

Modulieren Regression und Aufmerksamkeit die Wirkung interauraler Zeit- und Intensitätsdifferenzen auf die horizontale Schallquellenlokalisation?

Inauguraldissertation

zur

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

vorgelegt von

Alina Ignaz

geboren in Omsk (Russland)

Februar 2014

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

Koreferentin: PD. Dr. Susanne Mayr

Tag der mündlichen Prüfung: 4. April 2014

Inhalt

Zusammenfassung	4
Abstract	5
Einleitung	6
Experimente 1a und 2a	18
Experimente 1b und 2b	22
Kontrollexperiment	24
Experiment 3a, 3b und 4	25
Schlussfolgerungen und Ausblick	28
Literatur	34
Manuskripte	40

Zusammenfassung

Werden interaurale Zeit- und Intensitätsdifferenzen eines Testtons in entgegengesetzter Richtung eingestellt, heben sich bei bestimmten Kombinationen von Zeit- und Intensitätsunterschieden ihre lateralen Effekte auf die Schallquellenlokalisation gegenseitig auf, sodass ein mittiger Höreindruck resultiert. Das Verhältnis zwischen den beiden Hinweisreizen ist davon abhängig, welcher interaurale Hinweisreiz von der Versuchsperson eingestellt wird. Das Regressionsmodell nimmt eine Regression auf einen interauralen Parameter des im Wechsel zum Testton gespielten diotischen Referenztons an. Dies bewirkt eine systematische Unterschätzung des einzustellenden Hinweisreizes, was durch die Beobachtung eines sogenannten *Shift-Back-Effekts* gestützt wird. Demnach führt die von den Versuchspersonen gewählte Parameterkombination in einer zweiten Experimentalphase, in der nur noch die Lokation eines Tones beurteilt werden muss, nicht mehr zu einem mittigen Höreindruck, sondern wird in Richtung des vorgegebenen Hinweisreizes lokalisiert. Dieser Shift-Back-Effekt tritt allerdings auch ohne Referenzton auf, sodass als Ursache anstelle einer Regression eine Aufmerksamkeitsverschiebung auf den einzustellenden Hinweisreiz angenommen wurde. Nach dem Modell der Aufmerksamkeitsverschiebung erhält der einzustellende Hinweisreiz ein stärkeres perzeptuelles Gewicht, wodurch bereits kleine Werte auszureichen scheinen, um den vorgegebenen Hinweisreiz auszugleichen. Die vorliegenden Experimente 1a bis 2b untersuchten, ob kurzfristig gelernte, implizite Referenztöne aus einer vorangegangenen Übungsphase die Ergebnisse in Studien ohne Referenzton erklären. Die Experimente 3a, 3b und 4 untersuchten, ob die explizite Präsentation von Referenztönen den Effekt der unzureichenden Einstellung verstärkt und somit zu einem stärkeren Shift-Back-Effekt führt. Die Ergebnisse zeigen, dass implizit gelernte Referenztöne während der Übungsphase nicht für die unzureichende Einstellung und den Shift-Back-Effekt verantwortlich sein können. Werden jedoch Referenztöne alternierend zum Testton dargeboten, verstärken sie den unvollständigen Ausgleich des vorgegebenen Hinweisreizes, sodass ein größerer Shift-Back-Effekt beobachtet wird. Hierfür kommen mehrere Erklärungen in Frage.

Abstract

Setting the interaural time and intensity difference of a test tone in opposition to each other results in a cancelation of these cues' lateral effects on sound source location and thus to a centrally perceived sound image. The relation between both cues depends on which cue is adjusted by the listener. The regression model describes this phenomenon in terms of a regression to an interaural parameter of the reference tone played alternately with the test tone. Regression is assumed to lead to a systematic underestimation of the adjusted cue. This assumption is supported by recent experiments showing a so-called *shift-back effect*, which described the phenomenon that in a subsequent localization task, in which the tones were judged according to their locations, the parameter combination chosen by participants in the preceding adjustment task results in a sound image that is no longer perceived at a central position. Instead, the perceived sound source location shifts back to the side favoured by the preset cue. However, contradicting the regression model, the shift-back effect is also observed without reference tones. This can be explained by the attention-shift model, which postulates an increased weight of the adjusted cue so that relatively smaller values seem to suffice to compensate the preset cue during the adjustment phase. The present experiments 1a to 2b were conducted to investigate whether implicit reference tones acquired during a preceding practice phase are responsible for the results of experiments without a reference tone. Experiments 3a, 3b and 4 were conducted to investigate whether the explicit presentation of reference tones leads to an even higher underestimation of the adjusted cue and therefore to a greater shift-back effect as compared to non-reference trials. The results of the present set of experiments provide no evidence that implicit reference tones learned during a preceding practice phase cause an incomplete adjustment of the interaural cues and the shift-back effect. However, if an explicit reference tone was presented, the insufficient compensation and the shift-back effect were increased. It is currently not clear how this can be explained most adequately.

Einleitung

„Der Mensch hat zwei Ohren und eine Zunge, damit er doppelt so viel hören kann, wie er spricht.“ Mit dieser Aussage betonte der antike Philosoph Epiktet die Wichtigkeit des binauralen Systems für den Menschen. Das Hören mit zwei Ohren ist die Grundlage für die Erkennung der Richtung einer Schallquelle. Richtungshören wird auch als Schallquellenlokalisation (ab hier verkürzt: Lokalisation) bezeichnet und ist eine tägliche Herausforderung für das akustische Sinnessystem, deren erfolgreiche Bewältigung dabei hilft, die akustische Informationsflut zu ordnen und angemessen auf spezifische Informationen zu reagieren (z.B. einem klingelnden Fahrradfahrer oder einem hupenden Fahrzeug auf der Straße auszuweichen).

Richtungshören ist eine Voraussetzung für die Orientierung im dreidimensionalen Raum. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts werden die Grundlagen des Richtungshörens erforscht und finden unter anderem Anwendung in der Entwicklung von dreidimensionalen Audiobildschirmen (Begault & Wenzel, 1993; King & Oldfield, 1997) zur Verbesserung von Telekommunikationssystemen mit mehreren relevanten Kanälen (siehe u. a. Bronkhorst, 2000; MacDonald, Balakrishnan, Orosz, & Karplus, 2002; McAnally & Martin, 2007), zur Verbesserung der Sonardetektion (siehe u.a. Arrabito, 2006; Doll, Hanna, & Russotti, 1992) und zur Verbesserung von Cockpit-Displays in Flugzeugen (siehe u.a. Bronkhorst, Veltman, & vanBreda, 1996). Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet ist die Weiterentwicklung von Hörgeräten mit einem besseren Signal-Rausch-Verhältnis (Van den Bogaert, Doclo, Wouters, & Moonen, 2009; Van den Bogaert, Klasen, Moonen, Van Deun, & Wouters, 2006) sowie die Konzeption von Cochlea-Implantaten, die eine präzise Richtungswahrnehmung von seitlichen Schallquellen ermöglichen, wenn sie binaural eingesetzt werden (für Näheres siehe Culling, Jelfs, Talbert, Grange, & Backhouse, 2012; van Hoesel, Ramsden, & O'Driscoll, 2002).

Für die Spezifizierung von Winkeln relativ zum Kopf wird ein Koordinatensystem bestehend aus drei Ebenen verwendet (siehe Abbildung 1). Dieses System ist nicht nur kopfbezogen, sondern auch ohrenbezogen, da sich die menschlichen Ohren kaum relativ zum Kopf bewegen lassen (Blauert, 1974). Die drei Ebenen für die Lokalisation von Schallquellen sind die Medianebene (in Abbildung 1 die dunkelgraue

Fläche), die Frontalebene (die weiße Fläche) und die Horizontalebene (in Abbildung 1 die hellgraue Fläche). Der Ausgangspunkt ist dabei immer der Kopf des Zuhörers.

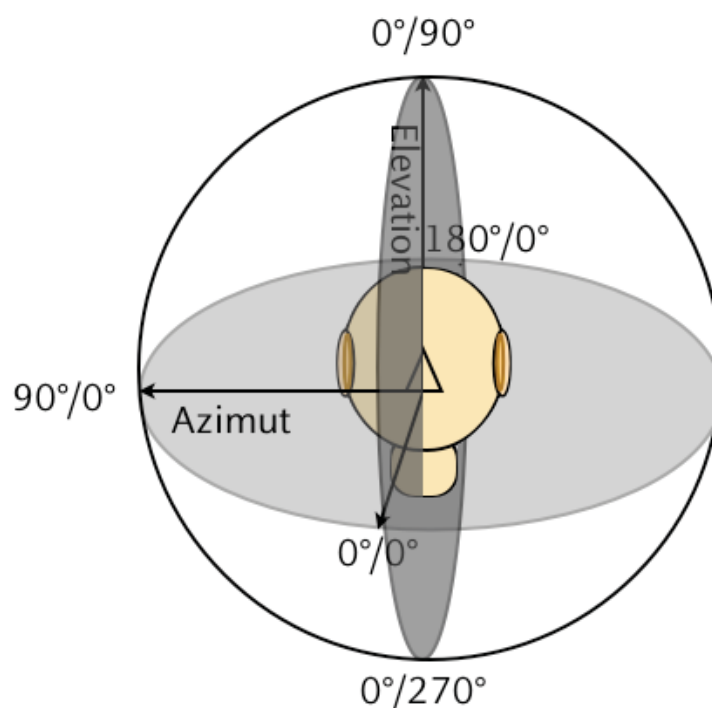


Abbildung 1: Dargestellt sind die drei Ebenen des Richtungshörens. Ein Winkel auf der Horizontalebene (hellgraue Fläche) wird als Azimut bezeichnet. Die Frontalebene ist in weiß und die Medianebene in dunkelgrau dargestellt. Die Höhe von Schallquellen wird durch die Elevation ausgedrückt. Die Winkelangaben vor dem Schrägstrich repräsentieren immer den Azimut und hinter dem Schrägstrich die Elevation.

Die Medianebene umfasst alle mittigen Positionen mit unterschiedlicher Entfernung und Höhe im Raum und verläuft sagittal in Relation zum Kopf eines Zuhörers. Die Entfernung zu beiden Ohren ist dabei für alle Schallquellen gleich, sodass spektrale Hinweisreize die wesentlichen Hinweise für die Lokalisation sind (Middlebrooks & Green, 1991; Moore, 2012). Mit spektralen Hinweisreizen ist gemeint, dass je nach Position der Schallquelle frequenzabhängige Pegelunterschiede durch Kopfschattungen am Ohr sowie Reflexionen von Schultern und vor allem Ohrmuscheln im Gehörgang entstehen (Culling & Akeroyd, 2010). Die spektralen Hinweisreize sind die Grundlage für die akustische Differenzierung zwischen vorne und hinten und unten und oben. Die Frontalebene verläuft entlang der *Ohrenachse*, sodass sich die

Positionen von Schallquellen auf dieser Ebene nur in ihrer Höhe und Lateralisation¹ unterscheiden. Die Horizontalebene verläuft waagrecht durch den Kopf des Zuhörers und liegt im 90° Winkel zu den anderen beiden Ebenen. Die Schallquellen auf dieser Ebene unterscheiden sich nur in der Lateralisation voneinander, nicht aber in ihrer Höhe.

Winkel auf der Horizontalebene werden als Azimut und Winkel auf der Medianebene als Elevation bezeichnet. Azimut und Elevation sind die zwei wesentlichen Richtungsangaben für die Lokalisation im Raum. Alle Schallquellen mit einer Elevation von 0° liegen auf der Horizontalebene. Alle Schallquellen mit einem Azimut von 0° liegen auf der Medianebene. Eine Schallquelle mit einem Azimut und einer Elevation von 0° kennzeichnet die mittige Position vor dem Zuhörer. Ein Azimut von -90°² deutet auf eine Schallquelle direkt am linken Ohr hin und ein Azimut von 180° signalisiert eine mittig gelegene Schallquelle hinter dem Zuhörer. Ein Azimut mit negativem Vorzeichen indiziert eine links gelegene Schallquelle, während Elevationswinkel mit negativem Vorzeichen Schallquellen unterhalb der Horizontalebene repräsentieren. Je nach Azimut und Elevation der Schallquelle lassen sich Töne mit unterschiedlicher Genauigkeit lokalisieren. Der Grad der Genauigkeit kann dabei zum Beispiel durch den kleinsten wahrnehmbaren (Azimut-)Winkel erfasst werden (Mills, 1958).

Essenzielle Hinweisreize für die Lokalisation auf der Horizontalebene sind die interaurale Zeitdifferenz und die interaurale Intensitätsdifferenz (Blauert, 1974). Die interaurale Zeitdifferenz beschreibt den Unterschied in der Laufzeit eines Schallsignals zwischen beiden Ohren. Sie entsteht zum Beispiel, wenn die Entfernung einer Schallquelle zum linken Ohr kürzer ist als zum rechten, sodass ein Schallereignis von dieser Schallquelle aus das linke Ohr früher erreicht als das rechte. Begrenzt durch den Kopfdurchmesser und die Geschwindigkeit von Schallsignalen können keine interauralen Zeitdifferenzen größer als 650 μs wahrgenommen werden (Culling & Akeroyd, 2010). Der Umkehrschluss, dass eine Zeitdifferenz von 650 μs immer zu

¹ Mit Lateralisation ist in dieser Arbeit die seitliche Positionierung der Schallquellen relativ zum Kopf gemeint.

² Für die gesamte Arbeit gilt, dass ein negatives Vorzeichen auf links gelegene Schallquellen bzw. interaurale Parameter zu Gunsten der linken Seite hindeutet. Analog deutet ein positives Vorzeichen auf rechts gelegene Schallquellen oder interaurale Parameter zu Gunsten der rechten Seite hin.

einer wahrgenommenen Schallquelle von 90° führt, ist jedoch nicht möglich; der Zusammenhang zwischen den psychophysikalischen Maßen und der akustischen Wahrnehmung ist komplexer (Blauert, 1974). Damit eine interaurale Zeitdifferenz von $650\ \mu\text{s}$ eine maximal seitliche Lokalisation bewirkt, darf die halbe Periodendauer der Schallwelle diesen Wert nicht unterschreiten. Dies ist jedoch bei Sinustönen mit einer Frequenz von mehr als 800 Hz der Fall, sodass die Lokalisation auf der Basis interauraler Zeitdifferenzen stark beeinträchtigt wird. Deshalb ist die interaurale Zeitdifferenz der dominante Richtungshinweis für die Lokalisation tiefer Frequenzen (Strutt, 1907). Bei Sinustönen mit Frequenzen größer als 1500 Hz tragen interaurale Zeitdifferenzen nicht mehr zur Lokalisation von Schallquellen bei. Die kleinsten wahrnehmbaren interauralen Zeitdifferenzen treten für Sinustöne im Bereich von 500 Hz bis 1000 Hz auf. Die Sensitivität für interaurale Zeitdifferenzen unterscheidet sich interindividuell. Besonders sensitive Probanden können interaurale Zeitdifferenzen von weniger als $10\ \mu\text{s}$ wahrnehmen.

Die interaurale Intensitätsdifferenz beschreibt den Unterschied im Schalldruckpegel (dB) eines Schallereignisses zwischen dem rechten und linken Ohr. Sie ist für die Lokalisation von Tönen mit hohen Frequenzen über 2000 Hz wichtig (Stevens & Newman, 1936) und hängt von der Größe der Wellenlänge eines Schallsignals ab. Ist die Wellenlänge verhältnismäßig zum Kopfdurchmesser klein, wird die Schallwelle vom Kopf des Zuhörers reflektiert und erzeugt einen Schallschatten an der schallabgewandten Seite. Dadurch entsteht ein deutlicher Lautstärkeunterschied zwischen beiden Ohren, der sich in einer spezifischen wahrgenommenen Lokation niederschlägt. Ist jedoch die Wellenlänge im Verhältnis zum Kopfdurchmesser groß, beugt sich die Schallwelle um den Kopf des Zuhörers und erzeugt auf der schallabgewandten Seite keinen ausreichenden Schallschatten. Folglich ist kein ausreichender Lautstärkeunterschied vorhanden. Befindet sich die Schallquelle unmittelbar vor dem Zuhörer, sind die interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen gleich null. Die Differenzen werden umso größer, je seitlicher die Schallquelle positioniert ist. Ihr Maximum haben sie auf der Ohrenachse, das heißt, wenn sich die Schallquelle unmittelbar am rechten oder dem linken Ohr befindet. Im Freifeld – respektive in einem Raum mit (natürlichen) Schallquellen, in dem keine Reflexionen auftreten – liefern beide interauralen Hinweisreize redundante Informationen über die Position einer Schallquelle. Um Schallquellen auf der Horizontalebene zu simulieren (zum Beispiel über Kopfhörer), ist die Frage nach dem Äquivalenzverhältnis zwischen den inter-

auralen Hinweisreizen wichtig, also die Frage danach, wie viel interaurale Intensitätsdifferenz dieselbe Wirkung auf die wahrgenommene Schallrichtung hat wie eine bestimmte interaurale Zeitdifferenz.

Eine gängige Methode zur Untersuchung dieser Frage ist das sogenannte *Trading-Paradigma* (siehe u.a. Harris, 1960; Naunton & Elpern, 1964; Whitworth & Jeffress, 1961). Es basiert auf der Annahme, dass eine interaurale Zeitdifferenz, die auf eine links gelegene Schallquelle hinweist, durch eine interaurale Intensitätsdifferenz, die im selben Maß auf eine rechts gelegene Schallquelle hinweist, ausgeglichen werden kann, sodass der Ton, der diese zwei entgegengesetzten Hinweisreize trägt, mittig wahrgenommen wird. Das Verhältnis zwischen den beiden Hinweisreizen wird als *Trading-Ratio* bezeichnet und in $\mu\text{s}/\text{dB}$ angegeben. Die Trading-Ratio gibt an, wie viele Mikrosekunden einer interauralen Zeitdifferenz notwendig sind, um ein Dezibel einer interauralen Intensitätsdifferenz auszugleichen. Die anfängliche Annahme eines linearen Verhältnisses zwischen den beiden Hinweisreizen wurde durch Studien in Frage gestellt, die unterschiedlich große Trading-Ratios in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren berichteten. Zum Beispiel variierten Deatherage und Hirsh (1959) interaurale Intensitätsdifferenzen von Klicks und präsentierten diese in drei verschiedenen Lautstärkestufen ($40 \text{ dB}_{\text{SPL}}$, $60 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ und $80 \text{ dB}_{\text{SPL}}$). Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, die interaurale Zeitdifferenz so einzustellen, dass sie die Klicks mittig lokalisierten. Die eingestellte interaurale Zeitdifferenz zum Ausgleich der interauralen Intensitätsdifferenz war dabei anhängig von der Lautstärke. Zum Beispiel konnten bei einer Lautstärke von $40 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ nur interaurale Intensitätsdifferenzen von bis zu 12 dB ausgeglichen werden, während bei $80 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ interaurale Intensitätsdifferenzen von bis zu 30 dB mit interauralen Zeitdifferenzen kompensiert werden konnten. Hafter und Jeffress (1968) fanden unterschiedlich große Trading-Ratios für Klicks im Vergleich zu 500-Hz-Sinustönen. Andere Autoren zeigten, dass die Frequenz der Sinustöne (250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz) für die Größe der Trading-Ratios entscheidend ist (Young & Levine, 1977). Die Versuchspersonen von Wightman und Kistler (1992) lokalisierten Breitbandgeräusche mit entgegengesetzt wirksamen interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen. Die interaurale Zeitdifferenz dominierte dabei den Richtungseindruck, wenn die Breitbandgeräusche Anteile tiefer Frequenzen aufwiesen. Durch Eliminierung der tiefen Frequenzanteile konnte diese Dominanz wieder aufgehoben werden. Weiter zeigte sich, dass die Größe der

ermittelten Trading-Ratios interindividuell variierte (siehe u. a. Mcfadden, Jeffress, & Russell, 1973).

Zur Ermittlung von Trading-Ratios wird oft eine Variante des Trading-Paradigmas realisiert, bei der ein diotischer Referenzton mit interauralen Differenzen von $0\ \mu\text{s}$ und $0\ \text{dB}$ (Elpern & Naunton, 1964; Hafter & Jeffress, 1968; Young & Levine, 1977) im Wechsel mit einem dichotischen³ Testton gespielt wird. Einer der interauralen Hinweisreize des Testtons wird vom Versuchsleiter vorgegeben, während der andere durch die Versuchsperson so eingestellt werden soll, dass der Testton denselben Richtungseindruck wie der Referenzton erzeugt. Studien, die diese Variante des Trading-Paradigmas verwendeten, zeigten, dass die Größe der erhaltenen Trading-Ratios davon abhängig ist, welcher interaurale Hinweisreiz von der Versuchsperson eingestellt wird (Young & Levine, 1977). Young und Levine interpretierten ihre Befunde im Sinne der sogenannten *Doppelbildtheorie* (Hafter & Carrier, 1972; Hafter & Jeffress, 1968; Whitworth & Jeffress, 1961). Demnach können Versuchspersonen Töne mit entgegengesetzten interauralen Hinweisreizen entweder als ein einzelnes, mittleres Tonabbild wahrnehmen, oder sie teilen es in ein Zeitabbild und ein Intensitätsabbild mit verschiedenen Schallquellenpositionen auf. Das Zeitabbild wird hauptsächlich von der interauralen Zeitdifferenz determiniert und mit sehr kleinen Trading-Ratios von weniger als $10\ \mu\text{s}/\text{dB}$ assoziiert. Das Intensitätsabbild wird vor allem von der interauralen Intensitätsdifferenz beeinflusst und mit großen Trading-Ratios von mehr als $20\ \mu\text{s}/\text{dB}$ in Verbindung gebracht. Welches Tonabbild aktiviert wird, hängt vom einzustellenden Hinweisreiz ab und führt zu unterschiedlich großen Trading-Ratios.

Trahiotis und Kappauf (1978) verglichen in einer Metaanalyse Trading-Ratios unterschiedlicher Studien. Unabhängig davon, welcher der Hinweisreize eingestellt wurde, lagen die Trading-Ratios über $20\ \mu\text{s}/\text{dB}$, sodass beide Bedingungen auf ein aktiviertes Intensitätsabbild hindeuteten. Folglich lieferte die Doppelbildtheorie keine hinreichende Erklärung für inkonsistente Trading-Ratios in Abhängigkeit des einzustellenden Hinweisreizes. Trahiotis und Kappauf nehmen stattdessen eine Regression zu einem Hinweisreiz des Referenztons als Ursache für eine unvollständige

³ In der vorliegenden Arbeit gilt ein Ton als diotisch, wenn (hinsichtlich sämtlicher physikalischer Parameter) identische Schallsignale am rechten und linken Ohr vorliegen. Dichotische Töne erzeugen hingegen unterschiedliche Schallsignale am rechten im Vergleich zum linken Ohr.

Kompensation zwischen den beiden Hinweisreizen an. Werden Test- und Referenzton im Wechsel gespielt, findet nicht nur ein Vergleich ihrer Richtungseindrücke, sondern auch ein Vergleich der interauralen Parameter beider Töne statt. Folglich orientiert sich die Versuchsperson bei der Einstellung eines Hinweisreizes des Testtons an dem äquivalenten Hinweisreiz des Referenztons. Soll die Versuchsperson zum Beispiel die interaurale Zeitdifferenz einstellen, vergleicht sie die interaurale Zeitdifferenz des Testtons mit der interauralen Zeitdifferenz des Referenztons. Im Falle eines diotischen Referenztons vergleicht die Versuchsperson den einzustellenden interauralen Hinweisreiz des Testtons mit null. Bei diesem Vergleichsprozess wird der einzustellende Hinweisreiz systematisch in seinem Wert unterschätzt, wobei nicht spezifiziert wird, warum bzw. durch welche Prozesse die Unterschätzung resultiert. Angenommen der wahre, zum vollständigen Ausgleich notwendige Wert für die interaurale Intensitätsdifferenz beträgt -4 dB, wenn ein Testton mit einer interauralen Zeitdifferenz von 200 μ s präsentiert wird. Eine Regression zur interauralen Intensitätsdifferenz des diotischen Referenztons (die 0 dB entspricht) würde dann bewirken, dass ein kleinerer Wert für die interaurale Intensitätsdifferenz von (zum Beispiel) -2 dB beim Testton eingestellt wird. Laut Trahiotis und Kappauf unterliegen alle mit der Methode der Adjustierung gewonnen Trading-Ratios dieser systematischen Antwortverschiebung in Richtung des korrespondierenden Parameterwerts des Referenztons. Das Regressionsmodell basiert auf der Annahme, dass eine wahre Trading-Ratio existiert, die jedoch aufgrund der systematischen Antwortverschiebung nicht ermittelt werden kann. Trahiotis und Kappauf betonen, dass es sich um ein deskriptives Modell handelt und grenzen es von der mathematischen Regression und der natürlichen Tendenz, eher mittlere Werte zu wählen, ab.

Ist Regression bzw. sind die dahinter stehenden, unbekannten Prozesse die einzige Ursache für einen unzureichenden Ausgleich zwischen dem einzustellenden und vorgegebenen Hinweisreiz, müssten sich einheitliche Trading-Ratios – unabhängig vom einzustellenden Hinweisreiz – ergeben, wenn *kein* Referenzton präsentiert wird. Dieser Frage gingen Lang und Buchner (2008, 2009) nach und führten eine Variante des Trading-Paradigmas ohne Präsentation eines Referenztons durch. Sie erweiterten ihre Experimente außerdem um eine zusätzliche Lokalisationsphase. In der Trading-Phase sollten die Versuchspersonen Testtöne über einen Schieberegler am Monitor mittig einstellen. Die Versuchspersonen wussten dabei nicht, dass ein interauraler Hinweisreiz des Testtons vorgegeben war und der andere von ihnen über den Schie-

beregler reguliert wurde. In der darauffolgenden Lokalisationsphase hörten die Versuchspersonen erneut die Testtöne mit ihren selbst gewählten Kombinationen der beiden interauralen Hinweisreize, die sich nach dem Urteil der Versuchsperson gerade ausgeglichen hatten und zu einer mittigen Lokalisation führten. Wählte eine Versuchsperson zum Beispiel zum Ausgleich einer interauralen Zeitdifferenz von $600\ \mu\text{s}$ eine interaurale Intensitätsdifferenz von $-5\ \text{dB}$ in der Trading-Phase, wurde ihr im korrespondierenden Lokalisationsdurchgang der Testton erneut mit einer zeitlichen Verzögerung von $600\ \mu\text{s}$ und einer erhöhten Lautstärke von $5\ \text{dB}$ auf dem linken im Vergleich zum rechten Ohr präsentiert. Obwohl die Versuchspersonen den vorgegebenen Hinweisreiz in der Trading-Phase mit einem zur entgegengesetzten Seite eingestellten Hinweisreiz ausgeglichen hatten, wurden die Töne jedoch in der Lokalisationsphase nicht mittig, sondern in Richtung des vorgegebenen Hinweisreizes lokalisiert. Im Beispieldurchgang würde das Richtungsurteil folglich durch die vorgegebene interaurale Zeitdifferenz von $600\ \mu\text{s}$ bei einer interauralen Intensitätsdifferenz von $-5\ \text{dB}$ von der Mitte zur rechten Seite hin abweichen, allerdings nicht so weit nach rechts wie der Ton, bei dem eine interaurale Zeitdifferenz von $600\ \mu\text{s}$ mit einer interauralen Intensitätsdifferenz von $0\ \text{dB}$ kombiniert ist. Dieses Phänomen wurde von Lang und Buchner als *Shift-Back-Effekt* bezeichnet und über sechs Experimente hinweg konsistent repliziert.

Obwohl die unzureichende Einstellung des einzustellenden Hinweisreizes auch vom Regressionsmodell nach Trahiotis und Kappauf (1978) angenommen wird und diese Annahme durch den beobachteten Shift-Back-Effekt gestützt wird, können die Ergebnisse von Experimenten ohne Referenzton (Lang & Buchner, 2008, 2009) nicht mit einer Regression zum Parameterwert eines Referenztons erklärt werden. Die von Lang und Buchner (2008, 2009) ermittelten Trading-Ratios waren zudem vergleichbar mit Trading-Ratios, die in Experimenten mit Referenzton (Young & Levine, 1977) gefunden wurden. Dies stellte das Regressionsmodell grundsätzlich in Frage. Lang und Buchner schlugen mit dem Aufmerksamkeitsmodell einen alternativen Erklärungsansatz vor. Nach diesem Modell verschiebt sich bei der Einstellung eines interauralen Hinweisreizes die Aufmerksamkeit auf diesen Hinweisreiz, wodurch er ein stärkeres perzeptuelles Gewicht erfährt und in seiner Wirkung überschätzt wird. Dadurch scheinen bereits relativ kleine Werte des einzustellenden Hinweisreizes für eine Kompensation des vorgegebenen Hinweisreizes auszureichen. Während der Trading-Phase wird der eingestellte Testton mittig wahrgenommen. In der darauf-

folgenden Lokalisationsphase findet jedoch keine aufgabenbedingte Aufmerksamkeitsverschiebung auf den einzustellenden Hinweisreiz statt, sodass sich wieder ein perzeptuelles Gleichgewicht zwischen den Hinweisreizen einstellt. Die zu klein gewählten Werte für den eingestellten Hinweisreiz reichen in dieser Situation nicht mehr für eine vollständige Kompensation des lateralen Effekts des vorgegebenen Hinweisreizes aus. Dadurch weicht die Lokalisation in Richtung des vorgegebenen Hinweisreizes ab, und ein Shift-Back-Effekt wird beobachtet. Folglich ist die Größe der Trading-Ratio davon abhängig, welcher Hinweisreiz von der Versuchsperson eingestellt wird. Die Annahme über das Zustandekommen des Shift-Back-Effekts steht im Einklang mit Lokalisationsexperimenten, die zeigten, dass Richtungsurteile im Trading-Paradigma jeweils durch den Hinweisreiz mit der stärkeren lateralen Wirkung bestimmt werden (Schlegel, 1994). Das Aufmerksamkeitsmodell geht nicht von einer wahren Trading-Ratio aus, sondern von so vielen Trading-Ratios wie es Hörsituationen gibt. Unabhängige Evidenz für ein verändertes perzeptuelles Gewicht der beiden Hinweisreize in Abhängigkeit von der Hörsituation stammt aus Experimenten, bei denen das relative Gewicht von interauralen Intensitätsdifferenzen bei der Lokalisation stieg, wenn die Sensitivität für interaurale Zeitdifferenzen abnahm (Rakerd & Hartmann, 1985; Stecker, 2010).

Zusammenfassend zeigt sich, dass sowohl das Regressionsmodell als auch das Aufmerksamkeitsmodell eine unzureichende Kompensation durch Unterschätzung des einzustellenden Hinweisreizes annehmen, die in der Lokalisationsphase zu einem Shift-Back-Effekt führt. Der Unterschied liegt jedoch in der zugrunde liegenden Variable. Während das Regressionsmodell von einem durch einen nicht spezifizierten Prozess vermittelten Einfluss der interauralen Hinweisreize des Referenztons ausgeht, nimmt das Aufmerksamkeitsmodell eine starke Aufmerksamkeitsfokussierung auf den einzustellenden Hinweisreiz des Testtons an, die dessen Gewicht bei der Beurteilung der Lokalisation des zu adjustierenden Tons gegenüber einer neutralen Hörsituation verstärkt. Das Regressionsmodell impliziert einen Vergleich zwischen den interauralen Hinweisreizen des Test- und Referenztons aus, während das Aufmerksamkeitsmodell unabhängig von einem Referenzton eine unterschiedlich gewichtete Verrechnung der interauralen Hinweisreize annimmt. Der neuronale Verrechnungsprozess verändert sich, sobald sich das perzeptuelle Gewicht der beiden Hinweisreize verändert. Folglich sind je nach Hörsituation bisweilen kleinere und bisweilen größere interaurale Intensitätsdifferenzen notwendig, um interaurale Zeit-

differenzen auszugleichen – dasselbe gilt umgekehrt für den Ausgleich interauraler Intensitätsdifferenzen durch interaurale Zeitdifferenzen. Ein Überblick der Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen beiden Modellen ist in Tabelle 1 illustriert.

Tabelle 1

Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen dem Regressions- und Aufmerksamkeitsmodell.

Regressionsmodell	Aufmerksamkeitsmodell
≠ Voraussetzung ist ein Referenzton	Unabhängig von einem Referenzton
Fokus auf einen interauralen Hinweisreiz des Referenztons	Aufmerksamkeit liegt auf einem interauralen Hinweisreiz des Testtons
Impliziert einen Vergleich zwischen Test- und Referenzton	Impliziert einen Verrechnungsprozess zwischen interauralen Hinweisreizen
Es existiert eine <i>wahre</i> Trading-Ratio, die mittels Methode der Adjustierung nicht erfasst werden kann.	Es existieren so viele Trading-Ratios wie Hörsituationen; der Verrechnungsprozess passt sich an.
= unzureichende Einstellung des einzustellenden Hinweisreizes bedingt unbeständige Trading-Ratios.	
	unzureichende Einstellung des Hinweisreizes bedingt Shift-Back-Effekt in einer darauffolgenden Lokalisationsphase.

Ein Problem für das Aufmerksamkeitsmodell ist das mögliche Wirken internaler Referenzöne. Diese könnten zum Beispiel während der Übungsphase, die allen Experimenten von Lang und Buchner (2008, 2009) voranging, gelernt worden sein. Für die Übungsphasen wurden nicht-personalisierte Impulsantworten (für einen Überblick, siehe Kistler & Wightman, 1992; Wightman & Kistler, 1989a, 1989b) für Winkel zwischen -90° und 90° entlang eines als vor dem Kopf liegend gedachten Halbkreises

verwendet. Unter anderem gab es Durchgänge, in denen Töne mit Impulsantworten für einen Azimut von 0° konvolviert wurden. Zusätzlich bekamen die Versuchspersonen nach jedem Durchgang eine Rückmeldung über die Korrektheit ihrer Antwort. Dafür kennzeichnete ein grüner Punkt in einem skizzierten Kreis am Computermonitor die Position, an der die jeweilige Impulsantwort aufgenommen wurde. Somit ist es möglich, dass internale Referenzöne für unterschiedliche Raumwinkel während der Übung gelernt und lange genug im Gedächtnis aufrecht erhalten wurden, um einen Einfluss auf die nachfolgende Trading-Phase zu haben. Gestützt wird diese Vermutung durch Lokalisationsexperimente, in denen Versuchspersonen die Schallquellen für über Lautsprecher oder Kopfhörer wiedergegebene Töne lokalisierten (Schlegel, 1994). Über Kopfhörer wurden die verschiedenen Positionen durch Manipulation der interauralen Hinweisreize simuliert. Die Versuchspersonen neigten dazu, in dieser Bedingung die Lateralisationswinkel zu überschätzen, selbst dann, wenn eine lange Übungsphase vorausging. Nur eine Rückmeldung über die tatsächlichen Winkel führte zu einer Reduktion der Überschätzung. Dies wurde auf ein Lernen von Assoziationen zwischen den interauralen Hinweisreizen und Schallquellenpositionen zurückgeführt, die als Referenzen für weitere Durchgänge fungierten.

Die Experimente 1a bis 2b der vorliegenden Arbeit zielten darauf zu untersuchen, ob implizite Referenzöne während der Übungsphasen von Lang und Buchner (2008, 2009) gelernt wurden und solange persistierten, dass sie die unzureichende Kompensation durch Unterschätzung des einzustellenden Hinweisreizes bewirkten und somit einen Shift-Back-Effekt verursachten. In den Experimenten 1a und 1b sollten vorgegebene interaurale Zeitdifferenzen durch eingestellte interaurale Intensitätsdifferenzen ausgeglichen werden. In den Experimenten 2a und 2b tauschten die Hinweisreize ihre Funktion. In den Übungsphasen von Experiment 1a und 2a wurden die 500-Hz-Sinustöne entlang des vorderen Halbkreises, aber niemals direkt an der mittleren Position präsentiert. Das heißt, es wurden Impulsantworten für einen Azimut von -90° bis 90° in Abständen von 15° mit den Tönen konvolviert. Die Impulsantwort für einen Azimut von 0° wurde jedoch nicht verwendet. Die mittige Position stellte in der darauffolgenden Trading-Phase die Zielposition dar. Sollte folglich der Aufbau einer mentalen Repräsentation des kritischen Referenztons für einen Azimut von 0° während der Übungsphase von Lang und Buchner verantwortlich für die Ergebnisse sein, wird in den vorliegenden Experimenten 1a und 2a eine vollständige Kompensation zwischen dem vorgegebenen und dem eingestellten interauralen

Hinweisreiz erwartet. Entsprechend sollte kein Shift-Back-Effekt in der Lokalisationsphase auftreten. In den Experimenten 1b und 2b wurden gar keine Übungsphasen durchgeführt. Während ein impliziter Referenzton für die mittige Position durch das Üben mit den übrigen simulierten Raumwinkeln indirekt gelernt werden und die Ergebnisse in Experiment 1a und 2a beeinflusst haben könnte, war dies in den vorliegenden Experimenten 1b und 2b nicht mehr möglich. Entsprechend wurde ein vollständiger Ausgleich zwischen dem vorgegebenen und dem eingestellten Hinweisreiz und kein Shift-Back-Effekt erwartet.

Ein weiteres Problem für den Vergleich des Regressions- und Aufmerksamkeitsmodells ergibt sich daraus, dass sich bisherige Studien auf die Untersuchung des Trading-Paradigmas ausschließlich *mit* oder ausschließlich *ohne* Referenzton konzentrierten. Die beiden Bedingungen wurden bislang nie in einem Experiment gemeinsam untersucht. Die Tatsache, dass eine unzureichende Einstellung des einzustellenden Hinweisreizes und der Shift-Back-Effekt auch ohne Referenzton auftreten (Lang & Buchner, 2008, 2009), stellt das Regressionsmodell erheblich in Frage und stützt das Aufmerksamkeitsmodell. Allerdings blieb bisher unklar, ob die Hinzunahme eines Referenztons einen *zusätzlichen* Effekt auf die Einstellung interauraler Hinweisreize und den Shift-Back-Effekt hat. Dies wurde in Experiment 3a und 4 im Innergruppenvergleich mit Messwiederholung untersucht, indem die Trading-Phasen sowohl Durchgänge mit Referenzton als auch Durchgänge ohne Referenzton enthielten. In den anschließenden Lokalisationsphasen hörten die Versuchspersonen Testtöne mit ihren selbst gewählten Parameterkombinationen und sollten diese lokalisieren. Die Experimente 3a und 4 unterschieden sich darin, welcher der vorgegebene und welcher der einzustellende Hinweisreiz war. Das Experiment 3b unterschied sich von Experiment 3a darin, dass Durchgänge mit und ohne Referenzton im Zwischengruppenvergleich untersucht wurden. Wenn ausschließlich Aufmerksamkeit der wesentliche Modulator für eine ungenügende Kompensation und den Shift-Back-Effekt ist, sollten sich die Bedingungen mit und ohne Referenzton in der Größe des eingestellten Hinweisreizes sowie hinsichtlich des Shift-Back-Effekts nicht unterscheiden. Wenn jedoch zusätzlich zur Aufmerksamkeitsverschiebung eine Regression auf einen Parameter des Referenztons stattfindet, sollten sich kleinere Werte für die eingestellten Hinweisreize in Durchgängen mit Referenzton im Vergleich zu Durchgängen ohne Referenzton ergeben. In der Lokalisationsphase müsste folglich ein größerer Shift-Back-Effekt in Durchgängen auftreten, die auf Trading mit Referenzton

renzton beruhen, als in Durchgängen, die auf Trading ohne Referenzton beruhen. Der genaue Aufbau und Ablauf sowie die Ergebnisse der Experimente werden detailliert in den angehängten Artikeln 1 und 2 beschrieben, sodass im Folgenden nur ein kurzer Überblick gegeben wird.

Experimente 1a und 2a

Die Experimente 1a und 2a bestanden aus einer Übungsphase, einer Trading-Phase und einer Lokalisationsphase. Im gesamten Experiment erfolgte die Tondarbietung der 500-Hz-Sinustöne über Kopfhörer. In der Übungsphase sollten sich die Versuchspersonen zunächst an die Wahrnehmung virtueller Schallquellen gewöhnen, indem sie die Sinustöne, konvolviert mit nicht-personalisierten Impulsantworten, hörten und auf einem skizzierten Kreis am Monitor lokalisierten. Die Impulsantworten wurden mit dem KEMAR-Kunstkopf (Gardner & Martin, 1994) bei einer Elevation von 0° für Azimutwinkel zwischen -90° und 90° in Schritten von 15° aufgenommen. Ausgenommen wurde die Impulsantwort für einen Winkel von 0° , sodass in keinem Übungsdurchgang der Ton (exakt) mittig zu hören war. Dadurch konnte kein internaler Referenzton über eine mittige Position gelernt werden, der die Einstellung der interauralen Hinweisreize in der Trading-Phase beeinflussen und einen Shift-Back-Effekt in der Lokalisationsphase hervorrufen könnte. Abbildung 2 zeigt die wahrgenommenen Winkel in der Übungsphase aus Experiment 1a im Vergleich zur Übungsphase eines Pilotexperiments, bei der die Versuchspersonen Schallquellen von Tönen zwischen -90° und 90° in Schritten von 15° entweder über Lautsprecher oder über Kopfhörer mit personalisierten Impulsantworten lokalisierten. Die personenbezogenen Impulsantworten wurden dabei mit „Im-Ohr“-Mikrofonen der Firma Brüel und Kjaer (Typ 4101) für jede Versuchsperson in dem erwähnten Winkelbereich gemessen. Die präziseste Lokalisation erfolgte in der Lautsprecherbedingung. Der Vergleich der zwei Lokalisationsbedingungen mit Kopfhörern zeigt, dass Versuchspersonen bei Verwendung personenbezogener Impulsantworten größere Winkelabweichungen von der „korrekten Position“ aufwiesen als bei Verwendung von nicht-personalisierten KEMAR-Impulsantworten. Dies ist möglicherweise auf Sequenzeffekte zurückzuführen, da in dem Pilotexperiment die Übung mit Kopfhörern unmittelbar auf die Übung der natürlichen Lokalisation mit Lautsprechern folgte. Da jedoch personalisierte Impulsantworten keine genaueren Lokalisationsurteile als die nicht-personalisierte KEMAR-Impulsantworten hervorbrachten, bestand kei-

ne Notwendigkeit für die Verwendung personalisierter Impulsantworten in den vorliegenden Experimenten. Die Versuchspersonen erhielten wie in den Experimenten von Lang und Buchner (2008, 2009) nach jedem Übungsdurchgang eine Rückmeldung über die Korrektheit ihrer Antwort. Ein grüner Punkt zeigte in einem skizzierten Kreis auf dem Computerbildschirm nach jedem Durchgang an, aus welchem Winkel die Impulsantwort aufgenommen wurde.

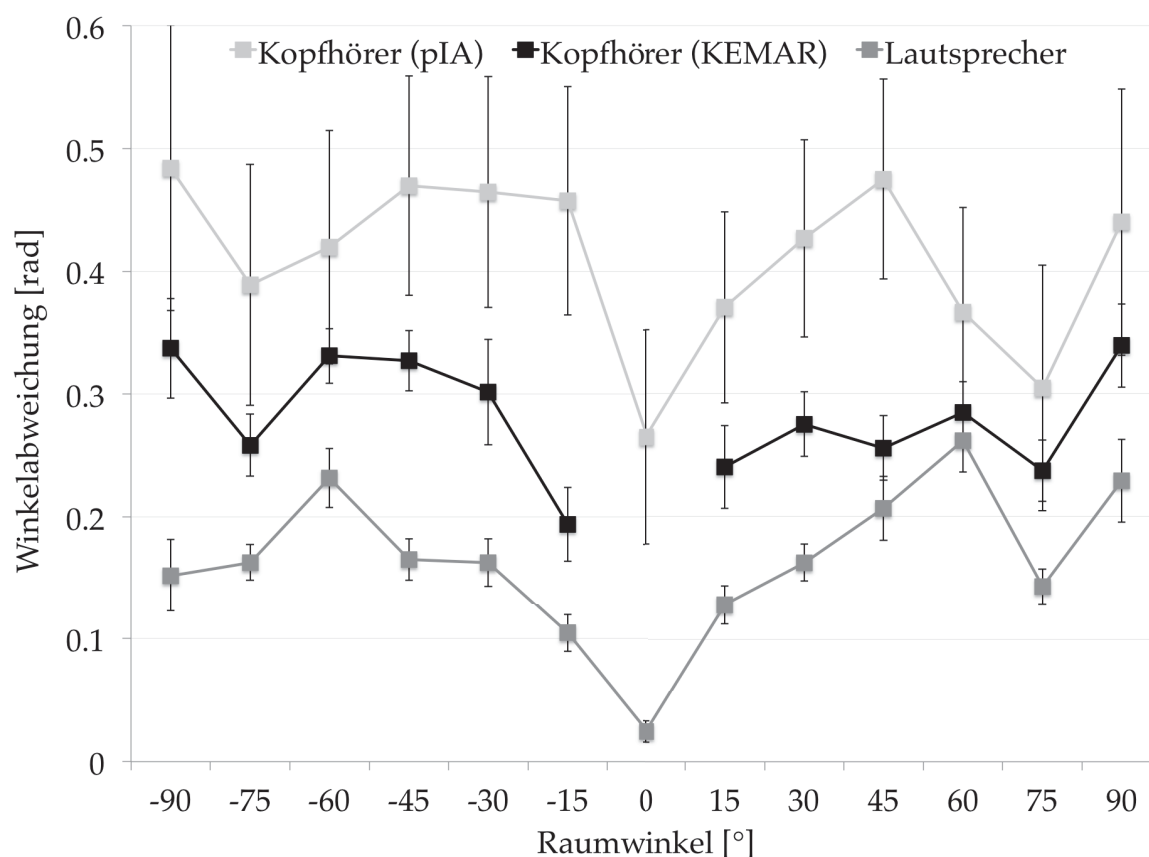


Abbildung 2: Dargestellt sind die durchschnittlichen wahrgenommenen Winkel bei der natürlichen Lokalisation über Lautsprecher (Pilotstudie) im Vergleich zur virtuellen Lokalisation über Kopfhörer mit nicht-personalisierten KEMAR-Impulsantworten (Experiment 1a) und personalisierten Impulsantworten (pIA, Pilotstudie). Die Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen.

In den Durchgängen der darauffolgenden Trading-Phase hörten die Versuchspersonen die Testtöne entweder mit einer vorgegebenen interauralen Zeitdifferenz, die von -0.6 ms bis 0.6 ms in Schritten von 0.2 ms manipuliert wurde (Experiment 1a), oder mit einer vorgegebenen interauralen Intensitätsdifferenz, die ebenfalls siebenstufig zwischen -7.5 dB und 7.5 dB in Schritten von 2.5 dB manipuliert wurde (Expe-

riment 2a). Der jeweils andere Hinweisreiz konnte von der Versuchsperson über einen Schieberegler auf der linken Seite am Bildschirm kontinuierlich zwischen ± 15 dB (Experiment 1a), beziehungsweise ± 1.2 ms (Experiment 2a) reguliert werden. Die Aufgabe der Versuchsperson war es, den Testton so einzustellen, dass er einen mittleren Richtungseindruck hervorrief. In der anschließenden Lokalisationsphase gab es zwei Arten von Durchgängen. In den kritischen Durchgängen hörten die Versuchspersonen die Kombinationen aus interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen, die sie zuvor während der Trading-Phase eingestellt hatten. In den Kontrolldurchgängen hörten die Versuchspersonen den Testton mit einer der sieben vorgegebenen interauralen Differenzen auf einem interauralen Hinweisreiz, während der andere interaurale Hinweisreiz jeweils konstant null war (in Experiment 1a 0 dB; in Experiment 2a 0 ms). Dadurch konnte geprüft werden, ob die Manipulation des vorgegebenen Hinweisreizes zu einem unterschiedlichen lateralen Lokationseindruck führte. Zum Beispiel sollte in Experiment 1a ein Kontrolldurchgang mit einer interauralen Zeitdifferenz von -0.6 ms zu einem deutlich links gelegenen und bei 0.6 ms zu einem deutlich rechts gelegenen Richtungseindruck führen. Bei ± 0.4 ms und ± 0.2 ms sollten die Töne in den Kontrolldurchgängen jeweils weniger links- beziehungsweise rechtsseitig wahrgenommen werden und bei 0 ms wurde ein mittlerer Höreindruck erwartet. Da sich ein Kontrolldurchgang von einem kritischen Durchgang nur in dem einzustellenden Hinweisreiz aus der Trading-Phase unterschied, kann ein Unterschied zwischen den beiden Durchgangsarten auch nur auf diesen Hinweisreiz zurückgeführt werden.

Die Ergebnisse für Experiment 1a und für 2a sind in Abbildung 3 für beide Experimentalphasen grafisch dargestellt. Gemäß den Vorhersagen für Experiment 1a und 2a wird durch die modifizierte Übungsphase ein vollständiger Ausgleich zwischen den Hinweisreizen erwartet, sodass kein Shift-Back-Effekt in den kritischen Durchgängen auftritt. Alle Stufen des vorgegebenen Hinweisreizes sollten demnach in der Lokalisationsphase zu einem durchschnittlichen wahrgenommenen Winkel von circa 0° führen, sodass die Kurve für die kritischen Durchgänge in Abbildung 3 auf der x-Achse liegen sollte. Es wurde außerdem ein nicht signifikanter Haupteffekt des vorgegebenen Hinweisreizes auf die wahrgenommene Lokation erwartet. Die Interaktion zwischen Durchgangsart (Kritisch versus Kontrolle) und vorgegebener Hinweisreiz müsste dann signifikant sein, weil sich die Kontrolldurchgänge und kritischen

Durchgänge bis auf die 0°-Position stark unterscheiden. Wie in Abbildung 3 ersichtlich, trafen diese Vorhersagen nicht zu.

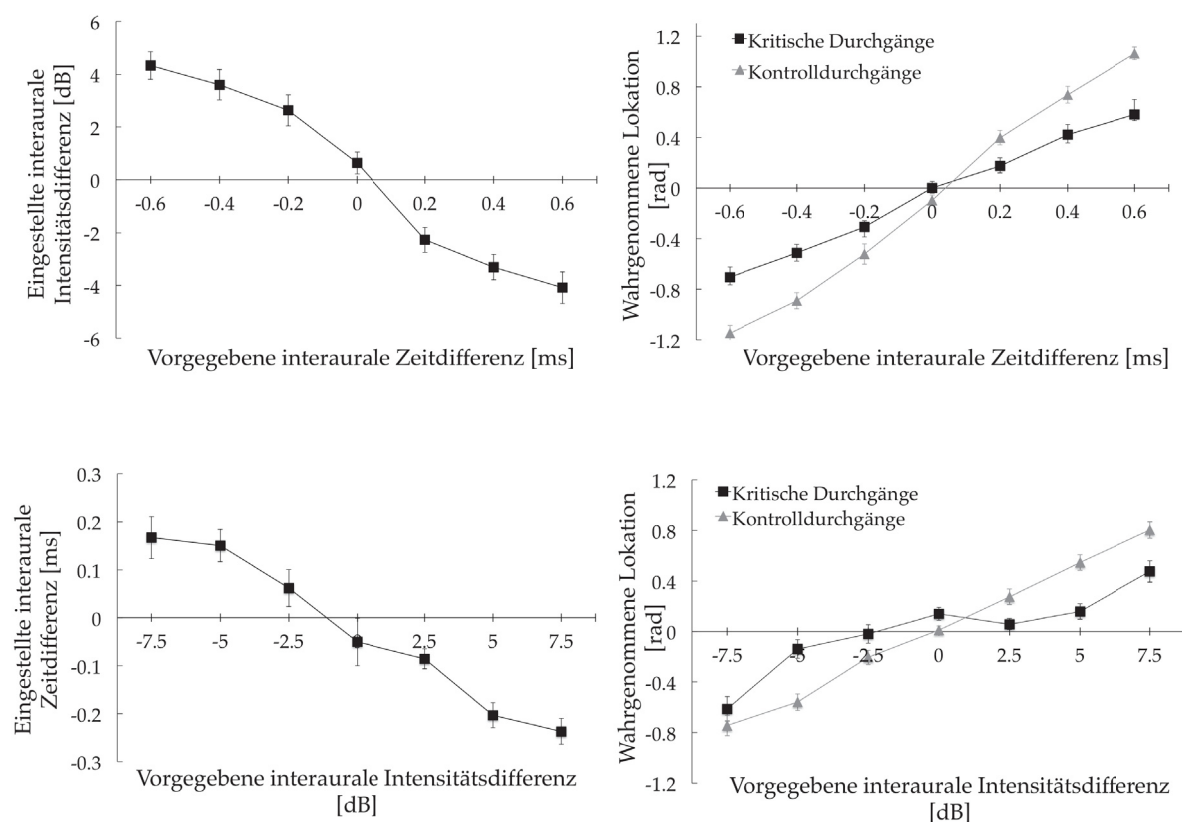


Abbildung 3: Dargestellt sind die Ergebnisse von Experiment 1a (obere Felder) und Experiment 2a (untere Felder). Die linken Felder illustrieren die durchschnittlichen eingestellten interauralen Differenzen zur Kompensation der vorgegebenen interauralen Differenzen während der Trading-Phasen. Die rechten Felder stellen die im Durchschnitt wahrgenommenen Lokationen als Funktion der vorgegebenen interauralen Differenzen während der Lokalisationsphasen dar. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardschätzfehler der Mittelwerte.

Es zeigte sich, dass die Versuchspersonen die Aufgabe aus der Trading-Phase verstanden hatten und den vorgegebenen Hinweisreiz mit entgegengesetzt eingestellten Werten für den einzustellenden Hinweisreiz ausglich. Die Einstellung des Hinweisreizes fiel dabei umso stärker zur entgegengesetzten Seite aus, je größer der Wert des vorgegebenen Hinweisreizes war. Nichtsdestotrotz zeigte sich kein vollständiger Ausgleich zwischen den Hinweisreizen, weil die kritischen Durchgänge der Lokalisationsphase nicht zu einer mittigen wahrgenommenen Position auf allen

Stufen des vorgegebenen Hinweisreizes führten. Vielmehr wichen die Richtungsurteile in beiden Experimenten in Richtung der Seite ab, auf welche der vorgegebene Hinweisreiz zeigte. Dieser signifikante Haupteffekt des vorgegebenen Hinweisreizes auf die wahrgenommene Lokation repräsentiert den Shift-Back-Effekt.

Der Vergleich von kritischen Durchgängen und Kontrolldurchgängen zeigt, dass der vorgegebene Hinweisreiz die Richtung der Abweichung determiniert. Die Testtöne wurden in beiden Durchgangsarten auf allen Stufen des vorgegebenen Hinweisreizes in Richtung derselben Seiten lokalisiert, die kritischen Durchgänge führten jedoch zu weniger lateralen Lokationseindrücken als die Kontrolldurchgänge. Zum Beispiel führte in Experiment 1a dieselbe interaurale Zeitdifferenz von -0.6 ms zu einem wahrgenommenen Winkel von -1.2 rad in den Kontrolldurchgängen, aber nur zu einem wahrgenommenen Winkel von -0.7 rad in den kritischen Durchgängen. Somit führte die entgegengesetzt eingestellte interaurale Intensitätsdifferenz im kritischen Durchgang zwar zu einem weniger lateralen Richtungseindruck, der Wert reichte jedoch nicht aus, um den Testton in der Lokalisationsphase mittig wahrzunehmen. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Lang und Buchner (2008, 2009) zeigten die Experimente 1a und 2a erneut, dass in den Trading-Phasen zwar eine Kompensation stattgefunden hatte, diese aber unvollständig war. Durch die Replikation der Ergebnisse kann die Annahme verworfen werden, dass die Präsentation eines Referenztons für die 0° -Position in der Übungsphase inkonsistente Trading-Ratios und den Shift-Back-Effekt verursacht.

Experimente 1b und 2b

Der Aufbau der Experimente 1b und 2b war identisch zum Aufbau der Experimente 1a und 2a, mit der Ausnahme, dass die gesamte Übungsphase eliminiert wurde. Die Versuchspersonen starteten stattdessen mit der Trading-Phase und durchliefen anschließend die Lokalisationsphase, die sowohl aus kritischen Durchgängen als auch Kontrolldurchgängen bestand. In den Experimenten 1a und 2a hätte ein internaler Referenzton für die mittige Position durch eine interne Verrechnung der Referenztöne für die übrigen simulierten Winkel gelernt werden können. Diese Hypothese könnte verworfen werden, wenn auch ohne Übungsphase eine unzureichende Kompensation des vorgegebenen Hinweisreizes und ein Shift-Back-Effekt aufträte. Abbildung 4 illustriert die Ergebnisse der Experimente 1b und 2b.

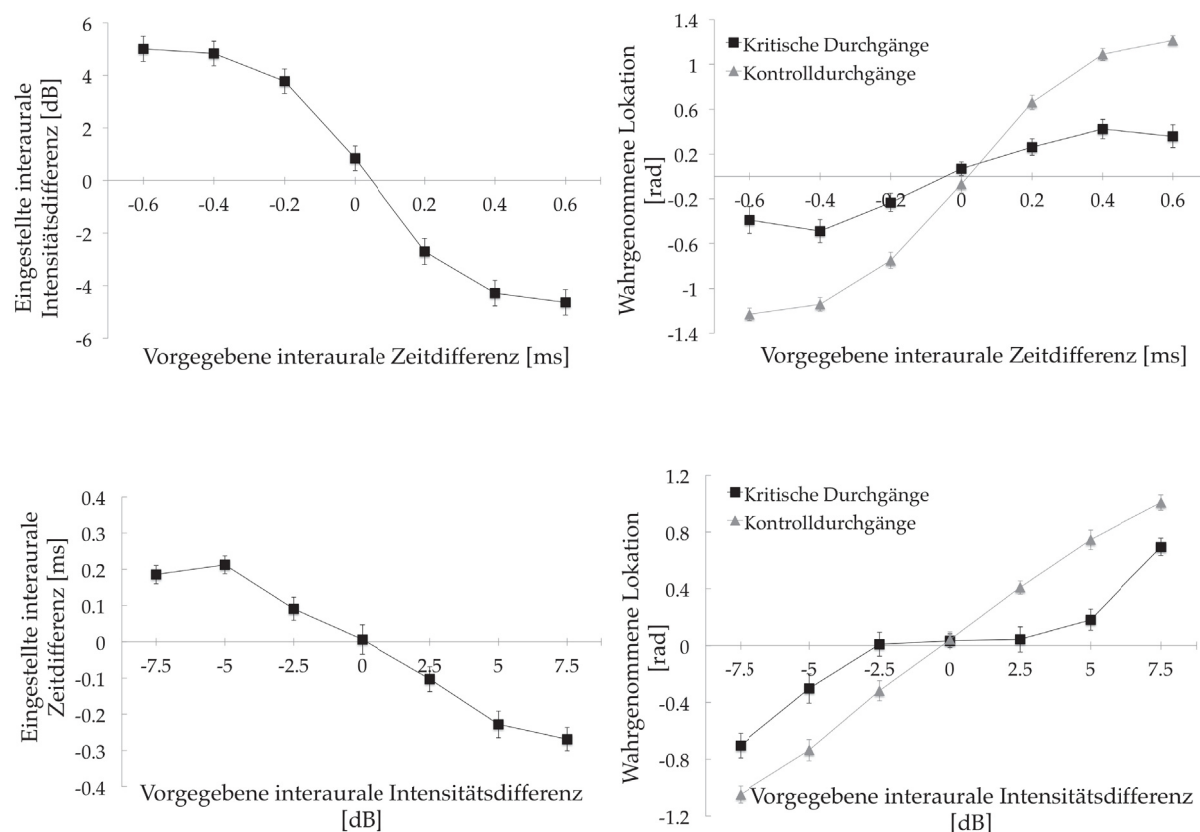


Abbildung 4: Dargestellt sind die Ergebnisse für Experiment 1b (obere Felder) und 2b (untere Felder). Auf der linken Seite sind die durchschnittlich gewählten interauralen Differenzen zur Kompensation der vorgegebenen interauralen Differenzen während der Trading-Phasen abgebildet. Auf der rechten Seite sind die durchschnittlich wahrgenommenen Lokationen in Abhängigkeit der vorgegebenen interauralen Differenzen während der Lokalisationsphasen illustriert. Die Fehlerbalken repräsentieren Standardschätzfehler der Mittelwerte.

Die Ergebnisse aus den Experimenten 1a und 2a konnten repliziert werden. Ein interner Referenzton, der im Laufe der Übungsphase gelernt wird, kann folglich als Ursache für inkonsistente Trading-Ratios und den Shift-Back-Effekt basierend auf den vorliegenden vier Experimenten ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse stützen die Annahme von Lang und Buchner (2008, 2009), dass eine Aufmerksamkeitsverschiebung auf den einzustellenden Hinweisreiz das perzeptuelle Gewicht zwischen den beiden Hinweisreizen verändert. Dadurch scheinen während der Trading-Phase kleine Werte des einzustellenden Hinweisreizes für eine Kompensation des vorgegebenen Hinweisreizes auszureichen. In einer Lokalisationssituation, in der sich wieder ein perzeptuelles Gleichgewicht zwischen den Hinweisreizen einstellt, reichen die

Werte jedoch nicht mehr für einen vollständigen Ausgleich aus, sodass ein Shift-Back-Effekt auftritt.

Kontrollexperiment

In einem zusätzlichen Kontrollexperiment, das in den angehängten Artikeln nicht beschrieben ist, sollte untersucht werden, ob eine unzureichende Einstellung eines einzustellenden Hinweisreizes auf der Tendenz von Versuchspersonen beruht, mittlere Positionen des Schiebereglers gegenüber Extrempositionen zu bevorzugen (Hollingworth, 1910). Eine generelle Tendenz zu mittleren Einstellungen würde zu kleineren Werten für den einzustellenden Hinweisreiz zur Kompensation des vorgegebenen Hinweisreizes führen und stellt somit eine weitere mögliche Erklärung für den Shift-Back-Effekt dar. Trahiotis und Kappauf (1978) grenzen zwar das Regressionsmodell von einer generellen Tendenz zur Mitte ab, haben diese jedoch nicht durch ein Experiment ausgeschlossen. Lang und Buchner (2008, 2009) stellten sicher, dass der Schieberegler vertikal am Monitor abgebildet wurde, um keine Richtungshinweise zu liefern, und balancierten über die Versuchspersonen, ob eine Verschiebung nach oben oder unten eine Verschiebung des interauralen Hinweisreizes nach rechts oder links bewirkte. Um jedoch auszuschließen, dass die natürliche Tendenz von Versuchspersonen, mittlere Einstellungen des Reglers zu bevorzugen, Ursache für inkonsistente Trading-Ratios und den Shift-Back-Effekt ist, müsste auch der Nullpunkt des Reglers variieren. Das vorliegende Experiment war hinsichtlich Aufbau und Durchführung identisch mit Experiment 1a, jedoch wurde in der Trading-Phase ein Schieberegler mit einem variierenden Nullpunkt eingesetzt. Zu diesem Zweck wurde der Bereich, in dem der einzustellende Hinweisreiz reguliert werden konnte, nicht – wie bisher – symmetrisch festgelegt (± 7.5 dB). Stattdessen wurde die bisherige Obergrenze ($+7.5$ dB) oder die bisherige Untergrenze (-7.5 dB) um einen für jeden Durchgang zufällig gewählten Betrag zwischen 0 dB und 15.0 dB erweitert. Der Regler hatte dann zum Beispiel einen Regelbereich zwischen -7.5 dB und $+22.5$ dB. Durch die Asymmetrie des Regelbereichs wurde erreicht, dass die „optische“ Mitte des Reglers nicht mehr einer interauralen Intensitätsdifferenz von 0 dB entsprach. Vielmehr war der Nullpunkt des Reglers entweder nach oben oder unten verschoben. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse des Experiments dargestellt. Die Befunde sind – insbesondere in der Größe des Shift-Back-Effekts – vergleichbar mit den Befunden aus dem vorangegangenen Experiment 1a. Die Replikation der Befunde

zeigt, dass die Versuchspersonen eine hinreichend stabile Repräsentation der mittleren Position haben. Ihre Einstellungen werden durch einen verschobenen Nullpunkt, der von Durchgang zu Durchgang seine Position auf dem Regler wechselt, nicht beeinflusst.

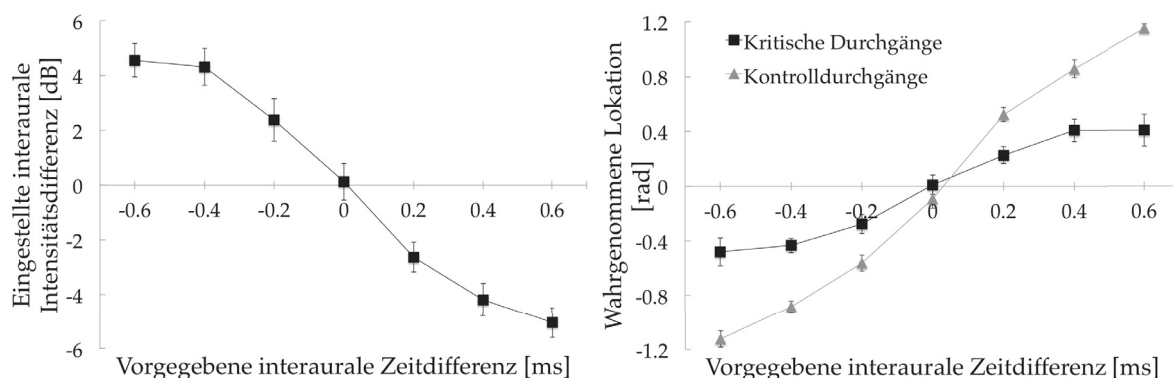


Abbildung 5: Dargestellt sind die durchschnittlich gewählten interauralen Intensitätsdifferenzen in Abhängigkeit der vorgegebenen interauralen Zeitdifferenz während der Trading-Phase mit variablem Nullpunkt (linke Seite). Auf der rechten Seite sind die durchschnittlich wahrgenommenen Lokationen in Abhängigkeit der vorgegebenen interauralen Zeitdifferenz für die Lokalisationsphase abgebildet. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardschätzfehler der Mittelwerte.

Experiment 3a, 3b und 4

Bisherige Ergebnisse zum Trading-Paradigma ohne Referenzton schließen das Regressionsmodell als alleinige Erklärung für unbeständige Trading-Ratios aus (siehe zum Beispiel Experimente 1a bis 2b und Lang & Buchner, 2008, 2009). Die Datenlage reicht jedoch nicht aus, um es gänzlich verwerfen zu können. Es ist zum Beispiel durchaus möglich, dass Regression zu einem Referenzton zusätzlich zu Aufmerksamkeitsprozessen eine Rolle im Trading-Paradigma spielt. Sollte es diesen zusätzlichen Effekt geben, dann stellt sich angesichts der deskriptiven Natur des Regressionsmodells außerdem die Frage, ob das Regressions- und das Aufmerksamkeitsmodell verschiedene Mechanismen implizieren, oder ob ihnen ähnliche Mechanismen zugrunde liegen. Die Studien 1a bis 2b zeigen, dass ein Referenzton keine notwendige Voraussetzung ist, um eine unzureichende Kompensation des vorgegebenen Hinweisreizes und einen Shift-Back-Effekt auszulösen. Des Weiteren fokussierten sich bisherige Studien entweder ausschließlich auf die Untersuchung des Trading-

Paradigmas mit Referenzton (siehe unter anderem Young & Carhart, 1974; Young & Levine, 1977) oder ohne Referenzton (siehe zum Beispiel Experimente 1a bis 2b und Lang & Buchner, 2008, 2009), sodass diese zwei Bedingungen nie in einem Experiment miteinander verglichen wurden. Für einen direkten Vergleich von Trading-Durchgängen mit und ohne Referenzton wurden die Experimente 3a, 3b und 4 durchgeführt. Der Referenzton war dabei diotisch, das heißt, beide interauralen Hinweisreize waren jeweils auf null eingestellt, um einen mittigen Höreindruck zu evozieren. Sollte die Hinzunahme eines Referenztons eine Regression zu einem Parameterwert des Referenztons auslösen, wird erwartet, dass der einzustellende Hinweisreiz in Durchgängen mit Referenzton kleiner gewählt wird als in Durchgängen ohne Referenzton. Folglich sollte der Shift-Back-Effekt größer in Lokalisationsdurchgängen ausfallen, die auf Trading-Durchgängen mit Referenzton beruhten, als in Lokalisationsdurchgängen, die auf Trading-Durchgängen ohne Referenzton beruhten.

Experiment 3a war genauso aufgebaut wie Experiment 1a, die Versuchspersonen bearbeiteten jedoch während der Trading-Phase zusätzlich zu Durchgängen ohne Referenzton auch Durchgänge mit Referenzton in zufälliger Reihenfolge. In Trading-Durchgängen ohne Referenzton sollte der Testton mittig eingestellt werden. In Durchgängen mit Referenzton sollte der Testton so eingestellt werden, dass er denselben Höreindruck wie der im Wechsel gespielte Referenzton erzeugte. Der präsentierte Testton bestand dabei aus einer vorgegebenen interauralen Zeitdifferenz und einer interaurale Intensitätsdifferenz, die von der Versuchsperson über den Schieberegler zwischen ± 7.5 dB eingestellt werden konnte. In der darauffolgenden Lokalisationsphase hörten die Versuchspersonen während eines kritischen Durchgangs nur noch die Testtöne, die entweder auf einem Trading-Durchgang mit oder ohne Referenzton basierten. Es wurden keine Referenztöne in der Lokalisationsphase präsentiert. Die Kontrolldurchgänge waren genauso aufgebaut wie in Experiment 1a. Ein bekanntes Problem beim Innersubjektdesign ist, dass ein Stimulus eines Durchgangs die Antwort auf einen Stimulus im darauffolgenden Durchgang beeinflussen kann (Garner, 1953; Ward & Lockhead, 1970). Somit könnte die zufällig abwechselnde Präsentation von Durchgängen mit und ohne Referenzton in der Trading-Phase bewirken, dass sich Referenztöne aus vorherigen Durchgängen auf die Einstellung von interauralen Hinweisreizen in nachfolgenden Durchgängen (ohne Referenzton) auswirken. Ein Unterschied zwischen den Durchgängen wäre dann auf diese Sequenzeffekte zurückzuführen. Deshalb wurde Experiment 3b im Gruppenvergleich durchgeführt.

Eine Gruppe von Probanden durchlief eine Trading-Phase, die ausschließlich aus Durchgängen ohne Referenzton bestand (wie in Experiment 1a). Eine andere Gruppe von Probanden bearbeitete in der Trading-Phase ausschließlich Durchgänge mit Referenzton. Abbildung 6 stellt die Ergebnisse für die Experimente 3a, 3b und 4 dar.

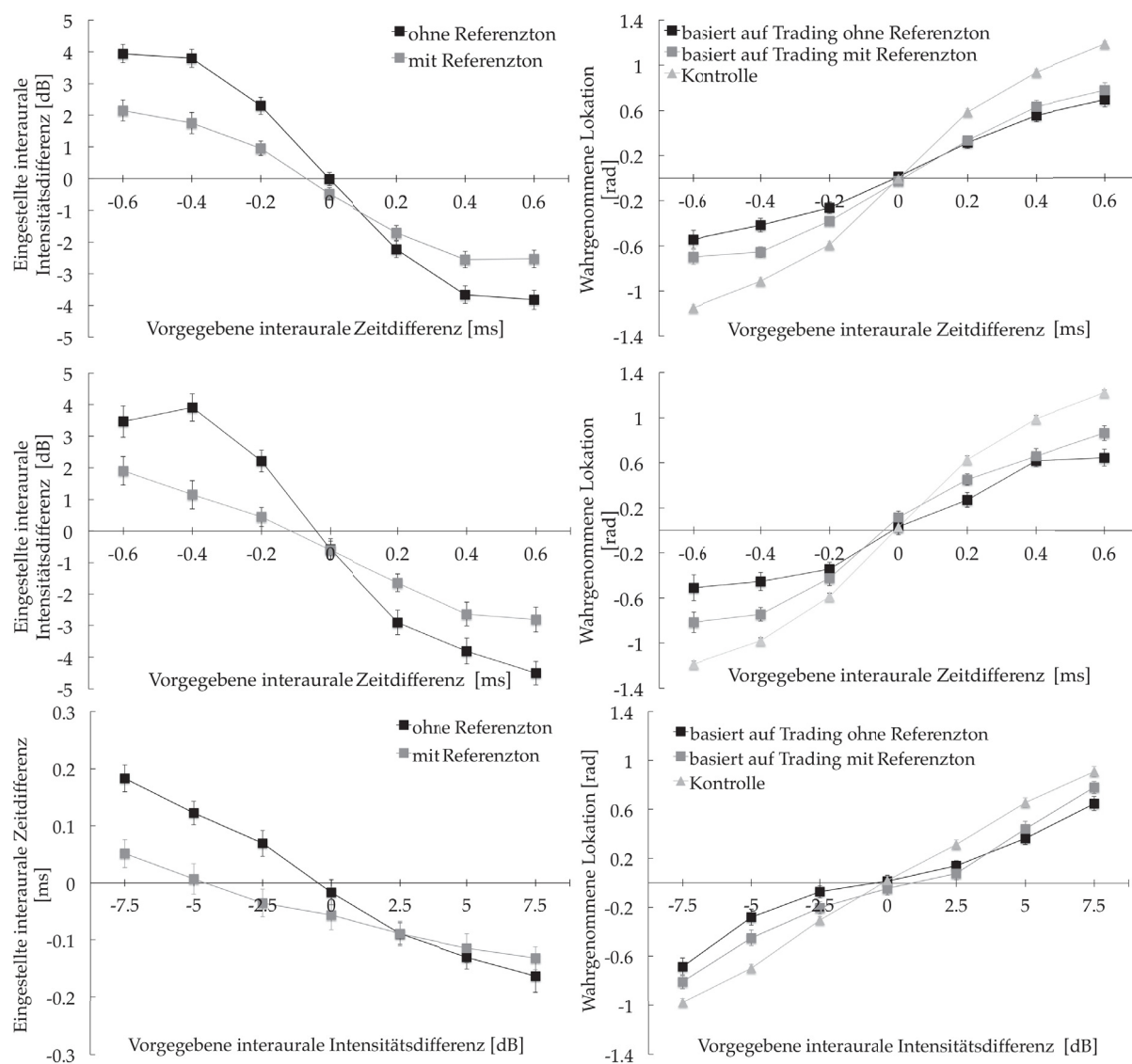


Abbildung 6: Dargestellt sind die Ergebnisse für Experiment 3a (obere Felder), 3b (mittlere Felder) und 4 (untere Felder). Auf der linken Seite sind die durchschnittlich gewählten interauralen Hinweisreize zur Kompensation des vorgegebenen Hinweisreizes während der Trading-Phase abgebildet. Auf der rechten Seite sind die durchschnittlichen wahrgenommenen Lokationen in Abhängigkeit des vorgegebenen interauralen Hinweisreizes für die Lokalisationsphasen illustriert. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardschätzfehler der Mittelwerte.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Hinzunahme eines Referenztons die ungenügende Einstellung des interauralen Hinweisreizes verstärkt, wodurch ein noch größerer Shift-Back-Effekt in der Lokalisationsphase auftritt. Die Ergebnisse von Experiment 3a und 3b fielen dabei sehr ähnlich aus, sodass der Verdacht möglicher Sequenzeffekte in Experiment 3a nicht bestätigt werden kann. Daher wurde Experiment 4 erneut im Innersubjekt-Design durchgeführt und entsprach im Aufbau Experiment 3a mit der Ausnahme, dass in der Trading-Phase interaurale Intensitätsdifferenzen vorgegeben und interaurale Zeitdifferenzen durch die Versuchspersonen eingestellt wurden. Die Ergebnisse von Experiment 3a und 3b konnten in Experiment 4 repliziert werden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war die Beantwortung der Frage, ob inkonsistente Trading-Ratios und der Shift-Back-Effekt ausschließlich auf einer Aufmerksamkeitsverschiebung auf den einzustellenden Hinweisreiz beruhen, oder ob zusätzlich eine Regression zu einem interauralen Hinweisreiz eines Referenztons auftritt. Um zunächst das mögliche Wirken implizit gelernter internaler Referenztöne auszuschließen, wurde in den Übungsdurchgängen von Experimenten 1a und 2a auf eine Präsentation von Tönen auf der 0°-Position verzichtet. In den Experimenten 1b und 2b wurde die gesamte Übungsphase eliminiert. Nichtsdestotrotz konnte in allen vier Experimenten der Shift-Back-Effekt von Lang und Buchner (2008, 2009) repliziert werden. Dies deutet darauf hin, dass der einzustellende Hinweisreiz nicht ausreichend groß gewählt wurde, um den vorgegebenen Hinweisreiz vollständig auszugleichen. Der Vergleich zwischen kritischen Durchgängen und Kontrolldurchgängen in den Lokalisationsphasen zeigt, dass der einzustellende Hinweisreiz in den kritischen Durchgängen zwar den lateralen Lokationseindruck des vorgegebenen Hinweisreizes kompensiert, diese Kompensation jedoch nicht ausreicht, um den Testton mittig wahrzunehmen. Die unvollständige Kompensation kann dabei weder auf einen expliziten Referenzton während der Trading-Phase noch auf einen impliziten Referenzton aus einer vorangegangenen Übungsphase zurückgeführt werden. Das zusätzliche Kontrollexperiment demonstrierte, dass eine natürliche Tendenz von Versuchspersonen, mittige Positionen des Reglers gegenüber Extrempositionen zu bevorzugen, ebenfalls nicht für die unvollständige Kompensation und den Shift-Back-Effekt verantwortlich sein kann. Zusammen mit den Experimenten von Lang

und Buchner (2008, 2009) bilden die vorliegenden Experimente Evidenz für die Annahme, dass eine Aufmerksamkeitsverschiebung auf den einzustellenden Hinweisreiz Ursache für inkonsistente Trading-Ratios und den Shift-Back-Effekt ist. Durch die Aufmerksamkeitsverschiebung erhält der einzustellende Hinweisreiz ein stärkeres perzeptuelles Gewicht als der vorgegebene Hinweisreiz. Dadurch scheinen bereits relativ kleine Werte des einzustellenden Hinweisreizes auszureichen, um den vorgegebenen Hinweisreiz auszugleichen. Dies gilt jedoch nur in Situationen mit einem perzeptuellen Ungleichgewicht, wie es in der Trading-Phase vorliegt. In der Lokalisationsphase stellt sich wieder ein perzeptuelles Gleichgewicht zwischen den interauralen Hinweisreizen ein, sodass der Richtungseindruck in Richtung des vorgegebenen Hinweisreizes von der mittigen Position abweicht.

Im Gegensatz zum Regressionsmodell von Trahiotis und Kappauf (1978) setzt das Aufmerksamkeitsmodell (Lang & Buchner, 2008, 2009) keinen Referenzton voraus, um die unzureichende Einstellung eines einzustellenden Hinweisreizes im Trading-Paradigma mit und ohne Referenzton zu erklären. Das Modell kann dadurch zwar die unvollständige Kompensation und den Shift-Back-Effekt ohne Referenzton erklären, es kann allerdings die Unterschiede zwischen Durchgängen mit und ohne Referenzton nicht vorhersagen, solange der vorgegebene und der einzustellende Hinweisreiz in beiden Durchgangsarten derselbe ist. Die Ergebnisse aus den Experimenten 3a und 3b zeigen jedoch, dass signifikant kleinere interaurale Intensitätsdifferenzen für dieselbe interaurale Zeitdifferenz gewählt werden, wenn ein expliziter Referenzton im Wechsel zum Testton gespielt wird. Experiment 4 demonstriert ein vergleichbares Ergebnismuster für eine vorgegebene interaurale Intensitätsdifferenz und eine einzustellende interaurale Zeitdifferenz. In allen drei Experimenten findet sich ein größerer Shift-Back-Effekt in Lokalisationsdurchgängen, die auf Trading mit Referenzton beruhten, im Vergleich zu Lokalisationsdurchgängen, die auf Trading ohne Referenzton beruhten. Diese Ergebnisse stimmen mit der Vorhersage des Regressionsmodells überein. Demnach findet – durch welchen Prozess auch immer verursacht – eine Regression zum interauralen Hinweisreiz des Referenztons statt, sobald ein Referenzton im Wechsel zum Testton präsentiert wird. Der Vergleich zwischen Test- und Referenzton führt zum Vergleich ihrer Parameter. Im Falle eines diotischen Referenztons orientieren sich die Versuchspersonen folglich bei der Einstellung eines interauralen Parameters des Testtons an einem Referenzwert von null und unterschätzen somit den wahren, zur vollständigen Kompensation notwendigen

Wert. Ein längerfristiger, implizier Referenzton aus der Übungsphase sowie ein expliziter Referenzton aus einem vorangegangenen Durchgang (siehe Vergleich Experiment 3a und 3b) wirken sich hingegen nicht auf die Einstellung eines interauralen Hinweisreizes aus. Dies spricht dafür, dass die Wirkung des Referenztons unmittelbar auftritt und nicht von längerfristiger Dauer ist. Eine naheliegende Schlussfolgerung ist, dass sich das Regressions- und das Aufmerksamkeitsmodell nicht gegenseitig ausschließen, sondern sich ergänzen. Es ist zum Beispiel denkbar, dass in beiden Durchgangsarten die Aufmerksamkeit auf dem einzustellenden Hinweisreiz liegt, aber zusätzlich zum perzeptuellen Ungleichgewicht noch eine Regression auftritt, sobald ein Referenzton vorhanden ist. Folglich kommt es in Durchgängen mit und ohne Referenzton zu einer unzureichenden Kompensation und einem Shift-Back-Effekt, aber beides fällt stärker aus, wenn ein Referenzton vorhanden ist. Hier wäre allerdings noch zu spezifizieren, welcher Prozess die Regression verursacht, denn, wie schon Trahiotis und Kappauf (1978) erwähnten, ist das Regressionsmodell in seiner aktuellen Fassung nur ein deskriptives Modell.

Auf Basis aktueller Ergebnisse ist auch keine genaue Aussage über die Verbindung zwischen dem Regressions- und Aufmerksamkeitsmodell möglich. Denkbar ist zum Beispiel, dass der Regressionseffekt die Aufmerksamkeitsverschiebung ersetzt, sobald ein Referenzton vorhanden ist. Der Unterschied zwischen den Durchgangsarten hinge dann damit zusammen, dass ein perzeptuelles Ungleichgewicht einen geringeren Effekt auf die Einstellung des interauralen Hinweisreizes hat als der unmittelbare Vergleich mit einem Hinweisreiz des Referenztons. Es ist ebenfalls möglich, dass beide Modelle auf demselben Mechanismus beruhen, der je nach Hörsituation den perzeptuellen Verrechnungsmechanismus zwischen den Hinweisreizen verändert. Der Unterschied zwischen den Durchgangsarten könnte dann darauf beruhen, dass Versuchspersonen in Durchgängen mit Referenzton eine diffusere Vorstellung von der mittigen Position haben und folglich mit größerer Varianz die Einstellung durchführen. Ein Vergleich der Standardabweichungen zwischen Trading-Durchgängen mit ($SD = 6.88$) und ohne Referenzton ($SD = 4.20$) von Experiment 3a stützt diese Annahme. Um die genaue Verbindung zwischen dem Aufmerksamkeits- und Regressionsmodell zu untersuchen, sind allerdings weitere Experimente notwendig.

Ferner scheint es notwendig, das Aufmerksamkeitsmodell einer direkteren empirischen Prüfung zu unterziehen. Bisherige Untersuchungen haben die Aufmerksam-

keit nie direkt – zum Beispiel durch Hinzunahme von Distraktoren – manipuliert. Gelänge dies, läge starke Evidenz für das Aufmerksamkeitsmodell vor. Eine Annäherung an die Frage, wie sich die Beteiligung von Aufmerksamkeit prüfen lässt, wäre die Untersuchung, inwiefern die gezielte Kontrolle des einzustellenden Hinweisreizes die Aufmerksamkeit auf diesen Hinweisreiz lenkt. In den bisher vorliegenden Experimenten regulierten die Versuchspersonen zwar einen der beiden interauralen Hinweisreize, ohne zu wissen, welchen Parameter sie kontrollierten. Sie konzentrierten sich dabei jedoch auf die Bewegung eines Reglers. Eine Veränderung am Regler bewirkte auch eine Veränderung im Richtungseindruck des Testtons. Somit könnte die Konzentration auf den Regler indirekt auch zur Konzentration auf den mit dem Regler verbundenen interauralen Hinweisreiz geführt haben. Ist die gezielte Betätigung eines Reglers die Ursache für eine Aufmerksamkeitsverschiebung und ein unterschiedliches perzeptuelles Gewicht zwischen den Hinweisreizen, müsste die Eliminierung des Reglers eine vollständige Kompensation zwischen den Hinweisreizen bewirken, sodass kein Shift-Back-Effekt auftritt. Ein interauraler Hinweisreiz wäre dabei nach wie vor pro Durchgang fest vorgegeben, während der andere kontinuierlich vom Versuchssteuerungsprogramm verändert würde. Die Aufgabe der Versuchspersonen wäre, eine Taste zu drücken, sobald der Testton mittig erscheint. Weil die Versuchspersonen nicht mehr regulieren müssten, besäße diese Trading-Aufgabe mehr Ähnlichkeit mit der Lokalisationsphase. Würden sich dennoch dieselben Ergebnisse zeigen wie in den bisherigen Experimenten, könnte ausgeschlossen werden, dass die *aktive* Einstellung eines interauralen Hinweisreizes über einen Schieberegler einen Einfluss auf die Trading-Ratios und den Shift-Back-Effekt hat. Erste Ergebnisse einer Pilotuntersuchung, in der der Regler auf die oben beschriebene Weise durch die automatische Variation des kritischen interauralen Parameters ersetzt wurde, deuten darauf hin, dass die Eliminierung des Reglers keinen substanziellen Effekt auf die Ergebnisse hat und der Shift-Back-Effekt nach wie vor auftritt. Eine weitere zu klärende Frage wäre, ob modalitätsübergreifende Aufgaben – wie zum Beispiel die visuelle Darstellung des Reglers am Computermonitor und das gleichzeitige Hören eines Tons – eine Situation geteilter Aufmerksamkeit schafft und somit das perzeptuelle Gleichgewicht verändert. Würde eine rein akustische Aufgabe gegeben sein, könnte Evidenz für die Beteiligung des Aufmerksamkeitsmechanismus erbracht werden, wenn ein größerer Shift-Back-Effekt in dieser Situation mit gezielter akustischer Aufmerksamkeit aufträte. Dieses Ergebnis stünde in Übereinstimmung mit

dem Unterschied zwischen Durchgängen mit und ohne Referenzton, da die Hinzunahme eines zweiten Tons die Aufmerksamkeit verstärkt auf die akustische Modalität lenken könnte.

Die Ergebnisse der Experimente 3a bis 4 rücken das Regressionsmodell in den Untersuchungsfokus. Sie zeigen, dass ein unmittelbarer Referenzton die Einstellung interauraler Hinweisreize beeinflusst und einen größeren Shift-Back-Effekt verursacht. Zur Prüfung der Modellvorhersage, dass interaurale Hinweisreize von Testton und Referenzton miteinander verglichen werden, wäre es sinnvoll, anstatt diotischer nun dichotische Referenztöne zu verwenden (zur Unterscheidung zwischen diotischen und dichotischen Tönen siehe Fußnote 2). Die interauralen Hinweisreize des dichotischen Referenztons müssten jedoch, wie beim Testton, in entgegengesetzte Richtungen weisen und dennoch einen mittigen Höreindruck erzeugen. Dies könnte durch die Verwendung personalisierter Impulsantworten realisiert und durch eine anfängliche Lokalisationsübung sichergestellt werden. Wie in Experiment 3a bis 4 bestünde die Aufgabe darin, den Testton so anzupassen, dass er denselben Höreindruck wie der Referenzton erzeugt. Damit ließe sich untersuchen, ob die Einstellung interauraler Hinweisreize in Richtung des Parameterwertes des Referenztons abweicht (Evidenz für das Regressionsmodell nach Trahiotis & Kappauf, 1978), oder unabhängig vom Referenzton zu einer unzureichenden Einstellung gegen null führt, wenn eine mittige Zielposition vorgegeben ist. Würden die Ergebnisse bisheriger Experimente mit diotischen Referenztönen repliziert werden, spräche dies gegen eine Regression in Richtung eines Parameters des Referenztons. Fraglich ist außerdem, ob es internale Referenztöne gibt, die sich im Laufe des Lebens aufbauen und die im akustischen System als Vergleichsmaßstab für Richtungsurteile dienen. Ihre Wirkung käme der einer Aufmerksamkeitsverschiebung gleich. Daher ist es schwer, experimentelle Paradigmen zu entwerfen, die zwischen beiden Theorien differenzieren.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studien – nämlich unvollständiges Trading in Abhängigkeit der An- oder Abwesenheit eines Referenztons – weisen darauf hin, dass die Verwendung der Einstellungsmethode zu inkonsistenten Daten führen kann. Diese methodische Problematik ist dabei nicht nur auf das Forschungsfeld zur akustischen Wahrnehmung und Lokalisation beschränkt, sondern kann auch andere psychophysikalische Dimensionen betreffen. Trahiotis and Kappauf (1978) leiteten zum Beispiel das Regressionsmodell von einem Experiment ab, in dem die Einstel-

lungsmethode verwendet wurde, um entweder die Einstiegszeit oder die Intensität vibrotaktiler Reize an einen Standardstimulus anzupassen (Sheldon, 1973). Die Ergebnisse zeigten, dass die Einstellung einer Dimension beim Testreiz systematisch in Richtung derselben Dimension des Standards verzerrt war (Kappauf, 1975). Ein Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher psychophysikalischer Experimente zeigte, dass eine systematische Antwortverschiebung der Urteile jeden psychophysikalischen Bereich betreffen kann, in dem die Variablen nicht perfekt miteinander korreliert sind (Stevens & Greenbaum, 1966). Es wurden dabei Experimente verglichen, die unter anderem zwei akustische Variablen (z.B. unterschiedliche Intensitäten; monaurale versus binaurale Reize) oder Dimensionen in verschiedenen Modalitäten (z.B. Vibration und Geräuschlautstärke; Luminanz und Lautheit) aneinander anpassen ließen. Auf der positiven Seite ist zu vermerken, dass, obwohl die Verwendung der Einstellungsmethode wegen der hier genannten Befunde nicht ideal scheint, sie dennoch zur Aufdeckung des Shift-Back-Effekts und der Entwicklung des Aufmerksamkeitsmodells und damit zum wissenschaftlichen Fortschritt führte.

Zusammenfassend zeigt sich, dass unterschiedliche Trading-Ratios auf einer unzureichenden Kompensation des vorgegebenen Hinweisreizes beruhen. Die unzureichende Kompensation äußert sich durch den Shift-Back-Effekt, der aufzeigt, dass der vorgegebene Hinweisreiz in einer neutralen Lokalisationssituation die Richtungswahrnehmung determiniert. In Experimenten ohne Referenzton wird der Shift-Back-Effekt ausschließlich auf ein stärkeres perzeptuelles Gewicht des eingestellten Hinweisreizes zurückgeführt. Eine Möglichkeit, wie sich das perzeptuelle Gewicht zwischen den Hinweisreizen verändern könnte, ist eine aufgabenbedingte Aufmerksamkeitsverschiebung auf den einzustellenden Hinweisreiz. Künftige Experimente sollten das Aufmerksamkeitsmodell durch eine direkte Aufmerksamkeitsmanipulation prüfen. Darüber hinaus zeigte sich in den vorliegenden Experimenten, dass die Hinzunahme eines expliziten, im Wechsel zum Testton präsentierten Referenztons den Effekt der unzureichenden Kompensation und den Shift-Back-Effekt verstärkt. Derzeit ist unklar, welche Mechanismen diese Verstärkung bewirken. Dies zu klären, bleibt künftigen Experimenten vorbehalten.

Literatur

- Arrabito, G. R. (2006). Three-dimensional auditory display for enhancing detection of passive sonar signals. *Human Factors*, 48(3), 465-473. doi: 10.1518/001872006778606769
- Begault, D. R., & Wenzel, E. M. (1993). Headphone localization of speech *Human Factors*, 35(2), 361-376. doi: 10.1177/001872089303500210
- Blauert, J. (Ed.). (1974). *Räumliches Hören*: S. Hirzel Verlag Stuttgart.
- Bronkhorst, A. W. (2000). The cocktail party phenomenon: A review of research on speech intelligibility in multiple-talker conditions. *Acustica*, 86(1), 117-128.
- Bronkhorst, A. W., Veltman, J. A. H., & vanBreda, L. (1996). Application of a three-dimensional auditory display in a flight task. *Human Factors*, 38(1), 23-33. doi: 10.1518/001872096778940859
- Culling, J. F., & Akeroyd, M. A. (2010). Spatial Hearing. In D. R. Moore (Ed.), *Oxford Handbook of Auditory Science: Hearing* (Vol. 3, pp. 123-144). New York: Oxford University Press Inc
- Culling, J. F., Jelfs, S., Talbert, A., Grange, J. A., & Backhouse, S. S. (2012). The Benefit of Bilateral Versus Unilateral Cochlear Implantation to Speech Intelligibility in Noise. *Ear and hearing*, 33(6), 673-682. doi: 10.1097/AUD.0b013e3182587356
- Deatherage, B. H., & Hirsh, I. J. (1959). Auditory localization of clicks. *Journal of the Acoustical Society of America*, 31(4), 486-492. doi: 10.1121/1.1907740 [doi]
- Doll, T. J., Hanna, T. E., & Russotti, J. S. (1992). Masking in 3-dimensional auditory displays. *Human Factors*, 34(3), 255-265. doi: 10.1177/001872089203400301

- Elpern, B. S., & Naunton, R. F. (1964). Lateralizing effects of interaural phase differences. *Journal of the Acoustical Society of America*, 36(7), 1392-1393. doi: 10.1121/1.1919215
- Gardner, B., & Martin, K. (1994). HRTF measurements of a KEMAR dummy-head microphone. *MIT Media Lab Machine Listening Group*, retrieved August 15, 2010 from <http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html>
- Garner, W. R. (1953). An informational analysis of absolute judgments of loudness *J Exp Psychol*, 46(5), 373-380. doi: 10.1037/h0063212
- Hafter, E. R., & Carrier, S. C. (1972). Binaural interaction in low-frequency stimuli - inability to trade time and intensity completely. *Journal of the Acoustical Society of America*, 51(6), 1852-1862. doi: 10.1121/1.1913044
- Hafter, E. R., & Jeffress, L. A. (1968). Two-image lateralization of tones and clicks. *Journal of the Acoustical Society of America*, 44, 563-569. doi: 10.1121/1.1911121
- Harris, G. G. (1960). Binaural Interactions of Impulsive Stimuli and Pure Tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 32(6), 685-692. doi: 10.1121/1.1908181
- Hollingworth, H. L. (1910). The Central Tendency of Judgment. *The Journal of Philosophy, Psychology and Scientific Methods*, 7(17), 461-469. doi: 10.2307/2012819
- Kappauf, W. E. (1975). Regression effect in judgments to determine equal response contours. *Percept. Psychophys.*, 17(4), 405-410. doi: 10.3758/BF03199354
- 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(2), 287-295. doi: 10.1518/001872097778543895

- Kistler, D. J., & Wightman, F. L. (1992). A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(3), 1637-1647. doi: 10.1121/1.402444
- Lang, A. G., & Buchner, A. (2008). Relative influence of interaural time and intensity differences on lateralization is modulated by attention to one or the other cue. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124(5), 3120-3131. doi: 10.1121/1.2981041
- Lang, A. G., & Buchner, A. (2009). Relative influence of interaural time and intensity differences on lateralization is modulated by attention to one or the other cue: 500-Hz sine tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(5), 2536-2542. doi: 10.1121/1.3212927
- MacDonald, J. A., Balakrishnan, J. D., Orosz, M. D., & Karplus, W. J. (2002). Intelligibility of speech in a virtual 3-D environment. *Human Factors*, 44(2), 272-286. doi: 10.1518/0018720024497934
- McAnally, K. I., & Martin, R. L. (2007). Spatial audio displays improve the detection of target messages in a continuous monitoring task. *Human Factors*, 49(4), 688-695. doi: 10.1518/001872007x215764
- 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(3), 755-761. doi: 10.2466/pms.1973.37.3.755
- Middlebrooks, J. C., & Green, D. M. (1991). Sound Localization by Human Listeners. *Annual Review of Psychology*, 42, 135-159.
- Mills, A. W. (1958). On the Minimum Audible Angle. *Journal of the Acoustical Society of America*, 30(4), 237-246. doi: 10.1121/1.1909553

- Moore, B. C. J. (Ed.). (2012). *An Introduction to the Psychology of Hearing* (6th ed.): Emerald Group Publishing Limited, Howard House, Uk.
- Naunton, R. F., & Elpern, B. S. (1964). Interaural phase and intensity relationships: The Weber test *The Laryngoscope*, 74, 55-63. doi: 10.1002/lary.5540740104
- Rakerd, B., & Hartmann, W. M. (1985). Localization of sound in rooms, II: The effects of a single reflecting surface. *Journal of the Acoustical Society of America*, 78(2), 524-533. doi: 10.1121/1.392474
- Schlegel, P. A. (1994). Azimuth Estimates by Human Subjects under Free-Field and Headphone Conditions. *Audiology*, 33(2), 93-116.
- Sheldon, P. E. (1973). Equal Onset Contours of Vibrotactile Stimuli. *Percept. Psychophys.*, 13(3), 403-407. doi: 10.3758/Bf03205793
- Stecker, G. C. (2010). Trading of interaural differences in high-rate gabor click trains. *Hearing research*, 268(1-2), 202-212. doi: 10.1016/j.heares.2010.06.002
- Stevens, S. S., & Greenbaum, H. B. (1966). Regression effect in psychophysical judgment. *Percept. Psychophys.*, 1(12), 439-446. doi: 10.3758/bf03215821
- Stevens, S. S., & Newman, E. B. (1936). The localization of actual sources of sound. *The American journal of psychology*, 48(2), 297-306.
- Strutt, J. W. (1907). On our perception of sound direction. *Philosophical Magazine*, 13, 214-232.
- Trahiotis, C., & Kappauf, W. E. (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(4), 1041-1047. doi: 10.1121/1.382087

- Van den Bogaert, T., Doclo, S., Wouters, J., & Moonen, M. (2009). Speech enhancement with multichannel Wiener filter techniques in multimicrophone binaural hearing aids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(1), 360-371. doi: 10.1121/1.3023069
- Van den Bogaert, T., Klasen, T., Moonen, M., Van Deun, L., & Wouters, J. (2006). Horizontal localization with bilateral hearing aids: Without is better than with. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(1), 515-526. doi: 10.1121/1.2139653
- van Hoesel, R., Ramsden, R., & O'Driscoll, M. (2002). Sound-direction identification, interaural time delay discrimination, and speech intelligibility advantages in noise for a bilateral cochlear implant user. *Ear and hearing*, 23(2), 137-149.
- Ward, L. M., & Lockhead, G. R. (1970). Sequential effects and memory in category judgments. *J Exp Psychol*, 84(1), 27-34. doi: 10.1037/h0028949
- Whitworth, R., & Jeffress, L. A. (1961). Time vs intensity in localization of tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 33(7), 925-929. doi: 10.1121/1.1908849
- Wightman, F. L., & Kistler, D. J. (1989a). Headphone simulation of free-field listening. I: Stimulus synthesis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 85(2), 858-867. doi: 10.1121/1.397557
- Wightman, F. L., & Kistler, D. J. (1989b). Headphone simulation of free-field listening. II: Psychophysical validation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 85(2), 868-878. doi: 10.1121/1.397558
- Wightman, F. L., & Kistler, D. J. (1992). The dominant role of low-frequency interaural time differences in sound localization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(3), 1648-1661. doi: 10.1121/1.402445

Young, L. L., & Carhart, R. (1974). Time-Intensity Trading Functions for Pure-Tones and a High-Frequency Am Signal. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56(2), 605-609. doi: 10.1121/1.1903298

Young, L. L., & Levine, J. (1977). Time-intensity trades revisited. *Journal of the Acoustical Society of America*, 61(2), 607-609. doi: 10.1121/1.381307

Manuskripte

Experimente 1a bis 2b

Ignaz, A., Lang A.-G., & Buchner, A. (2013). The impact of practice on the adjustment of interaural cues in a lateralization task. *Journal of the Acoustical Society of America*, 134, 901-904.

Experimente 3a, 3b und 4

Ignaz, A., Lang A.-G., & Buchner, A. (in press). The impact of reference tones on the adjustment of interaural cues. *Journal of the Acoustical Society of America*.

LETTERS TO THE EDITOR

This Letters section is for publishing (a) brief acoustical research or applied acoustical reports, (b) comments on articles or letters previously published in this Journal, and (c) a reply by the article author to criticism by the Letter author in (b). Extensive reports should be submitted as articles, not in a letter series. Letters are peer-reviewed on the same basis as articles, but usually require less review time before acceptance. Letters cannot exceed four printed pages (approximately 3000–4000 words) including figures, tables, references, and a required abstract of about 100 words.

The impact of practice on the adjustment of interaural cues in a lateralization task (L)

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

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

(Received 11 April 2013; revised 17 June 2013; accepted 20 June 2013)

Lang and Buchner [J. Acoust. Soc. Am. **124**, 3120–3131 (2008)] conducted trading experiments showing that the phenomenon of different trading ratios depending on which cue is adjusted by the listener is independent of the presentation of an *explicit* reference tone. Four experiments were conducted to test whether *implicit* reference tones during the preceding practice phase may have caused the different trading ratios. The results of Lang and Buchner were replicated, showing that an implicit reference learned during the practice phase cannot account for different trading ratios in experiments without the presentation of a reference tone.

© 2013 Acoustical Society of America. [http://dx.doi.org/10.1121/1.4812861]

PACS number(s): 43.66.Qp, 43.66.Ba, 43.66.Pn, 43.66.Lj [JFC]

Pages: 901–904

I. INTRODUCTION

Azimuthal sound localization is largely determined by the interaural time difference (ITD) and the interaural intensity difference (IID). In order to determine the ITD that has the same effect on azimuth perception as a specific IID, and vice versa, the so-called *trading paradigm* is frequently used. In this paradigm, ITD and IID are set in opposition to each other so that the lateral effect of one cue compensates the lateral effect of the other. The relation between ITD and IID that leads to a central sound source perception is referred to as *trading ratio*, measured in $\mu\text{s}/\text{dB}$.

In a typical trading study, Young and Levine (1977) presented a test tone with opposing ITD and IID alternating with a diotic reference tone. One interaural cue of the test tone was preset while the other cue was adjusted by the listener such that the test tone appeared to have the same lateral position as the reference tone. The trading ratios differed depending on which cue was preset and which cue was to be adjusted. Trahiotis and Kappauf (1978) assumed that a judgment bias in terms of a regression toward one parameter of the reference tone caused the differences in trading ratios. For example, when the listener has to adjust the IID of a test tone, the adjustment is biased toward the IID of the reference tone that is, toward 0 dB. Thus, the interaural parameters of a diotically presented reference tone serve as an anchor for participants' adjustments that leads to a *regression* toward zero, which is equivalent to an underestimation of the value of the to-be-adjusted cue and thus leads to an incomplete trading.

This regression explanation was questioned by Lang and Buchner (2008, 2009). In a *compensation phase* in their experiments, one binaural cue of the test tone was preset while participants adjusted the other cue so that the test tone appeared centered. In a subsequent *localization phase*, each sound was presented as previously adjusted (e.g., when a preset ITD of $-400\ \mu\text{s}$ was compensated with an IID of $+4.5\ \text{dB}$ during the compensation phase the corresponding trial of the localization phase consisted of a tone presented with an ITD of $-400\ \mu\text{s}$ and an IID of $+4.5\ \text{dB}$). Interestingly, during localization the test tone was not perceived at a central position but localization *shifted back* toward the side indicated by the preset interaural cue. Obviously, participants' insufficient adjustments during the compensation phase led to incomplete trading, resulting in the shift-back effect during the localization phase. Importantly, the underestimation of the to-be-adjusted cue could be replicated *without* a reference tone. This contradicts the assumption that a regression toward a parameter of a reference tone is the explanation for the phenomenon of different trading ratios. Instead, Lang and Buchner assumed that, during the compensation phase, the to-be-adjusted cue receives more attention in the sense that the to-be-adjusted cue is processed more intensely and thus receives an increased perceptual weight relative to the preset cue which, in turn, causes an underestimation of the value of the to-be-adjusted cue chosen to compensate the preset cue. Consequently, relatively small adjustments seem to suffice for a central perceived test tone during the compensation phase. During the localization phase attention is no longer focused on the previously adjusted cue and thus no longer inflates its weight. Thus, the previously chosen adjustment of that cue turns out to be too small for a complete compensation so that the shift-back effect occurs.

^{a)}Author to whom correspondence should be addressed. Electronic mail: alina.ignaz@hhu.de

While the results of Lang and Buchner (2008, 2009) cannot be due to the effects of a *temporally adjacent explicit* reference tone, a *temporally more distant implicit reference tone* could have been learned during the practice phase during which head-related impulse responses (HRIRs) were used to present ITD-IID combinations corresponding to certain sound source positions and participants learned to localize these sounds. One of the virtual lateral angles was 0° —a possible implicit reference tone for the central position. The corresponding interaural parameters ($0\ \mu\text{s}$, 0 dB) could have been learned and thus have led to a similar judgment bias on the adjustments of the following compensation phase as an explicit diotic reference tone used in a classical trading task.

To test this assumption, four experiments were conducted. The critical ($0\ \mu\text{s}$, 0 dB) practice trials were omitted in experiments 1a and 2a. Experiments 1b and 2b had no practice phase at all. If regression to an implicit reference tone caused the shift-back effect and different trading ratios obtained by Lang and Buchner (2008, 2009), then the regression model predicts neither a shift-back effect nor different trading ratios depending on which cue is adjusted by the listener for the present experiments.

II. EXPERIMENTS 1A AND 1B

A. Method

1. Participants

In experiment 1a, 17 female and 6 male persons participated (age range 20 to 35, $M=26$). In Experiment 1b, 20 female and 3 male persons participated (age range 19 to 26, $M=21$). Participants passed an audiometric screening. The criterion was less than or equal to 20 dB_{SPL} (where SPL = sound pressure level) hearing loss at frequencies between 500 and 8000 Hz on both ears.

2. Apparatus and stimuli

Stimuli were 500-Hz sine tones (32 bits resolution, 96 kHz sample frequency, squared cosine ramps of 50 ms rise and decay time). ITDs and IIDs were controlled by Microsoft's *Direct Sound* interface offering a temporal resolution for ITD-manipulation of $10.4\ \mu\text{s}$ (equal to one sample) at a sampling frequency of 96 kHz. The resolution for IID-manipulation is 0.01 dB. The sounds were played via headphones (SRS-4040 II, STAX Ltd., Iruma-Gun, Japan) at about 60 dB_{SPL} (A). To keep the overall sound level constant when the IID varied a formula for corrected levels by Gaik (1993) was applied.

In experiment 1a, a set of practice trials included ITD-IID combinations that were as natural as possible such that participants practiced sound localization via headphones without learning new unnatural parameter combinations. For this reason 500-Hz sine tones were convolved with HRIRs for lateral angles between -90° and $+90^\circ$ in steps of 15° , except for 0° , and an elevation of 0° recorded with the KEMAR Dummy-Head (Gardner and Martin, 1994). In experiment 1b, the practice phase was omitted.

For all non-practice trials no HRIRs were used. ITDs and IIDs were manipulated solely via *Direct Sound*. There were two types of non-practice trials: *Critical trials* were presented

with a preset ITD (-600 , -400 , -200 , 0 , 200 , 400 , or $600\ \mu\text{s}$) while the IID was adjusted by participants in a range between -7.5 and $+7.5$ dB. *Control trials* had an ITD within the same range as the critical trials while their IID was 0 dB. For each of the seven preset ITDs five critical trials and five control trials were created, resulting in 35 critical trials and 35 control trials.

A computer monitor was lying horizontally on a desk in front of the participants so that localization judgments given on the monitor matched the horizontal plane. For the audiometric screening 1000 ms sine waves (with 50 ms rise and decay time) at one of four frequencies (500, 1000, 4000, 8000 Hz) were presented separately on the left and right headphone channel.

3. Procedure

All experiments were conducted in an anechoic chamber protecting participants from external noise. All sounds were presented via headphones. The instructions were presented on the computer monitor. The audiometric screening was conducted first. Then, experiment 1a started with a practice phase at the beginning of which a visual-acoustical demonstration was presented. During this demonstration 500-Hz sine tones convolved with several HRIRs were played. Simultaneously with the sound, a circle was presented on the computer monitor. A red dot on the circle represented the lateral angle associated with the actual HRIR. Following this demonstration the participant's task was to indicate the direction from which a sound was perceived. A trial started with the presentation of a 500-Hz sine tone convolved with one of the HRIRs and played for 1000 ms in a loop with 1250 ms of silence between two repetitions. Participants used the computer mouse to move the red dot to the position on the circle corresponding to the position at which the sound was perceived. Once the participant clicked on a "continue" button a green dot indicating the correct location (according to the angle of the HRIR) was shown for 2000 ms. After a delay of 500 ms (± 100 ms random variation), binaurally uncorrelated white noise was presented for 3000 ms in order to eliminate possible aftereffects from the previous trial. Then the next trial began. Between three and six blocks of ten practice trials were performed. A trial was defined as erroneous when the participant chose an angle which deviated from the angle of the HRIR measurement by 30° or more in either direction. The practice phase ended already after the third, fourth, or fifth block if fewer than four errors occurred in that block. In experiment 1b the practice phase was omitted. Everything else was identical to experiment 1a.

A *trading phase* trial consisted of an infinite loop of a 1000 ms sine tone followed by 1250 ms of silence. The tones were presented with one of the seven preset ITDs chosen randomly for each trial. On the left side of the computer monitor a vertical slider permitted adjustments of the IID within a range of ± 7.5 dB. The participant moved the slider up or down until the tone was localized at the central position. The slider's initial position was randomized. The slider movement to IID mapping (up = positive IID, down = negative IID, or vice versa) was counterbalanced across participants. Participants were not informed about the physical

properties of the sound and that the slider controlled the IID. Four hundred to 600 ms after the continue button had been clicked binaurally uncorrelated white noise was presented for 3000 ms. Then the next trial started. Participants were allowed to pause after each block of ten trials.

Unknown to the participant, the *localization phase* consisted of two trial types presented in random order. The critical trials were taken from the trading phase, that is, the test tone was presented with one of the seven preset ITDs and with the IID the participant had chosen in order to compensate for the effect of the preset ITD in the corresponding trial of the trading phase. In a control trial the test tone was presented with one of the seven preset ITDs and with an IID of 0 dB. A trial of the localization phase started with a tone loop as described above. As in the practice phase, the participant saw a sketch of a circle and indicated the perceived location of the tone by moving the red dot, but no feedback about the correctness of the answer was given.

4. Design

The within-subject independent variable was the preset ITD manipulated in seven steps. Dependent variables were the adjusted IIDs during the trading and the perceived location during the localization phase. An *a priori* power analysis (Faul *et al.*, 2007) revealed that to detect effects comparable to those in experiment 1 by Lang and Buchner (2009, Pillai V = 0.798 for the adjusted IID during trading, Pillai V = 0.644 for the perceived location during localization), given $\alpha = \beta = 0.05$, $N = 19$ participants were needed. With $N = 23$, the power to detect the effects was larger than we had planned.

B. Results

The aggregation of the protocol files to one file was conducted using the data aggregation software ART (Lang, 2012). Figure 1 illustrates the results relative to those of Lang and Buchner (2009). A multivariate analysis of variance revealed a significant effect of the preset ITDs on the IIDs selected to compensate for the ITDs' lateral effect during the trading phase for experiment 1a, $F(6, 17) = 9.74$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.76$, and 1b, $F(6, 17) = 18.88$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.87$. For the localization phase of experiment 1a, the effect of the ITD on sound source location was significant for the control trials, $F(6, 17) = 118.27$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.98$, which was to be expected, but also for the critical trials, $F(6, 17) = 16.61$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.85$, which replicates the shift-back effect. For experiment 1b, the ITD effect on perceived

location was also significant for the control trials, $F(6, 17) = 179.02$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.98$, and for the critical trials, $F(6, 17) = 5.63$, $p = 0.002$, $\eta^2 = 0.67$.

The significant effect of the preset ITD on the perceived sound source location for the critical trials is compatible with the assumption that the trading was only complete during the trading phase during which the to-be-adjusted IIDs were selectively attended, but was insufficient during the localization phase. In the localization phase complete trading should lead to perceived locations corresponding to the abscissa (0°) for all preset ITDs. No effect of the to-be-adjusted cue should result in the same perceived locations as the control trials. Instead, the interaction between the preset ITD and the trial type was significant for experiment 1a, $F(6, 17) = 10.22$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.78$, and 1b, $F(6, 17) = 14.02$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.83$, indicating that trading had taken place but was incomplete.

III. EXPERIMENTS 2A AND 2B

A. Method

1. Participants, apparatus, stimuli, procedure, and design

In experiment 2a, 20 female and 6 male persons participated (age range 19 to 32, $M = 22$). In Experiment 2b, 27 female and 5 male persons participated (age range 19 to 40, $M = 24$). None of the participants had taken part in experiments 1a or 1b.

Audiometric screening, apparatus, stimuli, and procedure were identical to those of experiments 1a and 1b, except that during the trading phase participants adjusted the ITD within a range from $-1200 \mu\text{s}$ to $+1200 \mu\text{s}$ to compensate for the lateral effect of a preset IID (-7.5 , -5.0 , -2.5 , 0 , 2.5 , 5.0 , or 7.5 dB). Control trials had one of seven IIDs while the ITD was $0 \mu\text{s}$. Experiment 2a had a practice phase excluding trials with HRIRs representing the 0° position. Experiment 2b had no practice phase at all.

To detect IID effects comparable to those of experiment 2 by Lang and Buchner (2009, Pillai V = 0.774 for the adjusted ITD, Pillai V = 0.514 for the perceived location), given $\alpha = \beta = 0.05$, $N = 27$ participants were needed. With $N = 26$ and $N = 32$ in experiments 2a and 2b, the power was slightly smaller and larger, respectively, than planned.

B. Results

Figure 2 illustrates the results relative to those of experiment 2 by Lang and Buchner (2009). The effect of the preset IIDs on the ITDs selected to compensate for the IIDs was

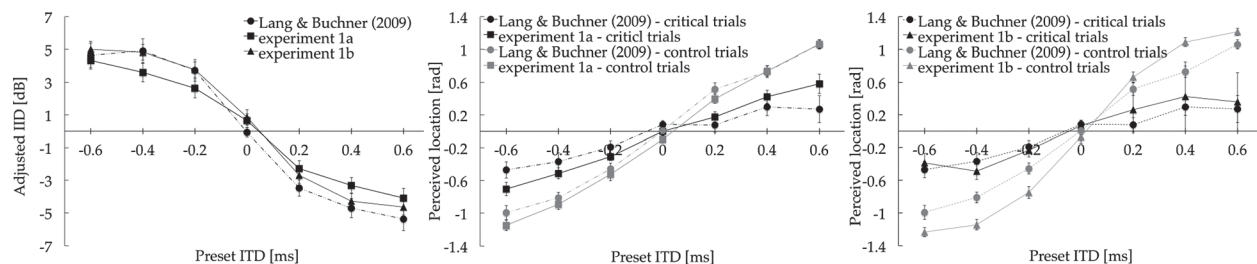


FIG. 1. The average adjusted IIDs during the trading phase of experiment 1a and 1b (left) and the average perceived locations for the control and critical trials of the localization phase of experiment 1a (middle) and 1b (left). Error bars denote the standard errors of the means.

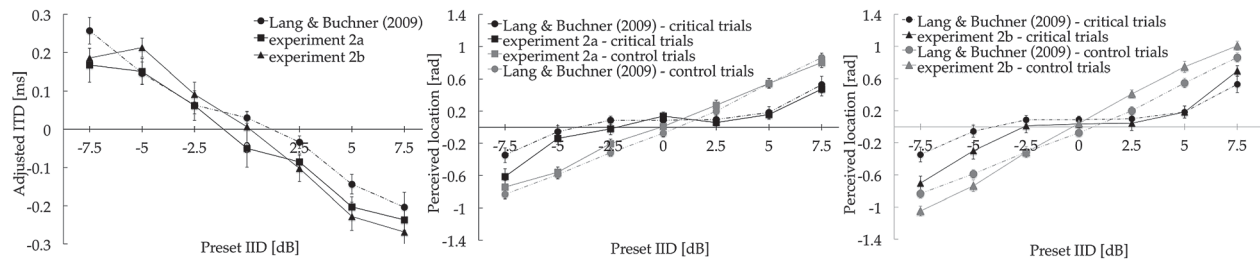


FIG. 2. The average adjusted ITDs during the trading phase of experiment 2a and 2b (right) and the average perceived locations for the control and critical trials of the localization phase of experiment 2a (middle) and 2b (left). Error bars denote the standard errors of the means.

significant for experiment 2a, $F(6, 20) = 19.96$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.86$, and 2b, $F(6, 26) = 39.28$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.90$. For the localization phase of experiment 2a, the effect of the IID on sound source location was significant for the control trials, $F(6, 20) = 20.64$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.86$, and for the critical trials, $F(6, 20) = 9.98$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.75$. For experiment 2b the IID effect on perceived location was significant for the control trials, $F(6, 26) = 78.57$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.95$, and for the critical trials, $F(6, 26) = 42.89$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.91$. The interaction between preset IID and trial type was again significant for experiment 2a, $F(6, 20) = 8.27$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.71$, and 2b, $F(6, 26) = 8.76$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.67$.

IV. GENERAL DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The fact that the shift-back effect and trading ratios differing as a function of the to-be-adjusted cue were observed without implicit (experiments 1a to 2b) or explicit (Lang and Buchner, 2008, 2009) reference tone to which regression could have occurred, contradicts the regression explanation of these phenomena. It strengthens the hypothesis of Lang and Buchner that, during trading, attention shifts toward the to-be-adjusted interaural cue and inflates its weight. This causes complete trading as long as the to-be-adjusted cue is selectively attended, but is insufficient during localization when none of the cues receives special attention. Independent evidence that the relative weight of IIDs and ITDs may change as a function of task parameters comes from experiments showing that the relative weight of IIDs in sound localization increases when the participants' sensitivity to ITDs decreases (Rakerd and Hartmann, 1985; Stecker, 2010).

Both the regression and the attention-shift model predict that the necessary value of the to-be-adjusted cue is underestimated during trading and both models imply that the listener has separate access to both interaural parameters. The main difference between the models concerns the underlying processes. The regression model assumes a *comparison process* between the value of the to-be-adjusted cue of the test tone and the value of the corresponding cue of the reference tone. This comparison leads to an alignment of the value of the to-be-adjusted cue with the parallel value of the reference tone. The resulting regression effect appears as a measurement artifact that distorts the measurement of the *true* trading ratio. In contrast, the attention-shift model assumes an increased perceptual weight of the to-be-adjusted cue during adjustment affecting the *computation process* between both interaural cues. The perceptual weight of both cues

changes again in a pure listening situation such as the localization phase. The model implies that *no true* trading ratio exists; rather, there are different trading ratios in different listening situations.

An alternative attention-shift mechanism seems possible against the backdrop of a double-image theory (Whitworth and Jeffress, 1961; Hafter and Jeffress, 1968) according to which contradicting ITDs and IIDs lead to the perception of two sound images—one almost exclusively affected by ITD and the other mainly affected by IID. Thus, attention might not only affect the perceptual weight of one of two cues, but also the preferred perception of one of two sound images. The available evidence does not allow to distinguish between these two mechanisms yet. A more general problem for the attention-shift model is that implicit long-term reference tones built up by participants' listening experience might be effective during trading. New experimental paradigms will be needed to test whether this might be the case.

- 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. Methods* **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.
- Gardner, B., and Martin, K. (1994). "HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone," MIT Media Lab Machine Listening Group, retrieved August 15, 2010 from <http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html> (Last viewed April 11, 2013).
- Hafter, E. R., and Jeffress, L. A. (1968). "Two-image lateralization of tones and clicks," *J. Acoust. Soc. Am.* **44**, 563–569.
- Lang, A. G. (2012). "ART: A data aggregation program for the behavioral sciences," Heinrich-Heine-Universität-Institut für experimentelle Psychologie, retrieved June 12, 2012 from <http://www.psych.hhu.de/abteilungen/aap/art> (Last viewed April 11, 2013).
- 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**, 3120–3131.
- Lang, A. G., and Buchner, A. (2009). "Relative influence of interaural time and intensity differences on lateralization is modulated by attention to one or the other cue: 500-Hz sine tones," *J. Acoust. Soc. Am.* **126**, 2536–2542.
- Rakerd, B., and Hartmann, W. M. (1985). "Localization of sound in rooms II: The effects of a single reflecting surface," *J. Acoust. Soc. Am.* **78**, 524–533.
- Stecker, G. C. (2010). "Trading of interaural differences in high-rate Gabor click trains," *Hear. Res.* **268**, 202–212.
- Trahiotis, C., and Kappauf, W. E. (1978). "Regression interpretation of differences in time-intensity trading ratios obtained in studies of lateralization using the method of adjustment," *J. Acoust. Soc. Am.* **64**, 1041–1047.
- Whitworth, R., and Jeffress, L. A. (1961). "Time vs intensity in localization of tones," *J. Acoust. Soc. Am.* **33**, 925–929.
- Young, L. L., and Levine, J. (1977). "Time-intensity trades revisited," *J. Acoust. Soc. Am.* **61**, 607–609.

The impact of reference tones on the adjustment of interaural cues

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

Institut für Experimentelle Psychologie,

Heinrich-Heine-Universität, 40225 Düsseldorf, Germany

Running head: Impact of reference tones on trading

^{a)} Electronic mail: alina.ignaz@hhu.de

Abstract

In the time-intensity trading paradigm, trading ratios are inconsistent in that they differ as a function of which cue is to be adjusted by the listener. Two explanations have been offered: First, the regression model assumes a regression to the interaural parameters of a reference tone played in alternation with the test tone to cause the phenomenon of inconsistent trading ratios. The second explanation is based on an inflated perceptual weighting of the to-be-adjusted cue. The perceptual-weight explanation has been supported by experimental results showing that the phenomenon of inconsistent trading ratios appears even in the absence of a reference tone. Those findings render regression as the sole explanation for inconsistent trading ratios implausible. The experiments presented in this paper address the question whether regression to the parameters of a reference tone plays a role if a reference tone is presented. Three experiments were conducted in which trials with and without reference tone were compared directly. Both within- and between-subject comparisons showed that a reference tone affects trading ratios and location judgments if present. Although regression cannot be the sole explanation for the phenomenon of inconsistent trading ratios it seems to play a role if a reference tone is presented.

PACS numbers: 43.66.Lj, 43.66.Qp, 43.66.Rq, 43.66.Pn

I. INTRODUCTION

Sound source localization on the horizontal plane is based primarily on interaural time differences (ITDs) and interaural intensity differences (IIDs). Given that both cues yield partly redundant information about the position of a sound source the so-called *trading ratio* is of interest. The trading ratio (measured in $\mu\text{s}/\text{dB}$) is a measure that provides information about which IID has the same effect on the perceived lateral position of a sound source as a given ITD (e.g., see Deatherage and Hirsh, 1959; Moushegian and Jeffress, 1959; Whitworth and Jeffress, 1961; Hafter and Jeffress, 1968; Hafter and Carrier, 1972; Young and Levine, 1977; Trahiotis and Kappauf, 1978).

A typical trading study has been reported by Young and Levine (1977). A diotic reference tone and a dichotic test tone were played in alternation with each other. The reference tone had fixed values for both interaural cues ($0 \mu\text{s}/0 \text{dB}$). The test tone was presented with one cue being preset while the other cue could be adjusted by the listener. Participants' task was to set the adjustable cue in opposition to the preset cue so that the test tone was perceived at the same (central) position as the reference tone. It is assumed that participants choose values such that both cues have opposing lateral effects of the same size on the perceived sound source position and, thus, cancel each other out. A classical finding with trading experiments is that the resulting trading ratio differs depending on which cue was preset and which cue was adjustable. Trahiotis and Kappauf (1978) offered a model by which this phenomenon of inconsistent trading ratios is ascribed to a so-called *regression effect*. They supposed that the comparison between perceived locations of test and reference tones leads to the comparison of the tones' interaural parameters. For example,

when the ITD of the test tone has to be adjusted it is compared with the ITD of the reference tone such that the listener tends to choose an ITD-value that is biased toward the ITD of the reference tone. In the case of a diotic ($0\ \mu\text{s}/0\ \text{dB}$) reference tone participants would choose an ITD biased toward $0\ \mu\text{s}$ which is too small to compensate fully the lateral effect of the preset IID. Trahiotis and Kappauf suggested that this bias causes the inconsistent trading ratios.

The regression model was called into question by experiments showing that trading ratios differing as a function of the to-be-adjusted cue can be observed even without a reference tone (Lang and Buchner, 2008; 2009; Ignaz *et al.*, 2013). In a trading phase participants adjusted one cue of the test tone to compensate the lateral effect of the preset cue. In a subsequent localization phase participants' task was to localize the test tone presented with ITD-IID-combinations chosen during the trading phase (e.g., if a participant had chosen to compensate an ITD of $-250\ \mu\text{s}$ ¹ with an IID of 3.5 dB during the trading phase the corresponding trial of the localization phase was presented with an ITD of $-250\ \mu\text{s}$ and an IID of 3.5 dB). The regression model predicts that omitting the reference tone during the trading phase should lead to a complete trading (because there is no reference tone to which regression could occur). This, in turn, should lead to ITD-IID-combinations that, during the subsequent localization phase, cause that tone to be perceived centrally. Contrary to this expectation, a so-called *shift-back effect* occurred, that is, the location judgments shifted toward the side indicated by the preset cue. While these results are incompatible with the regression model, they can be explained by the so-called attention-shift model (Lang and Buchner, 2008; 2009) according to which the perceptual weight of the to-be-adjusted cue is inflated during trading because the to-be-adjusted cue is fully at-

tended. Let the IID be the to-be-adjusted cue. Then the inflated perceptual weight of the IID during trading causes an underestimation of the IID value needed to compensate for the lateral effect of the preset ITD in a neutral listening situation such as the localization phase. Selecting too low an IID value leads to the shift-back effect during the localization phase because in this neutral listening situation the perceptual weight of the IID is no longer inflated, and the selected IID is too small to (fully) compensate the preset ITD. This fits with findings reported by Stecker (2010) that one cue (IID in this case) may indeed be favored at the expense of the other (ITD).

At first sight, the regression model seems to be disconfirmed by the findings about trading without reference tones (Lang and Buchner, 2008; 2009; Ignaz *et al.*, 2013). However, it would be premature to reject it completely. This is so because the mechanisms implied by the regression and the attention models need not be mutually exclusive. At least in principle, both a bias towards a reference tone and an increase in the perceptual weight of the to-be-adjusted cue may operate independently of each other. We currently do not know whether this is the case. Strictly speaking, we only know that a bias towards an explicit reference tone is not necessary for observing shift-back effects and trading ratios that differ as a function of which cue is to be adjusted (Lang and Buchner, 2008; 2009; Ignaz *et al.*, 2013). Beyond that the evidence is not conclusive because previous research focused on trading either exclusively with (Young and Levine, 1977; Trahiotis and Kappauf, 1978) or exclusively without reference tones (Lang and Buchner, 2008; 2009; Ignaz *et al.*, 2013). These two conditions were never compared in one experiment. This is why the present Experiments 1 and 2 were designed to contrast trading trials with and without a reference tone directly. If the presence of a diotic reference tone caused a

bias in the judgment of the to-be-adjusted cue of the test tone towards that parameter of the reference tone, then the trading values chosen by participants should be even smaller in trading trials with reference tone than in trading trials without reference tone. As a consequence, there should be an even larger shift-back effect in localization trials based on trading trials with reference tone as compared to localization trials based on trading trials without reference tone, the latter of which should largely replicate earlier results obtained without explicit reference tones (Lang and Buchner, 2008; 2009; Ignaz *et al.*, 2013). In contrast, if no reference-induced bias occurs on top of the inflated perceptual weight of the to-be-adjusted cue, then no difference is expected between trials with and without reference tone.

Contrasting trading trials with and without reference tone in a within-subject design has the advantage of maximizing statistical power, but the cost is that the reference tone may affect adjustments not only when it is presented but also in subsequent trials without a reference tone. A known problem is that a stimulus preceding a judgment may serve as a standard for that judgment, thereby affecting it (Garner, 1953; Ward and Lockhead, 1970). Whether a reference tone was present was therefore manipulated within-subject in experiment 1a and between subjects in experiment 1b. If trials with reference tone affect adjustments during subsequent trials without reference tone then the differences between trials with and without reference tone should be larger in experiment 1b than in 1a.

II. EXPERIMENTS 1A AND 1B

A. Method

1. Participants

Participants of experiment 1a were 50 female and 22 male persons (age range from 18 to 32 years, $M = 23$, $SD = 3$). Participants of experiment 1b were 49 female and 21 male persons (age range from 19 to 39, $M = 24$, $SD = 4$) who were randomly assigned to either the group with reference tone or the group without reference tone such that there were equal group sizes of 35 participants. In both experiments participants had no prior experience with psychoacoustic studies. Most participants were students at Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. The criterion for participation was less than or equal to 20 dB_{SPL} (where SPL = sound pressure level) hearing loss at four frequencies (500 Hz, 1000 Hz, 4000 Hz, and 8000 Hz) on both ears tested in an audiometric screening before the experiment. Participants were paid or received course credit as benefit.

2. Apparatus and Stimuli

The audiometric screening was conducted using the same equipment as the main experiment. Sine waves with a duration of 1000 ms with 50 ms rise and decay time were presented separately on the left and right headphone channel.

A 500-Hz sine tone with 50 ms rise and decay time served as test tone and reference tone in the main experiment. Both tones were sampled at a resolution of 32 bits. The sample frequency was 44.1 kHz for the reference tone and—in order to allow ITD variations as precise as possible—96 kHz for the test tone (at 96 kHz the minimum step size for ITD variations is 10.4 μ s). All sounds were presented via

headphones (SRS-4040 II, STAX Ltd., Iruma-Gun, Japan). A formula for corrected levels (Gaik, 1993) was used to keep the overall level of about 60 dB_{SPL} (A) constant when IIDs were varied. A computer monitor was lying horizontally on a desk.

Practice trials were created by convolving the 500-Hz sine tone with HRIRs measured with the KEMAR Dummy-Head (Gardner and Martin, 1994) for azimuth angles between -90° and +90° in steps of 15°, except of the 0° position. ITDs and IIDs of the subsequent experimental trials were varied using Microsoft's Direct Sound programming interface which offers a temporal resolution for the manipulation of ITDs of 1 sample (i.e., 10.4 μs at 96 kHz) and a resolution of 0.01 dB for the manipulation of IIDs. The ITD/IID of the reference tone was 0 μs/0 dB. The test tone had one of seven preset ITDs (-600 μs, -400 μs, -200 μs, 0 μs, 200 μs, 400 μs, or 600 μs) while IIDs were adjusted by participants within a continuous range between -7.5 dB and +7.5 dB. Each ITD was presented in five trials with and without reference tone, resulting in $7 \cdot 5 \cdot 2 = 70$ trading trials. *Control trials* had an ITD within the same range as the critical trials while their IID was 0 dB. There was one control trial for each critical trial resulting to 70 control trials in total.

3. Procedure

The experiment was conducted in an anechoic chamber in order to minimize external noise. The audiometric screening was conducted first. Next, a practice phase began with a visual-acoustical demonstration in which 500-Hz sine tones convolved with different HRIRs were played for 1000 ms in a loop with 1250 ms silence between two repetitions. A sketched circle was displayed on the computer monitor with a red dot indicating the position in the circle corresponding to the angle simulated by the current HRIR. This visual-acoustical demonstration was repeated for

several lateral angles so that the participant became familiar with the sound source perception via headphones. After this demonstration, tones convolved with an HRIR were played with participant's task being to move the red dot in the sketched circle to the position corresponding to the perceived sound source position. Initially the red dot was invisible. It appeared when the participant clicked somewhere onto the circle—at the position at which the participant had clicked. From that point in time the red dot was movable. After the participant had clicked on a button labeled “continue” a green dot appeared for 2000 ms, indicating the correct position (according to the actual HRIR). After a period of 500 ms (± 100 ms) binaurally uncorrelated white noise was presented for 3000 ms in order to avoid possible carry-over effects from one trial to another. Then the next trial started. A trial was counted as erroneous when the chosen angle deviated from the correct angle by 30° or more in either direction. The practice phase ended after the 30th trial if fewer than four errors were made between trials 21 and 30. Otherwise, the practice phase ended after the 40th trial if fewer than four errors were made between trials 31 and 40, and so on. The practice phase ended with trial 60 at the latest. Participants could take a break after each set of ten trials.

For the next two experimental phases no HRIRs were used. ITDs and IIDs were manipulated solely using the Direct Sound interface.

In experiment 1a the trading phase consisted of two different trial types. In 35 *trading trials without reference tone* the test tone was presented for 1000 ms in alternation with 1250 ms of silence. The task was to adjust the test tone by moving a vertical slider on the left side of the monitor up or down such that the test tone was perceived as originating from the central position. In the 35 *trading trials with reference*

tone a diotic reference tone of 1000 ms duration was played in alternation with the test tone in a loop with 1250 ms of silence between the tones. Each time the test tone was played a red dot appeared on the computer monitor. When the reference tone was played a green dot appeared. The participant was instructed to move the slider so that the test tone appeared to originate from the same sound source position as the reference tone. The participant ended a trial by clicking the continue button. After a delay of 500 ms (± 100 ms) binaurally uncorrelated white noise was presented for 3000 ms, after which the next trial started. The 70 trials were presented in random order. After each block of 10 trials participants were allowed to pause.

The trading phase of experiment 1b was identical to that of experiment 1a except that it consisted of only 35 trials of one of the two trial types (with or without reference tone, depending on the experimental condition).

The localization phase consisted of critical and control trials presented in random order. No reference tone was presented during localization. In experiment 1a, the 70 critical trials were based on trading trials with or without reference tone, that is, the tone was presented with the IID the participant had chosen in the corresponding trading trial; the ITD was identical to that of the trading trial. Seventy corresponding control trials were presented with an IID of 0 dB and one of the seven possible ITDs. Localization judgments in control trials served as a measure of the effectiveness of participants' trading by showing the maximum lateralization of a specific ITD when no trading had taken place. As in the practice phase participants' task was to move a red dot in a sketch to the position corresponding to the perceived location of the tone. Participants received no feedback about the correctness of their answer and no information about the sound properties or trial types.

The localization phase of experiment 1b was identical to that of experiment 1a except that it consisted of only 35 critical trials based on trading trials of one of the two trial types (with or without reference tone, depending on the experimental condition) and 35 corresponding control trials.

4. Design

The independent variables were reference tone (with or without reference tone; manipulated within-subject in experiment 1a and between-subjects in experiment 1b) and preset ITD (within-subject). Dependent variables were the adjusted IID during the trading phase and the perceived location during the localization phase. The main question of the experiment concerned a possible interaction effect between the two independent variables during the trading and the localization phase. If the adjustments during trading were smaller and the shift-backs during localization were larger with as opposed to without reference tones, then this would indicate that the reference tone caused a bias in the judgment of the to-be-adjusted cue of the test tone towards that parameter of the reference tone. An a priori power analysis for experiment 1a using the method recommended by Muller and Peterson (1984) for multivariate designs revealed that in order to detect interaction effects comparable to those of a pilot study ($\eta^2 = .33$ for trading, $\eta^2 = .26$ for localization) given $\alpha = \beta = .05$, $N = 54$ participants were needed for trading and $N = 71$ were needed for localization. A power analysis using G*Power (Faul *et al.*, 2007) revealed that with $N = 70$ participants experiment 1b was capable of detecting interaction effects of Pillai $V \geq .25$ with $\alpha = \beta = .05$.

B. Results

Aggregation of the protocol files to one file was done with the data aggregation software ART (Lang, 2012). Figure 1 shows the results of experiments 1a (top) and 1b (bottom).

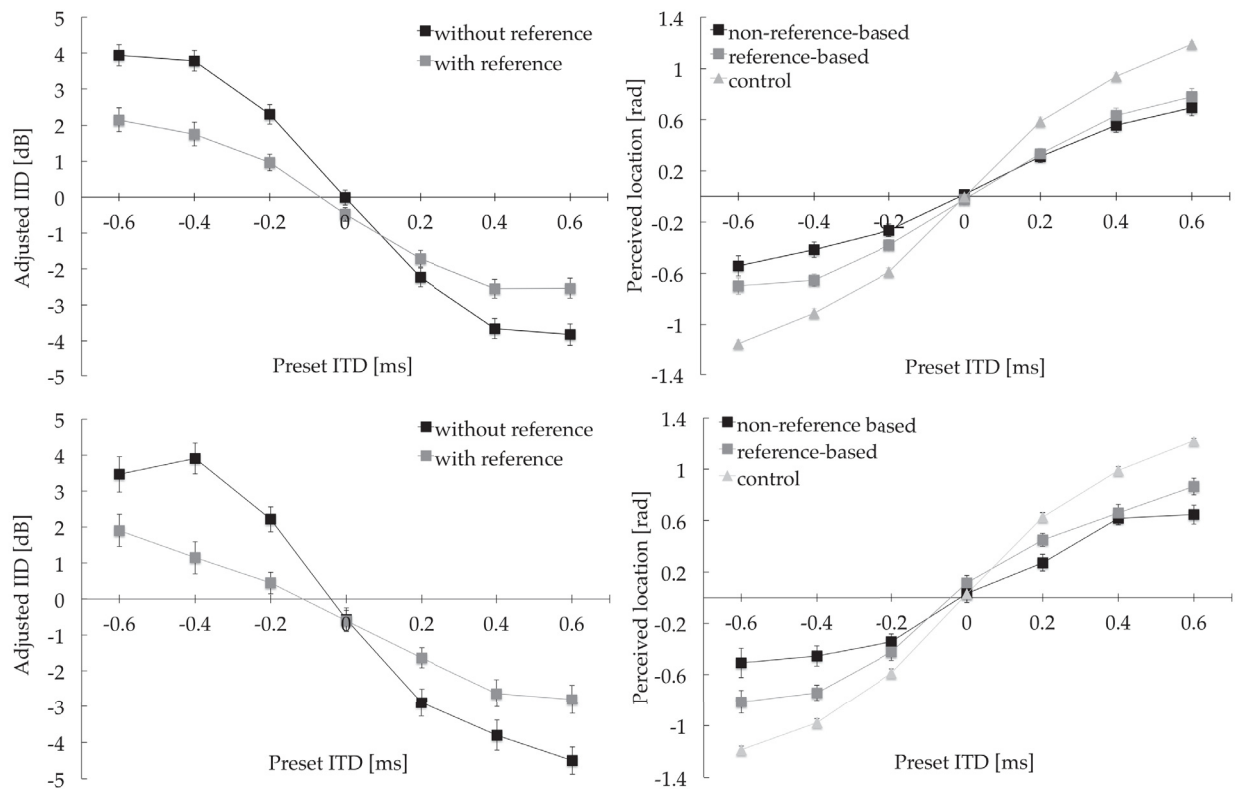


Figure 1: The left panel illustrates the average adjusted IIDs for trading trials with and without reference tone during the trading phase of experiment 1a (top) and 1b (bottom). The right panel shows the average perceived locations during the localization phase of experiment 1a (top) and 1b (bottom). Error bars denote the standard errors of the means.

The left panels illustrate participants' adjustments of the IID to compensate for the lateral effect of the preset ITD during the trading phases. The right panels show the location judgments of the localization phases. In experiment 1a the effect of the preset ITD on the adjusted IID was significant for trading trials with and without

reference tone, $F(6, 66) = 16.03$, $p < .001$, $\eta^2 = .59$, and $F(6, 66) = 44.18$, $p < .001$, $\eta^2 = .80$, respectively; the same was true for experiment 1b, with $F(6, 29) = 6.22$, $p < .001$, $\eta^2 = .56$, and $F(6, 29) = 35.55$, $p < .001$, $\eta^2 = .88$, for trading trials with and without reference tone, respectively.

The significant effect of the ITD on the adjusted IID during trading indicates that participants compensated for the preset ITD by an opposing IID, which was to be expected. If the compensation chosen during trading would also constitute a complete compensation during localization, then we would expect no effect of the preset ITD on perceived location during localization, that is, the critical trials should be perceived in the constant 0 rad location for all steps of the ITD. In this case the perceived-location graphs for critical trials should be equal to the abscissa in the right panels of figure 1. Obviously, this is not the case. The main effect of the ITD on localization judgments was significant for critical trials based on trading trials with reference tone, $F(6, 66) = 50.48$, $p < .001$, $\eta^2 = .82$ (experiment 1a), $F(6, 29) = 66.9$, $p < .001$, $\eta^2 = .93$ (experiment 1b), for critical trials based on trading trials without reference tone, $F(6, 66) = 25.12$, $p < .001$, $\eta^2 = .70$ (experiment 1a), $F(6, 29) = 23.91$, $p < .001$, $\eta^2 = .83$ (experiment 1b), and for control trials, $F(6, 66) = 482.48$, $p < .001$, $\eta^2 = .98$ (experiment 1a), $F(6, 63) = 620.4$, $p < .001$, $\eta^2 = .98$ (experiment 1b). This indicates that a shift-back effect had occurred in critical localization trials for both conditions—with and without reference tone.

The comparison of the critical trials with the control trials suggests that trading had taken place during the trading phase, but turned out to be incomplete during the subsequent localizations. The preset ITD by trial type (critical versus control)

interaction was significant for critical trials based on trading trials with reference tones, $F(6, 66) = 15.25$, $p < .001$, $\eta^2 = .58$ (experiment 1a), $F(6, 29) = 5.85$, $p < .001$, $\eta^2 = .55$ (experiment 1b), and for critical trials based on trading trials without reference tone, $F(6, 66) = 18.69$, $p < .001$, $\eta^2 = .63$ (experiment 1a), $F(6, 29) = 16.00$, $p < .001$, $\eta^2 = .77$ (experiment 1b).

Most interestingly, the preset ITD by reference tone interaction was significant in the trading phases, $F(6, 66) = 12.11$, $p < .001$, $\eta^2 = .52$ (experiment 1a), $F(6, 63) = 6.26$, $p < .001$, $\eta^2 = .37$ (experiment 1b), and in the localization phases, $F(6, 66) = 2.81$, $p = .017$, $\eta^2 = .20$ (experiment 1a), $F(6, 63) = 2.89$, $p = .015$, $\eta^2 = .22$ (experiment 1b).

These results are compatible with the assumption that the reference tone caused a bias in the judgment of the to-be-adjusted cue of the test tone towards that parameter of the reference tone which, in turn, affected the trading judgments. As a consequence of the more incomplete trading the shift-back effect in the localization trials is increased.

The hypothesis that the effects of reference tones carry over to adjacent trials without reference tones has to be rejected given that the data pattern was unaffected by whether the reference tone variable was manipulated within-subject (experiment 1a) or between subjects (experiment 1b). A within-subject design was therefore used in experiment 2 in which ITDs were to be adjusted and IIDs were preset.

III. EXPERIMENT 2

A. Method

1. Participants, Apparatus, Stimuli, Procedure, and Design

Participants were 54 female and 19 male persons (age range from 20 to 47 years, $M = 26$, $SD = 6$) who had no prior experience with psychoacoustic experiments. Audiometric screening, Apparatus, Stimuli and Procedure were identical to those of experiment 1a, except that the 500-Hz test tone was presented with a preset IID (-7.5 dB, -5.0 dB, -2.5 dB, 0 dB, 2.5 dB, 5.0 dB, or 7.5 dB) and participants adjusted the ITD within a range of $\pm 1200 \mu s$ during the trading phase. The control trials had one of the seven IIDs and an ITD of $0 \mu s$.

The within-subject independent variables were reference tone (with or without reference tone) and preset IID. The two dependent variables were the adjusted ITD during the trading phase and the perceived location during the localization phase. The size of the reference tone by preset IID interaction was expected to be comparable to the analogous effect of experiment 1a. Thus, the statistical power considerations led to the conclusion that at least $N = 71$ participants were needed.

B. Results

Figure 2 illustrates the average adjusted ITDs during the trading phase (left panel) and the perceived locations during the localization phase (right panel) as a function of the preset IID. The main effect of the preset IID on the ITD chosen during the trading phase was significant for trading trials with and without reference tone, $F(6, 67) = 6.73$, $p < .001$, $\eta^2 = .38$, and $F(6, 67) = 21.3$, $p < .001$, $\eta^2 = .66$, respectively.

Further, the main effect of the preset IID on the perceived location was significant for critical trials based on trading trials with reference tone, $F(6, 67) = 51.03$, $p < .001$, $\eta^2 = .82$, for critical trials based on trading trials without reference tone, $F(6, 67) = 36.04$, $p < .001$, $\eta^2 = .76$, and for control trials, $F(6, 67) = 156.7$, $p < .001$, $\eta^2 = .93$.

The preset IID by trial type (critical versus control) interaction was significant for the comparison of the control trials with critical trials based on trading trials with reference tone, $F(6, 67) = 6.93$, $p < .001$, $\eta^2 = .38$, and with critical trials based on trading trials without reference tone, $F(6, 67) = 13.9$, $p < .001$, $\eta^2 = .55$. Parallel to experiments 1a and 1b, this suggests that trading had taken place during the trading phase but turned out to be incomplete during the subsequent localizations.

Most importantly, the preset IID by reference tone interaction was significant in the trading phase, $F(6, 67) = 4.83$, $p < .001$, $\eta^2 = .30$, and in the localization phase, $F(6, 67) = 2.7$, $p = .021$, $\eta^2 = .19$.

Replicating conceptually the results of experiments 1a and 1b, these findings are compatible with the assumption that the reference tone caused a bias in the judgment of the to-be-adjusted cue of the test tone towards that parameter of the reference tone.

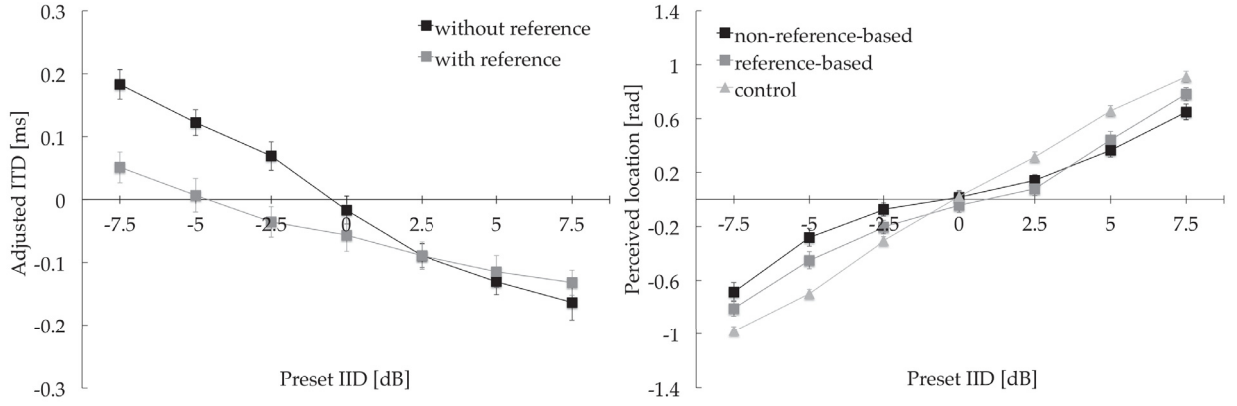


Figure 2: The left panel illustrates the average adjusted ITDs for trading trials with and without reference tone of experiment 2. The right panel shows the average perceived locations during the localization phase. Error bars denote the standard errors of the means.

IV. GENERAL DISCUSSION

The purpose of the series of experiments reported here was to test two models that may explain the shift-back effect, that is, the phenomenon that adjustments of an interaural cue during trading turn out to be insufficient for neutral listening situations (Lang and Buchner, 2008; 2009; Ignaz *et al.*, 2013). According to the attention-shift model, selectively attending to the to-be-adjusted interaural parameter inflates the perceptual weight of this parameter relative to the complementary parameter. The temporarily inflated weight causes trading to be complete only while adjusting the value of the attended cue. In a neutral listening situation such as during localization trading turns out to be incomplete, causing the shift-back effect (and, more generally, the phenomenon that trading ratios depend on the to-be-adjusted interaural cue). The second model implies a judgment bias. More specifically, it is assumed that the judgment of the to-be-adjusted cue of the test tone is biased towards the value of that cue in the reference tone which affects the trading adjustments. The fact that

shift-back effects occur without reference tones (Lang and Buchner, 2008; 2009; Ignaz *et al.*, 2013) excludes the possibility that a bias towards a reference tone is the sole explanation of the shift-back effect. However, those experiments left open the possibility that both a change in the perceptual weight of the to-be-adjusted cue and a bias towards a reference tone may operate jointly if a reference tone is present, that is, in standard trading experiments (e.g., Young and Levine, 1977).

All three experiments reported here are clearly compatible with the assumption that both mechanisms operate jointly. Trading turned out to be incomplete (and a shift-back effect occurred) without reference tones, replicating earlier results (Lang and Buchner, 2008; 2009; Ignaz *et al.*, 2013), but trading turned out to be even more incomplete (and the shift-back effect was even larger) when a reference tone was present, which is compatible with the idea that a bias towards the interaural parameters of the reference tone may have occurred on top of the increase of the perceptual weight. The exact relation between both mechanisms is currently unknown. It may be additive, but more complex relationships are of course possible. What is more, the two mechanisms may even be mutually exclusive. For instance, it could be that the task of adjusting one interaural cue leads to a higher weighting of the to-be-adjusted cue if no reference tone is present but leads to a judgment bias based on a comparison process with the corresponding cue of the reference tone if a reference tone is present.

However, there may be yet another, slightly simpler possibility. Trading with and without reference tones need not necessarily involve two separate mechanisms. For example, it could be that participants were more liberal and less certain when judging (in trials with a reference tone) the positional match of the to-be-adjusted

lateral test tone and the central reference tone than when judging (in trials without reference tone) the match of the test tone and the internal central position. In this case, on average smaller values of the to-be-adjusted cue would be used in trials with a reference tone than in trials without a reference tone. With this auxiliary assumption the attention-shift model alone could explain the present findings. While such an interpretation may seem attractive because it is somewhat less complex than assuming two distinct mechanisms for trading trials with and without a reference tone, it is post-hoc and clearly needs further investigation.

However, the assumption that trading with a reference tone is more liberal and less accurate than trading without a reference tone seems in conflict with the idea underlying earlier experiments in which diotic reference tones were used in order to provide a reliable anchor for the central target position (Haftner and Jeffress, 1968). If the reference tone served as a positional anchor in the present experiments, then one would expect the variability in the values chosen for the to-be-adjusted cue to be smaller in trials with a reference tone as compared to trials without a reference tone. In order to test this possibility, we compared the within-subject standard deviations of the values chosen for the IIDs between trading trials with and without reference tone in experiment 1a. The average variance of the IID values was in fact larger in trading trials with a reference tone ($SD = 6.88$) than in trading trials without a reference tone ($SD = 4.20$). This is inconsistent with the assumption that the reference tone provided a reliable anchor for the central target position in the present experiments. If anything, the opposite seems to be the case.

As a side result, the experiments presented here help estimating the time span during which a reference tone is effective once it is presented. In trading trials with

reference tone the temporal distance between test and reference tone is within a range of several hundreds of milliseconds. A reference tone presented in such close temporal proximity to the test tone affected the trading judgments. However, the parallel results of experiments 1a and 1b show that the effect of a reference tone does not persist from one trial to another and is thus rather elusive, at least without extensive training.

The findings of the present experiments—incomplete trading and a variation of that incompleteness as a function of the presence or absence of an explicit reference—show that the method of adjustment may be problematic in order to preserve consistent data. This problem with the method of adjustment is not necessarily restricted to the field of sound perception and localization, but may also be relevant to other psychophysical dimensions. In fact, Trahiotis and Kappauf (1978) derived the regression model from a study using the adjustment method for vibrotactile stimuli which were either adjusted in rise-time or in intensity to match a standard stimulus (Sheldon, 1973). The results showed a biased adjustment of one stimulus dimension to the value of the standard stimulus on that dimension (Kappauf, 1975). Stevens and Greenbaum (1966) compared the results of various psychophysical matching experiments including not only acoustic variables (e.g., loudness, monaural-binaural matching), but also cross-modality matching (e.g., vibration matching loudness of noise, matching between luminance and loudness). They reasoned that biased judgments could affect every psychophysical field in which the correlation between variables is less than perfect. Thus, with respect to the current experiments and the findings of other experiments of the psychophysical field the use of the method of adjustment may not be ideal. However, at least it led to the discovery of the shift-back

effect and the development of the attention-shift model which, in turn, nicely fits with findings showing that the relative weight of IIDs in sound localization increases when participants' sensitivity to ITDs decreases (Stecker, 2010). Together, these results show that the relative weight of IIDs and ITDs may change as a function of task parameters.

Given that, from a purely methodological point of view, the method of adjustment leads to a trading inconsistency, the size of which depends on the presence or absence of a reference tone, it seems useful to take a look at alternative methods to measure trading. One such method is to use same-different judgments. This has been done by Hafter and Carrier (1972) who asked their participants to judge whether a dichotic test tone presented with different combinations of opposing ITDs and IIDs produced the same or a different sound perception as a diotic reference tone. Discriminability between test and reference tone was measured in terms of d' . A d' value of zero would have indicated that the tones were not discriminable. Hafter and Carrier found that different combinations of ITD and IID led to different values of d' . However, there was no combination of ITD and IID that led to a d' value of exactly zero. Thus, a trading between ITD and IID seems possible, but it does not lead to a sound perception that is equivalent to that associated with a diotic tone which may also help to explain why, in the present experiments, trading with a reference tone was less accurate than trading without reference tone. In any case, this alternative method also leads to inconsistent trading ratios. However, Culling and Lewis (2010) used an odd-one-out technique and manipulated intensity and interaural coherence of a narrow sub-band noise presented within a broadband diotic noise. They also transformed their results into d' and found that spectrum level and interaural

correlation of sounds can be traded almost completely. Thus, the odd-one-out technique may be an appropriate alternative to the adjustment method in order to identify the amount of ITD resulting to the same sound perception as a specific IID. In contrast to setting the cues opposite to each other, Yost *et al.* (1975) investigated the interaction of ITD and IID with a procedure in which the participants judged whether a stimulus with a preset IID appeared to the left or right of the perceived location of a previously presented stimulus with a preset ITD. However, the high variability in the data prohibited an exact investigation of the ITD-to-IID relation for lateral positions. A further alternative method to investigate the sensitivity for ITDs and IIDs (e.g., during the tone presentation) is to measure temporal weighting functions in free-field or headphone listening situations showing that the onset dominance of ITD affecting the ITD-discriminability is influenced by the length of the inter trial interval of click trains (Stecker and Hafter, 2002; Brown and Stecker, 2010; Stecker and Brown, 2010).

In sum, the results of the experiments presented here demonstrate that the shift-back effect and trading ratios that differ depending on the to-be-adjusted cue occur without reference tones because the perceptual weight of the to-be-adjusted cue is inflated during trading. However, once a reference tone is presented, both effects are increased, presumably because the existence of a reference tone biases the judgment of the to-be-adjusted cue of the test tone towards the value of that cue in the reference tone. In more general terms, the present experiments demonstrate once more how context-dependent the human auditory perception mechanism is.

Footnotes

¹ In the following article negative values of ITD and IID indicate a sound source perception to the left side of the sagittal plane, while positive values indicate a sound source perception to the right side of the sagittal plane.

REFERENCES

- Brown, A. D., and Stecker, G. C. (2010). "Temporal weighting of interaural time and level differences in high-rate click trains," *J Acoust Soc Am* **128**, 332-341.
- Culling, J. F., and Lewis, H. G. (2010). "Trading of intensity and interaural coherence in dichotic pitch stimuli," *J Acoust Soc Am* **128**, 1908-1914.
- 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 Methods* **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.
- Gardner, B., and Martin, K. (1994). "HRTF measurements of a KEMAR dummy-head microphone," MIT Media Lab Machine Listening Group, retrieved August 15, 2010 from <http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html> (Last viewed April 11, 2013).
- Garner, W. R. (1953). "An informational analysis of absolute judgments of loudness " *J Exp Psychol* **46**, 373-380.
- Hafter, E. R., and Carrier, S. C. (1972). "Binaural interaction in low-frequency stimuli - inability to trade time and intensity completely," *J Acoust Soc Am* **51**, 1852-1862.

- Haft, E. R., and Jeffress, L. A. (1968). "Two-image lateralization of tones and clicks," *J Acoust Soc Am* **44**, 563-569.
- Ignaz, A., Lang, A.-G., and Buchner, A. (2013). "The impact of practice on the adjustment of interaural cues in a lateralization task," *J Acoust Soc Am* **134**, 901-904.
- Kappauf, W. E. (1975). "Regression effect in judgments to determine equal response contours," *Percept. Psychophys.* **17**, 405-410.
- Lang, A. G. (2012). "ART: A data aggregation program for the behavioral sciences," Heinrich-Heine-Universität - Institut für experimentelle Psychologie, retrieved June 12, 2012 from <http://www.psych.hhu.de/abteilungen/aap/art> (Last viewed April 11, 2013).
- 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**, 3120-3131.
- Lang, A. G., and Buchner, A. (2009). "Relative influence of interaural time and intensity differences on lateralization is modulated by attention to one or the other cue: 500-Hz sine tones," *J Acoust Soc Am* **126**, 2536-2542.
- Moushegian, G., and Jeffress, L. A. (1959). "Role of interaural time and intensity differences in the lateralization of low-frequency tones," *J Acoust Soc Am* **31**, 1441-1445.
- Muller, K. E., and Peterson, B. L. (1984). "Practical methods for computing power in testing the multivariate general linear-hypothesis," *Comput Stat Data An* **2**, 143-158.

- Sheldon, P. E. (1973). "Equal Onset Contours of Vibrotactile Stimuli," *Percept. Psychophys.* **13**, 403-407.
- Stecker, G. C. (2010). "Trading of interaural differences in high-rate gabor click trains," *Hear Res* **268**, 202-212.
- Stecker, G. C., and Brown, A. D. (2010). "Temporal weighting of binaural cues revealed by detection of dynamic interaural differences in high-rate Gabor click trains," *J Acoust Soc Am* **127**, 3092-3103.
- Stecker, G. C., and Hafter, E. R. (2002). "Temporal weighting in sound localization," *J Acoust Soc Am* **112**, 1046-1057.
- Stevens, S. S., and Greenbaum, H. B. (1966). "Regression effect in psychophysical judgment," *Percept. Psychophys.* **1**, 439-446.
- Trahiotis, C., and Kappauf, W. E. (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.
- Ward, L. M., and Lockhead, G. R. (1970). "Sequential effects and memory in category judgments," *J Exp Psychol* **84**, 27-34.
- Whitworth, R., and Jeffress, L. A. (1961). "Time vs intensity in localization of tones," *J Acoust Soc Am* **33**, 925-929.
- Yost, W. A., Tanis, D. C., Nielsen, D. W., and Bergert, B. (1975). "Interaural Time Vs Interaural Intensity in a Lateralization Paradigm," *Percept. Psychophys.* **18**, 433-440.

Young, L. L., and Levine, J. (1977). "Time-intensity trades revisited," J Acoust Soc Am **61**, 607-609.

Figure 1: The left panel illustrates the average adjusted IIDs for trading trials with and without reference tone during the trading phase of experiment 1a (top) and 1b (bottom). The right panel shows the average perceived locations during the localization phase of experiment 1a (top) and 1b (bottom). Error bars denote the standard errors of the means.

Figure 2: The left panel illustrates the average adjusted ITDs for trading trials with and without reference tone of experiment 2. The right panel shows the average perceived locations during the localization phase. Error bars denote the standard errors of the means.

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere an Eides Statt, dass die Dissertation mit dem Titel:

Modulieren Regression und Aufmerksamkeit die Wirkung interauraler Zeit- und Intensitätsdifferenzen auf die horizontale Schallquellenlokalisation?

von mir selbstständig und ohne unzulässig fremde Hilfe unter Beachtung der „Grundsätze zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf“ erstellt worden ist.

Datum: 13.02.2014

Name: Alina Ignaz

Unterschrift: