsgeraden³ angepasst worden. Aufgrund der hohen Standardabweichungen und der wenigen Messpunkte pro Pegel wird an dieser Stelle nicht ein festes MTIR oder TTIR für einen bestimmten Pegel angegeben, sondern lediglich der Vergleich zwischen den Experimenten angestellt. Die MTIRs und TTIRs behalten an den berechneten Mittelwerten aber ihre Bedeutung. Wie die entsprechenden Werte der MTIRs und TTIRs

außerhalb der bestimmten Punkte inter- bzw. extrapoliert werden müssen, kann auf Grund der hohen Standardabweichungen mit den hier durchgeführten Messungen nicht vorhergesagt werden.

Diskussion

Fünf Versuchspersonen führten sowohl matching- als auch trading-Versuche durch, bei denen einmal eine ILD und einmal eine ITD vorgegeben wurde. Sowohl bei den matching- als auch bei den trading-Versuchen sind die interindividuellen Werte für die angepassten ITDs und ILDs sehr unterschiedlich. Intraindividuelle Standardabweichungen sind sehr viel geringer als die interindividuellen, was auf eine hohe Reproduzierbarkeit der Messungen hinweist. Allerdings scheinen die binauralen audito-

³ Die angepasste Gerade verläuft durch den Ursprung, da anzunehmen ist, dass bei einer ILD (ITD) von 0 dB (0 ms) keine ITD (ILD) notwendig ist, um diese zu matchen oder zu kompensieren.

rischen Funktionen der Parameter ILD und ITD interindividuell sehr unterschiedlich ausgeprägt zu sein.

Probleme der Messungen:

a) Bei trading-Experimenten kommt es zu sogenannten Mehrfachhöreignissen, die sich störend auswirken und eine exakte Lateralisation nicht immer zulassen. Für eine VP war die vorgegebene ILD von 10 dB bereits extrem. Die von ihr eingestellte ITD wurde so groß, dass die Wahrnehmung der Pulsfolge nicht mehr »kompakt« war und im Extremfall der linke und rechte Stimulus bereits getrennt wahrgenommen wurden. Nach *Algom et al.* (1988) geschieht dies bei ca. 2 bis 4 ms, davor erscheint der Stimulus zunehmend diffus. Dadurch kam es bei dieser VP nicht mehr zu einer reinen Lateralisation. Deren Ergebnisse zeigen bis auf die großen Werte allerdings keine weiteren Auffälligkeiten.

Für matching-Experimente gilt das Gleiche: Nach *Algom et al.* (1988) kann mit Hilfe einer ILD eine extremere Lateralisation hervorgerufen werden als mit einer ITD, deren Wirkung sich auf einen kleineren Bereich beschränkt. Versucht man eine große Lateralisation, wie sie mit Hilfe einer ILD erzielt werden kann, mit Hilfe einer ITD zu erreichen, wird der Stimulus ab einer bestimmten ITD diffus wahrgenommen und nicht mehr extremer lateralisiert. Mit zunehmender ILD werden die Werte der ITD, die dieselbe Lateralisation hervorrufen, daher zunehmend ungenauer (*Furst et al.* (1985).

b) Ziel der Aufprägung einer ILD ist es, die Abschattung des einfallenden Schalls durch den Kopf zu simulieren. Diese Abschattung ist frequenzabhängig, was bei diesem Versuch nicht berücksichtigt wurde.

Aufgrund der Frequenzabhängigkeit von Beugungseffekten nehmen die natürlichen interauralen Pegeldifferenzen jedoch erst oberhalb von etwa 1 kHz einen signifikanten Betrag an, der mit zunehmender Frequenz zunimmt (siehe *Otten* (1997).

Tiefe Frequenzen werden demnach deutlich weniger von der Abschattung des Kopfes beeinflusst als höhere. Die breitbandige interaurale Pegeldifferenz der Pulsfolge stimmt daher nicht genau mit der Realität überein, die eine frequenzabhängige Abschwächung verlangen würde. Analog gilt für ITDs, dass deren Auswertung nur für tiefe Frequenzen eine Rolle spielt und keine frequenzabhängige ITD eingesetzt wurde.

Einfluss der Pegeldefinitionen: Bei Pegeldefinition »A« waren die Summen aus rechter und linker Leistung (RMS) für Test- und Referenzsignal immer gleich. Die Differenz der RMS-Werte von Referenz- und Testsignal bei Pegeldefinition »B« betrug bei einzelnen VPen dagegen bis zu 9 dB, was durch die von ihnen zum Teil sehr hoch eingestellten ILDs (bei einzelnen Messungen bis zu 22 dB) zustande kam. Dies war allerdings die Ausnahme. Die meisten einzelnen Messwerte der eingestellten ILDs lagen im Wertebereich zwischen 2 und 6 dB. Die Differenz der (binau-

ral addierten) RMS-Werte von Referenz- und Testsignal beträgt dann nur etwa 1 dB, so dass keine psychoakustisch relevante Abweichung zwischen beiden Pegeldefinitionen resultierte.

Literaturvergleich der matching- und trading-Versuche: Einen Vergleich von Literaturdaten mit den Werten dieser Arbeit zeigen die Tabellen 2 und 3.

Furst et al. (1985) führten matching-Experimente mit einer Pulsfolge bei einem Pegel von 60 dB SL⁴ durch. Sie fanden, dass eine Lateralisation, die durch eine ILD von 10 dB hervorgerufen wird, gleichwertig ist mit derjenigen, die durch eine ITD von ca. 200 bis 250 µs zustande kommt. Der entsprechende Messwert dieser Arbeit liegt mit 989 ± 264 µs bei 60 dB nHL sehr viel höher (ca. 740 bis 790 µs). Das gleiche gilt für die Vorgabe einer ITD von 400 µs. Um eine gleichwertige Lateralisation zu erzielen, benötigt man nach *Furst et al.* eine ILD von ca. 15 dB. Der entsprechende Wert dieser Arbeit liegt mit $4,2 \pm 1,5$ dB bei 60 dB nHL viel niedriger (ca. 10,8 dB).

Trading-Experimente wurden unter anderem von *David et al.* (1959) durchgeführt. Um eine ILD von 10 dB bei einem Pegel von 50 dB SL zu kompensieren, fanden sie eine ITD von ca. 560 µs. Dieser Wert liegt gerade noch innerhalb der Standardabweichung des Messwertes dieser Arbeit, der bei 671 ± 116 µs bei 50 dB nHL liegt. Der Wert verringert sich bei *David et al.* mit zunehmendem Pegel und liegt bei 70 dB SL bei etwa 380 µs. Die Tendenz der Werte dieser Arbeit ist dieselbe. Bei 70 dB nHL liegt er bei 608 ± 74 µs und somit deutlich über dem von *David et al.* gemessenen.

Die in dieser Arbeit gemessenen Werte der trading-Experimente weichen weniger von Literaturdaten ab als die matching-Werte. Es bestätigt sich, dass matching- und trading-Versuche für einzelne VPen nicht aufgrund von Literaturwerten vorhergesagt werden können.

Diese großen Abweichungen zwischen den Ergebnissen der drei Arbeiten sind nicht auf unterschiedliche Bandbreiten der Stimuli zurückzuführen (in allen drei Arbeiten wurden Pulse verwendet), sondern vielmehr auf die starken interindividuellen Schwankungen der Versuchspersonen, die bei dieser Art von Experimenten auftreten. Da in allen drei Arbeiten die Anzahl der Versuchspersonen sehr gering war (*Furst et al.*: 7, *David*: 6, diese Arbeit: 5) spiegeln sich die großen interindividuellen Abweichungen in den Gesamtergebnissen wider. Zusätzlich unterscheiden sich die Messverfahren: *Furst et al.* (1985) und *David et al.* (1959) benutzten Herstellungsverfahren⁵, in dieser Arbeit wurde ein 2-AFC-Verfahren benutzt, was ebenfalls eine Erklärung für die unterschiedlichen Ergebnisse sein kann.

⁴ SL: sensation level: Der Pegel über der individuellen Hörschwelle.

⁵ Die Versuchspersonen regelten über einen Drehknopf die Größe des Parameters ILD bzw. ITD ein.

Tab. 2: Vergleich der Daten von Furst et al. (1985) mit den Werten dieser Arbeit.

reference parameter	measured equivalent	Furst et al. (1985)
ITD: 400 μ s	ILD: 4.2 dB (60 dB nHL)	ILD: 12 to 15 dB (60 dB SL)
ILD: 10 dB	ITD: 990 μs (60 dB nHL)	ITD: 200 to 250 μs (60 dB SL)

Table 2: Comparison of the data obtained by Furst et al. (1985) with values of this study.

Tab. 3: Vergleich der Daten von David et al. (1959) mit den Werten dieser Arbeit.

reference parameter	measured equivalent	David et al. (1959)
ILD: 10 dB	ITD: 671 μs (50 dB nHL)	ITD: 560 μs (50 dB SL)
ILD: 10 dB	ITD: 608 μs (70 dB nHL)	ITD: 380 μs (70 dB SL)

Table 3: Comparison of the data obtained by David et al. (1959) with values of this study.

Zusammenhang zwischen matching time-intensity-ratio (MTIR) und trading time-intensity-ratio (TTIR): Es gibt Unterschiede zwischen MTIR und TTIR: Generell benötigten die VPen bei der Vorgabe einer ILD von 10 dB bei den matching-Versuchen eine größere ITD als bei den trading-Versuchen. Im Fall der Vorgabe einer ITD von 400 μ s ist dies umgekehrt: Dort sind die Werte der ILDs bei den trading-Experimenten gerade größer als die der matching-Experimente. Dies bedeutet, dass es wesentliche Unterschiede zwischen matching- und trading-Versuchen gibt. Es ist nicht dasselbe, ob man versucht, eine gleichwertige Lateralisation zu erzielen oder ob man eine vorgegebene Lateralisation kompensieren will. Erklären lassen sich diese Unterschiede durch die »Natürlichkeit« bzw. »Unnatürlichkeit« der Experimente. Im Freifeld (in der »natürlichen« Umgebung des Alltags) kommen ILDs bis zu 15 dB und ITDs bis zu 800 μ s vor. Dabei haben sie *immer* dieselben Vorzeichen. Eine Lateralisation, die entweder durch eine reine ILD, eine reine ITD oder durch eine Kombination von ILD und ITD mit gleichen Vorzeichen realisiert wird, wird als »natürlicher« empfunden als eine Realisierung durch Kombinationen von ILD und ITD mit unterschiedlichen Vorzeichen (siehe Gaik 1993). Letztere Kombinationen, wie sie in trading-Experimenten vorkommen, führen zu »unnatürlichen« Höreindrücken, die diffus wahrgenommen werden, daher oft schlecht lateralisiert sind und manchmal sogar zu mehreren gleichzeitigen Höreindrücken führen. Dies muss nicht dazu führen, wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse unter den »unnatürlichen« Höreindrücken leidet. Die Streuungen der Messwerte der matching-Experimenten sind im Vergleich zu denen der trading-Experimente z. T. sogar geringer (vgl. Abb. 4). Es ist allerdings fraglich, inwiefern bei trading-Experimenten auf Grund der »unnatürlichen« Höreindrücke wirklich eine Äquivalenz der Parameter ILD und ITD gemessen wird. Zumindest hat es den Anschein, als würde man

mit beiden Experimenten nicht exakt denselben Effekt messen. Matching-Experimente sind eher geeignet, Entsprechungen zwischen ILDs und ITDs zu bestimmen, da dabei im Freifeld vorkommende Kombinationen von ILD und ITD benutzt werden können. Somit treten ungewohnte Höreignisse, die bei trading-Experimenten durch die Kombination von ILD und ITD mit unterschiedlichem Vorzeichen zustande kommen, nicht auf.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Sowohl bei den matching-Versuchen als auch bei den trading-Versuchen sind die interindividuellen Standardabweichungen viel größer als die intraindividuellen. Dies besagt, dass die Versuche für einzelne Versuchspersonen gut reproduzierbar sind, sich die Ergebnisse unter verschiedenen Versuchspersonen aber unterscheiden, die subjektive Wahrnehmung der angebotenen Stimuli demnach sehr unterschiedlich ist. Eine individuelle Bestimmung des TIRs für einzelne Versuchspersonen ist demnach sehr sinnvoll und eine Übernahme von Literaturwerten nicht empfehlenswert.
- Die durch matching-Versuche gemessenen time-intensity-ratios unterscheiden sich wesentlich von denen, die mit trading-Versuchen gemessen wurden, was auf die »Unnatürlichkeit« der Höreindrücke bei den trading-Versuchen zurückgeführt werden kann. Dort werden Kombinationen der interauralen Parameter ILD und ITD benutzt (die Werte von ILD und ITD haben unterschiedliche Vorzeichen), die im alltäglichen Leben nicht vorkommen. Im Freifeld haben die Werte von ILD und ITD immer identische Vorzeichen. Für die Bestimmung von TIRs sind deshalb matching-Experimente vorzuziehen.

- Es stellte sich heraus, dass eine interaurale Pegeldifferenz von 10 dB für eine Versuchsperson bereits ein so großer Wert war, dass sie Mühe hatte, diesen mit einer interauralen Zeitdifferenz zu kompensieren (trading-Versuch) oder anzugleichen (matching-Versuch). Dies lässt erahnen, dass der Wertebereich, in dem Kompensationen bzw. Angleichungen stattfinden können, ebenfalls von Versuchsperson zu Versuchsperson stark schwanken können.

Literatur

- Algom D, Adam R, Cohen-Raz L* (1988) Binaural summation and lateralization of transients: A combined analysis. *J Acoust Soc Am* 84(4), 1302–1315
- David EEJ, Guttman N, van Bergeijk WA* (1959) Binaural interaction of high-frequency complex stimuli. *J Acoust Soc Am* 31(6), 774–782
- Furst M, Levine RA, Mc Gaffigan PM* (1985) Click lateralization is related to the β component of the dichotic brainstem auditory evoked potentials of human subjects. *J Acoust Soc Am* 78(5), 1644–1651
- Gaik W* (1993) Combined evaluation of interaural time and intensity differences: Psychoacoustic results and computer modeling. *J Acoust Soc Am* 94(1), 98–110
- Kinkel M* (1990) Zusammenhang verschiedener Parameter des binauralen Hörens bei Normal- und Schwerhörenden. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fachbereiche der Georg-August-Universität zu Göttingen
- Levitt H* (1971) Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics. *J Acoust Soc Am* 49, 467–477
- Moushegian G, Jeffress LA* (1959) Role of interaural time and intensity differences in the lateralization of low-frequency tones. *J Acoust Soc Am* 31, 1441–1445
- Otten J* (1997) Psychoakustische Messungen zur Lokalisationsfähigkeit beim Menschen. Diplomarbeit, Universität Oldenburg.
- Zwicker E, Fastl H* (1999) Psychoacoustics – Facts and Models. Springer-Verlag, Berlin. S 293–315