

Universität Ulm
Fakultät für Informatik
Abteilung Neuroinformatik



Hauptseminar
Sehen und Hören
SS 2004

Eigenschaften des Richtungshörens beim Menschen

Angela Zimmermann

az4@informatik.uni-ulm.de

Betreuer: Prof. Dr. Günther Palm, Marcus Borst

Einleitung

Die Wahrnehmung unserer Umwelt und die zwischenmenschliche Kommunikation hängen stark von unserem Hörvermögen ab. Das menschliche Hörsystem ist das schnellste Sinnessystem des Menschen und dient unter anderem als primäres Alarm- und Lokalisationssystem. Der Mensch kann mit ihm eine Schallquelle dreidimensional im Raum und sogar einzelne Schallquellen in einem Geräuschteppich orten. Für die Bestimmung des Ortes von Signalquellen im Raum spielt vor allem die binaurale Lokalisation eine entscheidende Rolle. Die physikalische Grundlage dafür ergibt sich aus dem Umstand, dass meist ein Ohr näher bei einer Schallquelle ist als das andere.

Im Folgenden wird zuerst die über 50 Jahre geltende Duplex-Theorie erläutert. Danach wird auf die maßgebenden Eigenschaften zur Lokalisation von Schallquellen eingegangen. Zuletzt werden noch weitere Phänomene, die in Zusammenhang mit der binauralen Analyse stehen untersucht.

Inhaltsverzeichnis

Die Duplex-Theorie.....	2
Eigenschaften zur Lokalisation einer Schallquelle	4
Der physikalische Reiz.....	4
Lokalisation	5
Der Präzedenzeffekt	6
Lateralisation	6
Zusammenfassung.....	7
Andere Phänomene die in Verbindung zur binauralen Analyse stehen	8
Binaurale Verdeckung.....	8
Cocktail-Party Effekt.....	10
Schlussfolgerungen	10
Literaturverzeichnis.....	10

Die Duplex-Theorie

Eine Erklärung für binaurales Hören, oder das Hören mit zwei Ohren, stellt die Duplex-Theorie von Lord Rayleigh aus dem Jahre 1907 dar. Sie war bis in die 70er Jahre der Eckpfeiler der binauralen Theorien. Die Duplex-Theorie basiert auf der Beziehung zwischen den physikalischen Eigenschaften eines Schalls, der die Ohren erreicht, und der Geometrie des Kopfes. Dabei gibt es zwei Kenngrößen, die interaurale Zeit- und Pegeldifferenz.

Unterschiedliche Laufzeiten des Schalls zum linken und rechten Ohr erzeugen eine Zeitverzögerung der Signale, die interaurale Zeitdifferenz. (siehe Abb. 1)

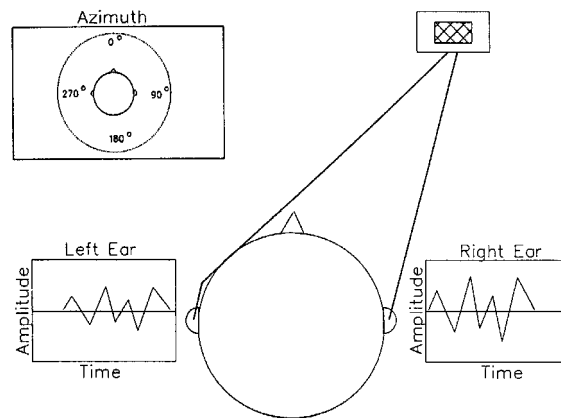


Abbildung 1: interaurale Zeitdifferenz [1]

Wenn die Wellenlängen des Schalls im Vergleich zum Kopf klein sind, werden sie vom ihm reflektiert und es bildet sich ein Schallschatten. Durch diese Abschattung auf der jeweils gegenüberliegenden Kopfseite kommt es zu unterschiedlichen Schallintensitäten am linken und rechten Ohr. Diese bezeichnet man als interaurale Pegeldifferenzen. (siehe Abb. 2)

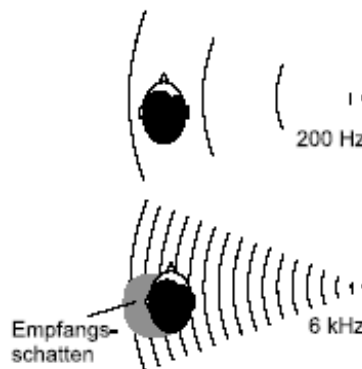


Abbildung 2: interaurale Pegeldifferenz [2]

1939 erweiterten Stevens und Newman die Duplex-Theorie indem sie die Wirkungsgebiete dieser zwei Kenngrößen einschränkten. Bei tiefen Frequenzen, die kleiner 1,5 kHz sind, kann die Ortung der Schallquellen nur durch Laufzeitunterschiede erfolgen. Es gibt keine wirksamen Intensitätsunterschiede, da die Schallwellen am Kopf gebeugt werden. Bei hohen Frequenzen kann die Ortung nur durch Intensitätsunterschiede vollzogen werden, da bei einer Wellenlänge, die kleiner als der Kopfumfang ist, keine eindeutigen Laufzeitunterschiede festgestellt werden können.

Anfang der 70er Jahre zeigten einige Versuche, dass die Duplex-Theorie eine zu starke Vereinfachung für die Lokalisation von Schallquellen beim Menschen darstellt. Dies ergaben sorgfältigere Messungen der interauralen Zeit- und Pegeldifferenzen und die Erkenntnis, dass auch monaural (Hören mit einem Ohr) die Schallquelle geortet werden kann. Außerdem wurde der Bedeutung von niederfrequenten Hüllkurven und der ersten

eintreffenden akustischen Welle mehr Gewicht zugemessen. Beobachtungen zeigten auch, dass die Form des Spektrums eines Schalls im Mittelohr nützliche Informationen für die Lokalisation enthält.

Eigenschaften zur Lokalisation einer Schallquelle

Der physikalische Reiz

Messungen bei unterschiedlichen Experimenten ergaben, dass selbst bei einfachen Reizen einer einzigen Schallquelle im Raum die Werte der Laufzeitunterschiede frequenzabhängig sind. Interaurale Zeitdifferenzen allein sind also kein eindeutiger Hinweis für die Lokalisation wie in der Duplex-Theorie angenommen wurde. Es müssten für verschiedene Frequenzen die jeweils unterschiedlichen Karten für die räumlichen Positionen existieren.

Ebenso sind die Pegeldifferenzen frequenzabhängig, so dass auch hier der Ort der Schallquelle nicht eindeutig bestimmt werden kann. Die folgende Abbildung 3 zeigt die interaurale Pegeldifferenz als Funktion des Winkels zwischen Lautsprecher und Kopf und der Frequenz. Bei einer Frequenz von 6,3 kHz kann die Pegeldifferenz bis zu 20 dB groß sein, bei 1 kHz dagegen nur ungefähr 5 dB.

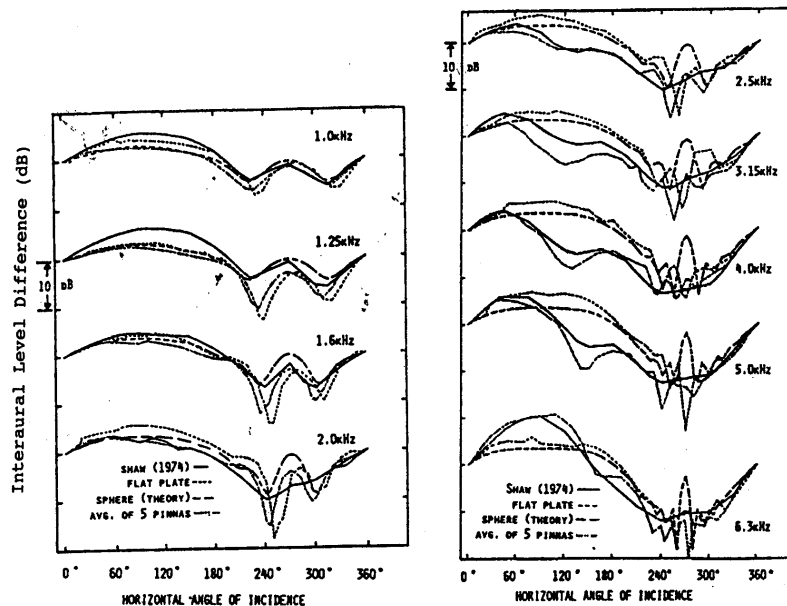


Abbildung 3: interaurale Pegeldifferenz als Funktion von Winkel und Frequenz [1]

Interaurale Zeit- und Pegeldifferenzen sind außerdem von dem genauen Weg eines Schalls zu den Ohren abhängig. Durch den Kopf, Rumpf und die Ohrmuschel wird der Reiz auf dem Weg zu den Ohren gefiltert, das heißt er wird im Pegel und in der Phase verändert. Der Filterung durch die Ohrmuschel kommt dabei besondere Bedeutung für die Genauigkeit der Lokalisation zu. Bis jetzt wurde jedoch keine Theorie gefunden, die diese Filterfunktionen besser erklären könnte.

Lokalisation

Frühe Untersuchungen lieferten einige der grundlegenden Eigenschaften für die Lokalisation von reinen Tönen.

Die größten Ungenauigkeiten bei der Lokalisation treten in einem Bereich von 1500 Hz und 2500 Hz auf. In diesem mittleren Frequenzbereich liefert sowohl die Zeit- als auch die Pegeldifferenz keine optimalen Hinweise. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis eines Versuchs bei dem drei blinde Personen die Position des Lautsprechers für die verschiedenen Frequenzen angeben sollten. Die Lokalisationsfehler sind jeweils in Grad der Winkel angegeben.

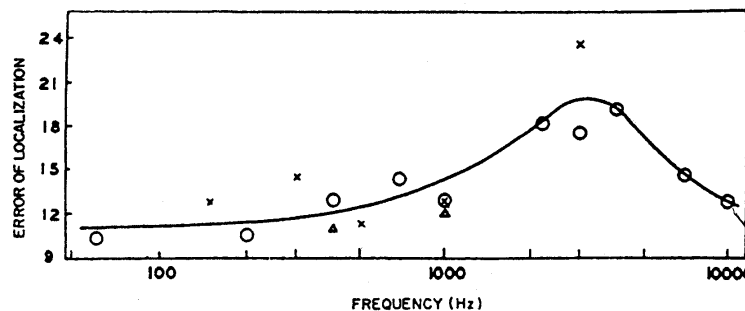


Abbildung 4: Lokalisationsfehler als Funktion von Frequenz und Winkel [1]

Die Fehler bei der Lokalisation sind außerdem am größten innerhalb des sogenannten "cone of confusion", dargestellt in Abbildung 5.

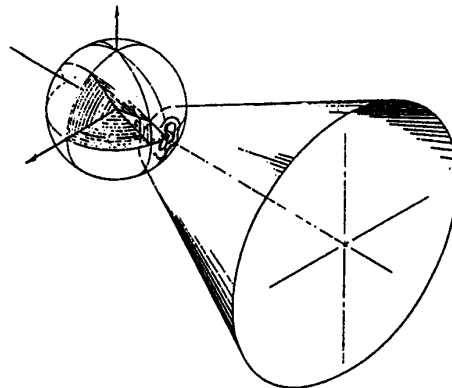


Abbildung 5: "cone of confusion" [1]

Alle Quellen auf der Oberfläche des Kegels erzeugen die gleichen Zeit- und Pegeldifferenzen. Der Mensch kann die einzelnen Schallquellen dann nicht lokalisieren. Durch leichtes Bewegen des Kopfs kann diese Verwirrung jedoch behoben werden. Es kann ebenfalls nicht unterschieden werden, ob der Schall von vorne oder hinten (Vorne-Hinten-Ambiguität) und von nah oder fern kommt.

Der Mensch kann bis zu 3° genau zwei verschiedene Schallquellen bestimmen. Dieses beste Ergebnis wird erzielt, wenn sich die Schallquellen direkt vor dem Hörer befinden. Der minimale hörbare Winkel ist außerdem frequenzabhängig und liefert für Frequenzen um 2.000 Hz die schlechtesten Resultate.

Wird der Hörer daran gehindert seinen Kopf zu bewegen, kann er die Schallquelle nur mit geringerer Genauigkeit orten.

Jüngste Versuche mit komplexen Reizen haben aber gezeigt, dass das Spektrum ebenfalls nützliche Informationen für die Lokalisation bereitstellt. So kann durch den Anteil an hohen Frequenzen eines Spektrums die Ortung mit nur einem Ohr erfolgen. Die Lokalisation in der vertikalen Richtung und des Tonumfangs hängen möglicherweise stark von der Energieverteilung über das Spektrum ab.

Der Präzedenzeffekt

Der Präzedenzeffekt, auch Haas-Effekt oder "Gesetz der ersten Wellenfront" genannt, ist ein wichtiger Mechanismus des Auditiven Systems, um Schall auch in reflexionsbehafteten Räumen lokalisieren zu können. Bevor ein Schall die Ohren erreicht, trifft er oft auf reflektierende Oberflächen in der Umgebung, die dann die Lokalisation der Quelle verfälschen könnten. Der Mensch könnte die Schallquelle an einer reflektierenden Oberfläche vermuten. Solche Fehleinschätzungen werden aber selbst bei Reflektionen mit hoher Intensität selten gemacht. Solange das Signal von der Quelle die Ohren vor den reflektierten Signalen erreicht, wird die Quelle richtig lokalisiert. Das ist normalerweise der Fall, da die reflektierten Signale einen längeren Weg zurücklegen müssen. Das Signal, das die Ohren zuerst erreicht, hat Vorrang vor den später ankommenden Echos bei der Lokalisation.

Lateralisation

Wird der Reiz über Kopfhörer dargeboten und die Wahrnehmung erfolgt somit internal, spricht man von Lateralisation oder Seitenzuordnung. Wenn diese Reize synchron sind, hört die Person die Schallquelle so, als befände sie sich in der Mitte des Kopfes, der sogenannten Mediaebene. Wird das Signal mit einer Laufzeit- oder Pegeldifferenz übertragen, bewegt sich die Schallquelle scheinbar aus der Mitte des Kopfes hin zu der Seite, deren Reiz früher dargeboten wird oder die höhere Intensität hat.

Der Mensch kann dabei Signale mit interauralen Zeitdifferenzen bis zu minimal 10 μ s und Pegeldifferenzen bis zu 0,3 dB unterscheiden.

Man wollte nun herausfinden, ob die Zeit- und Pegeldifferenz gleichwertig ist. Dazu wurden einige Versuche durchgeführt, oft bezeichnet als "trading ratio"-Experimente, in denen einem Ohr die höhere Intensität, aber das später eintreffende Signal dargeboten wird. Die Ergebnisse dieser Versuche sind unter anderem schwierig zu interpretieren, weil die Personen dann im Stande waren zwei verschiedene Eindrücke wahrzunehmen.

Um diesen Sachverhalt darzustellen wurden einige binaurale Modelle entwickelt, die von einer Informationsverarbeitung durch einen Kreuzkorrelationsmechanismus ausgehen. Jeffress vermutete, dass ein Koinzidenznetzwerk als neuronaler Kreuz-

korrelator dienen könnte. Abbildung 6 zeigt ein Schema eines solchen neuronalen Koinzidenznetzwerks.

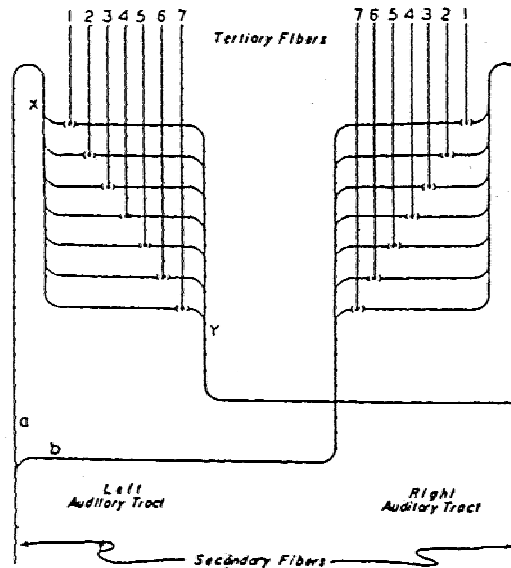


Abbildung 6: neuronales Koinzidenznetzwerk [1]

Wenn ein Signal an beiden Ohren gleichzeitig ankommt, wird Faser 4 angesprochen, da sie von beiden Seiten gleichzeitig erreicht wird. Ein Signal von rechts würde jedoch die Fasern 1, 2 oder 3 ansprechen, je nachdem wie nah die Quelle zu einem Ohr gerichtet ist.

Anfang der 70er Jahre widerlegten Versuche die Annahme, dass Laufzeitunterschiede nur für niedrige Frequenzen Hinweise zur Lokalisation darstellen. Wenn komplexe Reize nur hohe Frequenzen enthalten, diese aber eine niederfrequente Hüllkurve haben, können sie ebenfalls mit Hilfe von Zeitdifferenzen lokalisiert werden.

Der Präzedenzeffekt wurde auch mit Reizen, die über Kopfhörer dargeboten wurden, untersucht. Das Ergebnis war, dass bei der Lateralisation gleichermaßen die zuerst eintreffenden Signale die bedeutende Rolle für die Lokalisation spielen.

Zusammenfassung

Es gibt eine Vielzahl von interauralen und spektralen Eigenschaften, die für den Menschen Hinweise auf die Schallquelle bieten. Neue Erkenntnisse haben gezeigt, dass die Duplex-Theorie die Lokalisation von Schallquellen nicht angemessen beschreibt. Eine neue Theorie konnte noch nicht aufgestellt werden, da wir erst dabei sind zu lernen, welche Eigenschaften zur Lokalisation beitragen. Hinweise liefern möglicherweise die Intensitäts- und Pegeldifferenzen, interaurale Unterschiede beim Eintreffen der Reize, interaurale Verschiebungen zwischen niederfrequenten Einhüllenden von hochfrequenten komplexen Reizen, die Energieverteilung innerhalb des Spektrums

komplexer Reize und die spektrale Umwandlung der Reize durch die Filterung des Kopfes, Rumpfs und der Ohrmuschel.

Für die Schallquellenlokalisierung stellt das auditorische System Berechnungen über die eintreffenden Informationen an. Dem auditorischen System stehen dabei keine räumlichen Felder von Rezeptoren wie dem Auge zur Verfügung. Die Rezeptoren in der Cochlea sind tonotop organisiert, das heißt bestimmte Neurone werden durch bestimmte Frequenzen optimal aktiviert. Einige Modelle wie das Koinzidenznetzwerk beschreiben die nötigen Berechnungen, die das Nervensystem dafür durchführt.

Um eine umfassende Theorie aufzustellen, die alle Aspekte berücksichtigt, müssen aber sowohl auf der psychophysikalischen als auch auf der neuronalen Ebene erst weitere Untersuchungen gemacht werden.

Andere Phänomene die in Verbindung zur binauralen Analyse stehen

Binaurale Verdeckung

Beim Richtungshören treten fortwährend Maskierungseffekte auf, das heißt Störgeräusche überlagern die eigentlichen Signale. Diese Effekte treten besonders dann auf, wenn die Frequenzspektren der Störung und des Originalgeräuschs in etwa übereinstimmen. Der unterschiedliche Pegel eines Störgeräusches, um das Signal zu maskieren, wird als (binauraler) Maskierungspegel-Unterschied bezeichnet und kann bis zu 20 dB betragen.

Abbildung 7 verdeutlicht die Tatsache, dass wenn der Hörer an beiden Ohren die gleiche Verdeckung und das gleiche Signal dargeboten bekommt, er das Signal schlechter erkennen kann (oberer Bereich der Abbildung). Das Signal kann deutlich besser herausgehört werden, wenn es nur von einem Ohr empfangen wird und die Verdeckung weiterhin auf beiden Ohren stattfindet. Die Hörschwelle für das Signal ist dann näherungsweise 10 dB weniger.

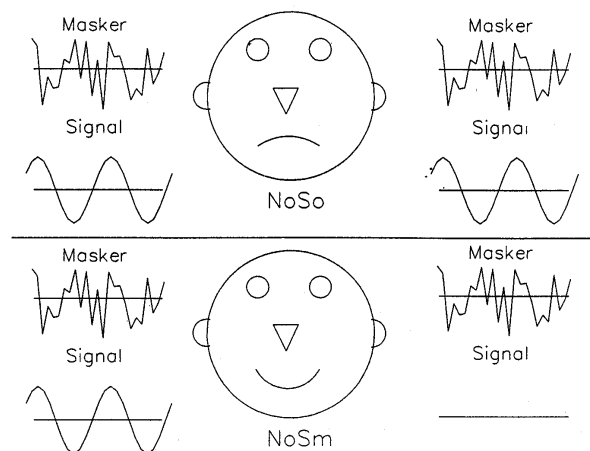
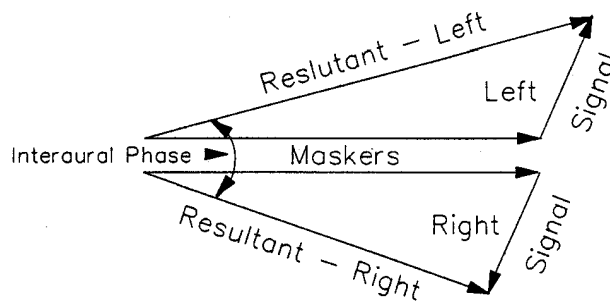


Abbildung 7: Hören eines Signals an zwei Ohren bzw. einem Ohr jeweils mit Maskierung [1]

Eine ähnliche Verbesserung kann erzielt werden, wenn die Schallquelle des Signals eine andere räumliche Position hat als die des Störsignals.

Für den Maskierungspegel-Unterschied wurden unterschiedliche Modelle vorgeschlagen, die in drei Kategorien aufgeteilt werden können: Vektormodelle, Equalization-Cancellation Modelle und auf Neuronen basierte Kreuzkorrelations-Modelle, wie sie auch für die Modellierung der Lateralisation und Lokalisation benutzt werden. Alle Modelle vergleichen die interauralen Zeit- und Pegeldifferenzen. Das Vektormodell (siehe Abbildung 8) betrachtet die Addition des Signals auf den Maskierer als Vektoraddition, die eine Zeit- und Pegeldifferenz erzeugt.



$$\text{Interaural Level} = \text{Resultant-Left} - \text{Resultant-Right}$$

Abbildung 8: Vektormodell des Maskierungspegel-Unterschieds [1]

Beim Equalization-Cancellation Modell (siehe Abb. 9) wird die Größe des Maskierungspegel-Unterschieds über das Verhältnis des Signals und des Störschalls, das am Ende ausgegeben wird, bestimmt. Davor werden die Signale im Inneren der Ohren gefiltert und anschließend werden die Zeitunterschiede ausgeglichen.

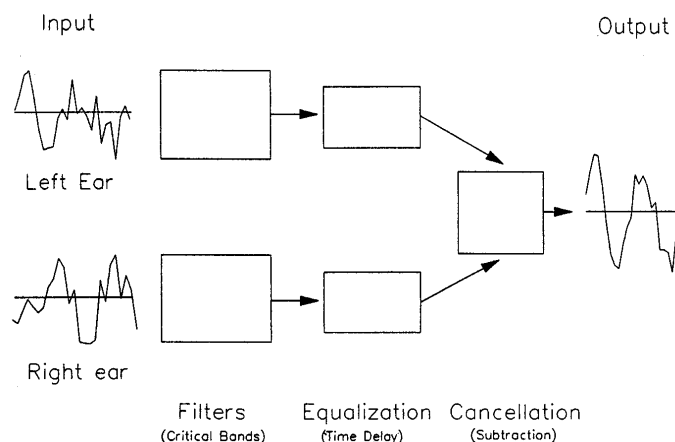


Abbildung 9: Equalization-Cancellation Modell [1]

Cocktail-Party Effekt

Ein Beispiel für das Auftreten des binauralen Maskierungseffekts ist der sogenannte Cocktail-Party Effekt: der Mensch ist in der Lage einem bestimmten Gespräch in einer Menge von Gesprächen zu folgen, ohne sich dem Gegenüber zuzuwenden. Die Stimme, der man zuhören will, hat eine andere räumliche Position als die anderen und kann deshalb verfolgt werden. Durch die räumliche Aufteilung und die Möglichkeit Schallquellen zu orten, ist der Mensch in der Lage, Signale aus einem geräuschvollen Hintergrund herauszuhören. Hält er jedoch ein Ohr zu, so dass interaurale Effekte nicht mehr auftreten können, wird diese Fähigkeit stark eingeschränkt.

Schlussfolgerungen

In dieser Übersicht zu den einzelnen Aspekten der binauralen Verarbeitung, besonders im Zusammenhang mit dem Richtungshören, war die Herangehensweise vor allem reizorientiert, wie es in der Psychoakustik üblich ist. Seit der Entwicklung der Duplex-Theorie ist die Anzahl möglicher physikalischer Eigenschaften, die zur Lokalisation von Schallquellen beitragen, erheblich gewachsen. Dies stellt hoffentlich einen Anreiz dar in Zukunft weitere Forschung auf der neuronalen Ebene zu betreiben. Ein anderer Punkt ist, dass Untersuchungen der binauralen Verarbeitung nicht nur Informationen über die Schallquellenlokalisierung liefern, sondern auch grundlegende Beschreibungen über die Vorgänge im zentralen Nervensystem.

Die Eigenschaften, die für die Lokalisation von Bedeutung sind, wurden auch verwendet um andere Phänomene zu untersuchen, die nicht direkt die Lokalisation betreffen, wie die binaurale Verdeckung und der Cocktail-Party Effekt. Diese Vorgänge haben einige wichtige Aspekte der binauralen Analyse verdeutlicht und zu einem besseren Verständnis der Algorithmen in der binauralen Verarbeitung geführt.

Literaturverzeichnis

W. A. Yost, R. H. Dye. Properties of Sound Localization by Humans. In: Neurobiology of Hearing: The Central Auditory System, R. A. Altschuler et al. (ed.), Raven Press, Ltd., New York, 1991.

W. A. Yost, G. Gourevitch. Directional Hearing. Springer Verlag, New York Inc., 1987.

N. Ackern, M. Lindenberg. Räumliches Hören.

(<http://www.uni-mannheim.de/fakul/psycho/irtel/lehre/seminararbeiten/w96/Hoeren1/Hoeren1.html>, Download: 1.6.04)

M. Fellner, R. Höldrich. Physiologische und Psychoakustische Grundlagen des räumlichen Hörens (2000).
(http://iem.at/projekte/publications/iem_report/report03_98/, Download: 1.6.04)

R. Rabenstein. Digitale Klänge.
(http://www.lnt.de/~rabe/DIK/pdf/2002-03/DIK_4.pdf, Download: 10.5.04)

Abbildungen:

- [1] W. A. Yost, R. H. Dye. Properties of Sound Localization by Humans. In: Neurobiology of Hearing: The Central Auditory System, R. A. Altschuler et al. (ed.), Raven Press, Ltd., New York, 1991.
- [2] J. Adamy, K. Voutsas, V. Willert. Ein binaurales Richtungshörsystem für mobile Roboter in echoarmer Umgebung.
(http://www.rt.e-technik.tu-darmstadt.de/LIT/search/pubelectron/RST04_03.pdf, Download: 10.5.04)