

Die relative Gewichtung von interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen in der horizontalen Schallquellenlokalisation wird durch Aufmerksamkeit auf einen der beiden Hinweisreize moduliert

Inauguraldissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Albert-Georg Lang

geboren in Bochum

Januar 2009

Aus dem Institut für Experimentelle Psychologie

Der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Gedruckt mit Genehmigung

Der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der

Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Referent: Prof. Dr. Axel Buchner

Koreferent: Prof. Dr. Martin Heil

Tag der mündlichen Prüfung: 8.5.2009

Inhalt

Zusammenfassung.....	4
Abstract	5
Einführung	6
Experiment 1a und Experiment 2.....	18
Experiment 1b.....	22
Experiment 1c	22
Experiment 1d.....	25
Experiment 3 und Experiment 4	26
Schlussbemerkungen und Ausblick.....	27
Endnoten.....	33
Literatur	34
Einzelarbeiten	37

Zusammenfassung

Der relative Einfluss von interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen auf die Lateralisation von Tönen wird häufig in einem experimentellen Paradigma untersucht, das diese interauralen Hinweisreize in Opposition zueinander setzt. Die Versuchsperson erhält die Aufgabe, einen der beiden Hinweisreize so einzustellen, dass die wahrgenommene Position eines Testtons mit der Position eines Referenztons übereinstimmt. Die Ergebnisse unterscheiden sich deutlich in Abhängigkeit davon, welcher Hinweisreiz beim Testton als fest eingestellt vorgegeben wird bzw. welcher Hinweisreiz durch die Versuchsperson justiert wird. Der Regressionsansatz von Trahiotis und Kappauf (1978) erklärt diese Diskrepanz durch einen Bias in Richtung des Parameterwertes des Referenztons („Regression“). In der vorliegenden Arbeit wird ein alternativer Erklärungsansatz angeboten, der die Unterschiede auf durch die Aufgabe verursachte Verschiebungen der Aufmerksamkeit zurückführt. Die vorgestellten Experimente bestanden aus zwei verschiedenen Aufgaben. Die Aufgabe während der „Kompensationsphase“ bestand in der oben beschriebenen Ausgleichsprozedur, wobei als „Ziel“ des Ausgleichs die Lokalisation des Testtons in der Mitte angegeben wurde, auf die Präsentation eines Referenztons jedoch verzichtet wurde. Die Aufgabe in der „Lokalisationsphase“ bestand hingegen in reinen Richtungsurteilen. Dabei wurden die Töne mit den selben Parameterwerten wie in der Kompensationsphase präsentiert, das heißt, mit dem identischen Wert des ehemals voreingestellten Hinweisreizes und mit dem von der Versuchsperson gewählten Wert des komplementären Hinweisreizes. Dennoch wurden die Töne in der Lokalisationsphase nicht in der Mitte lokalisiert, sondern ihre wahrgenommene Position ging zurück in Richtung der Position, in der sie ohne vorhergehende Kompensation lokalisiert worden wären. Die angenommenen kognitiven Prozesse, die der Theorie der Aufmerksamkeitsverschiebung zu Grunde liegen, werden diskutiert und einer erweiterten Form des Regressionsansatzes gegenüber gestellt.

Abstract

The relative influence of interaural time and intensity differences on lateralization of sounds is frequently investigated by a paradigm in which both binaural cues are set into opposition. Participants' task is to adjust one of both cues such that the perceived position of a test tone matches the position of a reference tone. The results are markedly different depending on which of the cues of the test tone is preset by the investigator and which cue is adjusted by the participant. The regression interpretation by Trahiotis and Kappauf (1978) resolves this difference by a bias to the parameter values of the reference tone ("regression"). The current work offers an alternative explanation that resolves the difference by shifts of attention caused by the task. The experiments reported here consisted of two different tasks. During the "compensation phase" participants adjusted one interaural cue as described above such that the test tone was located on the midline; however, no reference tone was presented. The task during the "localization phase" consisted of pure localization judgments of the same tones and with the same parameter values as during the compensation phase, that is, the tones were presented with an identical value of the formerly preset interaural cue and with the same value of the complementary cue as formerly chosen by the participant. Despite the fact that the parameter values were identical in both phases of the experiment the tones were not located on the midline during the localization phase; the perceived sound source position shifted back toward the position where the sound would have been localized without a compensation procedure. The underlying cognitive processes of the theory of shifted attention are being discussed and set in contrast to an extended form of the regression interpretation.

Einführung

Die Lokalisation von Schallereignissen im Raum ist eine der größten Herausforderungen, die unsere Umwelt an die menschliche Wahrnehmungsfähigkeit stellt. Im Gegensatz zur visuellen Modalität stehen bei der Wahrnehmung akustischer Ereignisse keine topographisch organisierten Rezeptoren zur Verfügung, so dass die räumliche Position von Schallereignissen aus den Informationen von lediglich zwei Kanälen „errechnet“ werden muss. Für alle drei Dimensionen des Raumes stehen räumliche Hinweisreize zur Verfügung, die dem auditorischen System eine mehr oder weniger präzise Ortung eines Schallereignisses auf der jeweiligen Dimension ermöglichen. Neben der Motivation der Grundlagenforschung sind die praktischen Anwendungsmöglichkeiten einer genauen Kenntnis des Zusammenhangs zwischen den räumlichen Hinweisreizen und deren Einfluss auf die Lokalisation von Schallquellen nahezu unbegrenzt. Bei modernen Musik- und Filmproduktionen werden diese Hinweisreize gezielt manipuliert, um einzelne Stimmen, Musikinstrumente oder Geräusche an einer ganz bestimmten (virtuellen) Position im Raum erscheinen zu lassen (siehe z.B. Tischmeyer, 2006). Dreidimensionale Audio-Displays finden in U-Booten und Flugzeugen Verwendung, um relevante Schallereignisse räumlich voneinander zu trennen und so deren Verarbeitung durch den Menschen zu erleichtern (Doll & Hanna, 1989, 1995, 1997; Doll, Hanna, & Russotti, 1992; King & Oldfield, 1997). Ähnliche Audio-Displays werden eingesetzt, um blinden Personen durch simulierte akustische Ereignisse die räumliche Orientierung zu ermöglichen (z.B. Loomis, Golledge, & Klatzky, 2001; Loomis, Golledge, & Klatzky, 1998; Marston, Loomis, Klatzky, Golledge, & Smith, 2006). In einer neueren Entwicklung bei der Kopfhörerwiedergabe von Mehrkanal-Tonaufzeichnungen („binaural room scanning“ – BRS) werden die Kopfbewegungen des Zuhörers bei der Wiedergabe berücksichtigt, um eine „Im-Kopf-Lokalisation“ zu vermeiden (siehe z.B. Horbach, Karamustafaoglu, Pellegrini, Mackensen, & Theile, 1999).

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten räumlichen Hinweisreize für alle drei Raumdimensionen gegeben.

- 1) *Horizontale Dimension (Azimut)*: Der Azimut oder Lateralisationswinkel ist der horizontale Winkel zwischen der Schallquelle und der sagittalen Mittelebene. Ein Azimut von 0° entspricht einer

Schallquelle genau vor dem Gesicht des Zuhörers, ein Azimut von $+90^\circ$ entspricht einer Schallquelle vor dem rechten Ohr¹. Für die Ortung von Schallereignissen auf dieser Dimension werden vorwiegend interaurale Differenzen ausgewertet, also interaurale Zeit- und Intensitätsdifferenzen sowie interaurale Differenzen hinsichtlich der spektralen Zusammensetzung des an den Ohren eintreffenden Schalls. Auch die absolute spektrale Zusammensetzung des Schalls beeinflusst die Ortung auf der horizontalen Ebene (sog. „monaurale Hinweisreize“). Die Veränderung der spektralen Zusammensetzung des Schalls wird verursacht durch frequenzabhängige Reflektion und Beugung des Schalls am Körper des Hörers und an den Ohrmuscheln. Die Bedeutung dieser spektralen Hinweisreize auf die Lokalisation auf der horizontalen Dimension ist allerdings nicht genau geklärt. So wurde zum Beispiel in Experimenten von Musicant and Butler (1985) ein signifikanter Einfluss von monauralen Hinweisreizen auf den wahrgenommenen Azimut festgestellt, der jedoch in Experimenten von Middlebrooks (1992) keine Bestätigung fand.

- 2) *Vertikale Dimension (Elevation)*: Unter der Elevation versteht man den vertikalen Winkel zwischen der Schallquelle und der horizontalen Mittelebene. Zum Beispiel befindet sich eine Schallquelle mit einer Elevation von 0° unmittelbar vor dem Zuhörer, während sich eine Schallquelle mit einer Elevation von $+90^\circ$ exakt über dem Kopf befindet. Die Ortung auf dieser Dimension erfolgt überwiegend aufgrund der spektralen Zusammensetzung des eintreffenden Schalls.
- 3) *Tiefendimension*: Die Tiefendimension wird hier definiert als die (winkelunabhängige) absolute Entfernung zwischen Schallquelle und Kopf des Hörers. Ein wichtiger Hinweisreiz auf dieser Dimension ist die spektrale Zusammensetzung des Schalls, die in diesem Zusammenhang durch die frequenzselektiven Eigenschaften der Luft zustande kommt; höhere Frequenzanteile schwächen sich bei der Übertragung durch die Luft stärker ab als tiefere Frequenzanteile. Weitere Hinweisreize sind die Lautstärke einer Schallquelle (insbesondere die Lautstärke in Relation zu anderen Schallquellen) und das Intensitätsverhältnis zwischen Direktschall und reflektiertem Schall.

Eine Sonderstellung bei den räumlichen Hinweisreizen nehmen die sog. „dynamischen Hinweisreize“ ein; zum Beispiel können Ambiguitäten zwischen der Lokalisation „vorne“ und „hinten“ dadurch aufgelöst werden, dass der Hörer leichte Kopfbewegungen macht. Der relative Winkel einer Schallquelle zum Hörer ändert sich bei einer Kopfdrehung in entgegengesetzte Richtungen, in Abhängigkeit davon, ob sich die Schallquelle vor oder hinter ihm befindet. Eine praktische Anwendung dieses Erkenntnis stellt das oben erwähnte „binaural room scanning“ dar. Ein ausführlicher Überblick über die Lokalisation auf allen drei Dimensionen und über die dynamischen Hinweisreize wird bei Middlebrooks and Green (1991) gegeben.

Auf der horizontalen Dimension sind in erster Linie interaurale Zeit- und Intensitätsunterschiede für die Lokalisation verantwortlich. Auf den ersten Blick erscheinen diese beiden Typen von Hinweisreizen redundant zu sein; wenn eine Schallquelle zum Beispiel in Bezug auf den Hörer einen Azimut von $+45^\circ$ hat (also in Bezug auf den Hörer 45° von der sagittalen Mittelebene nach rechts „versetzt“ ist), dann trifft der Schall auf dem rechten Ohr sowohl früher als auch mit höherer Intensität ein als auf dem linken Ohr. Die beiden Hinweisreize tragen also ähnliche Informationen hinsichtlich der Position der Schallquelle. Allerdings können beide Hinweisreize nicht auf dem gesamten Frequenzspektrum ausgewertet werden. Bereits Anfang des vorherigen Jahrhunderts veröffentlichte Lord Rayleigh seine Duplex-Theorie zur Lokalisation von Tönen (Strutt, 1907). Er fand heraus, dass Töne tieferer Frequenz überwiegend auf Grund von interauralen Zeitdifferenzen lokalisiert werden, während höhere Frequenzen vorwiegend auf Grund von Intensitätsdifferenzen geortet werden. In einem neueren Artikel resümierten Macpherson und Middlebrooks nach einer technisch extrem aufwändigen Untersuchung, dass „... die Lokalisation von komplexen Tönen in der lateralen Dimension gut mit einer mehr als einem Jahrhundert alten Theorie übereinstimmt, die auf der Lokalisation von vibrierenden Stimmgabeln beruht.“ (Macpherson & Middlebrooks, 2002, S. 2220).

Schallwellen tieferer Frequenz, deren Wellenlänge in der selben Größenordnung liegt wie der mittlere Ohrabstand beim Menschen (ca. 17 cm), werden um den Kopf gebeugt, so dass die Intensitätsdifferenz des Schalls an beiden Ohren deutlich geringer ist als bei höheren Frequenzen. Gaik (1993)

analysierte einen Datensatz von sog. kopfbezogenen Impulsantworten (head related impulse responses; HRIRs), um für verschiedene Einfallrichtungen von Schallereignissen die natürlich auftretenden interauralen Zeit- und Intensitätsunterschiede bestimmen zu können. Bei diesem Verfahren werden Miniaturmikrophone in die Gehörgänge der Versuchsperson eingeführt; anschließend wird mit Hilfe eines Lautsprechers Schall aus verschiedenen Richtungen abgegeben und das an den Mikrofonen ankommende Signal analysiert (Pösselt, Schröter, Opitz, Divenyi, & Blauert, 1986). Bei der Analyse für einen Lateralisationswinkel von $\pm 90^\circ$ zeigte sich, dass größere interaurale Intensitätsunterschiede erst ab einer Frequenz von ca. 2 kHz auftreten; dies entspricht einer Wellenlänge von ca. 17 cm. Die Tatsache, dass in natürlichen Hörsituationen bei tieferen Frequenzen keine nennenswerten Intensitätsunterschiede auftreten, lässt jedoch nicht den Schluss zu, dass solche Intensitätsunterschiede die Lokalisation nicht beeinflussen, wenn man sie künstlich (z.B. über einen Kopfhörer) induziert. Zum Beispiel verwendeten Young and Levine (1977) Sinustöne mit einer Frequenz von 500 Hz, um den relativen Einfluss von interauralen Zeit- und Intensitätsunterschieden auf die Lokalisation zu untersuchen und fanden einen signifikanten Einfluss *beider* Hinweisreize.

Während interaurale Intensitätsdifferenzen mit abnehmender Frequenz an Bedeutung verlieren, gibt es bei interauralen Zeitdifferenzen eine obere Grenzfrequenz. Zeitunterschiede üben bei Sinustönen oberhalb einer Frequenz von ca. 1,3 kHz keinen Einfluss mehr auf die Lateralisation einer Schallquelle aus. Dabei ist noch ungeklärt, ob dies durch einen Verlust der Phasen-Kohärenz im Hörnerv verursacht wird oder ob die Frequenzselektivität einer höheren Verarbeitungsstufe des auditorischen Systems für dieses Phänomen verantwortlich ist (Macpherson & Middlebrooks, 2002). Enthält ein Ton jedoch Pegelschwankungen, können interaurale Zeitdifferenzen auf Grund dieser sog. „Hüllkurve“ auch bei höheren Frequenzen ausgewertet und zur Ortung herangezogen werden.

Es gibt also einen Frequenzbereich zwischen ca. 1 kHz und 2 kHz, in dem weder interaurale Zeitdifferenzen noch interaurale Intensitätsdifferenzen als valide Hinweisreize für die räumliche Ortung von Schallquellen herangezogen werden können. Dies ist vermutlich der Grund, warum Stevens und

Newman bereits im Jahre 1936 feststellten, dass die Lokalisationsgenauigkeit in diesem Bereich am geringsten ist (Stevens & Newman, 1936).

Wegen der oben angesprochenen teilweisen Redundanz von interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen für die Ortung von Schallquellen auf der horizontalen Ebene kam schon recht früh die Frage auf, welche Zeitdifferenz zu einem identischen Lateralisationswinkel führt wie eine gegebene Intensitätsdifferenz (und umgekehrt). Die sog. “trading ratio” wird oft als Verhältnisbruch in der Einheit $[\mu\text{s}/\text{dB}]$ angegeben, wobei ein linearer Zusammenhang zwischen beiden Größen unterstellt wird. Da aber nur für kleinere Bereiche von Zeit- und Intensitätsdifferenzen von einem (näherungsweise) linearen Zusammenhang ausgegangen werden kann, wird der Ausdruck “trading ratio” im Folgenden nur verwendet, wenn der Verhältnisbruch für ein bestimmtes Paar aus einer Zeit- und Intensitätsdifferenz angegeben wird (ein Punkt auf einem Funktionsgrafen). In allen anderen Fällen soll hier der Ausdruck „Äquivalenzrelation“ verwendet werden.

Die Einleitung zu Artikel 1 im Anhang gibt einen Überblick über die wichtigsten experimentellen Paradigmen, die zur Ermittlung der Äquivalenzrelation herangezogen wurden, und fasst die Ergebnisse zusammen. Ein frühes Experiment von Leakey and Cherry (1957) soll an dieser Stelle zur Veranschaulichung der generellen Vorgehensweise herausgegriffen werden. Interaurale Zeit- und Intensitätsunterschiede wurden in Opposition zueinander gesetzt, d.h. es wurde die in natürlichen Hörumgebungen kaum anzutreffende Situation geschaffen, dass ein Ton ein Ohr früher erreicht als das andere Ohr, während er am anderen Ohr mit höherer Intensität auftritt. Um diese Situation herzustellen, platzierten Leakey und Cherry zwei Lautsprecher vor der Versuchsperson so, dass die Lautsprecher mit der Versuchsperson ein gleichseitiges Dreieck bildeten. Der Intensitätsunterschied wurde durch unterschiedliche Lautstärkeeinstellungen an den Verstärkern der Lautsprecher realisiert, während die interaurale Zeitdifferenz durch leichtes Versetzen eines Lautsprechers nach vorne oder hinten erzielt wurde. Der durch die unterschiedlichen Abstände ungewollt eingeführte Intensitätsunterschied wurde durch eine Erhöhung der Lautstärke des weiter entfernt liegenden Lautsprechers kompensiert. Während über die Lautsprecher die Aufnahme einer weiblichen Stimme wiedergegeben wurde, stellte der Versuchsleiter

verschiedene Kombinationen aus Zeit- und Intensitätsdifferenzen ein. Die Versuchsperson erhielt die Instruktion, die Richtung der zwischen den Lautsprechern entstehenden Phantomschallquelle anzugeben. Von Interesse waren die Durchgänge, in denen die Phantomschallquelle genau auf der Mittellinie zwischen beiden Lautsprechern lokalisiert wurde. In diesen Fällen glichen sich offensichtlich die Wirkungen beider interauraler Hinweisreize exakt aus. Die Kombinationen aus Zeit- und Intensitätsunterschieden in diesen Durchgängen wurden herangezogen, um die Äquivalenzrelation zu berechnen. Bereits in diesem Experiment zeigte sich, dass der Verhältnisbruch nicht konstant war; viel mehr wuchs er mit der Zeitdifferenz an. Zum Beispiel errechneten Leakey und Cherry einen Quotienten von $59 \mu\text{s}/\text{dB}$ bei einer Zeitdifferenz von $450 \mu\text{s}$, während sich bei einer Zeitdifferenz von $2270 \mu\text{s}$ ein Quotient von $218 \mu\text{s}/\text{dB}$ ergab. Als weitere unabhängige Variable wurde dem Sprachsignal weißes Rauschen verschiedener Lautstärkepegel überlagert; mit zunehmender Lautstärke des Rauschens erhöhte sich der Quotient aus Zeit- und Intensitätsdifferenz, was bedeutet, dass eine größere Zeitdifferenz benötigt wurde, um eine gegebene Intensitätsdifferenz in ihrer Wirkung zu kompensieren.

Es muss noch angemerkt werden, dass das Einführen von interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen über Lautsprecher suboptimal ist, da keine exakte Kontrolle der beiden Parameter möglich ist. Der von einem Lautsprecher abgegebene Schall erreicht nicht nur das Ohr auf der ipsilateralen Seite, sondern durch Beugung der Schallwellen um den Kopf auch (mit etwas Verzögerung) das Ohr auf der kontralateralen Seite. Aus diesem Grund hat sich die Präsentation über Kopfhörer – unter Verwendung von digitalen Techniken² zur Induktion von Zeitunterschieden – durchgesetzt.

Die Ergebnisse der Untersuchung von Leakey und Cherry lieferten bereits klare Belege dafür, dass die Äquivalenzrelation zwischen interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen nicht als einfache lineare Funktion dargestellt werden kann. Artikel 1 gibt in seiner Einleitung einen Überblick über Folgestudien und weitere Moderatorvariablen. Bei der Sichtung der Literatur fiel auf, dass sich die gefundenen Moderatorvariablen grob in zwei Kategorien unterteilen lassen. Ein Teil der durchgeführten Studien untersuchte die Einflüsse verschiedener stabiler Eigenschaften der Stimuli auf die Äquivalenzrelation, zum Beispiel die Gesamtlautstärke der präsentierten Töne (Deatherage & Hirsh, 1959), den Ein-

fluss von überlagertem weißem Rauschen (Leakey & Cherry, 1957, s.o.) oder die spektrale Zusammensetzung der Stimuli (Wightman & Kistler, 1992)³. Die andere Gruppe von Studien befasste sich mit interindividuellen Unterschieden bei der Gewichtung der beiden interauralen Hinweisreize (siehe zum Beispiel Jeffress & McFadden, 1971; McFadden, Jeffress, & Ermey, 1971; McFadden, Jeffress, & Lakey, 1972; McFadden, Jeffress, & Russell, 1973).

Eine ganz andere Art von Moderatorvariable fanden Young und Levine (1977). Sie führten zwei Experimente durch, in denen die Versuchsperson die Position eines Sinustons (250 Hz, 500 Hz oder 1000 Hz) so einstellte, dass sie mit der Position eines diotisch⁴ präsentierten Rauschens übereinstimmte. Einer der beiden interauralen Hinweisreize war jeweils fest eingestellt, während der andere durch die Versuchsperson so justiert werden sollte, dass die Position des Testtons mit der des Rauschens übereinstimmte. Die errechneten Äquivalenzrelationen unterschieden sich deutlich in Abhängigkeit davon, welcher der beiden Hinweisreize durch die Versuchsperson justiert wurde. Wenn die Versuchsperson die Zeitdifferenz einstellte, verschob sich die Äquivalenzrelation zu Gunsten der Zeitdifferenz, war hingegen die Intensitätsdifferenz die zu justierende Variable, verschob sich die Äquivalenzrelation zu Gunsten der Intensitätsdifferenz. Im ersten Fall betrug der Quotient $40.4 \mu\text{s}/\text{dB}$ (bei einer vorgegebenen Intensitätsdifferenz von 8 dB), im zweiten Fall $79.4 \mu\text{s}/\text{dB}$ (bei einer vorgegebenen Zeitdifferenz von 500 μs).

Offensichtlich führte *die Aufgabe*, einen der beiden interauralen Hinweisreize zu justieren, dazu, dass dieser Hinweisreiz in Relation zum komplementären Hinweisreiz *mehr Gewicht* bei der Lokalisation erhielt. Dieser Befund ist vielleicht der deutlichste Hinweis darauf, dass es *eine* trading ratio – im Sinne eines konstanten Verhältnisquotienten – nicht gibt. Dieses Ergebnis ist insofern von besonderer Bedeutung, als die bis zu diesem Zeitpunkt erhaltenen experimentellen Befunde die Vermutung nahelegten, dass die Verknüpfung zwischen interauralem Hinweisreiz und Lateralisationswinkel das Ergebnis von sehr langer Lernerfahrung ist und daher nicht durch eine experimentelle Manipulation verändert werden kann. So versuchten zum Beispiel Jeffress and McFadden (1971), die individuelle Gewichtung der beiden Hinweisreize durch *selektives Feedback* zu manipulieren. In einem klassischen Kompensations-

oder “trading” Paradigma waren die Versuchspersonen aufgefordert, Lateralisationsurteile für Stimuli mit konfligierenden interauralen Zeit- und Intensitätsunterschieden abzugeben. Diesen (kritischen) Durchgängen voraus ging eine Übungsphase, in der die Versuchspersonen Feedback über die Korrektheit ihrer Lateralisationsurteile erhielten. Dieses Feedback erfolgte entweder ausschließlich auf Grund der interauralen Zeitdifferenzen der dargebotenen Stimuli oder ausschließlich auf Grund der interauralen Intensitätsdifferenzen. Es stellte sich heraus, dass diese Manipulation während der Übungsphase keinen Effekt auf die in den nachfolgenden kritischen Durchgängen abgegebenen Lateralisationsurteile hatte.

Obwohl eine Verschiebung der Gewichtung von interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen die einfachste Erklärung für die von Young und Levine (1977) berichteten Daten zu sein scheint, lieferten Trahiotis und Kappauf (1978) einen alternativen Erklärungsansatz, der sich auf den ersten Blick grundsätzlich von dem erstgenannten unterscheidet. Trahiotis und Kappauf stellten eine Analogie zwischen der Aufgabe aus der Studie von Young und Levine (1977) und einer Aufgabe aus dem taktilen Bereich her. Sheldon (1973) führte zwei Versuche durch, in deren Verlauf die Versuchsperson die subjektiv empfundene „Abruptheit“ des Einschaltvorganges eines vibrotaktilen Stimulus so einstellen sollte, dass sie mit der Abruptheit eines Referenzstimulus übereinstimmte. Diese Abruptheit konnte durch zwei Parameter beeinflusst werden: die Anstiegszeit der Schwingung und die Amplitude, die am Ende der Anstiegszeit erreicht wurde. Der Referenzstimulus wurde in verschiedenen Durchgängen jeweils auf eine Parameterkombination fest eingestellt, während beim Teststimulus nur einer der beiden Parameter durch den Versuchsleiter fest eingestellt wurde (in Experiment 1 wurde die Amplitude fest eingestellt, in Experiment 2 wurde die Anstiegszeit fest eingestellt). Die Versuchsperson erhielt die Instruktion, den *jeweils anderen* Parameter des Teststimulus so zu justieren, dass die Abruptheit des Teststimulus mit der Abruptheit des Referenzstimulus übereinstimmte. Auf diese Weise erhielt man für jeden Referenzstimulus verschiedene Parameterkombinationen für den Teststimulus, die von den Versuchspersonen als „gleich abrupt“ empfunden wurden. Aus diesen als gleich empfundenen Parameter-Paaren konnten Äquivalenzrelationen errechnet werden, die der gleichen Logik folgten, die der Berechnung der Äquiva-

lenzrelationen von interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen bei akustischen Experimenten zu Grunde liegen. Es stellte sich heraus, dass sich die Quotienten in beiden Experimenten unterschieden, also abhängig davon waren, welcher der beiden Parameter des Teststimulus fest eingestellt war bzw. welcher Parameter durch die Versuchsperson justiert wurde. Die eingestellten Werte eines Parameters lagen näher an dem Wert des gleichen Parameters des Referenzstimulus als dies auf Grund der aus dem jeweils anderen Experiment ermittelten Äquivalenzrelation zu erwarten gewesen wäre. Sheldon bezeichnete dieses Phänomen als Regression.

Die Parallele zu den Befunden von Young und Levine (1977) ist offensichtlich. Young und Levine präsentierten den Referenzstimulus diotisch – also mit einer interauralen Zeitdifferenz von $0\ \mu\text{s}$ und einer interauralen Intensitätsdifferenz von 0 dB. Die ermittelten Äquivalenzrelationen zeigten kleinere Werte der Zeitdifferenz, wenn die Zeitdifferenz von der Versuchsperson justiert wurde und kleinere Werte der Intensitätsdifferenz, wenn die Intensitätsdifferenz von der Versuchsperson justiert wurde. Anstatt von einer höheren Gewichtung des durch die Versuchsperson eingestellten Parameters auszugehen, vermuteten Trahiotis und Kappauf eine Regression des zu justierenden Parameters zu den Parameterwerten des Referenzstimulus ($0\ \mu\text{s}$ bzw. 0 dB).

Um ein experimentelles Paradigma entwickeln zu können, das zwischen beiden Ansätzen – Verschiebung der Gewichtung zu Gunsten eines der beiden Hinweisreize vs. Regression – unterscheidet, sind Spezifizierungen beider Modelle notwendig, die konkrete Aussagen über die zu Grunde liegenden kognitiven Prozesse machen, so dass unterschiedliche Vorhersagen beider Modelle über den Ausgang eines Experimentes möglich werden.

Trahiotis und Kappauf trafen selbst keine Annahmen über die der Regressionshypothese zu Grunde liegenden kognitiven Prozesse; vielmehr charakterisierten sie ihr Modell als einen Ansatz, der die Daten eher beschreibt als erklärt (Trahiotis & Kappauf, 1978, S. 1045). Offensichtlich liegt dem Regressionsmodell aber die Vermutung zu Grunde, dass während des Einstellvorgangs ein Vergleichsprozess zwischen Teststimulus und Referenzstimulus stattfindet, und zwar nicht nur mit der lateralen Position des Referenzstimulus, sondern auch mit dessen Parameterwert des zu justierenden interauralen

Hinweisreizes. Der Teststimulus und der Referenzstimulus werden abwechselnd präsentiert, wobei die Instruktion gegeben wird, ein Steuerelement so einzustellen, dass der Teststimulus den selben Lokalisationswinkel hat wie der Referenzstimulus. Im Fall von Young und Levine wurde der Referenzstimulus diotisch dargeboten, so dass der Lokalisationswinkel 0° war. Wenn der Wert des voreingestellten Hinweisreizes beim Teststimulus von Null verschieden ist, muss der andere Hinweisreiz das konträre Vorzeichen tragen, so dass die Wirkung des voreingestellten Hinweisreizes kompensiert wird. Es findet also ein Vergleichsprozess zwischen dem Lokalisationswinkel des Referenzstimulus (0°) und dem *resultierenden* Lokalisationswinkel des Teststimulus statt. Wären die kognitiven Abläufe während des Justierens hiermit bereits vollständig beschrieben, müsste die Äquivalenzrelation unabhängig davon sein, welcher der beiden interauralen Parameter voreingestellt ist und welcher durch die Versuchsperson justiert wird. Daher nimmt die Regressionshypothese einen *zweiten Vergleichsprozess* an, der den ersten Vergleichsprozess stört. Wenn zum Beispiel die interaurale Intensitätsdifferenz der zu justierende Parameter ist, wird die Intensitätsdifferenz des Teststimulus mit der Intensitätsdifferenz des Referenzstimulus verglichen. Dieser Vergleichsprozess erzeugt ein Bias in Richtung der Intensitätsdifferenz des Referenzstimulus (0 dB bei diotischer Präsentation).

Unterstellt man hingegen eine Verschiebung der Gewichte von interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen als Ursache für die von Young und Levine berichteten unterschiedlichen Äquivalenzrelationen, erscheinen Prozesse von *selektiver Aufmerksamkeit* plausibel, um diese Verschiebung der Gewichte zu erklären. Die Versuchsperson erhält die Instruktion, mit Hilfe eines Steuerelements die virtuelle Position einer Schallquelle zu manipulieren. Mit dem Steuerelement wird der Wert eines der beiden interauralen Hinweisreize verändert. Regelt die Versuchsperson beispielsweise die interaurale Intensitätsdifferenz, bedient sie das Steuerelement und erhält *sofortiges Feedback* über die Auswirkung der Änderung der Intensitätsdifferenz auf die wahrgenommene Position der virtuellen Schallquelle. Die interaurale Zeitdifferenz hingegen bleibt während des gesamten Durchganges unverändert. Durch die kontinuierlich rückgemeldete Beziehung zwischen der Veränderung der Intensitätsdifferenz und der Veränderung der virtuellen Position der Schallquelle könnte es zu einer Verschiebung der Aufmerksamkeit kommen,

mit der Folge, dass die interaurale Intensitätsdifferenz stärker in das Lokalisationsurteil eingeht als die Zeitdifferenz. Es gibt experimentelle Befunde, die die Vermutung nahe legen, dass eine Verschiebung der Aufmerksamkeit zwischen interauralen Zeitunterschieden und interauralen Intensitätsunterschieden möglich ist und dass diese Verschiebung der Aufmerksamkeit die Lokalisation von Tönen beeinflussen kann. Einige Experimente, in deren Verlauf Zeit- und Intensitätsdifferenzen mit konträren Vorzeichen präsentiert wurden, zeigten, dass *zwei* virtuelle Schallquellen entstehen können (sog. “two image lateralization”). Die laterale Position einer Schallquelle wird fast ausschließlich durch die interaurale Zeitdifferenz determiniert (“time-image”), während die Position der anderen Schallquelle wesentlich stärker auch durch die Intensitätsdifferenz bestimmt wird (“time-/intensity image”). Es konnte gezeigt werden, dass Versuchspersonen trainiert werden können, während der Präsentation des Tons *beide* Bilder wahrzunehmen (siehe z.B. Hafter & Jeffress, 1968; Whitworth & Jeffress, 1961).

In der vorliegenden Arbeit soll ein experimentelles Paradigma vorgestellt werden, das die Hypothese der Verschiebung der Aufmerksamkeit („Aufmerksamkeitshypothese“) zur Erklärung der von Young und Levine gefundenen unterschiedlichen Äquivalenzrelationen überprüft. Darüber hinaus soll – soweit wie möglich – eine Abgrenzung gegenüber dem Regressionsansatz von Trahiotis und Kappauf erfolgen.

Die Aufmerksamkeitshypothese trifft die Annahme, dass kontinuierliches Feedback über die Wirkungen von Einstellungen eines der beiden binauralen Hinweisreize auf die Lokalisation der Schallquelle zu einer Verschiebung der Aufmerksamkeit zu eben diesem Hinweisreiz führt. Diese erhöhte Aufmerksamkeit führt zu einer höheren Gewichtung dieses Hinweisreizes im Verhältnis zum komplementären Hinweisreiz. Die höhere Gewichtung des Hinweisreizes müsste folglich entfallen, wenn die Aufgabe keinen Einstellvorgang beinhaltet und zum Beispiel aus reinen Lokalisationsurteilen besteht. Die hier vorgestellten Experimente bestehen daher aus zwei Phasen. In den Durchgängen der ersten Phase („Kompensationsphase“) wurde – ähnlich wie in den Experimenten von Young und Levine – jeweils ein voreingestellter interauraler Hinweisreiz durch die Einstellung des Wertes des komplementären Hinweisreizes ausgeglichen, und zwar so, dass der Ton auf der sagittalen Mittelebene lokalisiert

wurde. In der zweiten Phase („Lokalisationsphase“) wurden reine Lokalisationsurteile abgegeben. Neben verschiedenen Typen von Kontrolldurchgängen wurden in der Lokalisationsphase kritische Durchgänge präsentiert, die exakt die Parameterkombination enthielten, die die Versuchsperson im jeweils analogen Durchgang der Kompensationsphase eingestellt hatte. Wurde beispielsweise in einem Durchgang der Kompensationsphase ein Ton mit einer voreingestellten Zeitdifferenz von $-400\ \mu\text{s}$ präsentiert und die Versuchsperson wählte eine Intensitätsdifferenz von $+4,5\ \text{dB}$, um eine Ortung in der Mitte zu erzielen, wurde der selbe Ton in der darauf folgenden Lokalisationsphase ebenfalls mit einer Zeitdifferenz von $-400\ \mu\text{s}$ und einer Intensitätsdifferenz von $+4,5\ \text{dB}$ präsentiert. Wenn die in beiden Aufgaben auftretenden kognitiven Prozesse identisch wären, müssten die Töne der kritischen Durchgänge auch während der Lokalisationsphase in der Mitte geortet werden. Um es vorwegzunehmen: Das war in keinem der hier vorgestellten Experimente der Fall; vielmehr ging die Richtung der Lokalisationsurteile zurück in die Richtung, aus der sie ohne Kompensation lokalisiert worden wären – wenn auch nicht vollständig. Dieser Effekt wird im Folgenden „shift-back“ Effekt genannt.

Der „zentrale Baustein“ für die Regressionshypothese ist der Referenzstimulus. Es wird angenommen, dass die Versuchsperson während des Einstellvorgangs den Wert des zu justierenden Parameters des Teststimulus mit dem Wert des selben Parameters des Referenzstimulus vergleicht und dieser Vergleichsprozess zu einem Bias in Richtung des Parameterwertes des Referenzstimulus führt. Für die Aufmerksamkeitshypothese hingegen ist die Präsentation eines Referenzstimulus ohne Bedeutung. In den hier vorgestellten Experimenten wird daher auf die Präsentation eines Referenzstimulus verzichtet. Das Fehlen eines (diotischen) Referenzstimulus könnte jedoch dazu führen, dass sich während der Kompensationsphase die mentale Repräsentation des Begriffs „Ortung in der Mitte“ nach der einen oder anderen Seite verschiebt. Um diese Möglichkeit überprüfen zu können, wurde ein Teil der Kontrollstimuli mit einem vorgegebenen Parameterwert von Null ($0\ \mu\text{s}$ bzw. $0\ \text{dB}$) präsentiert. Die Startposition des Kontrollelements, mit dessen Hilfe die Versuchsperson den anderen Parameter justierte, war hingegen nicht Null, sondern nahm einen zufällig gewählten Wert innerhalb des gesamten Regelbereichs des Kontrollelements an. Auf diese Weise wurde erreicht, dass auch für die oben genannten Kon-

trolldurchgänge mit einem vorgegebenen Parameterwert von Null eine Einstellung des Kontrollelements erforderlich war. Ein Bias der Versuchsperson hinsichtlich ihrer Repräsentation der Mitte in dieser Phase des Experiments hätte sich in Form von einer systematischen Abweichung der justierten Werte von Null gezeigt. In den Datensätzen der hier vorgestellten Experimente wurde für diese Art von Kontrolldurchgängen jedoch keine signifikante Abweichung von Null gefunden.

Der Aufbau und der Ablauf sowie die Ergebnisse der Experimente sind in Artikel 1 und Artikel 2 im Detail beschrieben. Im Folgenden soll daher nur ein kurzer Überblick gegeben werden.

Experiment 1a und Experiment 2

Die Experimente 1a und 2 sind die Umsetzung des Grundparadigmas, wie es oben beschrieben wurde. Während der jeweiligen Kompensationsphase wurden von einer weiblichen Stimme gesprochene sinnlose Silben über Kopfhörer präsentiert. In Experiment 1a war in jedem Durchgang jeweils die interaurale Zeitdifferenz fest eingestellt ($-600\text{ }\mu\text{s}$, $-400\text{ }\mu\text{s}$, $-200\text{ }\mu\text{s}$, $0\text{ }\mu\text{s}$, $200\text{ }\mu\text{s}$, $400\text{ }\mu\text{s}$ oder $600\text{ }\mu\text{s}$). Das Kontrollelement, mit dessen Hilfe die Versuchsperson die interaurale Intensitätsdifferenz einstellte, war als vertikal verlaufender Schieberegler auf einem Computerbildschirm realisiert. Der Regelbereich umfasste Intensitätsunterschiede zwischen -15 dB und $+15\text{ dB}$, wobei die Zuordnung (positive Werte: oben, negative Werte: unten, bzw. umgekehrt) zwischen den Versuchspersonen ausbalanciert war. Wie weiter oben erwähnt, war in jedem Durchgang der Kompensationsphase die Startposition des Reglers zufällig gewählt und konnte jeden Wert auf dem gesamten Regelbereich annehmen. Die zufällig gewählte Ausgangsposition des Reglers erlaubte nicht nur die oben beschriebene Kontrolle eines eventuell vorhandenen Bias hinsichtlich der Mittenlokalisation; sie sollte auch verhindern, dass durch eine in allen Durchgängen konstante Startposition (z.B. 0 dB) ein „Ankerwert“ für den zu justierenden Parameter gegeben wurde.

In Experiment 2 waren die Rollen von interauralen Zeit- und Intensitätsunterschieden vertauscht. Während der Kompensationsphase wurden die Töne mit einer jeweils fest eingestellten interauralen Intensitätsdifferenz präsentiert ($-7,5\text{ dB}$; $-5,0\text{ dB}$; $-2,5\text{ dB}$; $0,0\text{ dB}$; $2,5\text{ dB}$; $5,0\text{ dB}$ oder $7,5\text{ dB}$).

Der Regelbereich des Schiebereglers auf dem Computermonitor umfasste interaurale Zeitdifferenzen zwischen $-600\text{ }\mu\text{s}$ und $+600\text{ }\mu\text{s}$.

Die Stimuli der Lokalisationsphasen beider Experimente bestanden jeweils zur Hälfte aus Kontrolldurchgängen und kritischen Durchgängen. In den kritischen Durchgängen wurde ein Ton aus der Kompensationsphase präsentiert, wobei der Wert des voreingestellten interauralen Hinweisreizes identisch mit dem voreingestellten Wert aus der Kompensationsphase war und der Wert des anderen Hinweisreizes auf den durch die jeweilige Versuchsperson während der Kompensationsphase justierten Wert eingestellt wurde. Die Kontrolldurchgänge enthielten die selben Werte für den voreingestellten interauralen Hinweisreiz wie die kritischen Durchgänge, der Wert des komplementären Hinweisreizes war jedoch in allen Kontrolldurchgängen Null (0 dB in Experiment 1a bzw. $0\text{ }\mu\text{s}$ in Experiment 2). Es wurde erwartet, dass die Lokalisation von Tönen, deren interaurale Hinweisreize nicht mit konträren Vorzeichen versehen waren, leichter sein würde als die Lokalisation in den kritischen Durchgängen; bei den Tönen in den Kontrolldurchgängen wurde daher ein monotoner Zusammenhang zwischen dem Wert des vorgegebenen interauralen Hinweisreizes und dem durch die Versuchsperson angegebenen Lokalisationswinkel erwartet – unabhängig davon, ob ein solcher Zusammenhang in den kritischen Durchgängen gefunden würde.

Die Richtungsurteile in den Lokalisationsphasen wurden an einem Computermonitor abgegeben. Auf diesem war die Zeichnung eines menschlichen Kopfes (von hinten) zu sehen. Die Versuchsperson konnte mit dem Mauszeiger einen Markierungspunkt auf dem oberen Halbkreis des Kopfes bewegen und so den Lokalisationswinkel zwischen -90° und $+90^\circ$ stufenlos angeben.

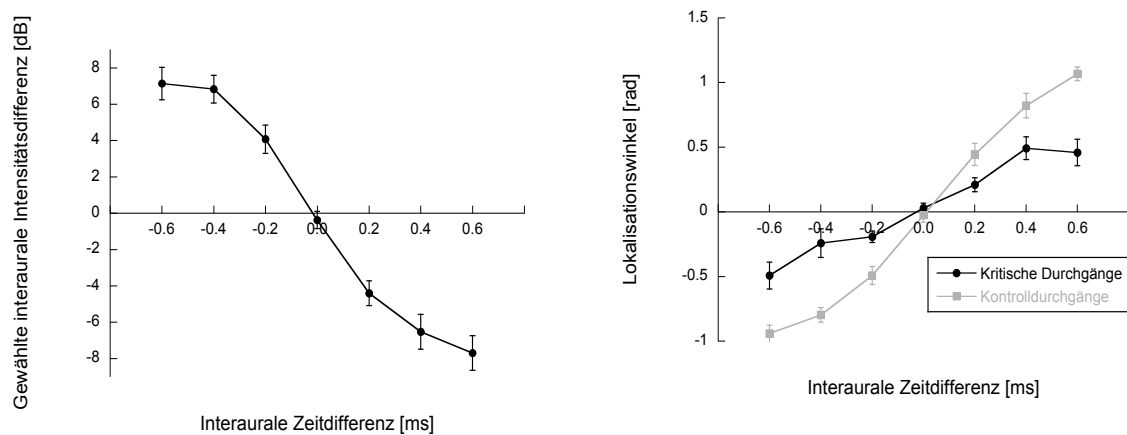


Abbildung 1. Linke Seite: Während der Kompensationsphase von Experiment 1a von den Versuchspersonen eingestellte Intensitätsdifferenzen, um die vorgegebenen Zeitdifferenzen zu kompensieren (die Fehlerbalken kennzeichnen die Standardmessfehler). Rechte Seite: Relation zwischen der vorgegebenen Zeitdifferenz und der wahrgenommenen Richtung der Töne während der Lokalisationsphase von Experiment 1a (die Fehlerbalken kennzeichnen die Standardmessfehler). Die Abbildung entspricht Abbildung 1 aus Artikel 1.

Abbildung 1 und Abbildung 2 stellen die Ergebnisse der beiden Experimente grafisch dar. In beiden Experimenten zeigte sich der shift-back Effekt deutlich. In den jeweiligen Lokalisationsphasen wurden die kritischen Stimuli nicht in der Mitte lokalisiert; vielmehr ging die Richtung der Lokalisationsurteile zurück in die Richtung der Position, an der sie ohne Kompensation lokalisiert worden wären. Betrachten wir zum Beispiel die Lokalisationsurteile aus Experiment 1a, die bei einer vorgegebenen Zeitdifferenz von $+600\ \mu\text{s}$ gegeben wurden. In den Kontrolldurchgängen – für die keine vorhergehende Kompensation der gegebenen Zeitdifferenz durch eine Intensitätsdifferenz von entgegengesetztem Vorzeichen stattgefunden hatte – betrug der mittlere Lokalisationswinkel $1,07$ (Bogenmaß). In den kritischen Durchgängen betrug der Lokalisationswinkel $0,46$. Beide Winkel tragen ein positives Vorzeichen, was bedeutet, dass die jeweiligen Töne rechts von der sagittalen Mittellinie lokalisiert wurden.

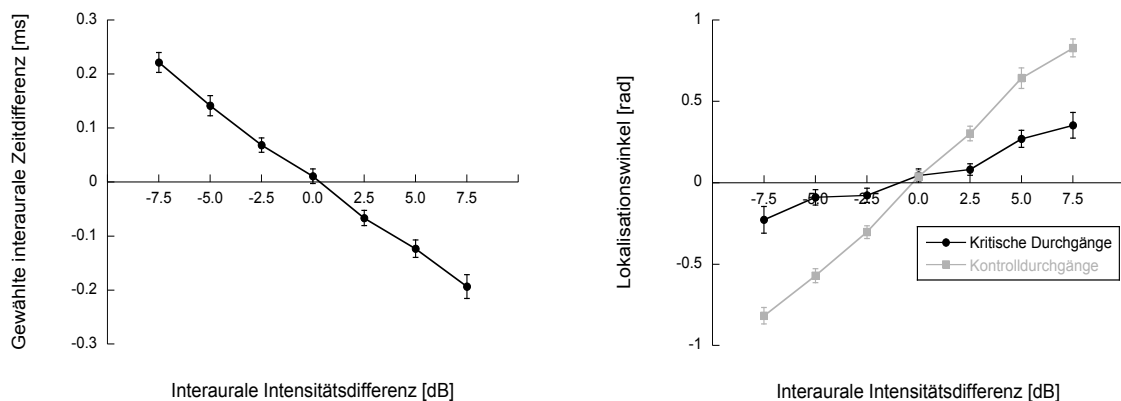


Abbildung 2. Linke Seite: Während der Kompensationsphase von Experiment 2 von den Versuchspersonen eingestellte Zeitdifferenzen, um die vorgegebenen Intensitätsdifferenzen zu kompensieren (die Fehlerbalken kennzeichnen die Standardmessfehler). Rechte Seite: Relation zwischen der vorgegebenen Intensitätsdifferenz und der wahrgenommenen Richtung der Töne während der Lokalisationsphase von Experiment 2 (die Fehlerbalken kennzeichnen die Standardmessfehler). Die Abbildung entspricht Abbildung 5 aus Artikel 1.

Die in den Kompensationsphasen beider Experimente gefundenen Äquivalenzmaßstäbe sind gut mit den von Young und Levine gefundenen Äquivalenzmaßstäben vergleichbar. In der Kompensationsphase von Experiment 1a betrug die trading ratio $80,1 \mu\text{s}/\text{dB}$ bei einer vorgegebenen Zeitdifferenz von $600 \mu\text{s}$ ($79,4 \mu\text{s}/\text{dB}$ für eine vorgegebene Zeitdifferenz von $500 \mu\text{s}$ bei Young und Levine). In der Kompensationsphase von Experiment 2 betrug die trading ratio $27,7 \mu\text{s}/\text{dB}$ bei einer vorgegebenen Intensitätsdifferenz von $7,5 \text{ dB}$ ($40,4 \mu\text{s}/\text{dB}$ für eine Intensitätsdifferenz von 8 dB bei Young und Levine).

Die von Young und Levine berichteten unterschiedlichen Äquivalenzrelationen konnten somit durch die vorliegenden Experimente weitgehend repliziert werden, obwohl in den hier vorgestellten Experimenten kein Referenzstimulus präsentiert wurde, der als „Ankerpunkt“ für eine Regression hätte dienen können.

Experiment 1b

Experiment 1b ist ein Kontrollexperiment, das eine alternative Erklärungsmöglichkeit für den in den Lokalisationsphasen von Experiment 1a und 2 gefundenen shift-back Effekt untersuchen sollte. Die kritischen Durchgänge von Experiment 1a wurden mit einer Kombination aus interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen präsentiert. Die meisten⁵ Kontrolldurchgänge hatten eine Zeitdifferenz, die ungleich Null war, und eine Intensitätsdifferenz von 0 dB. Insgesamt wurden also deutlich mehr Durchgänge mit einer von Null verschiedenen Zeitdifferenz als Durchgänge mit einer von Null verschiedenen Intensitätsdifferenz präsentiert. Diese Überrepräsentation von interauralen Zeitdifferenzen könnte für die in der Lokalisationsphase von Experiment 1a gefundene höhere Gewichtung von interauralen Zeitdifferenzen verantwortlich sein. Um diese Möglichkeit zu überprüfen, wurde die Lokalisationsphase von Experiment 1b um zusätzliche 35 Kontrolldurchgänge erweitert, die alle eine interaurale Zeitdifferenz von 0 μ s hatten; die Intensitätsdifferenzen waren identisch mit den Intensitätsdifferenzen der Kontrolldurchgänge aus Experiment 2 (-7,5 dB; -5,0 dB; -2,5 dB; 0,0 dB; 2,5 dB; 5,0 dB oder 7,5 dB).

Wenn eine Überrepräsentation von Zeitdifferenzen in den Kontrolldurchgängen von Experiment 1a für den shift-back Effekt (mit-) verantwortlich war, sollte der shift-back Effekt in Experiment 1b verschwinden bzw. sich abschwächen. Dies war jedoch nicht der Fall. Die Ergebnisse von Experiment 1b unterscheiden sich nicht signifikant von den Ergebnissen aus Experiment 1a. Die Überrepräsentation von Zeitunterschieden in den Kontrollstimuli von Experiment 1a ist daher als Erklärung für den shift-back Effekt unwahrscheinlich.

Experiment 1c

Experiment 1c stellt ein weiteres Kontrollexperiment dar. Phillips und Hall (2005) konnten Adaptionseffekte sowohl für interaurale Zeitdifferenzen als auch für interaurale Intensitätsdifferenzen nachweisen. Sie präsentierten ihren Versuchspersonen abwechselnd zwei Tonimpulse („kritische Töne“) mit verschiedenen Frequenzen, die sich entweder hinsichtlich der Zeitdifferenz oder hinsichtlich

der Intensitätsdifferenz unterschieden. Der Präsentation der kritischen Töne voraus ging die Präsentation von zwei „Adaptortönen“ mit den selben zwei Frequenzen und extremen, einander entgegengesetzten lateralen Positionen. Die lateralen Positionen wurden durch den selben interauralen Hinweisreiz induziert, der auch bei den nachfolgenden kritischen Tönen zum Einsatz kam. Es zeigte sich bereits nach wenigen Sekunden für beide Töne ein Adaptionseffekt, das heißt, die Wirkung des verwendeten interauralen Hinweisreizes auf den Lateralisationswinkel war reduziert. Im Vergleich zu einer Bedingung, in der der Präsentation der kritischen Töne keine Adaptortöne vorausgingen, fand eine Verschiebung der Lokalisationsurteile – von der Position der vorangegangenen Adaptortöne weg – statt.

Würde eine solche Adaption in einem Experiment auftreten, in dem – wie in Experiment 1a – beide interauralen Hinweisreize in Opposition stehen, wäre die relative Gewichtung des Hinweisreizes, bei dem die Adaption stattgefunden hat, reduziert in Relation zum komplementären Hinweisreiz. In der Kompensationsphase von Experiment 1a wurden die Töne jeweils mit einer fest eingestellten interauralen Zeitdifferenz präsentiert, während die interaurale Intensitätsdifferenz von der Versuchsperson justiert wurde und somit während des gesamten Durchganges permanenten Änderungen unterlag. Es wäre daher möglich, dass eine Adaption einseitig (bzw. in verstärktem Maße) zu Lasten der interauralen Zeitdifferenz stattfand und diese Adaption die relative Gewichtung der Zeitdifferenz während der Kompensation reduzierte. Diese Reduktion des Gewichts der Zeitdifferenz hätte zur Folge gehabt, dass die gewählte kompensatorische Intensitätsdifferenz kleiner ausgefallen wäre als in einer Situation, in der keine Adaption stattgefunden hatte. In den kritischen Durchgängen der Lokalisationsphase – wo beide interauralen Hinweisreize während des gesamten Durchganges unverändert blieben – hätte sich der zuvor eingestellte Wert für die Intensitätsdifferenz als zu gering erwiesen, was die bekannte Verschiebung in Form des shift-back Effekt erklären würde.

Experiment 1c wurde durchgeführt, um zwischen eventuell auftretenden Adaptionseffekten und der ursprünglich angenommenen Aufmerksamkeitshypothese zu differenzieren. In Experiment 1a wäre Adaption als Ursache für den shift-back Effekt denkbar, weil während der Kompensationsphase die interaurale Zeitdifferenz während eines Durchganges konstant blieb, während die interaurale Intensi-

tätsdifferenz durch die Versuchsperson justiert wurde und daher variierte. In der Lokalisationsphase hingegen waren beide Hinweisreize konstant. Die Lokalisationsphase von Experiment 1c wurde daher so gestaltet, dass es hinsichtlich der Variabilität der Hinweisreize in beiden Phasen des Experiments keinen Unterschied gab. In jedem Durchgang der Kompensationsphase wurden sämtliche Variationen der Intensitätsdifferenz, die die Versuchsperson vornahm, in ihrem zeitlichen Verlauf aufgezeichnet. Im analogen Durchgang der Lokalisationsphase wurde nicht – wie in Experiment 1a – nur der Wert der Intensitätsdifferenz präsentiert, den die Versuchsperson während der Kompensationsphase *zuletzt* eingestellt hatte (für den sie sich „entschieden“ hatte), sondern sämtliche Variationen über der Zeit exakt so präsentiert, wie sie auch in der Kompensationsphase zu hören waren. Betrachten wir ein (vereinfachtes) Beispiel. Während der Kompensationsphase wird ein Ton mit einer fest eingestellten Zeitdifferenz von 400 μ s präsentiert. Der Startwert des Schiebereglers beträgt 8,15 dB. Nach 750 ms der Präsentation schiebt die Versuchsperson den Regler gleichmäßig auf einen Wert von -4,36 dB (bis zum Zeitpunkt 1001 ms). Zum Zeitpunkt 1545 ms beendet die Versuchsperson den Durchgang, indem sie auf die Schaltfläche „Weiter“ klickt. Während der Lokalisationsphase wird dieser Durchgang mit einer fest eingestellten Zeitdifferenz von 400 μ s und einer anfänglichen Intensitätsdifferenz von 8,15 dB präsentiert; zwischen den Zeitpunkten 750 ms und 1001 ms ändert sich die Intensitätsdifferenz auf -4,36 dB. Zum Zeitpunkt 1545 ms endet die Präsentation des Stimulus. Im Anschluss soll die Versuchsperson die *zuletzt* gehörte Position des Tons angeben. Die Aufzeichnung erfolgte in einem Raster von 1 ms, um eine exakte Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Einstellungen während der Kompensationsphase zu gewährleisten. Um zu verhindern, dass die Kontrolldurchgänge von den kritischen Durchgängen unterschieden werden konnten, erhielten die Kontrolldurchgänge einen zufällig gewählten zeitlichen Verlauf der Intensitätsdifferenz, der bei 0 dB endete.

Das Signal, das die Versuchsperson in einem Durchgang der Kompensationsphase und im analogen Durchgang der Lokalisationsphase *hörte*, war während des gesamten zeitlichen Verlaufs des Durchgangs identisch. War Adaption und die daraus folgende geringere Gewichtung der interauralen Zeitdifferenz in den Durchgängen der Kompensationsphase von Experiment 1a die Ursache für den

shift-back Effekt, müsste dieser Adaptionseffekt in Experiment 1c *in beiden Phasen* gleich stark ausgeprägt sein und der shift-back Effekt daher verschwinden. Trifft hingegen die Hypothese zu, dass die *Aufgabe* des Justierens der interauralen Intensitätsdifferenz zu einer stärkeren Gewichtung der Intensitätsdifferenz führte, müsste der shift-back Effekt in Experiment 1c erhalten bleiben. Dies war der Fall; die Ergebnisse von Experiment 1c unterscheiden sich nicht signifikant von denen aus Experiment 1a. Adaption kann den shift-back Effekt daher nicht erklären.

Experiment 1d

Das Rationale von Experiment 1d ist ähnlich dem des vorherigen Experimentes. In Experiment 1c wurden Adaptionseffekte als mögliche Erklärung für den shift-back Effekt diskutiert. Es wurde unterstellt, dass eventuell auftretende Adaptionseffekte – wie von Phillips und Hall (2005) berichtet – bereits nach kurzer Präsentation der Töne (einige Sekunden) auftritt.

Mit Experiment 1d sollte untersucht werden, ob eine Verschiebung der Gewichtung von interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen über einen längeren Zeitraum hinweg stattgefunden hatte. Es wäre zum Beispiel denkbar, dass – aus noch zu spezifizierenden Gründen – während der *gesamten Dauer* der Kompensationsphase mit ihren 35 Durchgängen *allmählich* eine Verschiebung der perzeptuellen Gewichtung zu Gunsten der Zeitdifferenzen stattgefunden hat, die ebenfalls geeignet wäre, den shift-back Effekt in der Lokalisationsphase zu erklären. Aus diesem Grund wurde in Experiment 1d die Lokalisationsphase durch eine *zweite Kompensationsphase* ersetzt. Die Präsentation jedes kritischen Durchgangs in der zweiten Kompensationsphase begann mit der selben Parameterkombination wie der analoge Durchgang in der ersten Kompensationsphase, d.h. mit identischer vorgegebener Zeitdifferenz und mit der Intensitätsdifferenz, die die jeweilige Versuchsperson in der ersten Kompensationsphase gewählt hatte. Die Kontrolldurchgänge der zweiten Kompensationsphase wurden mit einem zufällig ausgewählten Initialwert der Intensitätsdifferenz präsentiert. Insgesamt konnten drei Äquivalenzfunktionen verglichen werden: (1) die gewählten kompensatorischen Intensitätsdifferenzen für die kritischen Durchgänge in der ersten Kompensationsphase, (2) die gewählten kompensatorischen Intensitätsdiffe-

renzen der kritischen Durchgänge in der zweiten Kompensationsphase und (3) die Kompensationswerte der Kontrolldurchgänge in der zweiten Kompensationsphase.

Es zeigte sich, dass sich die Äquivalenzrelationen in allen drei Fällen nicht signifikant unterschieden. Daher sind längerfristige Verschiebungen der perzeptuellen Gewichtung der beiden interauralen Hinweisreize, die durch die zeitliche Aufteilung von Kompensations- und Lokalisationsdurchgängen in zwei Blöcke hätten entstehen können, nicht in der Lage, den shift-back Effekt zu erklären.

Experiment 3 und Experiment 4

Experiment 3 und Experiment 4 sind in Artikel 2 beschrieben (sie tragen dort die Bezeichnungen „Experiment 1“ und „Experiment 2“). In den vier bisher vorgestellten Experimenten diente die Aufnahme einer weiblichen Stimme als Stimulusmaterial. Es gibt Belege dafür, dass breitbandige Töne mit der größten Genauigkeit lokalisiert werden (siehe zum Beispiel Stevens & Newman, 1936), und daher wurde erwartet, dass auf diese Weise ein eventuell vorhandener shift-back Effekt am deutlichsten gezeigt werden könnte.

Wie in der Einführung geschildert, werden tiefere Frequenzen überwiegend auf Grund der interauralen Zeitdifferenz lokalisiert, während höhere Frequenzen überwiegend auf Grund der Intensitätsdifferenz geortet werden. In dieser Tatsache könnte eine alternative Erklärung für den shift-back Effekt liegen. Es wäre möglich, dass die Aufmerksamkeit in den Durchgängen der Kompensationsphase nicht direkt auf den interauralen Hinweisreiz gelenkt wurde, den die Versuchsperson gerade justierte, sondern auf den *Frequenzbereich*, für den der jeweilige Hinweisreiz mehr Bedeutung besitzt. In Experiment 1a justierte die Versuchsperson in der Kompensationsphase den interauralen Intensitätsunterschied; eine Verschiebung der Aufmerksamkeit auf höhere Frequenzbereiche könnte der Versuchsperson die Aufgabe erleichtert haben, den Zusammenhang zwischen den von ihr vorgenommenen Justierungen der Intensitätsdifferenz und Veränderungen in der Lokalisation der Töne zu registrieren. Umgekehrt hätte in Experiment 2 eine Verlagerung der Aufmerksamkeit auf tiefere Frequenzbereiche die Aufgabe der Justierung der interauralen Zeitdifferenz erleichtern können.

Gegen diese Annahme sprechen die Befunde von Young und Levine (1977), die u.a. Sinustöne mit einer Frequenz von 500 Hz verwendeten und dennoch unterschiedliche Äquivalenzrelationen in Abhängigkeit davon erhielten, welcher Hinweisreiz durch die Versuchsperson justiert wurde. Dies wäre nur dadurch zu erklären, dass den von Young und Levine gefundenen Unterschieden in den Äquivalenzrelationen andere Ursachen zu Grunde liegen als den Unterschieden, die in den oben beschriebenen Experimenten auftraten. Es könnte sich bei der Regression in Anwesenheit eines Referenzstimulus (Young und Levine) und bei der frequenzspezifischen Aufmerksamkeit (Experimente 1a bis 1c und Experiment 2) um zwei verschiedene „Wirkmechanismen“ handeln, die einen vergleichbaren Effekt auf die gefundenen Äquivalenzrelationen haben.

Die Experimente 3 und 4 wurden – wie die Experimente von Young und Levine – mit 500-Hz-Sinustönen durchgeführt. Sinustöne setzen sich in der Fouriertransformation nicht aus Tönen unterschiedlicher Frequenz zusammen. Wenn der in den oben beschriebenen Experimenten gefundene shift-back Effekt sowie die unterschiedlichen Äquivalenzrelationen in den Kompensationsphasen auf Phänomene der frequenzselektiven Aufmerksamkeit zurückzuführen sind, müssten beide Effekte verschwinden, wenn statt gesprochener Sprache Sinustöne zum Einsatz kommen.

Bei Experiment 3 handelt es sich um eine exakte Replikation von Experiment 1a, während Experiment 4 eine exakte Replikation von Experiment 2 ist – mit dem einzigen Unterschied, dass in den Experimenten 3 und 4 Sinustöne mit einer Frequenz von 500 Hz als Stimulusmaterial dienen.

Die Ergebnisse von Experiment 3 und Experiment 4 sprechen für die Aufmerksamkeitshypothese in ihrer ursprünglichen Fassung. In beiden Experimenten wurde sowohl ein deutlicher shift-back Effekt gefunden als auch die charakteristische Diskrepanz der Äquivalenzrelationen in den Kompensationsphasen.

Schlussbemerkungen und Ausblick

Die in der vorliegenden Arbeit geschilderten Experimente liefern deutliche Belege für die Hypothese, dass die Gewichtung von interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen durch die der Versuchs-

person gestellte Aufgabe manipuliert werden kann und dass die kognitiven Prozesse in Kompensationsdurchgängen nicht mit den Prozessen in reinen Lokalisationsdurchgängen vergleichbar sind. In den Schlussdiskussionen beider Artikel im Anhang wird versucht, die Implikationen der Befunde darzustellen und zu anderen Arbeiten in Bezug zu setzen.

Eine der interessantesten Fragen ist nach wie vor, ob die hier vorgeschlagene Aufmerksamkeitshypothese und das Regressionsmodell von Trahiotis und Kappauf sich gegenseitig ausschließende Hypothesen darstellen oder ob eine Integration beider Modelle für ein umfassenderes Verständnis der zu Grunde liegenden kognitiven Prozesse möglich – und sinnvoll – ist. In der Einleitung wurde der Regressionsansatz eingeführt als ein alternativer Erklärungsansatz, der sich *auf den ersten Blick* grundsätzlich von der Aufmerksamkeitshypothese unterscheidet. Die Aufmerksamkeitshypothese unterstellt, dass durch die Kompensationsaufgabe die Aufmerksamkeit der Versuchsperson auf den zu justierenden Parameter gelenkt wird und diese Verschiebung der Aufmerksamkeit zu einer höheren Gewichtung des zu justierenden interauralen Hinweisreizes im Vergleich zum komplementären Hinweisreiz führt. Da in den vorliegenden Experimenten kein Referenzstimulus präsentiert wird, erscheint eine Regression unmöglich. Es ist jedoch vorstellbar, dass der Mensch durch seine Lernerfahrung *interne Repräsentationen* von Referenzstimuli für verschiedene Lateralisationswinkel besitzt. Eine solche interne Repräsentation würde für einen Winkel von 0° mit einer Zeitdifferenz von $0\ \mu\text{s}$ und einer Intensitätsdifferenz von $0\ \text{dB}$ einhergehen. In Erweiterung des in der Einführung vorgestellten Modells der Regression, das zwei Prozesse beinhaltet (Vergleichsprozess zwischen Test- und Referenzstimulus hinsichtlich der lateralen Position und des Wertes des zu justierenden Parameters), kommt mit der Annahme eines internen Referenzstimulus ein weiterer Prozess hinzu, so dass insgesamt drei Prozesse unterschieden werden können.

- 1) Aktivierung eines internen Referenzstimulus, der den Lateralisationswinkel hat, der durch die Kompensation erreicht werden soll;
- 2) Vergleichsprozess zwischen der Position des Teststimulus und der Position des internen Referenzstimulus;

- 3) Vergleichsprozess zwischen dem Wert des zu justierenden Parameters des Teststimulus und dem entsprechenden Parameterwert des internen Referenzstimulus; dieser Vergleichsprozess verursacht einen Antwort-Bias in Richtung des Parameterwertes des Referenzstimulus.

Im Unterschied zur ursprünglichen Fassung der Aufmerksamkeitshypothese würde die erhöhte Aufmerksamkeit für einen Hinweisreiz nicht die Gewichtung dieses Hinweisreizes in Relation zum komplementären Hinweisreiz erhöhen, sondern determinieren, auf welcher Dimension der dritte Vergleichsprozess stattfindet (Zeitdifferenz vs. Intensitätsdifferenz). In der weiteren Betrachtung wird dieser Ansatz als „erweiterter Regressionsansatz“ bezeichnet.

In der Schlussdiskussion von Artikel 1 wird das Resümee gezogen, dass ein experimentelles Paradigma gefunden werden müsse, dass die Aktivierung eines internen Referenztons oder dessen Verwendung als Vergleichsmaßstab verhindert, wenn man zwischen der Aufmerksamkeitshypothese und dem erweiterten Regressionsansatz differenzieren will. Dies könnte zum Beispiel dadurch erreicht werden, dass während des Experiments ein Referenzstimulus (explizit) dargeboten wird, der auf einer oder beiden Dimensionen den angenommenen Eigenschaften des internen Referenzstimulus widerspricht. Betrachten wir wieder ein Beispiel: Es wird angenommen, dass der interne Referenzton, der einen Lateralisationswinkel von 0° repräsentiert, eine interaurale Zeitdifferenz von $0\ \mu\text{s}$ und eine interaurale Intensitätsdifferenz von $0\ \text{dB}$ hat. In einem Experiment könnte nun ein Referenzton präsentiert werden, der ebenfalls in der Mitte lokalisiert wird, dessen interaurale Parameter sich aber von Null unterscheiden. Eine Voruntersuchung könnte beispielsweise ergeben haben, dass in reinen Lokalisationsdurchgängen ein Ton mit einer Zeitdifferenz von $-200\ \mu\text{s}$ und einer Intensitätsdifferenz von $+4,0\ \text{dB}$ in der Mitte lokalisiert wird. Dieser Ton wird in einer Kompensationsaufgabe als Referenzton für Mittenlokalisierung präsentiert. Der zu justierende Ton könnte eine fest eingestellte Zeitdifferenz von ebenfalls $-200\ \mu\text{s}$ haben. In der Kompensationsaufgabe werden der zu justierende Ton und der Referenzton alternierend präsentiert, wobei die Versuchsperson die Instruktion erhält, die Intensitätsdifferenz des Testtons so einzustellen, dass der Testton den selben Lateralisationswinkel aufweist wie der Referenzton. Der „kor-

rekte“ Wert für die Justierung, d.h. der Wert, der ohne Bias durch eine Übergewichtung eines der Hinweisreize oder Regression erwartet wird, ist +4,0 dB. Der Regressionsansatz und die Aufmerksamkeitshypothese machen an dieser Stelle unterschiedliche Vorhersagen hinsichtlich eines Bias. Der Regressionsansatz sagt einen Bias von Null vorher, da die Intensitätsdifferenz des Referenzstimulus identisch mit dem „korrekten“ Wert ist. Eine Regression würde daher in Richtung des Wertes erfolgen, der auch ohne einen Bias gewählt würde. Folgt man hingegen der Aufmerksamkeitshypothese, erwartet man eine justierte Intensitätsdifferenz, die signifikant kleiner als +4,0 dB ist, da die angenommene Aufmerksamkeitsverschiebung das Gewicht der Intensitätsdifferenz erhöht, so dass im Vergleich zu einer reinen Lokalisationsaufgabe (hier der Vorversuch) kleinere Werte für die Intensitätsdifferenz gewählt werden.

Der nächste Schritt wäre, das Paradigma so zu verändern, dass der Regressionsansatz und die Aufmerksamkeitshypothese jeweils einen Bias in *unterschiedliche Richtungen* vorhersagen. Nehmen wir an, die Analyse eines Satzes von head related impulse responses (HRIRs) habe ergeben, dass für einen Ton einer bestimmten Frequenz folgende Parameter in einer natürlichen Hörsituation gemeinsam auftreten: Der Lateralisationswinkel beträgt +45°, die interaurale Zeitdifferenz ist +200 µs und die interaurale Intensitätsdifferenz beträgt +4,0 dB. In einer Voruntersuchung wurde bestätigt, dass der Ton bei +45° lokalisiert wird, wenn die Zeitdifferenz +200 µs und die Intensitätsdifferenz +4,0 dB beträgt. Der selbe Vorversuch ergab darüber hinaus, dass auch die Präsentation mit +100 µs und +6,0 dB zu einem Lokalisationswinkel von +45° führt. In diesem Fall wurde offensichtlich die „zu geringe“ Zeitdifferenz durch eine erhöhte Intensitätsdifferenz ausgeglichen.

Im Hauptexperiment dient der zweite Ton (+100 µs; +6,0 dB) als Referenzton. Der zu justierende Ton wird mit einer fest eingestellten Zeitdifferenz von +200 µs präsentiert. Da der angestrebte Lokalisationswinkel +45° ist, wäre der „korrekte“ (Bias-freie) Einstellwert der Intensitätsdifferenz +4,0 dB (natürlich vorkommende Parameterkombination gemäß der HRIR und der Voruntersuchung). Das Regressionsmodell macht die Vorhersage eines Bias der eingestellten Intensitätsdifferenz in Richtung der Intensitätsdifferenz des Referenzstimulus (+6,0 dB), so dass ein justierter Wert von *mehr als* +4,0 dB erwartet wird. Die Aufmerksamkeitshypothese, für die die Parameterwerte des Referenzstimu-

lus bedeutungslos sind, geht hingegen von einer besonders hohen Gewichtung der Intensitätsdifferenz aus, so dass ein Einstellwert von *weniger als* +4,0 dB erwartet wird.

Auch die zwei eben beschriebenen Experimente sind jedoch nicht unproblematisch hinsichtlich ihres Potenzials, zwischen dem Regressionsansatz und der Aufmerksamkeitshypothese zu differenzieren. Es wird nämlich die – nicht-triviale – Annahme gemacht, dass ein explizit vorgegebener Referenzton einen eventuell vorhandenen internen Referenzton in seiner Wirkung aufhebt. Wenn in den beiden Experimenten ein Bias in Richtung der Parameterwerte des präsentierten Referenztons beobachtet würde, wäre diese Annahme plausibel. Würde hingegen ein Bias in Richtung Null beobachtet, könnte dies für die Aufmerksamkeitshypothese *oder* für die Dominanz eines internen Referenztons über den externen Referenzton sprechen. Für die Annahme eines dominanten internen Referenztons würde sprechen, dass er möglicherweise das Ergebnis von lebenslanger Lernerfahrung ist; auf der anderen Seite könnte argumentiert werden, dass der explizit dargebotene Referenzton wegen seiner zeitlichen Nähe zum Testton mehr Salienz besitzt.

Ein weiterer Schritt zur Klärung dieser Frage könnte sein, eine experimentelle Situation zu schaffen, in der der vermutete interne Referenzton und ein externer Referenzton einander direkt gegenübergestellt werden. Als *externer* Referenzton könnte der gleiche Ton verwendet werden wie im ersten in diesem Ausblick vorgeschlagenen Experiment. Wir hatten beispielhaft angenommen, dass ein Ton mit einer interauralen Zeitdifferenz von -200 μ s und einer Intensitätsdifferenz von +4,0 dB Mittenslokalisation hervorruft. Dieser externe Referenzton könnte alternierend mit dem *angenommenen internen* Referenzton präsentiert werden; dieser interne Referenzton hätte eine interaurale Zeitdifferenz von 0 μ s und eine Intensitätsdifferenz von 0 dB und dient in diesem Experiment als Testton, der durch die Versuchsperson justiert werden soll. Der Versuchsleiter legt die Zeitdifferenz auf 0 μ s fest und stellt als Startwert für die Intensitätsdifferenz 0 dB ein. Die Versuchsperson wird gebeten, die Intensitätsdifferenz so einzustellen, dass der Testton den selben Lateralisationswinkel hat wie der (externe) Referenzton. Dominiert nun den externe Referenzton über den internen (diotischen) Referenzton, wird die Versuchsperson die Intensitätsdifferenz in Richtung eines positiven Wertes (Anker der Regression: +4,0 dB)

verschieben. Vergleicht die Versuchsperson hingegen den zu justierenden Ton mit dem internen diotischen Referenzton, wird sie deren Gleichheit feststellen und keine Veränderung an der Intensitätsdifferenz des Testtons vornehmen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Regressionsansatz in seiner ursprünglichen, von Trahiotis und Kappauf vorgelegten Form durch die hier vorgestellten Experimente widerlegt wurde. Alle sechs Experimente zeigen, dass unterschiedliche Äquivalenzmaßstäbe auch dann auftreten, wenn kein Referenzstimulus präsentiert wird. Jedoch sind die hier vorgestellten Experimente auch kompatibel mit der Annahme eines durch Lernerfahrung gebildeten internen Referenzstimulus. Die weiter oben vorgeschlagenen Experimente könnten mit dazu beitragen, zwischen der Aufmerksamkeitshypothese und dem erweiterten Regressionsansatz zu differenzieren.

Endnoten

¹ Im Rest dieses Aufsatzes wird folgende Vorzeichen-Konvention eingehalten: Ein negatives Vorzeichen bei einer Winkelangabe kennzeichnet einen Ton, der links von der sagittalen Mittelebene lokalisiert wird. Bei einer interauralen Zeit- oder Intensitätsdifferenz kennzeichnet das negative Vorzeichen, dass der Ton auf dem linken Ohr früher bzw. lauter präsentiert wird als auf dem rechten Ohr. Ein positives Vorzeichen kennzeichnet einen Winkel rechts von der sagittalen Mittelebene bzw. frühere oder lautere Präsentation auf dem rechten Ohr.

² Auch vor der breiten Verfügbarkeit der Digitaltechnik war es möglich, Zeitdifferenzen über Kopfhörer zu realisieren. Zum Einsatz kamen damals passive elektronische Bauelemente, die zu sog. „Laufzeitgliedern“ zusammengefasst wurden.

³ Wightman und Kistler (1992) verglichen die Äquivalenzrelationen bei Verwendung von Breitbandrauschen oder hochpass-gefiltertem Rauschen. In der Breitband-Bedingung erfolgten die Richtungsurteile fast ausschließlich auf Grund der interauralen Zeitunterschiede. Wightman und Kistler zogen daraus den Schluss, dass Zeitdifferenzen von Tönen niedriger Frequenz über Intensitätsunterschiede auf allen Frequenzen dominieren.

⁴ Ein Ton wird diotisch (im Gegensatz zu „dichotisch“) präsentiert, wenn das linke und das rechte Ohr exakt die selben Signale erhalten, also insbesondere keine interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen vorhanden sind. Durch die diotische Präsentation des Rauschens war der angestrebte Lateralisationswinkel für die Sinustöne auf 0° festgelegt.

⁵ Wie weiter oben beschrieben, wurden die Kontrolldurchgänge mit interauralen Zeitdifferenzen von -600 µs, -400 µs, -200 µs, 0 µs, 200 µs, 400 µs oder 600 µs präsentiert, so dass nur 1/7 der Kontrolldurchgänge eine Zeitdifferenz von 0 µs hatte.

Literatur

- Deatherage, B. H., & Hirsh, I. J. (1959). Auditory localization of clicks. *Journal of the Acoustical Society of America*, 31, 486-492.
- Doll, T. J., & Hanna, T. E. (1989). Enhanced detection with bimodal sonar displays. *Human Factors*, 31, 539-550.
- Doll, T. J., & Hanna, T. E. (1995). Spatial and spectral release from masking in three-dimensional auditory displays. *Human Factors*, 37, 341-355.
- Doll, T. J., & Hanna, T. E. (Eds.). (1997). *Directional cuing effects in auditory recognition*. Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- Doll, T. J., Hanna, T. E., & Russotti, J. S. (1992). Masking in three-dimensional auditory displays. *Human Factors*, 34, 255-265.
- Gaik, W. (1993). Combined evaluation of interaural time and intensity differences: Psychoacoustic results and computer modeling. *Journal of the Acoustical Society of America*, 94, 98-110.
- Haft, E. R., & Jeffress, L. A. (1968). Two-image lateralization of tones and clicks. *Journal of the Acoustical Society of America*, 44, 563-569.
- Horbach, U., Karamustafaoglu, A., Pellegrini, R., Mackensen, P., & Theile, G. (1999). Design and Applications of a Data-based Auralization System for Surround Sound. *AES Convention Preprints*, 106th Convention.
- Jeffress, L. A., & McFadden, D. (1971). Differences of interaural phase and level in detection and lateralization. *Journal of the Acoustical Society of America*, 49, 1169-1179.
- King, R. B., & Oldfield, S. R. (1997). The impact of signal bandwidth on auditory localization: Implications for the design of three-dimensional audio displays. *Human Factors*, 39, 287-295.

- Leakey, D. M., & Cherry, E. C. (1957). Influence of noise upon the equivalence of intensity differences and small time delays in two-loudspeaker systems. *Journal of the Acoustical Society of America*, 29, 284-286.
- Loomis, J. M., Golledge, R. D., & Klatzky, R. L. (Eds.). (2001). *GPS-based navigation systems for the visually impaired*. Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Loomis, J. M., Golledge, R. G., & Klatzky, R. (1998). Navigation System for the Blind: Auditory Display Modes and Guidance. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7.
- Macpherson, E. A., & Middlebrooks, J. C. (2002). Listener weighting of cues for lateral angle: The duplex theory of sound localization revisited. *Journal of the Acoustical Society of America*, 111, 2219-2236.
- Marston, J. R., Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G., & Smith, E. L. (2006). Evaluation of Spatial Displays for Navigation without Sight. *ACM Transactions on Applied Perception*, 3, 110-124.
- McFadden, D., Jeffress, L., & Erney, H. L. (1971). Differences of interaural phase and level in detection and lateralization: 250 Hz. *Journal of the Acoustical Society of America*, 50, 1484-1493.
- McFadden, D., Jeffress, L., & Lakey, J. R. (1972). Differences of interaural phase and level in detection and lateralization: 1000 and 2000 Hz. *Journal of the Acoustical Society of America*, 52, 1197-1206.
- McFadden, D., Jeffress, L. A., & Russell, W. E. (1973). Individual differences in sensitivity to interaural differences in time and level. *Perceptual and Motor Skills*, 37, 755-761.
- Middlebrooks, J. C. (1992). Narrow-band sound localization related to external ear acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 92, 2607-2624.
- Middlebrooks, J. C., & Green, D. M. (1991). Sound localization by human listeners. *Annual Review of Psychology*, 42, 135-159.
- Musicant, A. D., & Butler, R. A. (1985). Influence of monaural spectral cues on binaural localization. *Journal of the Acoustical Society of America*, 77, 202-208.

- Phillips, D. P., & Hall, S. E. (2005). Psychophysical evidence for adaptation of central auditory processors for interaural differences in time and level. *Hearing Research*, 202, 188-199.
- Pössl, C., Schröter, J., Opitz, M., Divenyi, P. L., & Blauert, J. (1986). Generation of binaural signals for research and home entertainment. *Proc. 12th Int. Congr. on Acoustics, Toronto, 1*, B1-6.
- Sheldon, P. E. (1973). Equal-onset contours of vibrotactile stimuli. *Perception and Psychophysics*, 13, 403-407.
- Stevens, S. S., & Newman, E. B. (1936). The localization of actual sources of sound. *American Journal of Psychology*, 48, 297-306.
- Strutt, J. W. (1907). On our perception of sound direction. *Philos. Mag.*, 13, 214-232.
- Tischmeyer, F. (2006). *Internal Mixing: Der systematische Weg zum professionellen Mixdown im Rechner* Tischmeyer Publishing.
- Trahiotis, C., & Kappauf, W. (1978). Regression interpretation of differences in time-intensity trading ratios obtained in studies of laterality using the method of adjustment. *Journal of the Acoustical Society of America*, 64, 1041-1047.
- Whitworth, R. H., & Jeffress, L. A. (1961). Time vs. intensity in the localization of tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 33, 925-929.
- Wightman, F. L., & Kistler, D. J. (1992). The dominant role of low-frequency interaural time differences in sound localization. *Journal of the Acoustical Society of America*, 91, 1648-1661.
- Young, L., & Levine, J. (1977). Time-intensity trades revisited. *Journal of the Acoustical Society of America*, 61, 607-609.

**RELATIVE INFLUENCE OF INTERAURAL TIME AND INTENSITY
DIFFERENCES ON LATERALIZATION IS MODULATED BY ATTENTION TO
ONE OR THE OTHER CUE.**

Albert-Georg Lang^{a)} and Axel Buchner

Institut für Experimentelle Psychologie, Heinrich-Heine-Universität, 40225 Düsseldorf, Germany

Running head: Attentional modulation of sound localization

^{a)} Electronic mail: albert.lang@uni-duesseldorf.de

Abstract

When setting interaural time differences and interaural intensity differences into opposition the measured trading ratio depends on which of the cues is adjusted by the listener. This paper provides some evidence that the different trading ratios may be an effect of a shift of attention towards the to-be-adjusted cue. The experiments consisted of two phases. In the compensation phase, participants canceled out the effect of one preset binaural cue by adjusting a compensatory value of the other cue until the sound was located in the center. In the localization phase participants assessed the virtual location of the sounds, again using the preset values of the fixed cue, but using the values of the other cue as previously adjusted. The sounds were no longer perceived as originating from the center. Instead, their perceived location was shifted back towards the location from which they appeared to originate before the adjustment. These findings suggest that during the compensation task the to-be-adjusted sound localization cue received an increased weight compared to the other cue. We propose shifts of attention between the cues as a mechanism that could account for this finding.

PACS numbers: 43.66.Qp, 43.66.Ba, 43.66Pn

I. INTRODUCTION

Sound localization on the horizontal plane is largely determined by two physical parameters: interaural time differences (ITDs) and interaural intensity differences (IIDs). If experimenters or audio engineers want to manipulate the perceived location of a virtual sound source they may specify a certain ITD, an IID, or a combination of both. The question arises which ITD has the same effect on localization as a certain IID (and vice versa). Many experiments have been conducted to find a trading ratio or an equivalence relation¹ between both interaural cues (e.g., see Leakey and Cherry, 1957, Deatherage and Hirsh, 1959, Whitworth and Jeffress, 1961, Colburn and Durlach, 1965, Hafer and Jeffress, 1968, Jeffress and McFadden, 1971, McFadden et al., 1971, Hafer and Carrier, 1972, McFadden et al., 1972, McFadden et al., 1973, Algorn et al., 1988, Hafer et al., 1990, Wightman and Kistler, 1992, Gaik, 1993, Wightman and Kistler, 1997, Breebaart et al., 1999, Shinn Cunningham et al., 2000).

Setting the binaural cues into opposition such that their effects cancel each other out is a frequently used paradigm to find an equivalence relation. An early study is that of Leakey and Cherry (1957). In this study, words spoken by a female voice were presented over two loudspeakers set up outdoors in order to avoid disturbing reflections. ITDs were implemented by placing one loudspeaker more distant from the participant than the other loudspeaker while keeping the angle between the two loudspeakers constant relative to the listener. The IIDs caused by the unequal distances between the loudspeakers and the listener were compensated by increasing the volume of the more distant speaker. Participants' task was to judge the apparent

location of the virtual sound source for different combinations of ITDs and IIDs. The trials of interest were those in which the listener located the sound source exactly on the midline between the two loudspeakers. In these trials an ITD between the sound waves arriving from the two loudspeakers apparently had been compensated for by an IID of inverse sign, that is, the sound waves arrived earlier at one ear but at higher level at the other ear. It was found that the trading ratio increased with the preset ITD. For example the ratio was $59 \mu\text{s}/\text{dB}$ with the ITD set to $450 \mu\text{s}$, but $218 \mu\text{s}/\text{dB}$ with the ITD set to $2270 \mu\text{s}$. However, the presentation of sounds over loudspeakers has the shortcoming that the experimenter has insufficient control over the ITDs and IIDs that arrive at the listener's ears. For this reason presentation via headphones has established as the standard procedure for ITD-IID trading experiments.

The search for an equivalence relation is complicated by experimental results that show that there are different moderator variables. For example, the ratios found by Leahey and Cherry (1957) increased with the sound level of an additionally inserted source of white noise. Deatherage and Hirsh (1959) presented low-pass-filtered clicks at 40, 60, and $80 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ with preset IIDs via headphones. Participants adjusted the ITD so that they located the clicks in the middle of their heads. The ratio between ITDs and IIDs was not constant over the three listening levels. The ITD required to compensate for the given IID decreased with increasing sound pressure levels. Wightman and Kistler (1992) used either wideband or highpass-filtered noise stimuli with conflicting ITD and IID cues. In the wideband condition the listeners located the sounds solely on the basis of ITDs. Wightman and Kistler interpreted this result as evidence for

the dominance of low-frequency ITDs in the localization of sounds; when low-frequency ITDs were present they dominated IIDs at all frequencies.

Mills (1972) suggested that the localization judgment on the basis of the ITD limits the possible locus of a sound source to a so called “cone of confusion”, that is, a cone-shaped volume of hypothetical positions of the sound source that are consistent with the perceived ITD. The IID may pose additional constraints to the location of the sound source. Shinn Cunningham et al. (2000) described the intersection of iso-ITD and iso-IID volumes as torus-shaped volume (“tori of confusion”).

Besides the observation that the effects of opposing ITDs and IIDs cancel each other out, experiments have been reported in which setting both binaural cues into opposition lead to the perception of either of *two images*. One image is largely determined by the ITD (“time image”) while the other is determined to a much greater extent by the IID (“time/ intensity image”). The trading ratios are very different: For the time image the range is about 0 to 10 $\mu\text{s}/\text{dB}$ while for the time/ intensity image values between 20 and 50 $\mu\text{s}/\text{dB}$ have been reported. Extremely experienced listeners or participants that have completed huge amounts of practice trials over a period of several days may be able to hear both images (e.g., see Whitworth and Jeffress, 1961, Hafer and Jeffress, 1968).

Individual differences constitute another important set of moderator variables. For example, McFadden and colleagues (Jeffress and McFadden, 1971, McFadden et al., 1971, McFadden et al., 1972, McFadden et al., 1973) used an experimental design that is known from the measurement of masking level differences. The output of a noise generator was bandpass-

filtered and then sent to a variable phase shifter. The fixed output (N) and the variable output (S) of the phase shifter were mixed on both earphones where S was inverted in phase on one side in relation to the other side ($N0S\pi$). The ITD and IID between the resultants on both ears (SN_L and SN_R) could be manipulated by adjusting the phase angle between the fixed and the variable output of the phase shifter. Among other things, they found that there were interindividual differences in participants' weighting of ITDs and IIDs when both cues were set into opposition. This was true for both detection of the signal (S) that was turned on after N and for lateralization judgments. Herman, Warren, and Wagener (1977) compared the ability of older participants (aged between 60 and 72 years) with the ability of younger participants (aged between 20 and 32 years) in lateralizing a train of clicks either solely based on ITDs or solely based on IIDs. They found that the older participants needed larger ITDs to give correct lateralization judgments compared to the younger participants, but that there was no difference between the groups when IIDs were the only binaural cue.

To summarize, previous investigations of the moderators of equivalence relations concentrated on stable properties of the stimuli (overall sound level, sound level of additionally inserted noise, dominance of low-frequency ITDs) and on trait-like interindividual differences (extreme experience, age, individual preferences for the weighting of the cues). There are relatively few studies that investigated momentary states of the observer. Jeffress and McFadden (1971) tried to manipulate the individual weighting of ITDs and IIDs by selective feedback. They asked participants to give lateralization judgments to sound stimuli with conflicting ITD and IID information. The critical trials were preceded by practice trials in which feedback about the

correctness of the lateralization judgments was either provided solely on the basis of the ITD of the two ear signals or solely on the basis of the IID. Comparing the lateralization judgments in the critical trials that followed these two types of practice trials showed no systematic differences. Thus, selective feedback did not seem to change the processing of ITDs or IIDs.

Comparisons between experiments in which participants had to compensate ITDs by the adjustment of IIDs and experiments with converse roles of both cues showed different trading ratios (for an overview, see Trahiotis and Kappauf, 1978). For example, Young and Levine (1977) conducted two experiments in which the position of a pure tone of 250 Hz, 500 Hz, or 1000 Hz had to be aligned to the position of a diotic noise marker. The test tones were either presented with a fixed ITD or with a fixed IID. Participants' task was to adjust the other binaural cue so that the perceived position of the test tone was identical to that of the noise marker. The trading ratios more strongly favoured the IID when IIDs had to be adjusted in order to compensate for ITDs than in the converse case. For example, with the test tone of 500 Hz the trading ratio was 79.4 $\mu\text{s}/\text{dB}$ and 40.4 $\mu\text{s}/\text{dB}$, respectively. Young and Levine (1977) interpreted this result as evidence for two-image lateralization. Trahiotis and Kappauf (1978) disagreed with the assumption that the different trading ratios obtained by Young and Levine (1977) could be accounted for by a time image and a time-/ intensity image. As mentioned above, the time image is almost solely determined by the ITD and only to a very small degree by the IID, which leads to very small trading ratios (e.g., 3 $\mu\text{s}/\text{dB}$ as reported by Whitworth and Jeffress, 1961). Since the trading ratios found by Young and Levine (1977) were relatively large in *both* experiments, Trahiotis and Kappauf (1978) considered both ratios as more characteristic of time-/ intensity

images. They proposed that the data could be described in terms of a “regression” to the features of the reference stimulus. In order to clarify the regression interpretation Trahiotis and Kappauf (1978) discussed a study by Sheldon (1973) in which participants were asked to adjust the abruptness or “surge” of a vibrotactile stimulus in relation to a reference stimulus. The abruptness was determined by two physical parameters: the rise time and the final amplitude. The test stimulus differed from the reference stimulus either in rise time or in amplitude. When the stimuli differed in rise time participants had to adjust the amplitude until the stimuli had the same perceived abruptness; when the stimuli differed in amplitude the rise time was the parameter to be adjusted. It was found that the “equal-surge-contours” were different in both conditions; when the amplitude was to be adjusted the chosen amplitude was closer to the amplitude of the reference stimulus than predicted by the contour of the condition where the rise time was the to-be-adjusted parameter. Analogous results were found when the rise time was to be adjusted. Trahiotis and Kappauf (1978) assumed that an analogous effect occurred in the study by Young and Levine (1977) when subjects were asked to adjust one binaural localization cue such that a test tone was localized at the same position as a reference tone. In the case of the study reported by Young and Levine (1977) the reference stimulus was presented diotically (i.e., with an ITD of 0 μ s and an IID of 0 dB). Consider a trial in which the test stimulus was presented with a fixed ITD and the participant had to adjust the IID to match the location of the reference tone; since the IID of the reference tone was 0 dB a regression to the features of the reference stimulus would mean that the chosen compensatory IID was shifted towards 0 dB, that is, its absolute value was reduced. If the roles of ITD and IID were interchanged an analogue

regression towards an ITD of 0 μ s would occur. Trahiotis and Kappauf (1978) were clear about the fact that the term “regression” only describes the data they discussed, but that it does not explain the observed phenomena in terms of the cognitive processes involved.

We suggest shifts of attention as a possible explanation of equivalence relations that differ as a function of which interaural cue is adjusted. Consider that while adjusting one binaural cue in order to compensate for the other cue, participants move a control element and simultaneously receive feedback about the effects of their manipulations in terms of an immediate change of the virtual location of the sound source. Given that participants are instructed to find an adjustment value that leads to a certain localization (e.g., in a central position) they must carefully observe the relation between their adjustments and the perceived change of the location of the sound source. This could lead to an increased attention to the effect of the to-be-adjusted cue on perceived location which in turn could lead to an increased perceptual weight of this cue in relation to the other cue.

If this assumption were correct, then one would expect differences in perceived sound source location between compensation and localization tasks even for identical pairs of ITDs and IIDs. In the compensation task, attention is focused on the to-be-adjusted cue (e.g., the IID), amplifying the weight of this cue relative to the fixed cue (e.g., the ITD). In the localization task, attention is distributed more evenly between both binaural cues. Then the previously chosen compensatory value (e.g., of the IID) would no longer receive the amplified weight and thus the image would no longer appear centered; instead it would be shifted away from the adjusted cue (IID) and toward the preset cue (ITD). Further, if attention shifts induced by the compensation

task caused the observed differences in trading ratios depending on which binaural cue is adjusted, these trading ratio differences are also expected to occur if no reference stimulus is presented that can act as an “anchor” for regression.

Four experiments were conducted to test these predictions. In Experiments 1a to 1c IIDs were adjusted in order to compensate for ITDs. In Experiment 2 ITDs were adjusted in order to compensate for IIDs. Each experiment consisted of two phases: During the first phase (“compensation phase”) the adjustment of the IID or ITD took place; the second phase (“localization phase”) consisted of pure localization judgments.

II. EXPERIMENT 1A

A. Method

1. Participants

Participants were 12 female and 4 male persons, most of whom were students at the Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Their age ranged from 20 to 45 years ($M = 28$, $SD = 8.3$). All participants reported normal hearing. They were paid for participating or received course credit.

2. Apparatus and Stimuli

Five meaningless words (“Adaxal”, “Eferel”, “Inibis”, “Odobol”, “Urubut”, pronounced according to German pronunciation rules) were spoken by a female speaker and recorded in an anechoic chamber in order to avoid disturbing reflections which would have posed additional

cues for spatial hearing. The signal of the microphone (Sennheiser MD-421) was amplified by one channel of a low-noise mixing console and recorded by a DAT-recorder.

In order to familiarize participants with sound localization via headphones a special set of stimuli was created. Head-related impulse responses (HRIRs) were recorded in order to be able to present practice trials in which the five sounds had natural ITD to IID ratios. The HRIRs were recorded for lateral angles between -90° and 90° in steps of 10° .

The stimuli were presented by a program written in C++ on an Intel-based personal computer. The Microsoft Direct Sound programming interface was used for playing the sounds and for manipulating ITDs and IIDs of the non-practice trials. In order to assess the accuracy of Direct Sound when delaying one channel in relation to the other the delay times were measured in the range relevant for the experiment ($-600\ \mu\text{s}$ to $600\ \mu\text{s}$) using a two-channel oscilloscope. This measurement revealed that Direct Sound changes the delay in steps of integer samples ($22.68\ \mu\text{s}$ at $44.1\ \text{kHz}$).

When Direct Sound receives the instruction to change the relative level between the left and the right channel it attenuates the weaker channel so that the desired ratio is obtained. By this approach the overall sound level varies against the chosen intensity difference. In order to keep the overall sound level constant, the level was corrected by a modified version of a formula proposed by Gaik (1993) such that

$$L_L = 20 \log \frac{10^{(L_{\text{Ref}} + 6\text{dB})/20}}{1 + 10^{\Delta L/20}} \quad (1)$$

and

$$L_R = L_L + \Delta L \quad (2)$$

where L_{Ref} denotes the reference level, that is, the level of a sound with no intensity difference between the channels that has the same perceived loudness as the actual sound, and L_L and L_R denote the left and right sound levels, respectively; ΔL is the difference between the left and right sound levels.

During the experiment, the sounds were presented via headphones (AKG K-400) at a sound level of about 60 dB_{SPL} (A-weighted). The ITD was varied in seven steps: -600 μs , -400 μs , -200 μs , 0 μs , 200 μs , 400 μs , and 600 μs ². There were two types of (non-practice) trials: During the critical trials participants had to assess the direction of a sound whose ITD they had compensated for by a certain IID in an earlier phase of the experiment. The control trials were identical to the critical trials but their ITD had not been compensated for by the participants, that is, the IID was 0 dB. Each of the five words was presented once with each of the ITDs, resulting in 35 critical trials and 35 control trials.

3. Procedure

The experiment took place in an anechoic chamber. In an initial *demonstration phase*, the computer monitor in front of the participants showed a sketch of a head wearing headphones as seen from behind. The recorded voice of a narrator spoke to the participants with the recordings of the voice being convolved with the same impulse responses as the words of the subsequent practice trials. A red dot in the drawing showed the “actual location” of the voice, that is, it appeared at an angle relative to the head-sketch that matched the lateral angle employed during HRIR recordings. Different locations were demonstrated while the narrator spoke sentences such

as “It sounds like this when I talk to you from the rightmost location.” Subsequently the narrator asked the participants to use the computer mouse to move the red dot to the correct position while he said “From where do you hear me now?” This sentence was repeated with 1000 ms of silence between two repetitions. After participants had made a decision and clicked on a button labeled “Continue” the playback of the sentence was stopped and a green dot indicating the correct location was displayed for 2000 ms.

The demonstration was followed by a *practice phase* of 20 trials, each of which started with playing one of the five meaningless words in a loop with 500 ms of silence between two repetitions. The lateral angle of the virtual sound source was chosen randomly (between -90° and 90° in steps of 10°). As in the demonstration, participants’ task was to move the red dot to the correct location and subsequently to press the “Continue” button after which the green dot indicating the correct position was displayed for 2000 ms. 500 ms (± 100 ms random variation) after the green dot had disappeared the next trial started. Every ten trials participants were offered to take a break for as long as they wished. After the second block of practice trials performance was evaluated for the last ten trials. A location judgment was classified as incorrect if the angular deviation from the correct location was larger than 22.5° . If four or more trials were incorrect, then ten more trials were presented together with the request to concentrate on giving more precise judgments. This was repeated if necessary.

For the next two phases of the experiment (compensation phase and localization phase) unfiltered sounds were used, that is, no HRIR filter was used here; the ITDs and IIDs were manipulated directly with Direct Sound as described above.

The *compensation phase* consisted of 35 trials. Each trial started with the continuous playback of one of the five meaningless words in a loop with 500 ms of silence between two word repetitions. The sound on one ear was delayed in relation to the sound on the other ear by -600 μ s, -400 μ s, -200 μ s, 0 μ s, 200 μ s, 400 μ s, or 600 μ s. The computer monitor displayed a vertical slider that was used to control the relative sound level of the left and the right channels within a range of ± 15 dB. The mapping of the slider's position (top vs. bottom) onto the sign of the level ratio (higher level on the left vs. on the right channel) was counterbalanced across participants. The slider's initial position was chosen randomly for each trial. Participants were instructed to move the slider so that they localized the sound source in the center. Participants received no further information about the physical properties of the sound or the physical property that was changed by the slider. 500 ms (± 100 ms random variation) after the "Continue" button had been clicked the next trial started. Participants were asked to take a rest in intervals of ten trials.

During the *localization phase* each trial again started with the continuous playback of one of the five meaningless words in a loop with 500 ms of silence between two word repetitions. Participants assessed the apparent sound location of (a) the previously presented trials for which participants had compensated the preset ITD by an IID such that the sound appeared to originate from a central location (critical trials; the IIDs were constant at the final value selected by the participant during the compensation phase such that the sound appeared to originate from a central location) and (b) trials with only ITDs but no IIDs (control trials). On the monitor the same drawing of a head and red dot were presented as in the demonstration- and practice-

phase. The 70 localization trials (35 critical and 35 control trials) were set up in a new randomly chosen sequence. The participants' task was to move the red dot to the corresponding position at which they located the sound. All other aspects of the localization trials (such as intertrial and break intervals) were parallel to those of the compensation trials.

4. Design

The independent variable was the ITD, which was manipulated within-subject in seven steps (-600 μ s, -400 μ s, -200 μ s, 0 μ s, 200 μ s, 400 μ s, and 600 μ s). The dependent variables were (a) the chosen IID during the compensation phase and (b) the perceived location during the localization phase of the experiment. A multivariate approach (MANOVA) was used for the within-participant comparisons. Polynomial contrasts were evaluated from order one to order four. Partial η^2 is reported as an effect size measure. A statistical power analysis using G*Power 3 (Faul et al., 2007) showed that in order to detect effects of $\eta^2 = .75$ (determined in a pilot study) of the independent variable given $\alpha = \beta = .05$, $N = 9$ participants were needed.

B. Results

Figure 1 (left panel) illustrates the relation between the preset ITD and the IID chosen to compensate for the effects of the ITD during the compensation phase. A MANOVA showed that the obvious effect of the preset ITD (-600 μ s, -400 μ s, -200 μ s, 0 μ s, 200 μ s, 400 μ s, and 600 μ s) on the chosen IID was statistically significant ($F(6, 10) = 15.25, p < .001, \eta^2 = .90$). An analysis of the polynomial contrasts revealed statistically significant first and third order trends ($F(1, 15) = 87.13, p < .001, \eta^2 = .85$; $F(1, 15) = 26.58, p < .001, \eta^2 = .64$, respectively).

Figure 1 (right panel) shows the relation between the ITD and the perceived location during the localization phase. A MANOVA for the control trials showed a significant effect of the ITD on the perceived sound source location ($F(6, 10) = 49.05, p < .001, \eta^2 = .97$).

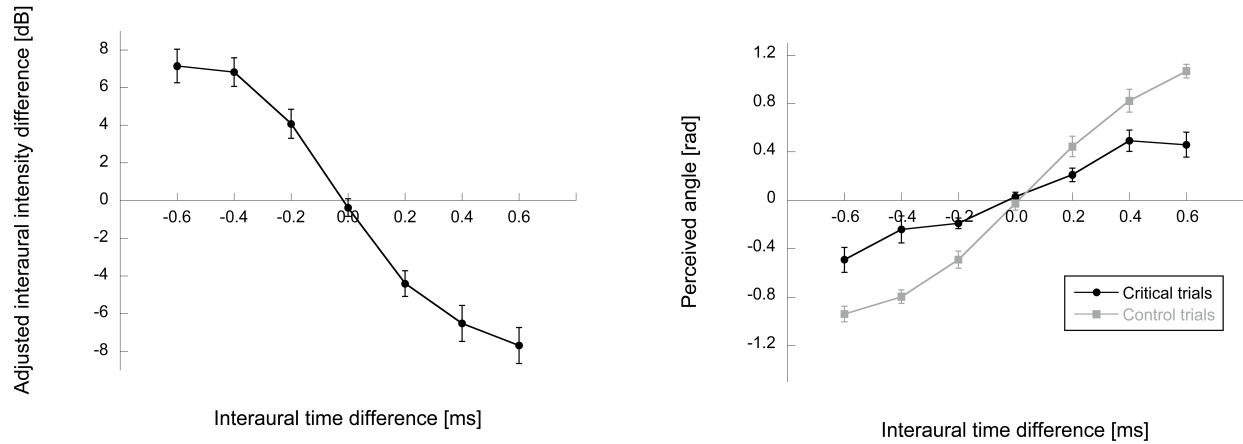


Figure 1: Left panel: IIDs chosen to compensate for given ITDs during the compensation phase of Experiment 1a (error bars denote the standard errors of the means). Right panel: Relation between the preset ITD and the perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phase of Experiment 1a (error bars denote the standard errors of the means).

A more interesting analysis concerns the perceived sound source locations for the critical trials. For these trials participants had compensated ITDs by appropriate IIDs during the compensation phase. Thus, one should expect, for all levels of the ITD variable, a perceived location at the midline (i.e., a perceived angle of zero) if the processes operating during the compensation and localization phase were identical. However, this does not appear to be the case. Instead, the perceived location of the critical trials is shifted towards the location predicted by the ITD, albeit not completely. A MANOVA for the critical trials showed that the effect of the ITD was indeed significant ($F(6, 10) = 9.63, p = .001, \eta^2 = .85$). An analysis of the

polynomial contrasts showed that only the linear component was statistically significant ($F(1, 15) = 37.31, p < .001, \eta^2 = .71$).

C. Discussion

The analysis of the compensation phase data showed that participants had understood the task of canceling out the preset ITDs by appropriate IIDs.

However, the data from the localization phase showed that the processes operating while manipulating IIDs to compensate for ITDs cannot be considered equivalent to the processes operating when sounds are located in a normal listening situation. The same sounds that had been adjusted to be perceived as originating from the midline were perceived off-midline and, on average, shifted towards the location predicted by the ITDs during the localization phase. This shift-back effect is consistent with the assumption that when participants compensate for ITDs by manipulating IIDs, attention is focused on the (to-be-manipulated) IIDs. The result is that more weight is given to the IIDs than would be the case in a more neutral listening situation. During the localization phase attention is distributed more evenly across the binaural cues and thus, the adjusted IID is not large enough to compensate for the ITD.

However, an alternative explanation for these findings is possible based on the fact that during the localization phase ITDs were over-represented. The critical trials were presented with a combination of ITDs and IIDs whereas the control trials were implemented only in terms of ITDs (i.e., the IID was 0 dB). This over-representation of ITDs could have led to an increased weighting of this cue. In order to test this hypothesis Experiment 1b was conducted with additional control trials that had only IIDs while ITDs were 0 μ s.

III. EXPERIMENT 1B

A. Method

1. Participants

Participants were 12 female and 9 male persons, most of whom were students at the Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Their age ranged from 18 to 40 years ($M = 27$, $SD = 7.4$). All participants reported normal hearing. They were paid for participating or received course credit.

2. Apparatus and Stimuli

Apparatus and stimuli were identical to those of Experiment 1a except for the following: In addition to the 35 control trials that only had ITDs (-600 μ s, -400 μ s, -200 μ s, 0 μ s, 200 μ s, 400 μ s, and 600 μ s) further 35 additional trials were inserted that only had IIDs (-7.5 dB, -5.0dB, -2.5 dB, 0 dB, 2.5 dB, 5.0 dB, and 7.5 dB).

3. Procedure

The procedure was identical to that of Experiment 1a.

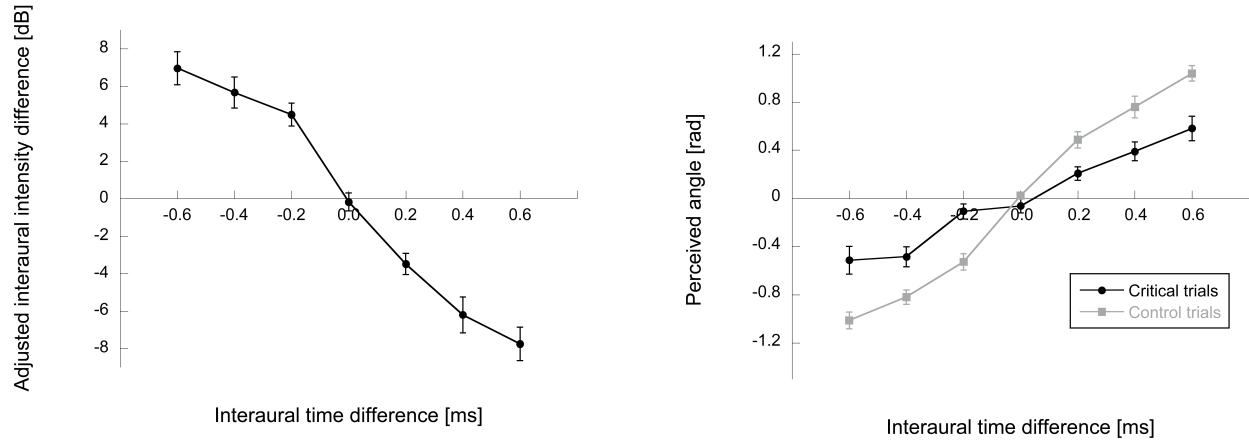


Figure 2: Left panel: IIDs chosen to compensate for given ITDs during the compensation phase of Experiment 1b (error bars denote the standard errors of the means). Right panel: Relation between the preset ITD and the perceived location during the critical trials and the (ITD-) control trials of the localization phase of Experiment 1b (error bars denote the standard errors of the means).

4. Design

The design was identical to that of Experiment 1a except for the additional independent variable of IIDs for the added control trials.

B. Results

Figure 2 (left panel) illustrates the relation between the preset ITD and the IID chosen to compensate for the effects of the ITD during the compensation phase. A MANOVA showed that the effect of the preset ITD on the chosen IID was statistically significant ($F(6, 15) = 18.63$, $p < .001$, $\eta^2 = .88$).

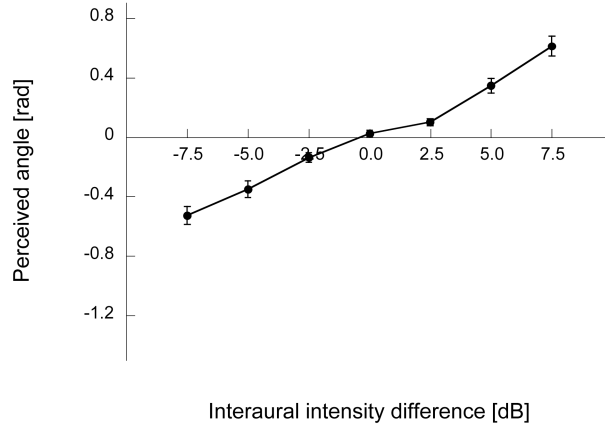


Figure 3: Relation between the preset IID and the perceived location during the (IID-) control trials of the localization phase of Experiment 1b (error bars denote the standard errors of the means).

An analysis of the polynomial contrasts showed statistically significant trends of order one to three ($F(1, 20) = 73.76, p < .001, \eta^2 = .79$; $F(1, 20) = 8.88, p = .007, \eta^2 = .31$; $F(1, 20) = 15.89, p = .001, \eta^2 = .44$).

Figure 2 (right panel) shows the relation between the ITD and the perceived location during the localization phase. A MANOVA for the (ITD-) control trials showed a significant effect of the ITD on the perceived sound source location ($F(6, 15) = 58.86, p < .001, \eta^2 = .96$). A MANOVA for the control trials that had only IIDs (Figure 3) revealed a significant effect of the IID on the perceived location of the sound source ($F(6, 15) = 14.94, p < .001, \eta^2 = .86$).

A MANOVA for the critical trials showed a statistically significant effect of the ITD ($F(6, 15) = 7.93, p = .001, \eta^2 = .76$). An analysis of the polynomial contrasts revealed that only the linear component was statistically significant ($F(1, 20) = 44.14, p < .001, \eta^2 = .69$).

C. Discussion

The effect of the ITD on the perceived sound source location in the critical trials is similar to that of Experiment 1a ($\eta^2 = .85$ in Experiment 1a, $\eta^2 = .76$ in Experiment 1b). The same is true for the effect size of the linear component revealed by the polynomial contrast analyses ($\eta^2 = .71$ and $\eta^2 = .69$, respectively). Hence, the fact that there were only control trials with ITDs in the localization phase of Experiment 1a seems to be irrelevant for the localization judgments during the critical trials.

Differentially adapting processors for ITDs and IIDs might pose a further alternative explanation of the shift-back effect found in Experiments 1a and 1b. Phillips and Hall (2005) asked participants to give laterality judgments for tone pulses of two different frequencies which differed either in ITD or in IID. The tone pulses were preceded by adaptor tones of the same two frequencies that were highly lateralized on opposite sides based on the same interaural cue as the test tones. An adaptation effect was found, that is, for each of the two test tones the perceptual weight given to the interaural cue that was present with the adaptor tone was reduced and hence the point of perceived centrality was displaced towards the side of the adaptor tone with the same frequency. In the compensation phases of the current experiments the value of the ITD was constant during each trial while the IID was regulated by the participant and hence subject to permanent change. This presentation of a fixed ITD could have led to a similar adaptation effect as described by Phillips and Hall (2005) and thus to a decrease of the perceptual weight of the ITD.

Experiment 1c was conducted in order to test this adaptation hypothesis against the attentional modulation hypothesis. In the localization phase of Experiment 1a, each trial started with the continuous playback of one of the five meaningless words with constant values for the ITDs and IIDs; in the critical trials the ITDs were preset and the IIDs corresponded to the final value selected by the participant such that the sound appeared to originate from a central location in the compensation phase. In the localization phase of Experiment 1c, in contrast, the critical trials in the localization phase were simply playbacks of the compensation trials. Thus, participants listened to exactly the same sequence of ITDs and IIDs as during the compensation phase, which means that during one trial the ITD was constant at the preset value and the IID corresponded to the various values selected by the participant during the compensation phase.

Thus, the possible effect of adapting to a fixed ITD during one trial on the one hand and the effect of allocating attention to the to-be-adjusted IID on the other were distinguishable. If the shift-back effect found in Experiments 1a and 1b were due to an adaptation to ITDs, then this adaptation must be present during *both the compensation phase and the localization phase* of Experiment 1c because participants listen to exactly the same stimuli in the relevant trials in both phases. Hence, the sounds that were localized at a central position in the compensation phase should also be localized at a central position in the localization phase. Thus, if the adaptation hypothesis were correct, then the results of Experiment 1c should deviate from those of Experiments 1a and 1b in that there should be no shift-back effect in the localization phase. In contrast, if the shift-back effect found in Experiments 1a and 1b were caused by shifting listeners' attention towards the IIDs by the process of regulating this cue during the compensation phase, then an off-center localization during the localization phase in which attention is more evenly

distributed should still be observed. In other words, if the attentional modulation hypothesis were correct, then there should be a shift-back effect in Experiment 1c that is similar to the shift-back effects observed in Experiments 1a and 1b.

IV. EXPERIMENT 1C

A. Method

1. Participants

Participants were 12 female and 8 male persons, most of whom were students at the Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Their age ranged from 19 to 50 years ($M = 26$, $SD = 8.5$). All participants reported normal hearing. They were paid for participating or received course credit.

2. Apparatus and Stimuli

Apparatus and stimuli were identical to those of Experiment 1a except for the following. For every trial during the compensation phase, the entire sequence of slider movements (and, hence, the entire sequence of the participant's IID manipulations) were recorded in terms of both the movement velocity and duration (with a resolution of 1 ms) and the new position of the slider. For the critical trials of the localization phase the movements of the slider were simulated by changing the IID as recorded during the compensation phase. The IIDs of the control trials were changed according to a sine-shaped function with random amplitude (between 5 dB and 10 dB) and random cycle duration (between 2000 ms and 5000 ms). Before and after the sine-shaped

change of the IID of the control trials the IID was constant at 0 dB for a random interval (between 1000 ms and 2000 ms before and between 2000 ms and 3000 ms after the changing process).

3. Procedure

The procedure was identical to that of Experiment 1a except for the localization phase. Participants were told that they would hear sounds that would change in perceived direction. They were instructed to wait until the playing of the sound stopped and to indicate the final location of the sound. They saw the same sketch of the head and red dot as during the localization phase of Experiment 1a and did not see the slider.

4. Design

The design was identical to that of Experiment 1a.

B. Results

Figure 4 (left panel) illustrates the relation between the preset ITD and the IID chosen to compensate for the effects of the ITD during the compensation phase. A MANOVA showed that the effect of the preset ITD on the chosen IID was statistically significant ($F(6, 14) = 21.41$, $p < .001$, $\eta^2 = .90$). An analysis of the polynomial contrasts showed statistically significant trends of order one and order three ($F(1, 19) = 127.50$, $p < .001$, $\eta^2 = .87$; $F(1, 19) = 18.61$, $p < .001$, $\eta^2 = .50$).

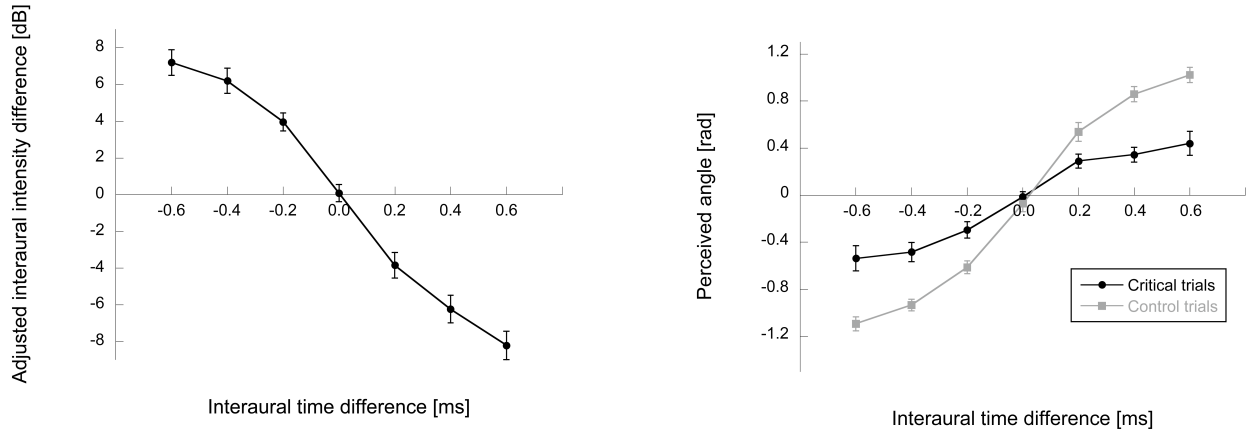


Figure 4: Left panel: IIDs chosen to compensate for given ITDs during the compensation phase of Experiment 1c (error bars denote the standard errors of the means). Right panel: Relation between the preset ITD and the perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phase of Experiment 1c (error bars denote the standard errors of the means).

Figure 4 (right panel) shows the relation between the ITD and the perceived location during the localization phase. A MANOVA for the control trials showed a significant effect of the ITD on the perceived sound source location ($F(6, 14) = 94.55, p < .001, \eta^2 = .98$). A MANOVA for the critical trials showed a statistically significant effect of the ITD ($F(6, 14) = 8.36, p = .001, \eta^2 = .78$). An analysis of the polynomial contrasts revealed that the linear and the cubic component were statistically significant ($F(1, 19) = 51.84, p < .001, \eta^2 = .73$; $F(1, 19) = 5.05, p = .037, \eta^2 = .21$).

C. Discussion

The effect of ITD on the perceived sound source location in the critical trials is similar to that of Experiment 1a ($\eta^2 = .85$ in Experiment 1a, $\eta^2 = .78$ in Experiment 1c). The linear

component revealed by the polynomial contrast analyses is also similar ($\eta^2 = .71$ in Experiment 1a and $\eta^2 = .73$ in Experiment 1c).

The fact that the localization of the critical trials during the localization phase was off-center even though participants during the localization phase listened to the same fixed ITD and identical changes of the IID as during the compensation phase is incompatible with the hypothesis that the shift-back effect obtained in Experiments 1a and 1b was due to selective adaptation to ITDs during the compensation phase. If adaptation caused the shift-back effect in those experiments, then the effect should have disappeared in the localization phase of Experiment 1c. This is so because participants listened to the same sequences of constant ITDs and changing IIDs during the compensation and the localization phase, as a consequence of which adaptation should have occurred in both phases of the experiment. In contrast, the present results are clearly compatible with the assumption that the *task of adjusting* the IID shifted listeners' attention towards the IIDs, thus giving more perceptual weight to this cue during the compensation phase than during the localization phase.

An analogous shift-back effect as in Experiments 1a to 1c should be observed when the roles of ITDs and IIDs are reversed. Experiment 2 was conducted to test this prediction. However, as mentioned in the introduction, there is some evidence that ITDs play a dominant role in localization when low-frequency components are contained in the sounds (Wightman and Kistler, 1992, Shinn Cunningham et al., 2000). If this were correct then during the compensation phase we would try to shift participants' attention towards the interaural cue that already *is* the

dominant cue. This could lead to a decrease the shift-back effect. To anticipate, this is what we found.

V. EXPERIMENT 2

A. Method

1. Participants

Participants were 29 female and 10 male persons, most of whom were students at the Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Their age ranged from 18 to 47 years ($M = 24$, $SD = 5.8$). All participants reported normal hearing. They were paid for participating or received course credit.

2. Apparatus and Stimuli

Apparatus and stimuli were identical to those of Experiment 1a, with the following exceptions. The sounds were presented with preset IIDs instead of ITDs. As a reference point for choosing a reasonable range of IIDs the mean value of the IIDs chosen by the participants to compensate for the maximum ITD ($\pm 600 \mu s$) of Experiment 1a was computed. The mean IID for this judgment situation was 7.42 dB. We therefore selected interaural intensity differences of -7.5 dB, -5.0 dB, -2.5 dB, 0 dB, 2.5 dB, 5.0 dB, and 7.5 dB for Experiment 2. The slider in the compensation phase of the experiment allowed participants to adjust the ITD in a range of $\pm 600 \mu s$.

During a pilot study one participant (AGL) had the subjective impression that in some trials even an ITD of $\pm 600 \mu\text{s}$ would not seem to compensate for the given IID. For this reason a checkbox labeled “Not enough” was displayed next to the slider. Participants were instructed to check the box if they had the impression that even the most extreme slider position was not sufficient to achieve a sound localization in the midline. These trials were excluded from all further analyses.

3. Procedure

The procedure was the same as in Experiment 1a except that the to-be-adjusted variable during the compensation phase was the ITD.

4. Design

The independent variable was the IID, which was manipulated within-subject in seven steps (-7.5 dB, -5.0 dB, -2.5 dB, 0 dB, 2.5 dB, 5.0 dB, and 7.5 dB). The dependent variables were (a) the chosen ITD during the compensation phase and (b) the perceived location during the localization phase of the experiment. As mentioned above we expected a smaller effect size than in Experiment 1a because during the compensation phase we tried to shift participants' attention towards the interaural cue that already *is* the dominant cue. We presumed an effect size of $\eta^2 = .45$. A statistical power analysis using G*Power 3 (Faul et al., 2007) showed that in order to detect effects of $\eta^2 = .45$ of the independent variable given $\alpha = \beta = .05$, $N = 12$ participants were needed.

B. Results

Two participants had to be excluded because for one or more given IIDs they chose the “Not enough” checkbox during all trials. For the remaining participants this was the case for 2.0% of the trials. The left panel of Figure 5 illustrates the relation between the preset IID and the ITD chosen to compensate for the effects of the IID during the compensation phase. A MANOVA showed that the effect of the preset IID (-7.5 dB, -5.0 dB, -2.5 dB, 0 dB, 2.5 dB, 5.0 dB, and 7.5 dB) on the chosen ITD was statistically significant ($F(6, 31) = 30.87, p < .001, \eta^2 = .86$). An analysis of the polynomial contrasts showed that only the linear component was statistically significant ($F(1, 36) = 159.66, p < .001, \eta^2 = .82$).

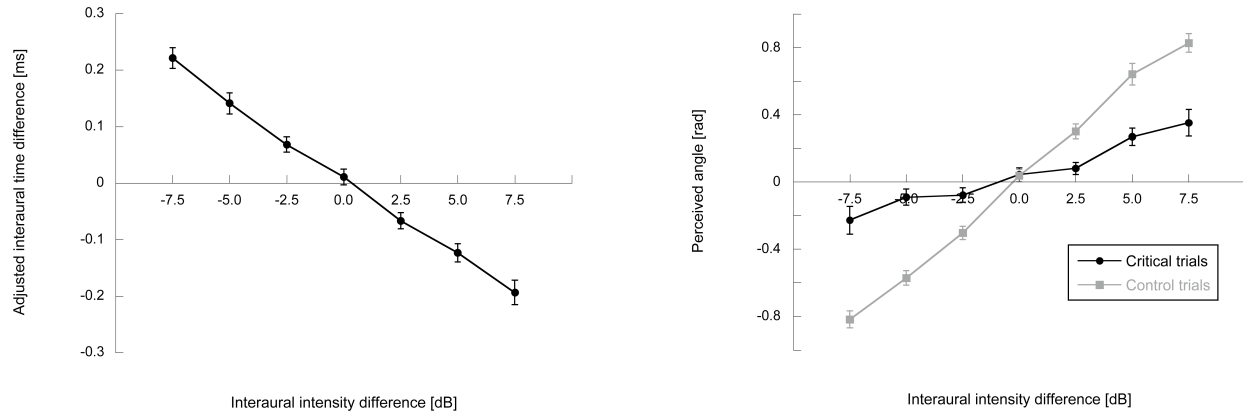


Figure 5: Left panel: ITDs adjusted by the participants in order to compensate for preset IIDs during the compensation phase of Experiment 2 (error bars denote the standard errors of the means). Right panel: Relation between the preset IID and the perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phase of Experiment 2 (error bars denote the standard errors of the means).

Figure 5 (right panel) shows the relation between the IID and the perceived location during the localization phase. A MANOVA for the control trials showed a significant effect of the IID on the perceived sound source location ($F(6, 31) = 48.45, p < .001, \eta^2 = .90$).

For the critical trials participants had compensated the IIDs by appropriate ITDs during the compensation phase. Thus, one should expect a perceived location at the midline (i.e., a perceived angle of zero) if the processes operating during the compensation and localization phases were identical. As in Experiment 1a, this does not appear to be the case, albeit the shift of the perceived location of the critical trials towards the location predicted by the preset interaural cue (IID) was smaller than in Experiment 1a. A MANOVA for the critical trials showed that the effect of the IID was nevertheless statistically significant ($F(6, 31) = 4.75, p = .002, \eta^2 = .48$). An

analysis of the polynomial contrasts showed that only the linear component was statistically significant ($F(1, 36) = 24.30, p < .001, \eta^2 = .40$).

C. Discussion

The analysis of the compensation phase data showed that participants had understood the task of canceling out the preset IIDs by appropriate ITDs. However, the data from the localization phase showed that the processes operating while manipulating ITDs to compensate for IIDs cannot be considered equivalent to the processes operating during sound localization in a normal listening situation. The shift-back effect observed in Experiments 1a to 1c also occurred in Experiment 2. However, the effect was smaller in this experiment; this is consistent with the assumption that low-frequency ITDs play a dominant role in sound localization and hence, attention was directed to the interaural cue that already is the dominant cue.

VI. GENERAL DISCUSSION

The trading ratios found in our experiments are comparable to those reported by Young and Levine (1977) for 500 Hz tones: In Experiment 1a we found a trading ratio of 80.1 $\mu\text{s}/\text{dB}$ for a preset ITD of 600 μs (79.4 $\mu\text{s}/\text{dB}$ for a preset ITD of 500 μs in Young and Levine, 1977); in Experiment 2 we found a trading ratio of 27.7 $\mu\text{s}/\text{dB}$ for a preset IID of 7.5 dB (40.4 $\mu\text{s}/\text{dB}$ for a preset IID of 8 dB in Young and Levine, 1977).

The results of the current experiments show that trading ratios more strongly favored IID when adjusting IID, and more strongly favored ITD when adjusting ITD, relative to a neutral

listening context. This implies that during the compensation phases a greater perceptual weight was applied to the to-be-adjusted cue in relation to the fixed cue. This finding suggests that the task of canceling out the effect of one binaural cue by a compensatory value of the other cue implies a shift of attention towards the to-be-adjusted cue which in turn gives more perceptual weight to this cue. This change of the perceptual weights to ITDs and IIDs due to a shift of attention towards one of the cues holds an explanation for both the fact that trading ratios differ depending on which of the cues is regulated as reported by Young and Levine (1977) and for the shift-back effect found in the current experiments. The question arises if our attention approach can be regarded as an extension of the regression interpretation by Trahiotis and Kappauf (1978). What would this mean? It seems possible that attention to one interaural cue (e.g., IID) is accompanied not only by an increased weight of this cue in relation to the other cue but also by the evocation of an internal reference tone with the sound source position of interest (e.g., a central position). This reference tone might be a “remainder” of the practice trials in our experiments or be the result of all-day listening experience. It is plausible to assume that the IID of a reference tone in a central position would be 0 dB. When adjusting the IID of a tone a comparison process between the IID of this tone and the IID of the reference tone (0 dB) could start and lead to a “regression” to 0 dB.

In contrast to Young and Levine (1977) in our experiments no reference tone was presented. So the plausibility of the arguments mentioned above depends on the question if participants have internal representations of reference tones that could serve as “anchors” for regression. In order to test whether an internal representation of a reference tone plays a roll in trading experiments in which no (explicit) reference is presented an experimental design would

be needed that prevents the build up and/ or the use of such an internal representation effectively.

Experiments 1b and 1c showed that the shift-back effect can be explained neither in terms of an over-representation of the preset interaural cue (Experiment 1b) nor in terms of selective adaptation to the preset and thus constant cue (Experiment 1c).

One possible problem has been unmentioned until now. In the localization phases participants had a pointing device which they used to indicate the location of the virtual sound source. This pointing device could have served as a visual reference for the central position. In contrast, during the compensation phases there was no visual reference for centrality. The question arises if this led to a systematic deviation in the position that the participants considered to be the central position in both phases of the experiments. The critical trials with a preset ITD of 0 μ s and a preset IID of 0 dB, respectively can help to determine if such a deviation occurred. In each trial of the compensation phases the starting position of the control slider was set randomly such that the listener had to adjust a compensation value even for the critical trials in which the preset cue was set to zero. The fact that the mean compensation values for a preset cue of 0 μ s or 0 dB were very close to zero indicates that there was no systematic error as to the central position during the compensation phases. (see Figures 1, 2, 4, and 5 – left panels).

The attentional manipulation should be considered short-lived because during the localization phase the sounds were perceived as originating from an off-midline location consistent in its trend with the preset interaural cue. The short-term nature of the attention allocation poses a possible explanation as to why Jeffress and McFadden (1971) found no effect of

their manipulation by selective feedback solely on the basis of ITDs or solely on the basis of IIDs. They compared the trials *following* the trials with selective feedback, rather than the trials in which the feedback was given.

In more general terms, the present results clearly show that equivalence relations of ITDs and IIDs depend in part on states of the observer. Thus the method used to obtain equivalence relations must be taken into account when interpreting them. Relations found by setting both binaural cues into opposition must not be compared with relations found in experiments where only one cue was present at a time (such as the control trials in our experiments).

In order to illustrate the difference, approximations to the current equivalence relations were computed for the two phases and trial types of Experiments 1a and 2. In the compensation phases of both experiments and in the critical trials of the localization phases ITDs and IIDs were set into opposition, while in the control trials of the localization phases only one cue was present. Separate equivalence relations were computed for

- a) the control trials of the localization phases of both experiments (no opposition)
- b) the compensation phases of both experiments (the cues were in opposition and attention was directed on one of the cues by the compensation task)
- c) the critical trials of the localization phases of both experiments (the cues were in opposition but attention was not manipulated)

The equivalence relation of the control trials was obtained as follows. In Experiment 1a the data points of the control trials represent the relation between the preset ITD and the perceived location. In Experiment 2 the data points of the control trials represent the relation between the preset IID and the perceived location. In order to obtain a function that relates the ITDs to the

IIDs, the data points of the control trials of both experiments were approximated by polynomial functions. These functions were set to be equal and resolved for the ITD-variable. For both experiments polynomials of order one to three were evaluated in order to determine the best approximation. The best fit to the data points of the control trials of Experiment 1a was observed with a third order polynomial ($F(3, 3) = 6311.4$, $p < .001$, $R^2 = 1.000$). The best fit to the data points of the control trials of Experiment 2 was observed with a linear equation ($F(1, 5) = 1516.5$, $p < .001$, $R^2 = .997$). ITDs corresponding to IIDs between -8 dB and 8 dB in steps of 1 dB were computed. The equivalence relations of the compensation phases of both experiments were obtained by plotting the to-be-adjusted dimension against the preset dimension. The equivalence relations of the critical trials of the localization phases of both experiments were computed as follows. For each preset ITD or IID the perceived location of the *critical trials* was inserted into the regression equation (see above) of the *control trials* of the same experiment. This equation was solved for the corresponding ITD or IID. In this way the ITD or IID was obtained that leads to the same perceived location when presented without a binaural cue of inverse sign. This may be regarded as the residual ITD or IID that had not been compensated for in the compensation phase and thus accounted for the shift-back effect. Hence the difference between the *preset* ITD or IID and this residual represents the portion of the preset interaural cue that had been compensated for by the adjustment of the other cue.

Figure 6 shows the resulting relations. Comparing the two phases of Experiment 1a clearly shows a shift of the equivalence relation towards IIDs in the compensation phase in comparison with the localization phase. A converse shift towards ITDs can be seen in the compensation phase of Experiment 2.

It is worth mentioning that most data points are below the curve computed from the control trials. Consistent with the dominant role of ITDs in sounds with low frequency content, when ITDs and IIDs are set into opposition a shift towards ITDs takes place so that ITDs receive more weight than in a non-conflict situation.

Returning to the central focus of this series of experiments, we want to mention that we currently consider two mechanisms that may operate as a result of the attention shift induced by the task of compensating one interaural localization cue by adjusting the other cue. First, the perceptual weight of the to-be-adjusted cue per se may vary along a continuum. Second, the probability of listening to a time image or a time-/ intensity image may vary.

Whether one of these mechanisms, or perhaps a combination thereof, operates as a result of the attention shifts described here is currently an open question, which may be answered by future research.

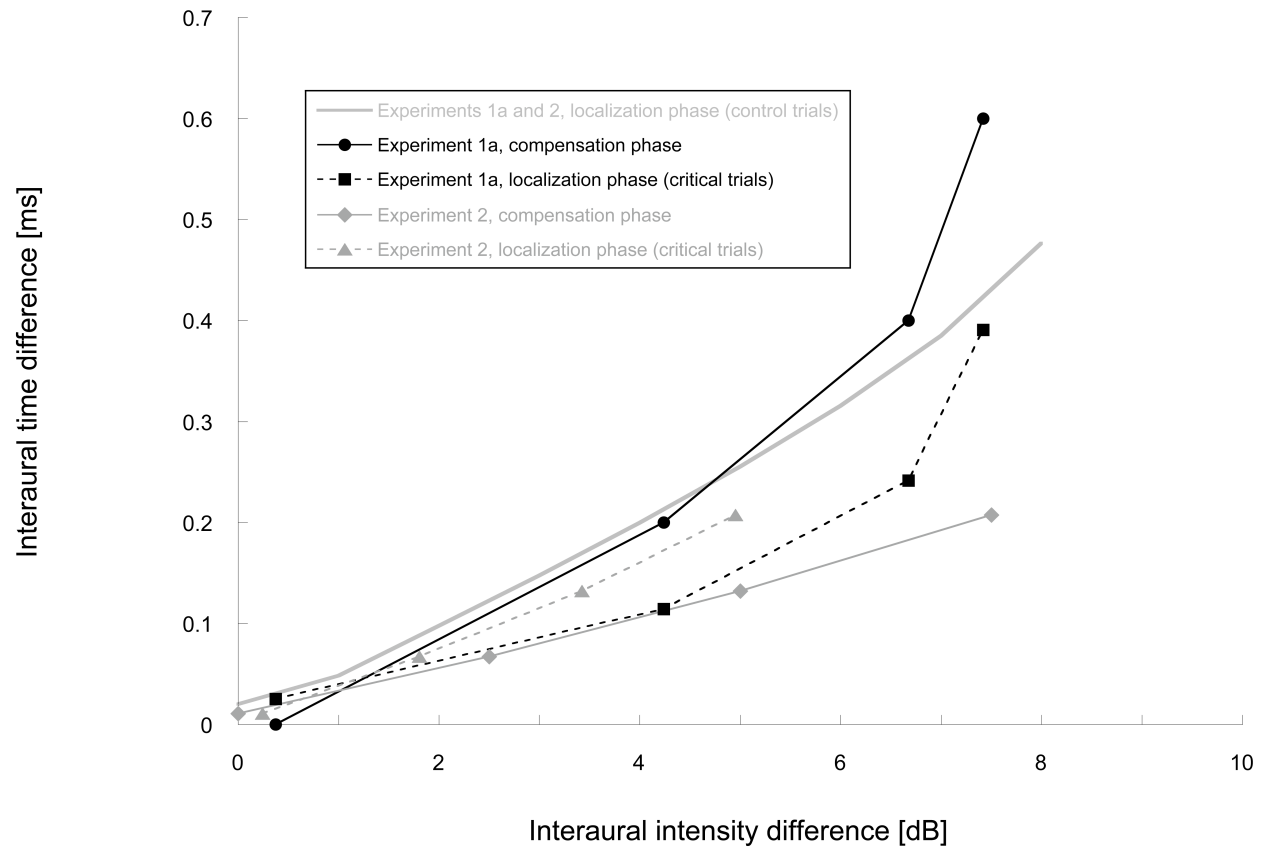


Figure 6: Equivalence relations during the two phases of Experiment 1a and Experiment 2 and in the non-conflict situation of the control trials.

FOOTNOTES

¹ The term “trading ratio” suggests a linear relationship between ITDs and IIDs. In the following, the term “trading ratio” is used either when a linear relationship is assumed or when the relation at a distinct point is reported (e.g., “80.1 $\mu\text{s}/\text{dB}$ at an ITD of 600 μs ”). In all other cases the more general term “equivalence relation” is used.

² In the rest of the article negative ITDs or IIDs denote that a sound was earlier or louder, respectively, on the left channel whereas positive values indicate that it was earlier or louder, respectively, on the right channel.

REFERENCES

- Algom, D., Adam, R., and Cohen Raz, L. (1988). "Binaural summation and lateralization of transients: A combined analysis," *J. Acoust. Soc. Am.* **84**, 1302-1315.
- Breebaart, J., van de Par, S., and Kohlsrausch, A. (1999). "The contribution of static and dynamically varying ITDs and IIDs to binaural detection," *J. Acoust. Soc. Am.* **106**, 979-992.
- Colburn, H. S., and Durlach, N. I. (1965). "Time-intensity relations in binaural unmasking," *J. Acoust. Soc. Am.* **38**, 93-103.
- Deatherage, B. H., and Hirsh, I. J. (1959). "Auditory localization of clicks," *J. Acoust. Soc. Am.* **31**, 486-492.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., and Buchner, A. (2007). "G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences," *Behav. Res. Meth.* **39**, 175-191.
- Gaik, W. (1993). "Combined evaluation of interaural time and intensity differences: Psychoacoustic results and computer modeling," *J. Acoust. Soc. Am.* **94**, 98-110.
- Hafer, E. R., and Carrier, S. C. (1972). "Binaural interaction in low-frequency stimuli: The inability to trade time and intensity completely," *J. Acoust. Soc. Am.* **51**, 1852-1862.
- Hafer, E. R., Dye, R. H., Wenzel, E. M., and Knecht, K. (1990). "The combination of interaural time and intensity in the lateralization of high-frequency complex signals," *J. Acoust. Soc. Am.* **87**, 1702-1708.

- Hafer, E. R., and Jeffress, L. A. (**1968**). "Two-image lateralization of tones and clicks," J. Acoust. Soc. Am. **44**, 563-569.
- Herman, G. E., Warren, L. R., and Wagener, J. W. (**1977**). "Auditory lateralization: Age differences in sensitivity to dichotic time and amplitude cues," Journal of Gerontology **32**, 187-191.
- Jeffress, L. A., and McFadden, D. (**1971**). "Differences of interaural phase and level in detection and lateralization," J. Acoust. Soc. Am. **49**, 1169-1179.
- Leakey, D. M., and Cherry, E. C. (**1957**). "Influence of noise upon the equivalence of intensity differences and small time delays in two-loudspeaker systems," J. Acoust. Soc. Am. **29**, 284-286.
- McFadden, D., Jeffress, L., and Erney, H. L. (**1971**). "Differences of interaural phase and level in detection and lateralization: 250 Hz," J. Acoust. Soc. Am. **50**, 1484-1493.
- McFadden, D., Jeffress, L., and Lakey, J. R. (**1972**). "Differences of interaural phase and level in detection and lateralization: 1000 and 2000 Hz," J. Acoust. Soc. Am. **52**, 1197-1206.
- McFadden, D., Jeffress, L. A., and Russell, W. E. (**1973**). "Individual differences in sensitivity to interaural differences in time and level," Percept. Mot. Skills **37**, 755-761.
- Mills, A. W. (**1972**). "Auditory localization," in *Foundations of modern auditory theory. Vol. 11*, edited by J. V. Tobias (Acadademic Press, New York), pp. 303-348.
- Phillips, D. P., and Hall, S. E. (**2005**). "Psychophysical evidence for adaptation of central auditory processors for interaural differences in time and level," Hearing Research **202**, 188-199.

- Sheldon, P. E. (**1973**). "Equal-onset contours of vibrotactile stimuli," *Perception and Psychophysics* **13**, 403-407.
- Shinn Cunningham, B. G., Santarelli, S., and Kopco, N. (**2000**). "Tori of confusion: Binaural localization cues for sources within reach of a listener," *J. Acoust. Soc. Am.* **107**, 1627-1636.
- Trahiotis, C., and Kappauf, W. (**1978**). "Regression interpretation of differences in time-intensity trading ratios obtained in studies of laterality using the method of adjustment," *J. Acoust. Soc. Am.* **64**, 1041-1047.
- Whitworth, R. H., and Jeffress, L. A. (**1961**). "Time vs. intensity in the localization of tones," *J. Acoust. Soc. Am.* **33**, 925-929.
- Wightman, F. L., and Kistler, D. J. (**1992**). "The dominant role of low-frequency interaural time differences in sound localization," *J. Acoust. Soc. Am.* **91**, 1648-1661.
- Wightman, F. L., and Kistler, D. J. (**1997**). "Factors affecting the relative salience of sound localization cues," in *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*, edited by R. H. Gilkey, and T. R. Anderson (Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ), pp. 1-23.
- Young, L., and Levine, J. (**1977**). "Time-intensity trades revisited," *J. Acoust. Soc. Am.* **61**, 607-609.

Figure 1: Left panel: IIDs chosen to compensate for given ITDs during the compensation phase of Experiment 1a (error bars denote the standard errors of the means). Right panel: Relation between the preset ITD and the perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phase of Experiment 1a (error bars denote the standard errors of the means).

Figure 2: Left panel: IIDs chosen to compensate for given ITDs during the compensation phase of Experiment 1b (error bars denote the standard errors of the means). Right panel: Relation between the preset ITD and the perceived location during the critical trials and the (ITD-) control trials of the localization phase of Experiment 1b (error bars denote the standard errors of the means).

Figure 3: Relation between the preset IID and the perceived location during the (IID-) control trials of the localization phase of Experiment 1b (error bars denote the standard errors of the means).

Figure 4: Left panel: IIDs chosen to compensate for given ITDs during the compensation phase of Experiment 1c (error bars denote the standard errors of the means). Right panel: Relation between the preset ITD and the perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phase of Experiment 1c (error bars denote the standard errors of the means).

Figure 5: Left panel: ITDs adjusted by the participants in order to compensate for preset IIDs during the compensation phase of Experiment 2 (error bars denote the standard errors of the means). Right panel: Relation between the preset IID and the perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phase of Experiment 2 (error bars denote the standard errors of the means).

Figure 6: Equivalence relations during the two phases of Experiment 1a and Experiment 2 and in the non-conflict situation of the control trials.

**RELATIVE INFLUENCE OF INTERAURAL TIME AND INTENSITY
DIFFERENCES ON LATERALIZATION IS MODULATED BY ATTENTION TO
ONE OR THE OTHER CUE: 500-HZ SINE TONES**

Albert-Georg Lang^{a)} and Axel Buchner

Institut für Experimentelle Psychologie, Heinrich-Heine-Universität, 40225 Düsseldorf, Germany

Running head: Attentional modulation of sound localization

^{a)} Electronic mail: albert.lang@uni-duesseldorf.de

Abstract

When interaural time differences and interaural intensity differences are set into opposition the measured trading ratio depends on which of the cues is adjusted by the listener. In an earlier article (Lang and Buchner, 2008) four experiments were reported in which a compensation task was compared to a localization task. It was shown that the sounds that were adjusted by participants to originate from a central position were not located in the center when pure localization judgments were given. Instead, the perceived location was shifted back toward the location from which the sounds appeared to originate before the adjustment. It was argued that attention shifted toward the to-be-adjusted cue during the compensation task and that this shift of attention led to an increased weighting of the to-be-adjusted cue. A female voice was used as stimulus material in those experiments. The use of broadband stimuli raises the question whether the “shift-back effect” found in our previous experiments was caused by shifts of attention to the to-be-adjusted binaural cues themselves or by attention shifts to a frequency range which is more important for localizations based on the to-be-adjusted cue. Two experiments were conducted in which sine tones of 500 Hz were used instead of broadband sounds. The shift-back effect could still be observed. We thus conclude that shifts of attention between the binaural cues themselves seem more plausible than shifts of attention between high and low frequency ranges for explaining the shift-back effect.

I. INTRODUCTION

In an earlier article (Lang and Buchner, 2008) we reported four experiments showing that the equivalence relation¹ between interaural time differences (ITDs) and interaural intensity differences (IIDs) varies as a function of the task participants have to perform. The experiments consisted of two phases. In the *compensation phase*, participants canceled out the effect of one preset binaural cue on localization by adjusting a compensatory value of the other cue until the sound was located in a central position. In the *localization phase* participants assessed the virtual position of the sound, using the preset value of the fixed cue and using the same value of the complementary cue as previously adjusted. The sounds were no longer perceived as originating from the center. Instead, their perceived location was shifted back toward the location from which they appeared to originate before the adjustment. This “shift-back effect” suggests that the to-be-adjusted cue received a larger weight than the other cue during the compensation task.

Specifically, while adjusting one binaural cue in order to compensate for the effect of the other cue participants moved a control element and simultaneously received feedback about the effects of their adjustments in terms of immediate changes of the virtual location of the sound source. Given that participants were instructed to find an adjustment value that led to a certain localization (at the central position) they had to carefully observe the relation between their adjustments and the perceived changes of the sound source location. We presumed that this led to an increased attention to the effect of the to-be-adjusted cue on perceived location which, in turn, led to an increased perceptual weight of this cue in relation to the complementary cue.

In the experiments reported previously (Lang and Buchner, 2008) we used wideband stimuli (a female voice) because we expected more precise localization judgments with wideband stimuli (e.g., see Stevens and Newman, 1936) and, hence, an increased chance of finding a possible shift-back effect. Nevertheless, the trading ratios found in our experiments are quite similar to those of the trading experiments reported by Young and Levine (1977) where 500-Hz sine tones were used. When ITD was the preset cue that was to be compensated by a complementary IID we found a trading ratio of 80.1 $\mu\text{s}/\text{dB}$ for a preset ITD of 600 μs which compares nicely with a ratio of 79.4 $\mu\text{s}/\text{dB}$ for a preset ITD of 500 μs in Young and Levine (1977). When the roles of ITD and IID were interchanged we found a trading ratio of 27.7 $\mu\text{s}/\text{dB}$ for a preset IID of 7.5 dB which again seems to fit with a ratio of 40.4 $\mu\text{s}/\text{dB}$ for a preset IID of 8 dB in Young and Levine (1977).

According to Rayleigh's "Duplex Theory" of sound localization (Strutt, 1907) IIDs are the more important interaural cue for sound localization of high-frequency sounds while ITDs are more important for low-frequency sounds. In spite of the considerable age of Rayleigh's theory it is still in good agreement with actual findings (e.g., see Macpherson and Middlebrooks, 2002). This "specificity" of the binaural cues to high or low frequency ranges poses an alternative explanation of the shift-back effect in the experiments reported by Lang and Buchner (2008). It may be hypothesized that the compensation task did not lead to a shift of attention to one of the two binaural cues but to one of two *frequency ranges*. For example, while adjusting the IID in order to compensate for a preset ITD participants moved a control element and simultaneously received feedback in terms of a change of the virtual sound source location. IIDs are the more

important cue for localization of high frequency sounds. It is thus conceivable that listeners' attention shifted toward the high-frequency components of the sounds in order to receive the best feedback about the relation between their adjustments and the changes of the sound source position. Conversely, while adjusting the ITD in order to compensate for an IID listeners' attention could have shifted toward the low-frequency components of the sounds.

If this assumption were correct, then the shift-back effect found in the experiments reported by Lang and Buchner (2008) should no longer be observed if pure tones are used instead of broadband stimuli. However, if our original hypothesis were correct that shifts of attention between the binaural cues *themselves* caused the shift-back effect, then the shift-back effect should also emerge when pure tones are used. Two experiments were conducted to test these predictions of the two alternative explanations of the shift-back effect. In experiment 1 participants compensated preset ITDs by complementary IIDs. In experiment 2 the roles of ITDs and IIDs were interchanged.

II. EXPERIMENT 1

A. Method

1. Participants

Participants were 12 female and 6 male persons, most of whom were students at Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Their age ranged from 19 to 42 years ($M = 26.0$, $SD = 5.9$). All participants reported normal hearing. They were paid for participating or received course credit.

2. Apparatus, Stimuli, and Procedure

The experiment was a replication of experiment 1a of Lang and Buchner (2008) with the only difference being that 500-Hz sine tones were used as stimuli instead of natural speech sounds. In order to maximize the precision with which ITDs could be regulated the tones were sampled at a resolution of 32 bits at 96 kHz. During the experiment, the sounds were presented via headphones (AKG K-501) at a sound level of about 60 dB_{SPL} (A-weighted).

The experiment consisted of two phases, a compensation phase in which participants compensated a preset ITD by an IID of inverse sign, and a localization phase that consisted of pure localization judgments. Each trial of the *compensation phase* started with a continuous loop in which the sine tone was presented for 1000 ms alternating with 1250 ms of silence. In order to avoid steep transients squared cosine ramps of 50 ms rise and fall time were used at the beginning and at the end of the tones. The tones were presented with one of seven preset ITDs (-600 μ s, -400 μ s, -200 μ s, 0 μ s, 200 μ s, 400 μ s, or 600 μ s)²; each preset ITD was presented in five trials, such that there were $7 \times 5 = 35$ compensation trials. The control element that was used by participants to choose a compensatory IID was a vertical slider displayed on a computer monitor which controlled the level difference between the left and right headphone within a range of ± 15 dB. Each trial began at a randomly chosen starting position of the slider. When participants had finished the adjustment they clicked on a “Continue” button in order to start the next trial.

The *localization phase* consisted of 35 critical and 35 control trials. Each trial was presented with a preset ITD (-600 μ s, -400 μ s, -200 μ s, 0 μ s, 200 μ s, 400 μ s, or 600 μ s). The IID was set to 0 dB in all control trials; in the critical trials the IID was identical with the IID the participant

had chosen during the parallel trial of the compensation phase. On the computer monitor a sketch of a human head wearing headphones was displayed as seen from behind such that the left side of the sketch paralleled the left side of the participant's head. A red dot could be moved to angles between -90° and $+90^\circ$ on the upper hemicycle of the displayed head using the computer mouse.

3. Design

Independent variable was the ITD, which was manipulated within-subject in seven steps ($-600\ \mu\text{s}$, $-400\ \mu\text{s}$, $-200\ \mu\text{s}$, $0\ \mu\text{s}$, $200\ \mu\text{s}$, $400\ \mu\text{s}$, and $600\ \mu\text{s}$). Dependent variables were the IID chosen during the compensation phase and the perceived location during the localization phase. A multivariate approach (MANOVA) was used for within-participant comparisons. Polynomial contrasts were evaluated from order one to order four. Partial η^2 is reported as an effect size measure.

B. Results

Figure 1 (left panel) illustrates the relation between the preset ITD and the IID chosen to compensate for the effect of the ITD during the compensation phase. A MANOVA showed that the effect of the preset ITD ($-600\ \mu\text{s}$, $-400\ \mu\text{s}$, $-200\ \mu\text{s}$, $0\ \mu\text{s}$, $200\ \mu\text{s}$, $400\ \mu\text{s}$, and $600\ \mu\text{s}$) on the chosen IID was statistically significant ($F(6, 12) = 7.89$, $p = .001$, $\eta^2 = .80$). An analysis of the polynomial contrasts revealed statistically significant first and third order trends ($F(1, 17) = 60.04$, $p < .001$, $\eta^2 = .78$; $F(1, 17) = 35.08$, $p < .001$, $\eta^2 = .67$, respectively).

Figure 1 (right panel) shows the relation between the preset ITD and the perceived location during the localization phase. A MANOVA for the control trials showed a significant effect of the preset ITD on perceived sound source location ($F(6, 12) = 74.0, p < .001, \eta^2 = .97$).

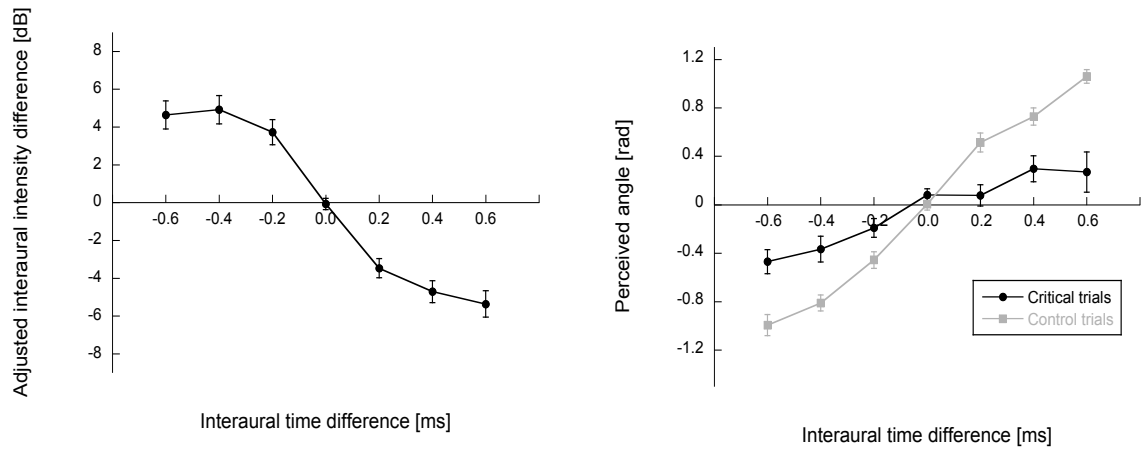


FIG. 1. Left panel: IIDs chosen to compensate for preset ITDs during the compensation phase of experiment 1 (error bars denote standard errors of the means). Right panel: Relation between the preset ITD and the perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phase of experiment 1 (error bars denote standard errors of the means).

A more interesting analysis concerns the perceived sound source locations of the critical trials. If a shift-back effect was present in the current experiment an effect of the preset ITD on sound source locations should be observed. A MANOVA for the critical trials showed that the effect of the ITD was indeed significant ($F(6, 12) = 3.62, p = .028, \eta^2 = .64$). An analysis of the polynomial contrasts showed that only the linear component was statistically significant ($F(1, 17) = 18.21, p = .001, \eta^2 = .52$).

C. Discussion

The central result of experiment 1 is that our earlier findings could be replicated: The shift-back effect demonstrated in Experiment 1a of Lang and Buchner (2008) with natural speech sounds also emerged in the current experiment with 500-Hz sine tones.

As a side note, in the critical trials of the localization phase of the current experiment 1 the effect of the preset ITD on perceived localization angle ($\eta^2 = .64$) was somewhat smaller than the effect in experiment 1a of Lang and Buchner ($\eta^2 = .85$). The relevant data are displayed in the right panel of Figure 2. Of course, this may just represent random variation between experiments with different samples of participants so that we cannot be sure that the difference observed here warrants a substantive interpretation. That being said, the left panel of Figure 2 shows another difference between these experiments in terms of the IIDs chosen by participants to compensate for preset ITDs during the compensation phases. In the current experiment 1 the chosen IIDs were smaller than in experiment 1a of Lang and Buchner (2008). It appears as if smaller IIDs were perceived as being sufficient to compensate for the effects of preset ITDs when 500-Hz sine tones were used rather than natural speech sounds. This may imply that in the compensation phase of the current experiment 1, ITDs received a smaller perceptual weight than in experiment 1a of Lang and Buchner, or alternatively, that IIDs received a larger perceptual weight in the current experiment, or both.

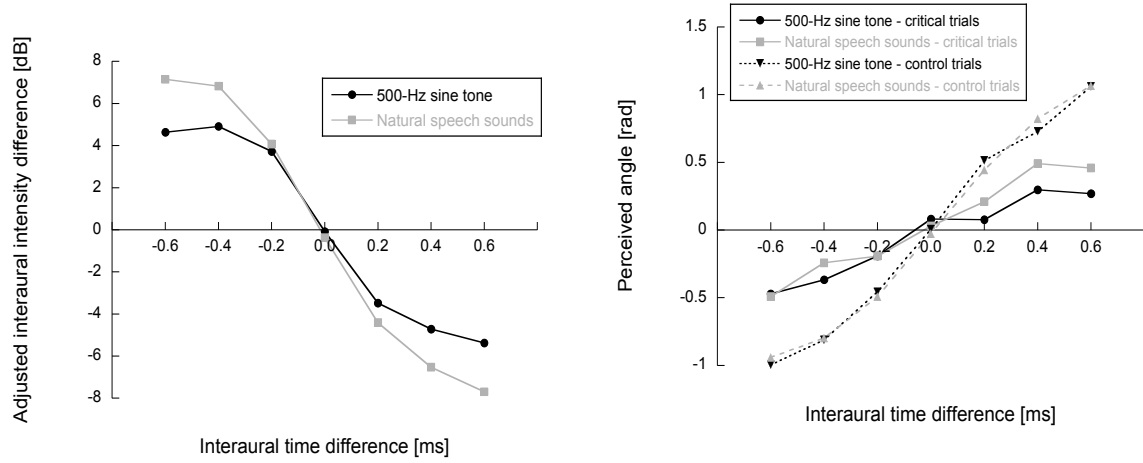


FIG. 2. Left panel: IIDs chosen to compensate for given ITDs during the compensation phase of experiment 1 (500-Hz sine tone) and the compensation phase of experiment 1a of Lang and Buchner (2008; natural speech sounds). Right panel: Relation between the preset ITD and perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phases of both experiments.

III. EXPERIMENT 2

A. Method

1. Participants

Participants were 43 female and 4 male persons, most of whom were students at the Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Their age ranged from 18 to 48 years ($M = 24.4$, $SD = 7.3$). All participants reported normal hearing. They were paid for participating or received course credit.

2. Apparatus, Stimuli, and Procedure

Experiment 2 was an exact replication of experiment 2 in Lang and Buchner (2008) and is identical to experiment 1 except for the fact that the roles of ITDs and IIDs were interchanged. Each trial was presented with a preset IID of -7.5 dB, -5 dB, -2.5 dB, 0 dB, 2.5 dB, 5 dB, or 7.5 dB. The slider that was used during the compensation trials allowed adjustments of the ITD between -600 μ s and +600 μ s. As in experiment 1, a sampling resolution of 32 bits/96 kHz was used.

During a pilot study prior to experiment 2 in Lang and Buchner (2008) the subjective impression was noted that for some trials even an ITD of ± 600 μ s would not seem to compensate the given IID. For this reason a checkbox labeled “Not enough” was displayed next to the slider, just as in experiment 2 of Lang and Buchner. Participants were instructed to check the box if they had the impression that even the most extreme slider position was not sufficient to achieve a sound localization on the midline. These trials were excluded from all further analyses since the occurrence of a shift-back effect would have been a trivial finding in these trials.

3. Design

Independent variable was the preset IID, which was manipulated within-subject in seven steps (-7.5 dB, -5.0 dB, -2.5 dB, 0 dB, 2.5 dB, 5.0 dB, and 7.5 dB). Dependent variables were (a) the ITD chosen during the compensation phase and (b) the perceived location during the localization phase of the experiment.

B. Results

Eleven participants had to be excluded because for one or more preset IIDs they chose the “Not enough” checkbox in all trials. For the remaining participants this was the case for 7.7% of the trials. The left panel of Figure 3 illustrates the relation between the preset IID and the ITD chosen to compensate for the effect of the IID during the compensation phase. A MANOVA showed that the effect of the preset IID (-7.5 dB, -5.0 dB, -2.5 dB, 0 dB, 2.5 dB, 5.0 dB, and 7.5 dB) on the chosen ITD was statistically significant ($F(6, 30) = 17.1, p < .001, \eta^2 = .77$). An analysis of the polynomial contrasts showed that the linear and the cubic components were statistically significant ($F(1, 35) = 63.32, p < .001, \eta^2 = .64$; and $F(1, 35) = 6.35, p = .016, \eta^2 = .15$).

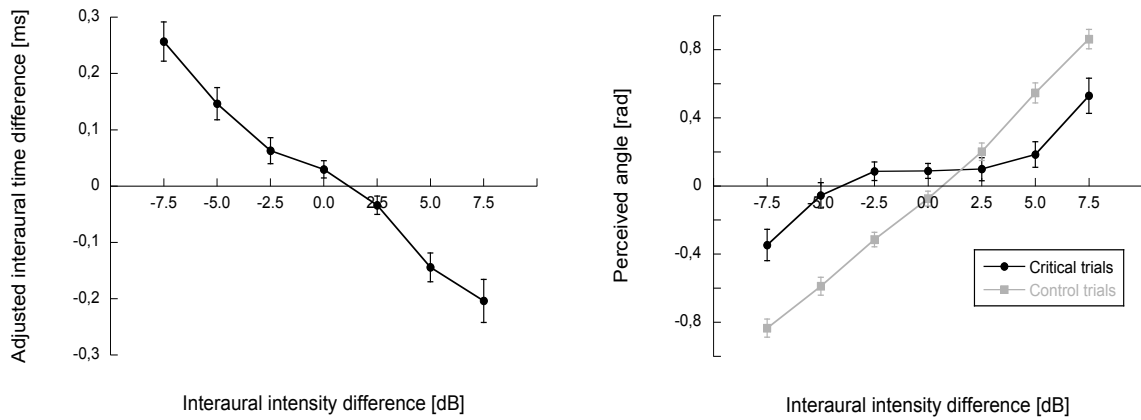


FIG. 3: Left panel: ITDs adjusted by participants in order to compensate for preset IIDs during the compensation phase of experiment 2 (error bars denote standard errors of the means). Right panel: Relation between the preset IID and perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phase of experiment 2 (error bars denote standard errors of the means).

Figure 3 (right panel) shows the relation between the preset IID and the perceived location during the localization phase. A MANOVA for the control trials showed a significant effect of the IID on perceived sound source location ($F(6, 30) = 67.5, p < .001, \eta^2 = .93$).

As in experiment 1, the most interesting analysis concerns the critical trials since an effect of the preset IID on sound source location would indicate the presence of a shift-back effect. A MANOVA for the critical trials showed that the effect of the preset IID was statistically significant ($F(6, 30) = 5.29, p = .001, \eta^2 = .51$). An analysis of the polynomial contrasts showed that the linear and the cubic components were statistically significant ($F(1, 35) = 20.96, p < .001, \eta^2 = .38$; and $F(1, 35) = 17.12, p < .001, \eta^2 = .33$, respectively).

C. Discussion

The central finding of experiment 2 is that, again, the shift-back effect found in experiment 2 of Lang and Buchner (2008) also emerged when 500-Hz sine tones were used instead of natural speech sounds. Even the size of the shift-back effect was almost identical in both of these experiments ($\eta^2 = .51$ and $\eta^2 = .48$, respectively).

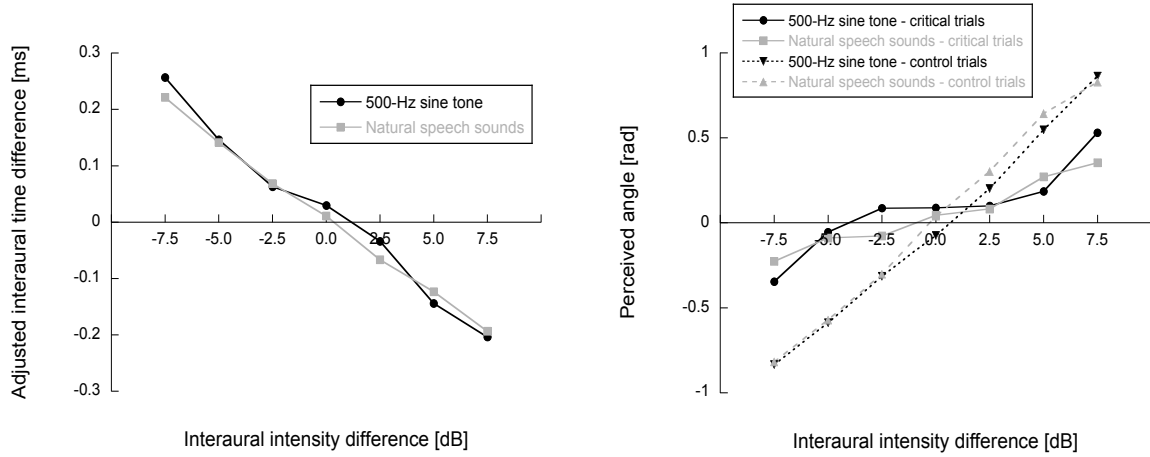


FIG 4: Left panel: ITDs chosen to compensate for given IIDs during the compensation phase of the current experiment 2 (500-Hz sine tone) and during the compensation phase of experiment 2 of Lang and Buchner (2008; natural speech sounds). Right panel: Relation between the preset IID and perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phases of both experiments.

Figure 4 shows that, in contrast to experiment 1, there was no obvious difference as to the compensation values chosen by participants between this experiment and the analogous experiment 2 of Lang and Buchner with natural speech sounds. Thus, the current experiment very nicely replicates those earlier results, showing that the shift-back effect is not tied to the use of broadband natural speech sounds.

There was, however, a more subtle difference between these experiments. In the present experiment 2 the number of trials in which the “Not enough” checkbox was chosen was clearly larger than in experiment 2 of Lang and Buchner (12.3% vs. 3.1%, respectively³). It is not quite clear how this should be explained. Again, this may represent just random variation between experiments. However, a plausible explanation could be that the present sine tones were more

difficult to localize in general than the natural speech sounds used in our previous study (e.g., see Stevens and Newman, 1936), and that the “Not enough” response category also reflects cases in which participants felt that they had not enough information about the sound source location, such that they found it impossible to adjust a “correct” value.

IV. GENERAL DISCUSSION

The main purpose of the current experiments was to answer the question whether the shift-back effect found with natural speech (Lang and Buchner, 2008) could be replicated with tones that had only one frequency component. The important result thus is that the shift-back effect occurs with both natural speech and 500-Hz sine tones. If there were no shift-back effect when 500-Hz sine tones were used instead of natural speech sounds, then the shift-back effect could be explained by assuming shifts of attention between different frequency ranges instead of assuming task-induced attentional shifts between the interaural cues themselves. However, the fact that a shift-back effect was replicated in the current experiments supports the original explanation according to which attention is shifted toward the to-be-adjusted binaural cue during the compensation phase, thereby increasing the perceptual weight of this cue above the level with which this cue affects “neutral” localization judgments. During the localization phase attention is distributed more evenly across the binaural cues and thus, the previously adjusted cue (IIDs in Experiment 1, ITDs in Experiment 2) was not large enough to compensate for the effects of the other cue on sound source localization. In more general terms, these results confirm our earlier conclusions that equivalence relations of ITDs and IIDs depend in part on states of the observer. Thus the method used to obtain equivalence relations must be taken into account when

interpreting them. Specifically, relations found by setting both binaural cues into opposition must not be compared with relations found in experiments where only one cue was present at a time (such as the control trials in our experiments).

FOOTNOTES

¹ The more common term “trading ratio” suggests a linear relationship between time and intensity differences. In the following, the term “trading ratio” is used either when a linear relationship is assumed or when the relation at a distinct point is reported (e.g., “80.1 μ s/dB, given a time difference of 600 μ s”). In all other cases the more general term “equivalence relation” is used.

² In the rest of the article negative ITDs or IIDs denote that a sound was earlier or louder, respectively, on the left channel whereas positive values indicate that it was earlier or louder, respectively, on the right channel.

³ Note that these values also include the trials of participants that had been excluded since they chose the checkbox for all trials of one or more preset IIDs.

REFERENCES

- Lang, A.-G., and Buchner, A. (2008). "Relative influence of interaural time and intensity differences on lateralization is modulated by attention to one or the other cue.," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**.
- Macpherson, E. A., and Middlebrooks, J. C. (2002). "Listener weighting of cues for lateral angle: The duplex theory of sound localization revisited," *J. Acoust. Soc. Am.* **111**, 2219-2236.
- Stevens, S. S., and Newman, E. B. (1936). "The localization of actual sources of sound," *American Journal of Psychology* **48**, 297-306.
- Strutt, J. W. (1907). "On our perception of sound direction," *Philos. Mag.* **13**, 214-232.
- Wightman, F. L., and Kistler, D. J. (1992). "The dominant role of low-frequency interaural time differences in sound localization," *J. Acoust. Soc. Am.* **91**, 1648-1661.
- Young, L., and Levine, J. (1977). "Time-intensity trades revisited," *J. Acoust. Soc. Am.* **61**, 607-609.

Figure 1: . Left panel: ITDs chosen to compensate for preset ITDs during the compensation phase of experiment 1 (error bars denote standard errors of the means). Right panel: Relation between the preset ITD and the perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phase of experiment 1 (error bars denote standard errors of the means).

Figure 2: Left panel: ITDs chosen to compensate for given ITDs during the compensation phase of experiment 1 (500-Hz sine tone) and the compensation phase of experiment 1a of Lang and Buchner (2008; natural speech sounds). Right panel: Relation between the preset ITD and perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phases of both experiments.

Figure 3: Left panel: ITDs adjusted by participants in order to compensate for preset ITDs during the compensation phase of experiment 2 (error bars denote standard errors of the means). Right panel: Relation between the preset ITD and perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phase of experiment 2 (error bars denote standard errors of the means).

Figure 4: Left panel: ITDs chosen to compensate for given ITDs during the compensation phase of the current experiment 2 (500-Hz sine tone) and during the compensation phase of experiment 2 of Lang and Buchner (2008; natural speech sounds). Right panel: Relation

between the preset IID and perceived location during the critical trials and the control trials of the localization phases of both experiments.