

ÜBER DIE LOKALISATION
IM ÜBERLAGERTEN SCHALLFELD

von

Dipl.-Ing. Günther Theile

Dem Fachbereich 21 (Umwelttechnik)
der Technischen Universität Berlin
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
vorgelegte Dissertation

Berichter : Prof. Dr.-Ing. G. Boerger
Prof. Dr.-Ing. L. Cremer
Prof. Dr. phil. G. Plenge

Tag der mündlichen Prüfung: 30. April 1980

Berlin 1980
D83

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
1. Einführung	4
2. Die „Phantomschallquelle“	9
2.1. Das hypothetische Summenlokalisationsprinzip.....	10
2.2 Der „spektrale Einwand“ zur Summenlokalisierung.....	10
2.2.1 Messung der Kammfilterwirkung.....	13
2.2.2 Hörversuch zur Klangverfärbungsunterdrückung	17
3. Ein Assoziationsmodell für die Lokalisation	23
3.1 Die Lokalisationsreizselektion	25
3.1.1 Die räumliche Dekodierung.....	25
3.1.2 Die assoziative Mustererkennung.....	26
3.1.3. Ein Funktionsschema der Ortsassoziationsstufe.....	29
3.2 Das Assoziationsmodell	30
3.2.1 Empfindungs- oder Wahrnehmungsmodell?	30
3.2.2 Die Wirkungsweise des Assoziationsmodells	34
4. Die Lokalisation im überlagerten Schallfeld - Diskussion des Assoziationsmodells ..	40
4.1 Grenzen der Lokalisationsreizselektion	40
4.2 Zwei kohärente Schallquellen	44
4.2.1. Die Elevation und Entfernung der Phantomschallquelle.....	44
4.2.2 Die Klangfarbe der Phantomschallquelle	46
4.2.3 Seitliche Phantomschallquellen	48
4.2.4 Hörereignisse bei schmalbandigen Signalen	49
4.2.5. Hörereignisse bei gegenphasigen Signalen	51
4.3 Zwei inkohärente Schallquellen.....	53
4.3.1 Das „Gesetz des ersten Lokalisationsreizes“	54
4.3.2. Der Cocktail-Party-Effekt.....	57
5. Eine Konsequenz des Assoziationsmodells	59
5.1 Lateralisation - die Lautsprecherentfernung Null	61
5.2 Zeit-Intensitäts-Äquivalenz bei Kunstkopfsignalen.....	63
6. Abschluß	67
Literaturverzeichnis	70
LEBENS LAUF	79

Abstract

Theile, Günther

Über die Lokalisation im überlagerten Schallfeld

Es wird ein neues Lokalisationsmodell, das „Assoziationsmodell“, vorgestellt. Es basiert auf der Grundvorstellung, daß die Lokalisation aufgrund der Hörerfahrung zustande kommt (Wahrnehmungsprozeß). Die Abhängigkeit der Ohrsignale vom Schallquellenort wird als Mechanismus zur Kodierung räumlicher Information aufgefasst, dessen Kenntnis eine Dekodierung der räumlichen Information ermöglicht. Im überlagerten Schallfeld stellt sich damit die Lokalisation als Prozeß zur gleichzeitigen Dekodierung verschiedener räumlicher Informationen dar.

Die im Modell enthaltene „Ortsassoziationsstufe“ leistet diesen Prozeß. Sie ist einer zweiten zentralen Verarbeitungsstufe, der „Gestaltassoziationsstufe“, vorgeschaltet. Jeder der beiden Verarbeitungsprozesse geschieht auf dem Wege einer assoziativ gesteuerten Musterselektion: ein aktueller Reiz, welcher von einer Schallquelle herrührt, löst in der ersten Verarbeitungsstufe eine Ortsassoziation und in der zweiten eine Gestaltassoziation aus. Beide Stufen bestimmen gemeinsam die Hörereigniseigenschaften.

Die konsequente Unterscheidung dieser beiden Reizauswertungsstufen entspricht völlig den zwei elementaren Bereich der Hörerfahrung: die empfangenen Ohrsignale sind zurückzuführen auf die zwei stets paarweise auftretenden Schallquelleneigenschaften „Ort“ und „Signal“.

Der zweistufige, assoziative Selektionsprozeß im Assoziationsmodell stellt deshalb einen einheitlichen Ansatz für die widerspruchsfreie Erklärung wichtiger Phänomene des räumlichen Hörens dar. Das Modell steht - im Gegensatz zu Summenlokalisations-theorien - im Einklang mit den Gesetzmäßigkeiten zur Bildung von "Phantom-schallquellen" hinsichtlich Richtung, Entfernung, Elevation und Klangfarbe. Es liefert weiterhin plausible Erklärungen für das „Gesetz der ersten Wellenfront“, für den „Cocktail-Party-Effekt“, sowie für die „Im-Kopf-Ortung“. Darüber hinaus ergibt sich als Konsequenz, daß die Funktion des Gehörs bei der Lokalisation nicht mit schmalbandigen Signalen und nicht unter Lateralisationsbedingungen untersucht werden kann.

1. Einführung

Den Begriff „Lokalisation“ beim räumlichen Hören hat BLAUERT 1974 definiert als Zuordnungsgesetz zwischen dem Ort eines Hörereignisses und bestimmten Merkmalen eines Schallereignisses. Wird unter Hörereignis nach BLAUERT 1969 nur allgemein die "zeitlich, räumlich und eigenschaftlich bestimmte auditive Wahrnehmung" und unter Schallereignis die ebenso bestimmte „physikalische Seite des Hörvorganges“ verstanden, so ergibt sich zunächst eine wichtige Beschreibungsgrundlage für Untersuchungen, die das räumliche Hören betreffen.

Es hat sich jedoch im Verlauf der vorliegenden Arbeit gezeigt, daß eine präzisere Begriffsbestimmung notwendig wird, sobald mehr als eine Schallquelle die Beschaffenheit der Ohrsignale bestimmen.

Unter natürlichen Bedingungen erfolgt das Hören vorwiegend im überlagerten Schallfeld. Störschallquellen aller Art, sehr häufig Reflexionen am Boden oder an den Begrenzungsflächen eines Raumes (Spiegelschallquellen), aber auch eine Vielzahl gleichwertiger Schallquellen, beispielsweise verschiedene Sprecher in der Nähe eines Hörers, erzeugen normalerweise Ohrsignale, die in keiner Weise mit dem Elementarfall einer Einzelschallquelle übereinstimmen. Aber das menschliche Gehör ist in der Lage, unter diesen Schallfeldbedingungen „einen sehr sinnvollen Auswahl-, Ordnungs- und Gliederungsprozess durchzuführen“ (PLENGE 1973), sodaß trotz der Überlagerung die entsprechenden Hörereigniszuordnungen zustande kommen können. Bekannte Hörphänomene in diesem Zusammenhang sind das "Gesetz der ersten Wellenfront (CREMER 1948) und der „Cocktail-Party-Effekt“ (CHERRY 1953, 1954).

Der Lokalisation im überlagerten Schallfeld liegen offenbar Prozesse zugrunde, die für die Lokalisation im freien Schallfeld einer Einzelschallquelle keine unmittelbare Bedeutung haben: es sind alle diejenigen Prozesse, die eine separate Auswertung bestimmter Ohrsignalanteile ermöglichen.

Welche Ohrsignalanteile diskriminiert das Gehör im überlagerten Schallfeld? Welche Schallereignismerkmale gewährleisten dies?

In der Literatur wird in sehr großer Zahl über Untersuchungen berichtet, die sich mit der Beantwortung dieser Fragen befassen. Dazu gehören besonders alle Arbeiten über die Phänomene „Phantomschallquelle“, „Gesetz der ersten Wellenfront“ und „Cocktail-Party-Effekt“ (Literaturangaben dazu in BLAUERT 1974 und in den folgenden Abschnitten dieser Arbeit), es gehören dazu weiterhin Arbeiten auf dem Gebiet der binauralen Signalerkennung (Literatur in BLAUERT 1974, in neuerer Zeit z. B. DOMNITZ / COLBURN 1976, 1977, HAFTER 1977, KOENIG et al. 1977, ALLEN et al. 1977, HAWKINS et al. 1978, HAFTER et al. 1979), aber dazu gehören ebenso

einige Arbeiten zu besonderen Fragen der auditiven Wahrnehmung (Literatur z. B. in PLENKE 1973, in neuerer Zeit z.B. WETTSCHURECK 1976, MASSARO / WARNER 1977, POLLACK 1977, DANNENBRING / BREGMAN 1978, PALEFF / NICKERSON 1978, LEHRINGER 1979). Die vielen Einzel-Phänomene, die mit dem räumlichen Hören zusammenhängen, sind - oft sehr ausführlich experimentell untersucht worden, und für den überwiegenden Teil der bekannten Gesetzmäßigkeiten gibt es Modellvorstellungen, die das Gehör in den verschiedenen Funktionen zu beschreiben suchen.

Die Mehrheit dieser Modelle sind nachrichtentechnische Modelle, welche innerhalb ihres Gültigkeitsbereiches Aussagen machen über die Beziehungen zwischen bestimmten Ohrsignalmerkmalen und Hörereigniseigenschaften. Es ist wegen ihres begrenzten Gültigkeitsbereiches aber zu fragen, ob sie damit überhaupt Informationen liefern, die das Verständnis über die Funktion des gesamten Auswertungsprozesses beim räumlichen Hören verbessern. Welchen Sinn hat beispielsweise ein Modell nur für das Richtungshören bei Stereophonie, gültig nur für die Horizontalebene, nicht für breitbandige Signale und nicht für die Hörereignisentfernung (vgl. WENDT 1963) ?

Vermutlich sind es gerade die Zusammenhänge unter den verschiedenen Teilaspekten des räumlichen Hörens, die das angestrebte Verständnis für die Wirkungsweise des Gehörs herbeiführen können. Diese Zusammenhänge sind jedoch bisher relativ unbekannt. Vier Beispiele dazu sind zu nennen:

1. Bei Stereophonie treten im überlagerten Schallfeld aufgrund der resultierenden Ohrsignale bestimmte Hörereignisse zwischen den Lautsprechern auf („Phantomschallquelle“, vgl. Abschn. 2). Identische Hörereignisse lassen sich mit einer entsprechenden Einzelschallquelle im Schallfeld erzeugen, obwohl die Ohrsignale dann hinsichtlich Spektrum und Kohärenzgrad nicht übereinstimmen (vgl. Abschn. 2.2). Bisher ist der Zusammenhang zwischen Lokalisation im überlagerten Schallfeld und im freien Schallfeld einer Einzel-Schallquelle nicht widerspruchsfrei geklärt (vgl. Abschn. 4.2).
2. Die Grenze für den Gültigkeitsbereich des „Gesetzes der ersten Wellenfront“ wird zu kleinen Verzögerungszeiten hin durch den Übergang zur „Summenlokalisierung“ (vgl. Abschn. 2.1) definiert. Beide Phänomene treten im überlagerten Schallfeld dadurch auf, daß das zweite Schallereignis gegenüber dem ersten verspätet eintrifft. Die Abgrenzung der Phänomene geschieht wegen unterschiedlicher Gesetzmäßigkeiten bezüglich der Hörereignisrichtung, -vielleicht auch deshalb, weil der erste Effekt für das Hören in geschlossenen Räumen, der zweite Effekt für die übertragungstechnische Anwendung von Bedeutung ist. Es ist aber zu vermuten, daß sich eine Funktion des Gehörs im überlagerten Schallfeld finden läßt, die die Hörereigniszuordnung für alle Signalverzögerungen gemeinsam erklärt (vgl. Abschn. 4.3.1).

3. Lateralisationsexperimente geben Aufschlüsse über die Auswertung interauraler Signalunterschiede. Man kann daraus auch Modellvorstellungen für das Auftreten von Hörereignissen mit seitlichen Auslenkungen entwickeln, jedoch gibt es keine abgesicherte Hypothese für die Verallgemeinerung dieser Erkenntnisse auf das räumliche Hören. Der funktionelle Zusammenhang zwischen lateralisierten und lokalisierten Hörereignisorten ist bisher unbekannt (vgl. Abschn. 5).
4. Der „Cocktail-Party-Effekt“ besagt, daß ein Nutzsignal, das aus einer bestimmten Richtung einfällt, von einem Störsignal, das aus einer anderen Richtung einfällt, bei zweiohrigem Hören weniger stark verdeckt wird als bei einohrigem Hören. Allgemein gilt - im überlagerten Schallfeld ebenso wie bei Kopfhörerbeschallung -, daß die Mithörschwelle des Nutzsignals sinkt, wenn Nutzsignal und Störsignal bei getrennter Darbietung Hörereignisse nicht an gleichen, sondern an verschiedenen Orten erzeugen. Lateralisationsexperimente auf dem Gebiet der binauralen Signalerkennung haben offenbar einen deutlichen Bezug zu der Frage, welche Ohrsignalanteile das Gehör im überlagerten Schallfeld diskriminieren kann. Bisher gibt es jedoch keine klare Vorstellung über die Bedeutung der sogenannten „Detektionsmodelle“ für die Lokalisation im überlagerten Schallfeld (vgl. Abschn. 4.3.2).

Die Beispiele deuten an, daß die Wirkungsweise des Gehörs beim räumlichen Hören bisher vorwiegend in abgegrenzten Teilbereichen und weniger „ganzheitlich“ untersucht wurde. Ein Grund dafür liegt vielleicht in dem nachrichtentechnischen Bestreben, beobachtete Verknüpfungen zwischen Schall- und Hörereignismerkmalen sogleich als Gesetzmäßigkeit bzw. mit Hilfe eines Funktionsmodells zu formulieren - woraus sich die Notwendigkeit zur präzisen Abgrenzung ergibt.

Die Beispiele weisen weiter darauf hin, daß gerade die Grenzen der Gültigkeitsbereiche sowie mögliche Zusammenhänge einzelner Hörphänomene von besonderem Interesse sein müssen, ebenso die Erkenntnisse aus anderen Wissenschaftszweigen, beispielsweise der Neurophysiologie und der Wahrnehmungsforschung. In dieser Hinsicht mag eventuell die Anwendung der assoziativen Speichertechnik und Signalverarbeitung (vgl. z. B. WIGSTROEM 1974, WILLWACHER 1976, KOHONEN 1977, BOHN 1978), vielleicht auch der Holographie (vgl. WESS / ROEDER 1977), neue Möglichkeiten schaffen (vgl. Abschn. 3.2.1).

In der vorliegenden Arbeit wird ein Modell für die Lokalisation im überlagerten Schallfeld beschrieben, das *einheitlich* eine große Zahl verschiedener Hörphänomene berücksichtigt. Es basiert auf dem Ansatz, daß die Lokalisation über einen "Reizmustervergleich zwischen aktuellen Reizen und erlernten Reizmustern" (PLENGE 1973) erfolgt, daß also aufgrund der Hörerfahrung die Hörereigniszuordnung zustande

kommt. Versteht man die Abhängigkeit der Ohrsignale vom Schallquellenort als einen Mechanismus zur Kodierung räumlicher Information, so kann die Kenntnis dieser Ohrsignalabhängigkeit als Schlüssel zur Dekodierung der räumlichen Information aufgefaßt werden. Im überlagerten Schallfeld stellt sich damit die Lokalisation als Prozeß zur gleichzeitigen Dekodierung verschiedener räumlicher Informationen dar. Er gelingt ganz, teilweise oder gar nicht, abhängig von der Anzahl und den Eigenschaften der beteiligten Schallereignisse.

Welches sind die beteiligten Schallereignisse? Es ist zweckmäßig, an dieser Stelle den Begriff „Schallereignis“ präzise zu definieren. Bisher ist unklar, wie zwei Schallereignisse überhaupt voneinander unterschieden werden sollen. Betrachtet man entsprechend BLAUERT 1974 ausschließlich „die physikalische Seite des Hörvorgangs“, so kann damit allein die Wirkung von Kopf und Außenohren im Schallfeld gemeint sein. Zwei verschiedene, simultane Schallereignisse sind dann aber nur infolge verschiedener räumlicher Merkmale vorhanden (Orte der Schallquellen, Ausbreitungsrichtungen der Schallwellen usw.). Diese Betrachtung erscheint im überlagerten Schallfeld deshalb nicht sinnvoll, weil der Hörvorgang hier wesentlich durch die Diskriminierbarkeit einzelner Signalanteile gekennzeichnet ist

Zwei räumlich getrennte Lautsprecher z. B. können - abhängig von den Eigenschaften der Sendesignale - entweder zwei simultane Hörereignisse an verschiedenen Orten oder ein einziges Hörereignis an einem dritten Ort erzeugen, weiterhin kann ein einziger Lautsprecher, der zwei „unterschiedliche Sendesignale“ abstrahlt, zwei simultane Hörereignisse erzeugen. Die Auswertungsprozesse im Gehör, die zur Bildung des Hörereignisortes und der Hörereignisgestalt führen, bestimmen stets gemeinsam die Hörereigniseigenschaften; sie beeinflussen sich scheinbar gegenseitig. Die physikalische Seite der Lokalisation ist erst mit Schallereignissen beschreibbar, die sich nicht allein hinsichtlich räumlicher Merkmale gegeneinander abgrenzen lassen. Im Folgenden gilt deshalb für den Begriff folgende

Definition:

Ein **Schallereignis** ist derjenige Schallanteil, der von einer Einzelschallquelle herrührt und der die Eigenschaft des zugeordneten Hörereignisses hinsichtlich Ort oder Gestalt bestimmt oder beeinflusst.

Damit sei die Lokalisation beschrieben nach folgender

Definition:

Die **Lokalisation** ist das Zuordnungsgesetz zwischen dem Ort eines Hörereignisses außerhalb des Kopfes und bestimmten Merkmalen eines oder mehrerer Schallereignisse.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Zusammenhänge einzelner Phänomene der Lokalisation im überlagerten Schallfeld aufzudecken, weil vielleicht besonders auf diesem Wege das Verständnis für die Funktion unseres Gehörs beim räumlichen vertieft werden kann. Das Anliegen erscheint nicht vermessen, wenn die Lokalisation konsequent als Folge eines Wahrnehmungsprozesses angesehen wird, der allein aufgrund der Hörerfahrung möglich ist.

2. Die „Phantomschallquelle“

Ein wichtiger Spezialfall der Lokalisation im überlagerten Schallfeld liegt vor, wenn mehrere Schallereignisse einem gemeinsamen Hörereignis zugeordnet sind, sodaß Hörereignisort und Schallquellenorte nicht übereinstimmen. Man spricht in dem Fall von einer „Phantomschallquelle“, weil ein Hörereignis dort wahrgenommen wird, wo sich keine Schallquelle befindet.

Im Sinne der vorangestellten Definitionen kann aber das Wort "Schallquelle" nicht zur Beschreibung des Hörereignisraumes herangezogen werden. Die Phantomschallquelle wird deshalb in der Literatur auch im Sinne einer „gedachten Schallquelle“ verstanden, mit deren Hilfe man die physikalische Seite der Lokalisation zu beschreiben sucht. Man geht davon aus, daß die Phantomschallquelle grundsätzlich eine Ersatzschallquelle darstellt, in deren Schallfeld am Hörort die gleichen Ohrsignalmerkmale erzeugt werden wie im überlagerten Schallfeld.

Wie sich zeigen wird, gibt es gegen diese Annahme in vielen Fällen gravierende Einwände (vgl. Abschn. 2.2 und 4.2). Dennoch soll im Folgenden der Begriff „Phantomschallquelle“ zunächst weiter benutzt werden, um die besondere Schallfeldkonstellation wie üblich zu kennzeichnen. Wenn nicht besonders angegeben, sei damit speziell das Schallfeld gemeint, welches zwei kohärente Sender in Stereostandardanordnung hervorrufen (wobei unter Stereostandardanordnung eine Aufstellung der Lautsprecher nach Bild 1 verstanden werden soll).

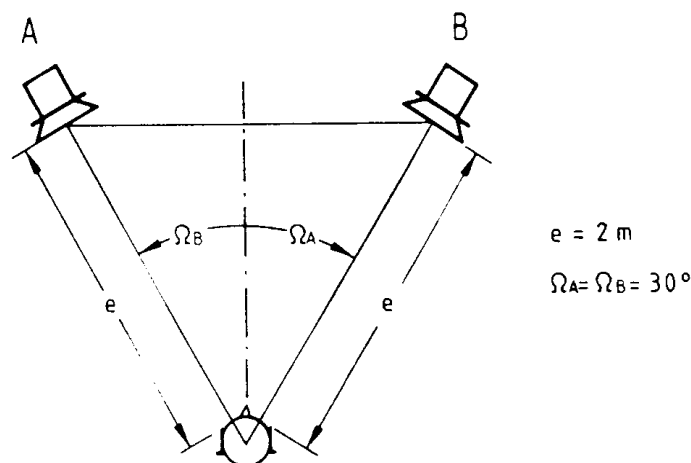


Bild 1 :

Stereostandardaufstellung der Lautsprecher

Die Lokalisation im überlagerten Schallfeld dieser speziellen Art hat nicht nur für die elektroakustische Übertragung von räumlich verteilten Schallquellen eine spezielle Bedeutung. Wie schon eingangs angedeutet wurde, können vermutlich wichtige Einblicke in die Funktion des Gehörs beim räumlichen Hören gewonnen werden, wenn Einzelphänomene sich innerhalb einer möglichst allgemeingültigen Hörtheorie einordnen lassen. Besonders die Gesetzmäßigkeiten für Phänomene der Phantomschallquelle scheinen in diesem Sinne eine wichtige Rolle zu spielen. Sie sind in einer Vielzahl von Arbeiten untersucht und beschrieben worden (z. B. DE BOER 1940, WENDT 1963, BOERGER 1965, ORTMEYER 1966, DAMASKE 1969/70, BLAUERT 1970, GARDNER 1973, THEILE / PLENGE 1977, LOY 1978), und es wurden für deren Erklärung unterschiedliche Theorien entwickelt.

2.1. Das hypothetische Summenlokalisationsprinzip

Alle bekannten Phantomschallquellentheorien basieren gemeinsam auf der grundsätzlichen Annahme, daß Summenlokalisierung" (WARNCKE 1941) stattfindet. Darunter wird die Vorstellung verstanden, daß aus den Schallfeldüberlagerungen an den Ohren Summensignale resultieren, deren Komponenten das Gehör nicht mehr trennen kann. Man vermutet deshalb bei der Lokalisation einer „Phantomschallquelle“ und bei der Lokalisation einer entsprechenden, am Ort der Phantomschallquelle befindlichen Realschallquelle eine Äquivalenz der Ohrsignalmerkmale am linken Ohr bzw. am rechten Ohr. In den Arbeiten über Summenlokalisierung werden verschiedene Äquivalenztheorien beschrieben, deren Gültigkeitsbereiche sich jedoch auf das Richtungshören beschränken, oft sogar speziell auf das Richtungshören in der Horizontalebene. Beispiele sind die bekannten Summenlokalisierungstheorien von LEAKEY 1959, FRANSSSEN 1960/63, MAKITA 1962, WENDT 1963, MERTENS 1965.

2.2 Der „spektrale Einwand“ zur Summenlokalisierung

Die Summenlokalisationsmodelle berücksichtigen die interauralen Phasen-, Laufzeit- und Intensitätsdifferenzen, welche im überlagerten Schallfeld an den Ohren auftreten. Sie berücksichtigen nicht die resultierenden spektralen Eigenschaften der Ohrsignale: Das wirksame Schallfeld an jedem Ohr setzt sich aus gegeneinander verzögerten Anteilen zusammen, sodaß jedes der an den beiden Ohren auftretenden Signale eine spektrale Veränderung entsprechend der Kammfilterwirkung enthält (Bild 2).

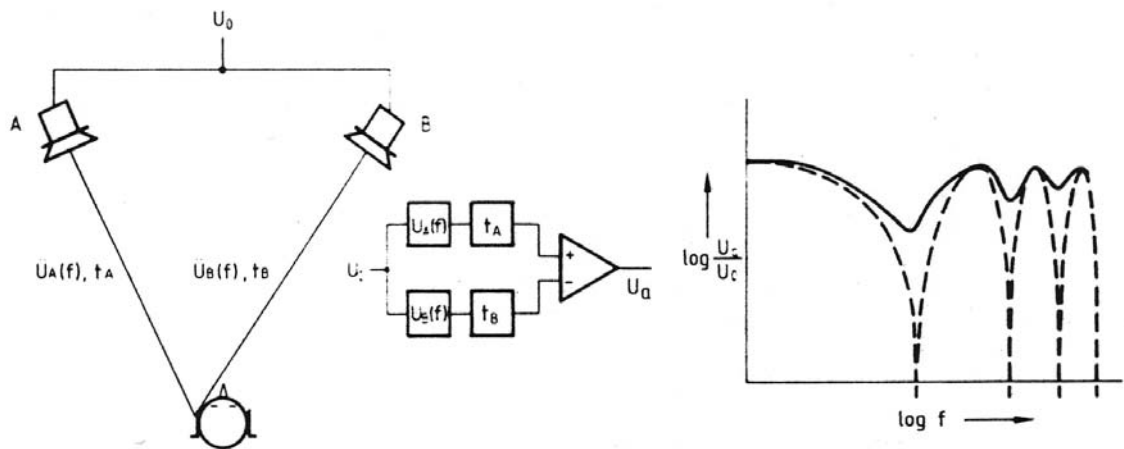


Bild 2 :

Skizze zur Kammfilterwirkung an den Ohren in der Phantomschallquellsituation. Die durchgezogene Kurve gelte für $\dot{U}_A \neq \dot{U}_B$.

Besonders die jüngsten Erfahrungen mit kopfbezogenen stereofonen Aufnahme-Wiedergabesystemen haben gezeigt, daß bereits geringe lineare Verzerrungen zur Im-Kopf-Ortung führen können (PLENGE 1973, NAKAMURA 1976, LAWS et al. 1976/77 BLAUERT et al. 1978). Die Lokalisation, d. h. die Zuordnung von Hörereignissen außerhalb des Kopfes, setzt genau die charakteristischen - offenbar sogar individuell charakteristischen - spektralen Merkmale voraus, die durch das Außenohr beim natürlichen Hören gegeben sind. Diese Erkenntnis steht im Widerspruch zu den Summenlokalisierungstheorien. Die aus den Kammfilterwirkungen resultierenden linearen Verzerrungen führen nicht zu den spektralen Merkmalen, die eine am Ort der Phantomschallquelle befindliche Ersatz-Realschallquelle liefern würde. Trotzdem tritt die Phantomschallquelle außerhalb des Kopfes auf, und zwar etwa unter der mittleren Entfernung der Hörereignisorte, die die beiden Lautsprechersignale einzeln hervorrufen würden (REICHARDT / HAUSTEIN 1968). Die Kammfilterwirkung an beiden Ohren beeinflusst nicht die Entfernungswahrnehmung.

Ein weiterer Einwand gegen das Summenlokalisationsprinzip leitet sich ebenfalls aus dem wirksamen Spektrum ab. Charakteristische Frequenzbänder bestimmen die Hörereignisrichtung in der Medianebene (BLAUERT 1969); die Elevation eines Hörereignisses ergibt sich entsprechend aus den spektralen Merkmalen der Ohrsignale (BLOOM 1977). Jedoch ist diese Tatsache nicht grundsätzlich mit Summenlokalisierung vereinbar, weil äquivalente Intensitäts- und Zeitdifferenzen zwischen den Lautsprechersignalen zu den gleichen Hörereignisorten führen: befinden sich die Lautsprecher symmetrisch zur Medianebene rechts und links des Hörers, so wandert die

Phantomschallquelle, abhängig von der eingefügten Kanalpegeldifferenz, in der Frontalebene mit konstanter Entfernung. Das gleiche geschieht, wenn anstelle der Pegeldifferenz eine Zeitdifferenz verändert wird. Ein bestimmter Elevationswinkel läßt sich sowohl mit einer Kanalpegeldifferenz als auch mit einer Kanalzeitdifferenz herstellen; in beiden Fällen führen die Kammfilterwirkungen an den Ohren aber zu sehr unterschiedlichen Spektren, auch im relevanten 8-kHz-Bereich (vgl. BLOOM 1977).

Offenbar müssen für das Summenlokalisationsprinzip Vorbehalte geltend gemacht werden, weil die Phantomschallquelle sich hinsichtlich ihres Spektrums nicht als Ersatzschallquelle auffassen läßt.

Dieser „spektrale Einwand“ bezieht sich ebenfalls auf die Klangfarbe der Phantomschallquelle. Es läßt sich zeigen, daß eine äquivalente Intensitäts- und Laufzeitdifferenz zwischen den Lautsprecher-signalen, die zur gleichen Phantomschallquellenrichtung führt, auch die gleichen Phantomschallquellenklangfarbe erzeugt, obwohl unterschiedliche Spektren wirksam sind. Das Klangfarbenphänomen der Phantomschallquelle zeigt sich besonders deutlich in einem einfachen Hörversuch (Bild 3):

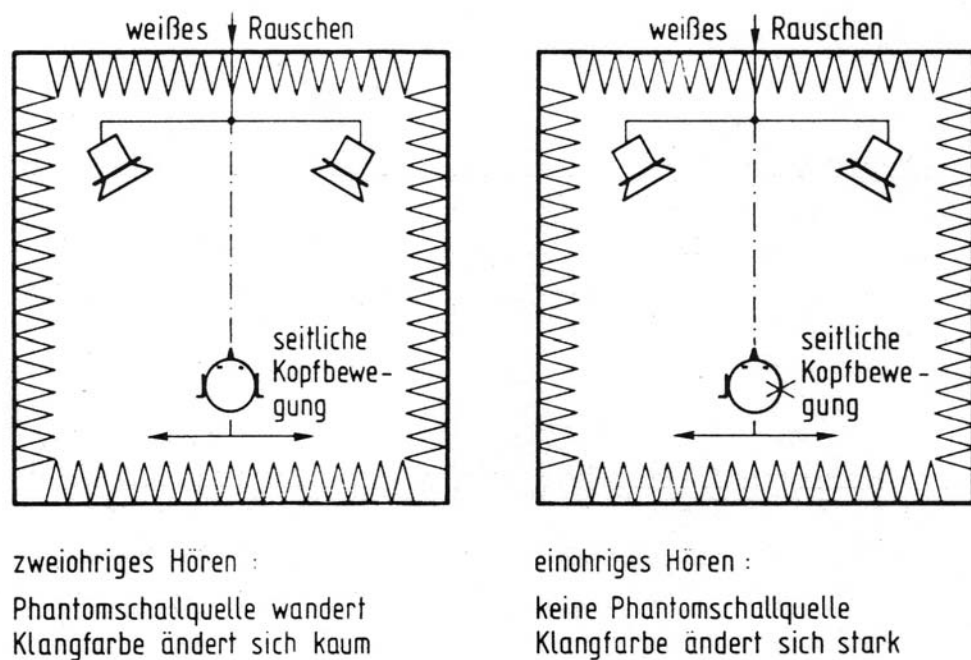


Bild 3 :

Versuch zur Klangverfärbungsunterdrückung: Die Kammfilterwirkung ist nur bei einohrigem Hören bemerkbar.

Man stelle sich im reflexionsarmen Raum symmetrisch vor die beiden Lautsprecher, die kohärentes weißes Rauschen abstrahlen (Pegel nicht zu hoch wählen). Seitliche Kopfbewegungen führen zu seitlichen Auslenkungen der Phantomschallquelle (Laufzeitstereofonie), die Klangfarbe ändert sich dabei kaum. Das gleiche führe man durch, während ein Ohr zugehalten wird: man bemerkt deutlich eine stark wechselnde Klangfarbe. Die Klangverfärbung, die vom Kammfilter hervorgerufen wird, und die an jedem Ohr einzeln hörbar ist, verschwindet bei zweiöhrigem Hören, d.h. sobald eine Phantomschallquelle auftritt. Ihr Auftreten impliziert die Unterdrückung der Klangverfärbung. Auf diesen Effekt wurde erst von THEILE 1978 prinzipiell hingewiesen.

Bevor in einem Hörversuch der Zusammenhang zwischen Klangverfärbungsunterdrückung und der Lokalisierbarkeit von Phantomschallquellen untersucht wird, sollen die linearen Verzerrungen, die am linken und rechten Ohr infolge des Kammfiltereffektes auftreten, quantitativ erfaßt werden.

2.2.1 Messung der Kammfilterwirkung

Ein Kunstkopf (NEUMANN KU 80) befindet sich am Hörort einer Lautsprecheranordnung in Stereostandaraufstellung nach Bild 1. Die Pegel der Frequenzgruppen (vgl. ZWICKER / FELDKELLER 1967) der Kunstkopfsignale im Frequenzbereich 0.25 ... 6 kHz werden in Abhängigkeit von der Laufzeitdifferenz Δt der Laufsprecher-signale gemessen. Die Laufzeitdifferenzen $\Delta t = 0, 90, 210, 270$ und $480 \mu s$ werden durch seitliche Versetzung des Kunstkopfes zwischen 0 und 16 cm nach rechts erreicht, was einer Verschiebung der Phantomschallquellenrichtung im Bereich $\Phi = 0^\circ \dots +25^\circ$ entspricht. Die auftretenden Pegeländerungen sind vernachlässigbar. Das Ergebnis zeigt Bild 4.

Dargestellt sind die spektralen Änderungen, die sich beim linken Ohr durch Zuschalten des rechten Lautsprechers B und beim rechten Ohr durch Zuschalten des linken Lautsprechers A ergeben. Die Übertragungsfunktionen der gesamten Strecke Lautsprecher-Außenohr-Mikrofon sind eliminiert. Die eingetragenen Pfeile kennzeichnen die Frequenzen, bei denen rechnerisch ein Einbruch zu erwarten ist, wenn die interauralen Laufzeitdifferenzen frequenzunabhängig angenommen werden ($\tau_A - \tau_B \approx 250 \mu s$ für $\Omega_A = \Omega_B = 30^\circ$). Der Messung lassen sich folgende Einzelheiten entnehmen:

1. Die Einbrüche liegen in der Größenordnung von 10 dB und mehr. Die Anhebungen, besonders im tieffrequenten Bereich, betragen oft 5 dB. Im mittleren Frequenzbereich treten also spektrale Unterschiede von etwa 15 dB auf, zu hohen Frequenzen hin verringert sich dieser Wert etwas, weil der Obersprechanteil stärker abgeschwächt ist.

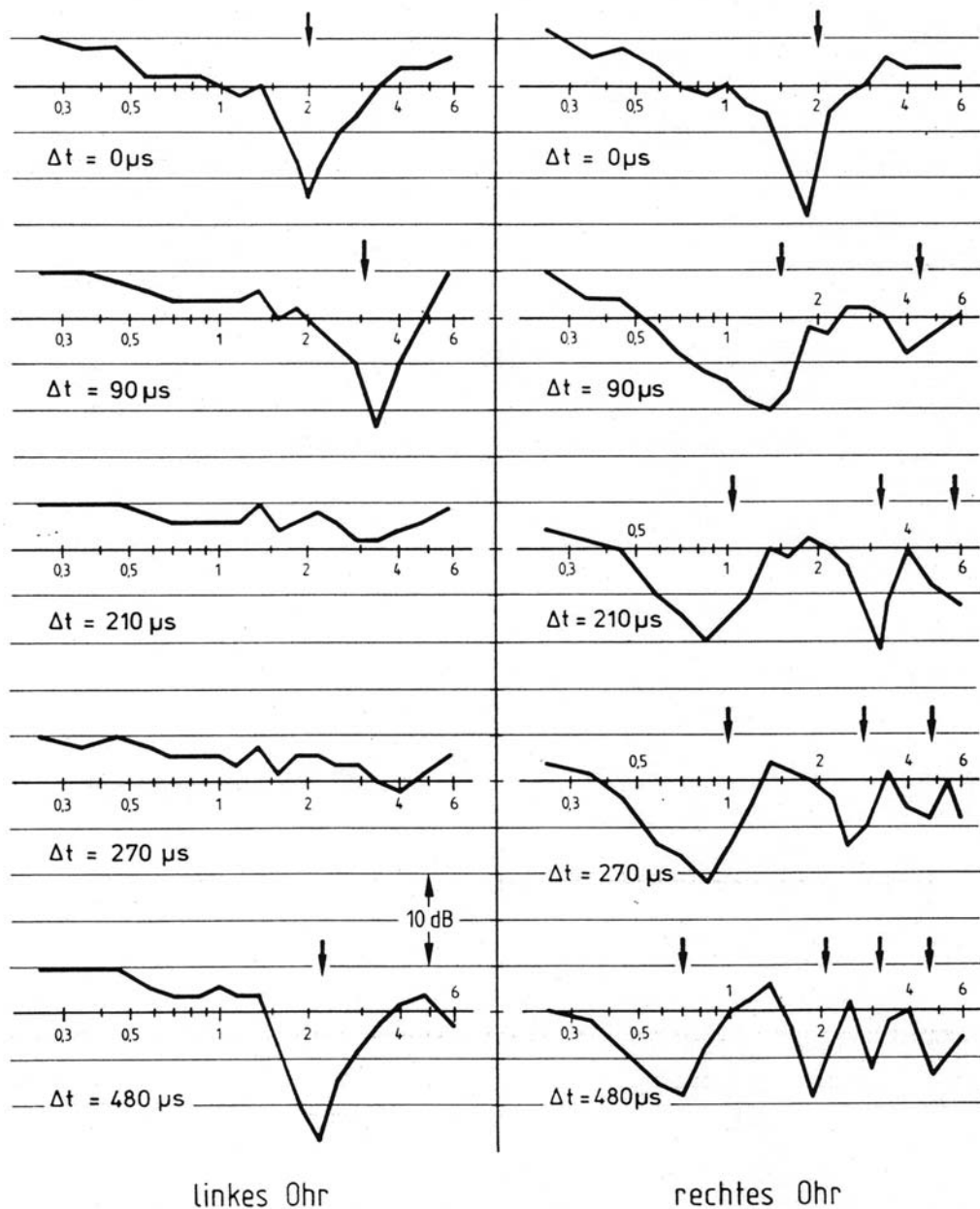


Bild 4 :

Kammfilterwirkung bei Laufzeitstereofonie, siehe Text (das Hörereignis wandert nach rechts)

- Die Frequenzlagen der Einbrüche sind nur für $\Delta\tau = 0$ „ohrsymmetrisch“, d. h. die Einbrüche verschieben sich am einen Ohr zu hohen und am anderen Ohr zu tiefen Frequenzen hin, wenn $\Delta\tau$ bis auf $250 \mu\text{s}$ vergrößert wird. Im Bereich $\Delta\tau$ bis auf $250 \mu\text{s}$ ist die resultierende Laufzeitdifferenz an einem Ohr gleich Null (hier linkes Ohr, "der Phantomschallquelle abgewandt"). Für $\Delta\tau > 250 \mu\text{s}$ verschieben sich die Einbrüche gleichsinnig.

3. Man muß ausschließen, daß die Unterdrückung der Klangverfärbung mit einer Art Mittelung, die das Gehör zwischen den resultierenden Spektren am linken und rechten Ohr vornimmt, erklärt werden kann. Die Mittelwerte der resultierenden Spektren zeigt Bild 5. Die resultierenden Schwankungen des Amplitudenspektrums wären sehr deutlich bemerkbar.
4. Die spektralen Eigenschaften der Ohrsignale bei Laufzeitstereofonie unterscheiden sich sehr stark von denjenigen einer Realschallquelle, welche sich entsprechend der Phantomschallquelle im Bereich zwischen 0° und 30° bewegt. Das geht aus einem Vergleich mit Werten aus Bild 6 hervor. Dargestellt sind hier die spektralen Änderungen, die sich ergeben, wenn der Lautsprecher B von $\Omega_B = 30^\circ$ zur Mitte $\Omega_B = 0^\circ$ bewegt. Wie sich im Hörversuch zeigen wird (Abschn. 2.2.2), rufen diese Abweichungen bei einohrigem Hören bemerkbare Klangverfärbungen hervor.

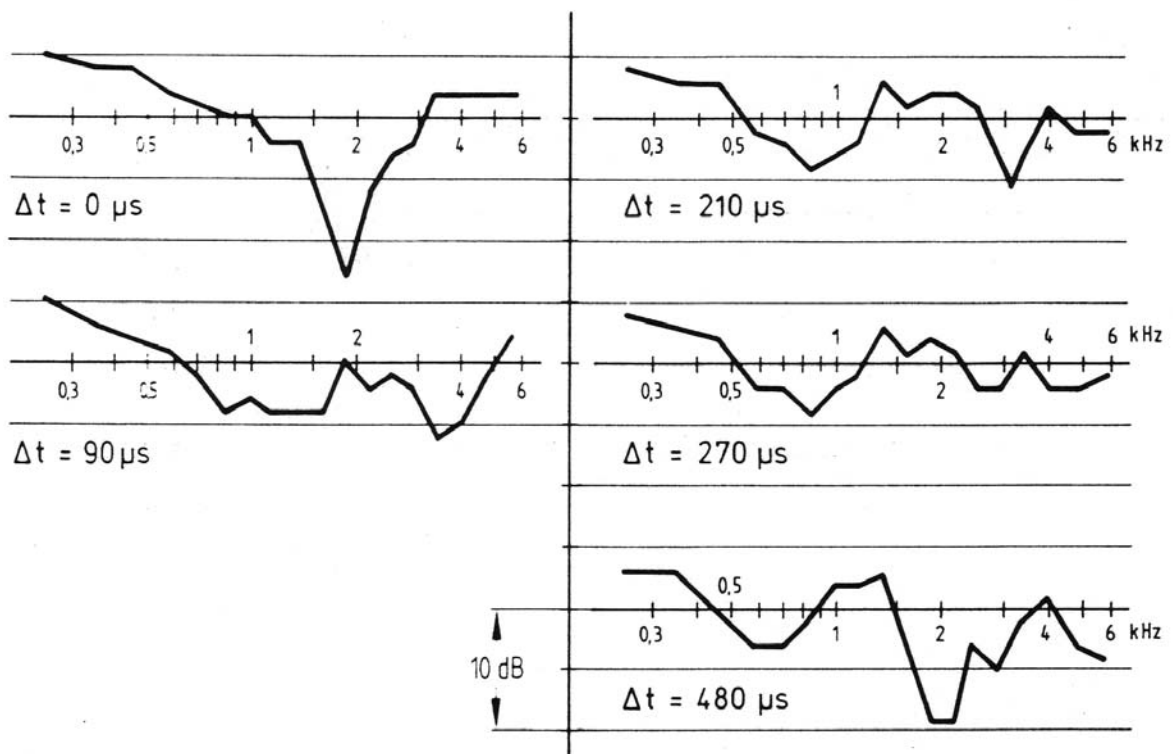


Bild 5:

Die Mittelwerte der resultierenden Spektren an den Ohren, entnommen aus Bild 4.

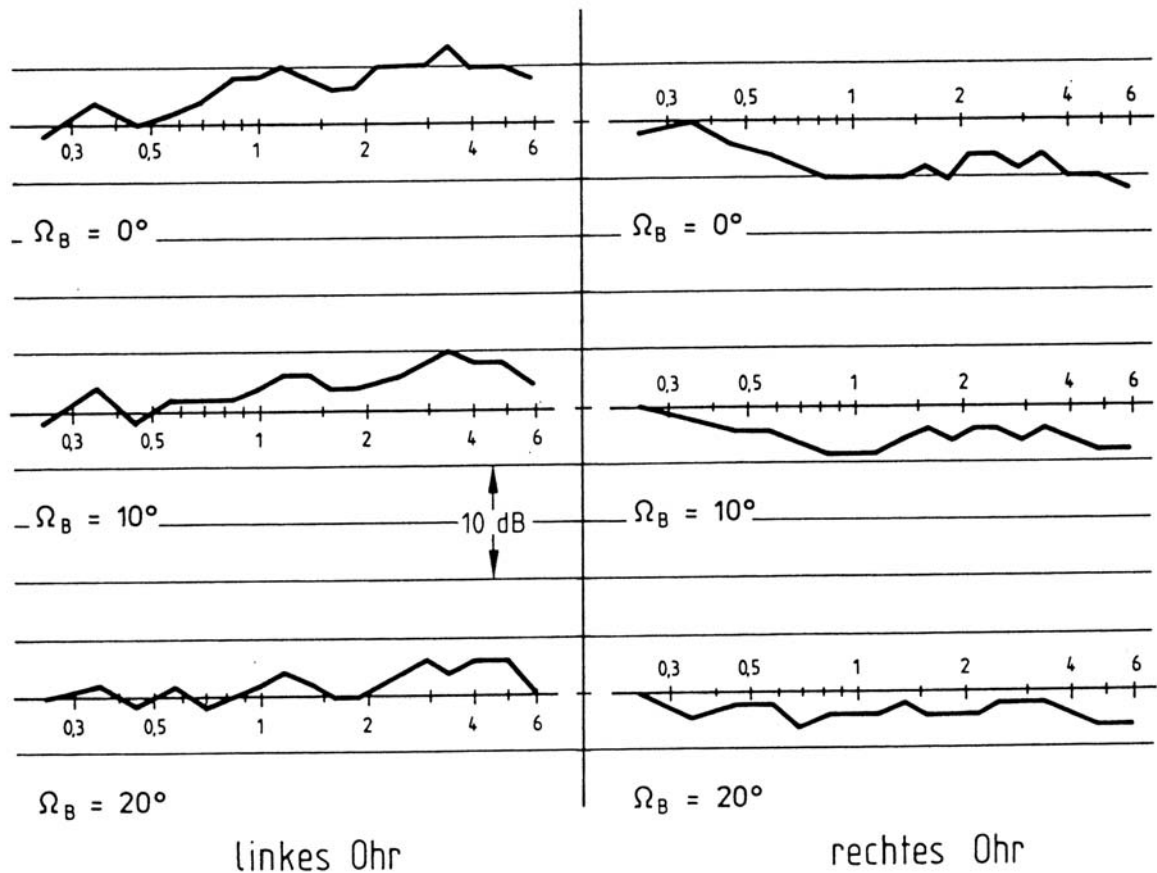


Bild 6 :

Änderung der Ohrsignalspektren als Funktion des Einfallswinkels Ω_B bezogen auf $\Omega_B = 30^\circ$.

5. Hinsichtlich der Entfernung und Elevation der Phantomschallquelle kann Bild 4 entnommen werden, daß das Gehör die Signale als „linear verzerrt“ werten muß, weil die interauralen spektralen Differenzen von *keiner* Real-schallquelle herrühren können; die entsprechenden interauralen Übertragungsfunktionen sind nicht vorhanden (Ausnahme: $\Delta t = 0$). Das wird besonders deutlich für $200 \mu s < \Delta t < 300 \mu s$. Am linken Ohr treten hier nur Einbrüche oberhalb $f = 10 \text{ kHz}$ auf, hingegen existieren am rechten Ohr vier Minima im Bereich $1 \dots 10 \text{ kHz}$ (vgl. $\Delta t = 210 \mu s$ und $270 \mu s$ in Bild 4). Zudem schwankt die Lage dieser Minima für $\Delta t = 250 \mu s \pm 50 \mu s$ um 22 %, ohne daß sich am Spektrum des linken Ohrsignals etwas ändert. Da sich die Übertragungsfunktionen der Außenohren im interessierenden Bereich relativ konstant verhalten (vgl. Bild 6), kann weder die stabile Außer-Kopf-Lokalisation noch die Elevation mit den interauralen spektralen Differenzen vereinbart werden.

2.2.2 Hörversuch zur Klangverfärbungsunterdrückung

Um für jede Versuchsperson identische Versuchsbedingungen zu gewährleisten, werden die Ohrsignale, die im reflexionsarmen Raum am Hörort einer stereofonen Anordnung auftreten, mit Hilfe des Kunstkopfes übertragen. Die Lautsprecher der Anordnung strahlen kohärentes weißes Rauschen ab, die Darbietungszeit beträgt 5 bis 10 s. Während der Darbietungszeit wird der Kunstkopf auf der Ohrenachse periodisch mit ca. 0,5 bis 0,1 Hz und einer Auslenkungsamplitude von max. ± 20 cm aus der Mitte bewegt. Die Bewegung entspricht etwa einer Schwankung der Laufzeitdifferenz um max. $\pm 600 \mu\text{s}$ (Laufzeitstereofonie) und führt bei Wiedergabe der Kunstkopfsignale über Kopfhörer erwartungsgemäß zu stark seitlich wandernden Hörereignisrichtungen.

Unter Beibehaltung der Schwenkbewegung werden folgende Testsignale hergestellt und in zufälliger Reihenfolge aufgezeichnet

Gruppe A:

Parameter ist die Kunstkopf-Blickrichtung δ . Gewählt werden die Signale

- A1 mit $\delta = 0^\circ$
- A2 mit $\delta = 30^\circ$
- A3 mit $\delta = 60^\circ$
- A4 mit $\delta = 90^\circ$
- A5 mit $\delta = 180^\circ$

Gruppe B :

Die Kunstkopf-Blickrichtung ist fest, $\delta = 0^\circ$. Parameter sind unterschiedliche, absichtlich eingeführte Fehler im kopfbezogenen Aufnahme- und Wiedergabesystem. Gewählt werden die Übertragungsbedingungen:

- B1 : Dichotische Darbietung der Kunstkopfsignale, jedoch phasenvertauscht
- B2 : Dichotische Darbietung der Kunstkopfsignale, jedoch ein Ohrsignal um $\Delta t = 200$ ms verzögert
- B3 : Monotische Darbietung eines Kunstkopfsignales
- B4 : Diotische Darbietung eines Kunstkopfsignales
- B5 : Dichotische Darbietung der Kunstkopfsignale, jedoch Aufnahme ohne Kunstkopf-Außenohren
- B6 : Dichotische Darbietung der Mikrofonsignale, jedoch Aufnahme ohne Kopf und Außenohren des Kunstkopfes

Die Testsignale A1 ... A4 und B1 ... B6 erzeugen bei Kopfhörerdarbietung im unterschiedlichen Maße Phantomschallquellen, beispielsweise muß das Signal A1 - je nach Fehlerfreiheit des Kunstkopf-Übertragungssystems - eine gut lokalisierbare Phantom-

schallquelle reproduzieren, das Signal B2 ermöglicht die Reproduktion dagegen sicherlich nur schlecht. Um einen Vergleich mit den Verhältnissen bei der Lokalisation einer Realschallquelle zu haben, werden noch drei Testsignale hinzugefügt:

Gruppe C :

Keine Phantomschallquellenanordnung, sondern ein Lautsprecher in der Medianebene. Gewählt werden die Übertragungsbedingungen

C1 : Sonst wie A1

C2 : Anstelle der Schwenkbewegung eine Drehbewegung um $\delta = \pm 30^\circ$

C3 : Wie C2, jedoch diotische Darbietung eines Kunstkopf-Ohrsignals

Die Testsignale werden den Versuchspersonen je Messung zweimal über Kopfhörer angeboten. Je Durchgang ist *ein* Bemerkbarkeitsattribut zu beurteilen, und zwar die Bemerkbarkeit der Klangfarbenänderung (**Attribut Kl**) und die Bemerkbarkeit der Richtungsänderung (**Attribut Ri**) des Hörereignisses während der Testsignaldarbietungszeit. Die Beurteilungsskala ist 5stufig:

0	:	nicht bemerkbar
0,25	:	gerade bemerkbar
0,5	:	bemerkbar
0,75	:	deutlich bemerkbar
1	:	sehr deutlich bemerkbar

Vor jedem Durchgang werden einige Testbeispiele vorgestellt. Das dient der Erhöhung der Urteilssicherheit und der Vermeidung von Lerneffekten während des Versuchsablaufes. Dabei wird die Aufmerksamkeit entweder auf das Attribut Kl oder auf das Attribut Ri gelenkt; dies geschieht bei 11 Versuchspersonen zuerst mit Kl und bei 11 Versuchspersonen zuerst mit Ri.

Ergebnisse des Hörversuchs

1. Der Zusammenhang der Attribute Kl und Ri für die Testsignalgruppen A und B geht aus Bild 7 hervor. Jeder eingetragene Kl/Ri-Wert stellt das arithmetische Mittel der Urteile von 11 Versuchspersonen für 1 Testsignal dar (4 Mittelwerte je Testsignal). Die berechneten beiden Regressionsgeraden (die erste schließt von Ri auf Kl, die zweite von Kl auf Ri) zeigen einen engen linearen Zusammenhang; der Korrelationskoeffizient beträgt

$$r = - 0,91.$$

Die Bemerkbarkeit der Klangfarbenänderung verhält sich invers zur Wahrnehmbarkeit der Richtungsänderung.

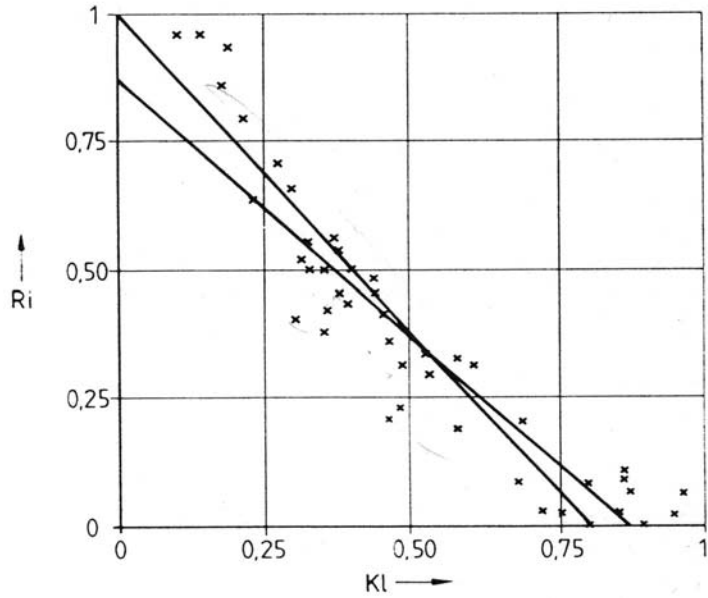


Bild 7 :

Zusammenhang der Bemerkbarkeit von Richtungs- und Klangfarbenänderungen

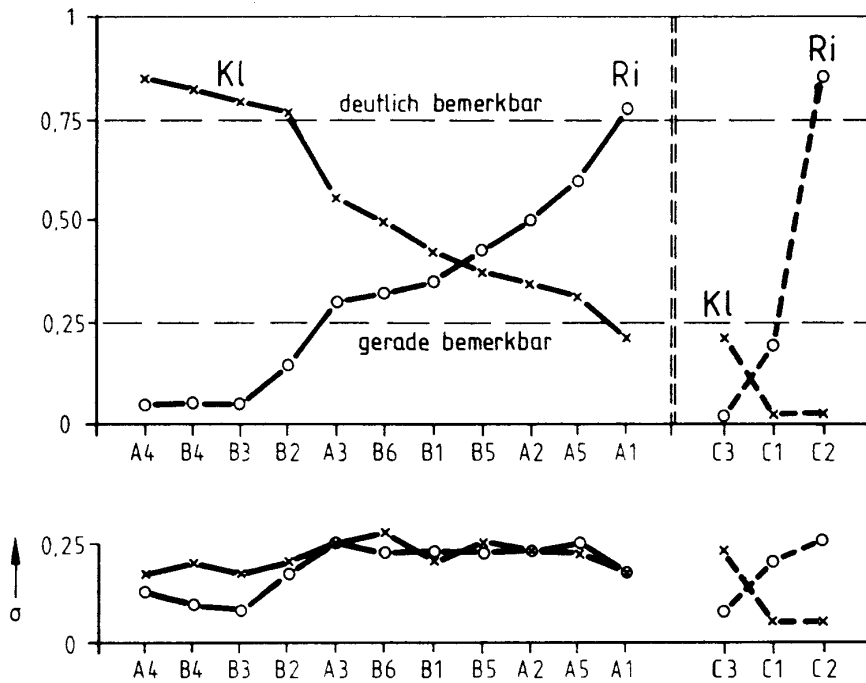


Bild 8 :

Ergebnisübersicht, siehe Text

2. Die Abhängigkeit dieser Attribute von den Testsignalen geht aus einer Übersicht in Bild 8 hervor; die Testsignale sind auf der Abszisse so geordnet, daß ein ansteigender bzw. fallender Verlauf auftritt (die unteren Kurven geben die zugehörigen Standardabweichungen an). Klar ist zu erkennen, daß in allen Fällen, in denen keine Phantomschallquellen auftreten können (Testsignale A4, B4, B3, B2), die Kammfilterwirkungen an den Ohren entsprechend deutlich bemerkt werden. Auf der anderen Seite ist zu erkennen (Testsignal A1), daß bei ungestörter Kunstkopfübertragung das Hörereignis deutlich wandert und entsprechend schwach die vorhandenen spektralen Veränderungen an den Ohren bemerkt werden.

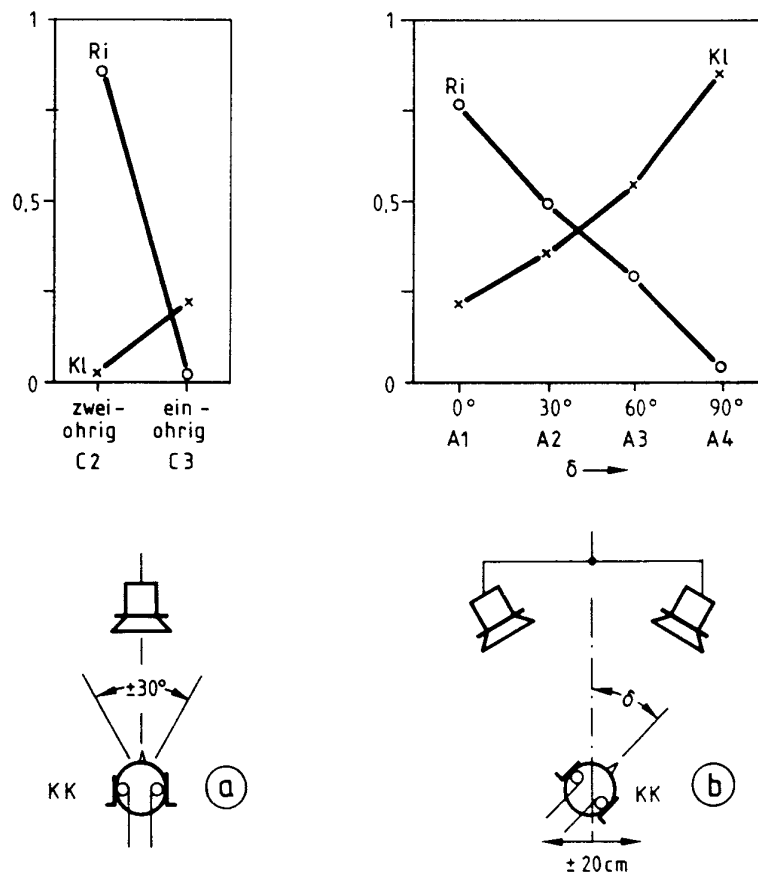


Bild 9 :

Ergebnis für die Testsignale C2, C3 und A1. ... A4

3. Im Vergleich zum Testsignal C2 ist jedoch folgendes festzustellen (siehe auch Bild 9): wandert die Realschallquelle ebenso wie die Phantomschallquelle im Winkelbereich $\pm 30^\circ$, so tritt bei Übertragung dieser Ohrsignale über Kunstkopfsystem für die Phantomschallquelle ein kleineres Ri und größeres Kl auf als für die Realschallquelle (vgl. C2 mit A1).

4. Eine merkbare Klangfarbenänderung tritt auch für Realschallquellen auf, wenn die zugehörigen binauralen Richtungsmerkmale fehlen (Testsignale C2 und C3, Bild 9a). Diese Bemerkbarkeit der Klangfarbenänderung ist ebenso groß wie diejenigen für die normale Phantomschallquellensituation (Testsignale C3 und A1, Bild 9).
5. Bild 9 gibt die Attribute KI und Ri in Abhängigkeit von der Kunstkopf KI und Ri von der Kunstkopfausrichtung δ wieder: die Lokalisierbarkeit der Phantomschallquelle nimmt ab mit wachsendem δ , seitliche Phantomschallquellen ($\delta = 90^\circ$) treten nicht auf (z.B. RATLIFF 1974, THEILE / PLENGE 1977), entsprechend groß ist die Bemerkbarkeit der Klangfarbenänderung.
6. Die Bemerkbarkeit der Richtungsänderung in der Phantomschallquellensituation sinkt schon dann relativ stark, wenn nur anstelle eines normalen Kunstkopfes ein Kunstkopf ohne Außenohren eingesetzt wird (Bild 10). Diese Manipulation am Kunstkopf verursacht vernachlässigbare Änderungen der interauralen Pegel- und Zeitdifferenzen, allein die resultierenden Änderungen der Ohrsignalspektren führen zur stark verminderten Bemerkbarkeit der Phantomschallquellenbewegung.

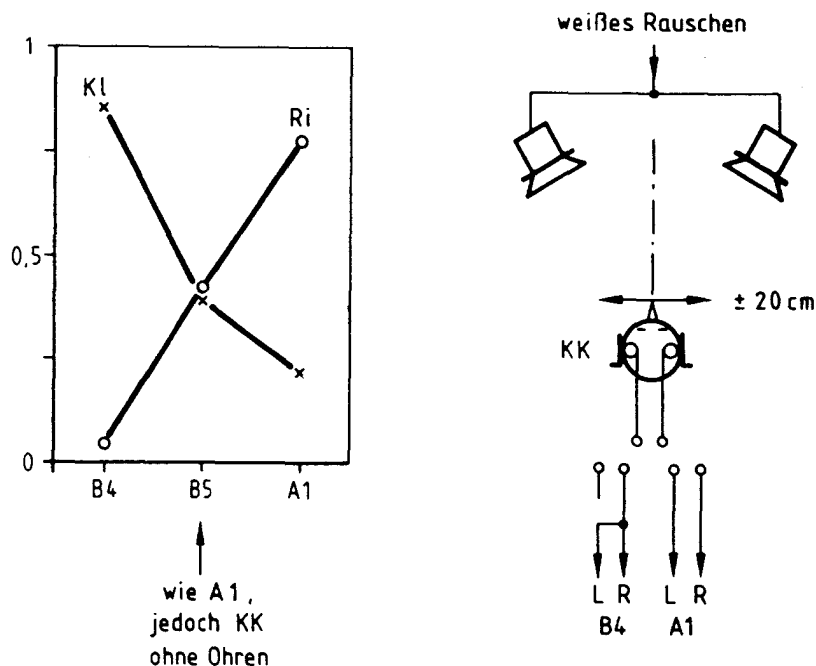


Bild 10 :

Ergebnis für die Testsignale B4, B5, A1

Das Gesamtergebnis lautet :

Die Klangverfärbungsunterdrückung im überlagerten breitbandigen Schallfeld bei zwei kohärenten Schallquellen tritt in dem Maße auf, wie sich eine Phantomschallquelle ausbildet. Die Klangfarbe der Phantomschallquelle entspricht nicht vollständig den spektralen Eigenschaften der Ohrsignale.

3. Ein Assoziationsmodell für die Lokalisation

Verursachen die Ohrsignale, die aus der Schallfeldüberlagerung resultieren, und die Ohrsignale, die von einer Einzelschallquelle herrühren, identische Hörereignisse, so weisen breitbandige Signale in beiden Fällen unterschiedliche Spektren auf. Die spektralen Eigenschaften der Ohrsignale in der Phantomschallquellsituation lassen sich nicht mit der Entfernung, Elevation und Klangfarbe des Hörereignisses vereinbaren, wenn angenommen wird, daß die Ohrsignale als Ganzes verarbeitet werden.

Der beschriebene spektrale Einwand ergibt sich, wenn man versucht, Summenlokalisationsmodelle als Lokalisationsmodelle zu verstehen. Summenlokalisationsmodelle basieren nicht auf den Erkenntnissen zur Lokalisation, sondern auf Theorien für das Richtungshören; es ist nicht möglich, diesen eingeschränkten Gültigkeitsbereich des Summenlokalisationsprinzips zu erweitern auf alle Phänomene der Phantomschallquelle. Wenn man davon ausgeht, daß das Verständnis für die Phantomschallquelle letztlich das Verständnis für das räumliche Hören vertiefen soll, so muß der Ansatz "Summenlokalisation" deshalb in Frage gestellt werden.

Anzustreben ist ein grundlegender Ansatz, der zu einer einheitlichen Erklärung der Hörereigniseigenschaften im überlagerten Schallfeld führen kann, der also die allgemeinen Erkenntnisse zur Lokalisation berücksichtigt (Gesetzmäßigkeiten bei der Im-Kopf-Ortung, beim Entfernungs- und Richtungshören sowie bei der Wahrnehmung simultaner Hörereignisse).

Der spektrale Einwand gibt den Anstoß für die Entwicklung eines vollständigen Lokalisationsmodells, dessen Gültigkeitsbereich die Phantomschallquellen ebenso einschließt wie die Realschallquellen:

Es wurde in Abschnitt 2.2 festgestellt, daß in der Phantomschallquellsituation die Kammfilterwirkungen an den Ohren weder die Entfernungswahrnehmung noch die Wahrnehmung der Klangfarbe beeinflussen. Nicht die an den Ohren tatsächlich auftretenden Spektren sind wirksam, sondern eher diejenigen Spektren, welche die Lautsprecher einzeln an den Ohren hervorrufen.

Diese Beobachtung führt auf die Vermutung, daß das Gehör die Komponenten der Summensignale, die an den Ohren auftreten, wieder trennt. Versteht man die Abhängigkeit der Ohrsignale vom Schallquellenort als einen Mechanismus zur Kodierung räumlicher Information, so kann die Kenntnis dieser Ohrsignalabhängigkeit als Schlüssel zur Dekodierung der räumlichen Information aufgefaßt werden. Wenn man annimmt, daß im überlagerten Schallfeld die gleichzeitige Dekodierung von wenigstens zwei räumlichen Informationen noch möglich ist, beispielsweise durch Mustererkennungsprozesse, dann ist eine getrennte Verarbeitung der Komponenten der Summensignale denkbar.

Sollte eine derartige Verarbeitung im Gehör in Betracht gezogen werden? Wie sich zeigen wird, führt der Ansatz auf ein Lokalisationsmodell, das im Einklang mit vielen Erscheinungen des räumlichen Hörens steht, und das deshalb neue Möglichkeiten für deren Erklärung vermittelt. Zunächst erscheint der Ansatz aus zwei Gründen zweckmäßig:

1. Er kann eine Erklärung für die Unwirksamkeit des Kammfiltereffektes in der Phantomschallquellsituation liefern (vgl. 3.2.2).
2. Er entspricht der Hypothese, daß die Lokalisation als Folge eines Wahrnehmungsprozesses anzunehmen ist, der allein aufgrund der Hörerfahrung zustande kommt (vgl. 3.1.2 und 3.2.1).

Das neue Lokalisationsmodell enthält deshalb eine Verarbeitungsstufe, die infolge der Hörerfahrung solche Ohrsignalanteile selektieren kann, welche ausschließlich durch die Wirkung von Kopf und Ohrmuscheln im überlagerten Schallfeld miteinander verkoppelt sind. Im Folgenden werden diese Ohrsignalanteile als "Lokalisationsreize" bezeichnet.

Definition:

Hinreichend breitbandige Ohrsignale oder Ohrsignalanteile an den Trommelfellen der beiden Ohren bilden zusammen einen **Lokalisationsreiz**, wenn sie sich hinsichtlich der Zeit- und spektralen Merkmale einem einzigen Schallereignisort zuordnen lassen.

Die Verarbeitungsstufe zur Selektion von Lokalisationsreizen wird „Ortsassoziationsstufe“ genannt. Sie ist im Modell einer zweiten, höher gelagerten zentralen Verarbeitungsstufe vorgeschaltet. Diese sogenannte „Gestaltassoziationsstufe“ enthält die Prozesse, welche die eigenschaftlichen Merkmale des Hörereignisses mit Ausnahme der räumlichen Merkmale bestimmen (Einzelheiten dazu in Abschn. 3.2).

Das Lokalisationsmodell ist somit durch eine **zweidimensionale Reizverarbeitung** wesentlich gekennzeichnet. Die konsequente Unterscheidung der beiden Verarbeitungsstufen entspricht völlig den zwei elementaren Bereichen der Hörerfahrung: Die empfangenen Ohrsignale sind zurückzuführen auf die zwei voneinander unabhängigen, stets paarweise auftretenden Schallquelleneigenschaften „Ort“ und „Signal“. Demzufolge sind im Modell die auftretenden Hörereignisse zurückzuführen auf die Wirkung einer ortbestimmenden und einer gestaltbestimmenden Verarbeitungsstufe.

Beide Stufen müssen durchlaufen werden, damit der Reiz zu einer Wahrnehmung führt. Beide Prozesse bestimmen also stets gemeinsam die Eigenschaften eines Hörereignisses; auch die gestaltbestimmende Verarbeitungsstufe ist damit ein Element des **Lokalisationsmodells**.

3.1 Die Lokalisationsreizselektion

Die Ortsassoziationsstufe des Modells hat die Eigenschaft, einen empfangenen Reiz vorzugsweise als Lokalisationsreiz zu deuten, d.h. sie vergleicht spontan den aktuellen Reiz mit Reizmustern, welche infolge der Erfahrung bestimmten Hörereignisorten zugeordnet sind. Nur ein Lokalisationsreiz führt zur Lokalisation. Er liegt vor, wenn die Ohrsignalmerkmale hinsichtlich Zeit und Spektrum mit der Erfahrung vereinbar sind. Damit ist das Gehör in der Lage, aus einer Summe von Signalen die für einen Schallquellenort charakteristischen Signalanteile zusammenzufassen und geschlossen weiterzuleiten (Lokalisationsreizselektion). „Geschlossen weiterleiten“ heißt dabei: Die Lokalisationsreizselektion läßt sich als Fusionsprozeß interpretieren, welcher die binauralen Signalanteile einer bestimmten Schallquelle untrennbar vereint und mit der umkodierten, zur Wahrnehmung führenden räumlichen Information versieht. Die Lokalisationsreizselektion wirkt im überlagerten Schallfeld als Filter zur gleichzeitigen Diskrimination einzelner Sendesignale.

Diese Funktion der hypothetischen Ortsassoziationsstufe läßt sich wahrscheinlich nicht mit Operatoren nachbilden, die nach unserem heutigen Wissen physiologisch möglich sind. Vielmehr sollen die Leistungsmerkmale dieser Verarbeitungsstufe - soweit wie möglich - mit Mitteln der linearen Systemtheorie beschrieben werden, im Rahmen dieser Arbeit auch nur für maximal zwei Schallereignisse beliebiger räumlicher Konstellation (vgl. 4.1). Als grobes Schema wird ein steuerbares Filter angenommen, dessen Übertragungsfunktion sich invers verhält zur ortsabhängigen Übertragungsfunktion des Außenohres (vgl. 3.1.1). Die Bestimmung der momentan wirksamen Übertragungsfunktion geschieht durch Mustererkennungsprozesse (vgl. 3.1.2, auch PLENGE 1973).

3.1.1 Die räumliche Dekodierung

Das Gehör besteht aus einem Auswertesystem mit zwei Eingangskanälen. Den Eingangskanälen ist ein gemeinsames lineares Netzwerk vorgeschaltet, dessen Übertragungsfunktion M sich aus der Wirkung des Kopfes und der Außenohren im Schallfeld ergibt. M ist eine Funktion des Schallquellenortes i , welche die Ohrsignale definiert miteinander verknüpft („räumliche Kodierung“). Liegt am Eingang i der Matrix $M(i)$ ein Sendesignal Q an, so treten an den Eingängen des Auswertesystems die verknüpften Signale der Form $l_i Q = L$ und $r_i Q = R$ auf (l_i, r_i = akustische Übertragungsfaktoren bei Beschallung vom Ort i für das linke Ohr bzw. rechte Ohr, vgl. BLAUERT/ LAWS 1973); nach erfolgter räumlicher Dekodierung erscheint die Antwort Q' am zugeordneten Ausgang i' (Bild 11).

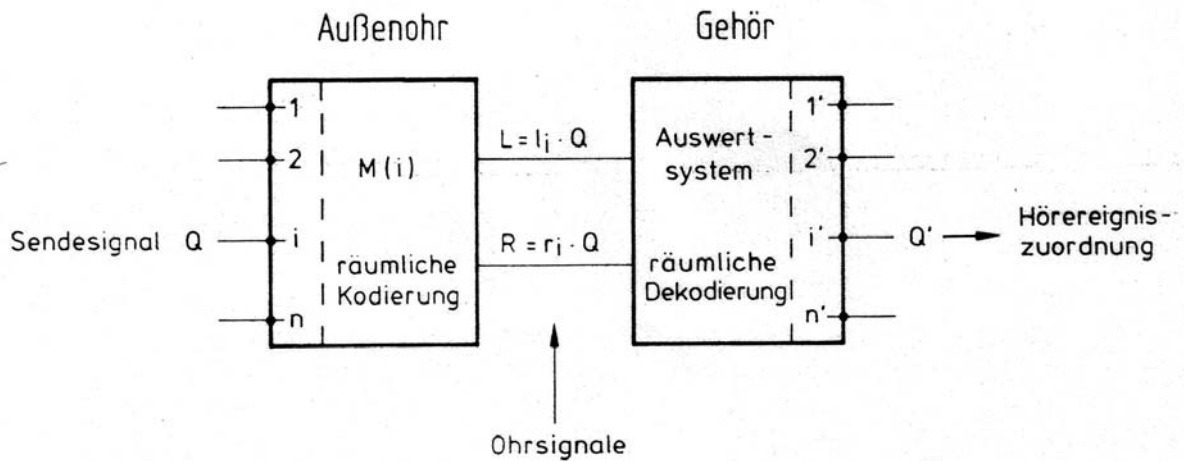


Bild 11:

Das räumliche Übertragungssystem

Dazu muß sich der Dekodiermechanismus an den Schallquellenorten anpassen. Diese Adaption setzt einen assoziativen Mustererkennungsprozess voraus.

Das Wesen der Lokalisation soll deshalb in einem Erkennungsprozess liegen, der zur Selektion führt. Ganz entsprechend enthält das Funktionsschema der Ortsassoziationsstufe einen Baustein "Mustererkennung", der die Information für die optimale Filteranpassung liefert. Der Mustererkennungsprozeß schafft die Voraussetzung für eine Isolation bestimmter Signalmuster.

3.1.2 Die assoziative Mustererkennung

Eine wichtige Arbeitshypothese für die Entwicklung entsprechender Modelle für die Mustererkennung stellt die Annahme dar, daß bestimmte aktuelle Reize ganz bestimmte Assoziationsprozesse auslösen. Betrachtet man ebenso die Lokalisation als Assoziationsprozeß, so ergibt sich daraus eine plausible Erklärung für die vermutete Fähigkeit des Gehörs, die Komponenten eines überlagerten Schallfeldes auch bei kohärenten Schallquellen unterscheiden zu können.

Wenn Assoziationsprozesse bewirken, daß Hörereignisort und Schallquellenort normalerweise deckungsgleich auftreten, so müssen entsprechende Lokalisationsabweichungen gerade mit diesen Assoziationsprozessen erklärbar sein. Tatsächlich scheint das nicht nur für das Phänomen "Phantomschallquelle" zuzutreffen. Auch andere Phänomene der Lokalisation weisen auf Assoziationsprozesse hin. Folgende weitere Beispiele für Divergenzen zwischen Hörereignisort und Schallquellenort entstehen unter speziellen, widernatürlichen Umständen:

1. Die Hörereignisrichtung in der Medianebene steht im direkten Zusammenhang mit dem Signalspektrum; sie verhält sich bei schmalbandigen Signalen von der Schalleinfallrichtung unabhängig. Die Abhängigkeit vom Spektrum läßt sich ableiten aus den linearen Verzerrungen, die vom Außenohr verursacht werden (BLAUERT 1969) und zur Prägung von richtungsbestimmenden Reizmustern führen.
2. Die Hörereignisentfernung steht bei Signalkennntnis im direkten Zusammenhang mit Signalpegel und -spektrum (z.B. LAWS 1972). Bei Lautsprecherdarbietung im freien Schallfeld verhält sie sich abhängig von der Hörerfahrung (PLENGE 1973): entscheidend ist das Verhältnis der Lautheit und Klangfarbe zur assoziierten Lautstärke und "Tonlage" der Schallquelle.
3. Die Hörereignisrichtung entspricht der Schalleinfallrichtung bei Fehlpassung an die bisherige Hörerfahrung, beispielsweise nach plötzlicher Normalisierung eines einseitig krankhaft veränderten Gehörs (Operation, RÖSER 1965).
4. Der Hörereignisort läßt sich, in bestimmten Grenzen unabhängig von Schallquellenort, durch Assoziationslenkung beeinflussen, beispielsweise durch begleitende akustische oder optische Reize [z.B. KLEMM 1909 ("räumliche Komplikation"), BLAUERT 1970, PLENGE 1973, MASSARO / WARNER 1977, LEHRINGER 1979].
5. Die vielfältigen Ursachen der Im-Kopf#-Ortung lassen sich zusammenfassen, wenn man davon ausgeht, daß die Lokalisation über einen Reizmustervergleich zwischen aktuellem Reiz und erlernten Reizmustern erfolgt (PLENGE 1972, 1974). Im-Kopf-Ortung tritt auf, sobald der Reiz sich nicht einem ortsbestimmenden Reizmuster zuordnen läßt; sie kann durch Assoziationslenkung verhindert werden (z.B. optische Informationen JEFFRESS/ TAYLOR 1961).

Wichtige Phänomene der Lokalisation legen nahe, daß der Zusammenhang zwischen Hörereignisort und Schallquellenort mit den Assoziationseigenschaften gegeben ist. Bevor auf dieser Grundlage das vollständige Lokalisationsmodell entwickelt wird, soll die Bedeutung des Assoziationsprinzips auf anderen Forschungs- und Anwendungsgebieten kurz umrissen werden. Es zeigt sich dabei, daß wesentliche Bereiche des Wahrnehmungsprozesses mit einer Art "assoziativer Mustererkennung" erklärt und auch in stark vereinfachter Form beschrieben werden können, daß andererseits jedoch Assoziationsvorgänge - beispielsweise aus neurophysiologischer Sicht - in der nervösen Verarbeitung des zentralen Nervensystems nicht einheitlich als erwiesen gelten.

Aus wahrnehmungspsychologischer und informationstheoretischer Sicht geben Assoziations- und Mustererkennungsmechanismen aber die oft einzig mögliche Erklärung bestimmter Phänomene der auditiven (und visuellen) Wahrnehmung. Dazu gehört z.B. die Erscheinung der "simultanen Hörereignisse" bei Darbietung verschiedener Signale über einen Lautsprecher. Das entspricht nachrichtentechnisch dem Empfang getrennter Signale nach Übertragung über einen einzigen Kanal mit der Bandbreite eines Signals. Diese grundlegenden Fähigkeiten unseres Gehörs ist leicht nachzuweisen und nachrichtentechnisch wohl nur mit der informationsreduzierenden Wirkung von Mustererkennungsmechanismen erklärbar.

Definition :

Assoziative Mustererkennung ist ein Prozeß, der ein aktuelles Muster mit einem gespeicherten Muster verknüpft, selbst dann, wenn nur Teile des gespeicherten Musters im aktuellen Muster enthalten sind.

Dieser bis heute noch hypothetische Mechanismus ist seit langer Zeit auf mehreren Forschungsgebieten Gegenstand des Interesses, so besonders in der Kybernetik (vgl. FLECHTNER 1972). In der Neurophysiologie wird die Existenz eines "sensorischen Assoziationssystems" für die Verarbeitung der sensorischen Erregungen im zentralen Nervensystem vermutet (z.B. CASPERS 1973); es gilt indes als nahezu unerforscht. Die hier erkennbaren Vorstellungen sind stark beeinflusst von kybernetischen Modellen. Besonders in jüngerer Zeit versucht man intensiv, die speziellen Fähigkeiten des menschlichen Gehirns nachzubilden, um sie zu untersuchen oder technisch anzuwenden. Assoziative Informationsspeicherung und assoziativer Informationsruf stellen dabei offenbar ein Grundprinzip der Verarbeitung dar (vgl. FUKUSHIMA 1973, POGGIO 1975, KOHONEN et al. 1976, KOHONEN / OJA 1976, KOKONEN 1977, WESS / ROEDER 1977, BOHN 1978, FUKUSHIMA / MIYAKE 1978, MURAKAMI et al. 1978).

Ein „Modell eines neuronalen Netzwerkes“ von WIGSTROEM 1974 beispielsweise

„das für die Beschreibung der Gehirnrinde gedacht ist, besteht aus einem Netzwerk von Zellen, die von erregendem und hemmendem Typ sind. Es hat die Fähigkeit für assoziatives Lernen. Es wird gezeigt, daß unter geeigneten Bedingungen das Ausgangsmuster von nur einer Hauptkomponente gebildet wird, auch wenn das erregende Eingangsmuster aus einem Gemisch von mehreren Mustern, die beim Lernprozess Verwendung fanden, besteht. Diese Hauptkomponente ist ein Teil des speziellen Ausgangsmusters, das beim Einlernen mit dem Eingangsmuster assoziiert wurde. Das Verhalten wird durch einen dynamischen Prozess erreicht, in dem die Musterseparationseigenschaften der Rückkopplungskreise eine wichtige Rolle spielen. Die Funktion des Modells kann als Mustererkennung betrachtet werden.“

Als weiteres Beispiel sei die Arbeit von WILLWACHER 1976 angegeben, der die „Fähigkeiten eines assoziativen Speichersystems im Vergleich zu Gehirnfunktionen“ untersuchte. Das vorgestellte Netzwerk vermag in stark vereinfachter Weise Leistungen des menschlichen Gehirns nachzuahmen: parallele Assoziation (vollständiger Aufruf eines Musters durch Eingabe eines Teils des Musters), serielle Assoziationen (Aufruf einer zeitlichen Mustersequenz durch Eingabe eines Anfangsmusters), Zuordnung eines unbekanntes (nicht gespeicherten) Musters, Zuordnung von Mustern aus zwei Systembereichen, Assoziation einer wahrscheinlichen Musterfolge, Störung des Assoziationsvorgangs, „Eselsbrücke“, „Abstraktion des Gemeinsamen“, „Umlernen“, „produktiver Einfall“.

Diesen und anderen kybernetischen Ansätzen ist gemeinsam, daß die verwendeten Systembausteine ein den realen Neuronen analoges Verhalten zeigen. Da bis heute keine bis ins einzelne gehende Befunde der Neurologie über die Struktur des Gehirns und die Art der Mustererkennung vorliegen, synthetisiert man mit Hilfe der bekannten Bausteine entsprechende Gehirnleistungen, um daraus Hypothesen zur Gehirnfunktion zu gewinnen. Die zentrale Hypothese lautet, daß Assoziationsvorgänge ein Grundprinzip der sensorischen Reizverarbeitung darstellen.

3.1.3. Ein Funktionsschema der Ortsassoziationsstufe

Die Ortsassoziationsstufe leistet die Lokalisationsreizselektion entsprechend Abschn. 3.1. Der Verarbeitungsprozess dieser Stufe läßt sich beispielsweise beschreiben mit der Wirkung eines ortsabhängigen Filters, entsprechend Abschn. 3.1.1, dessen Parameter aufgrund der assoziativen Mustererkennung entsprechend Abschn. 3.1.2 gesteuert werden. Als zweckdienliches Signalmuster für den Erkennungsprozeß wird ein in Abschn. 4.1 definiertes "binaurales Korrelationsmuster" gewählt. Das Funktionsschema gibt Bild 13 wieder.

Es sei angenommen, daß die Verknüpfung zwischen Ein- und Ausgangssignal das Verhalten dieser hypothetischen Verarbeitungsstufe beschreibe. Das Schema soll nicht die innere Struktur der sensorischen Verarbeitung nachbilden. Die Funktion der Stufe setzt voraus, daß der Erfahrungsprozeß stattgefunden hat, daß also das gespeicherte binaurale Korrelationsmuster vorliegt.

Kennzeichnend ist die selektive Eigenschaft. Das von der peripheren Stufe ankommende Signal (vgl. 3.2) enthält eine Rauminformation und eine Gestaltinformation (einer Schallquelle). Die Rauminformation wird mit Hilfe des Mustererkennungsprozesses erkannt, die Gestaltinformation mit Hilfe des adaptiven Filters diskriminiert und der Gestaltassoziationsstufe zugeführt.

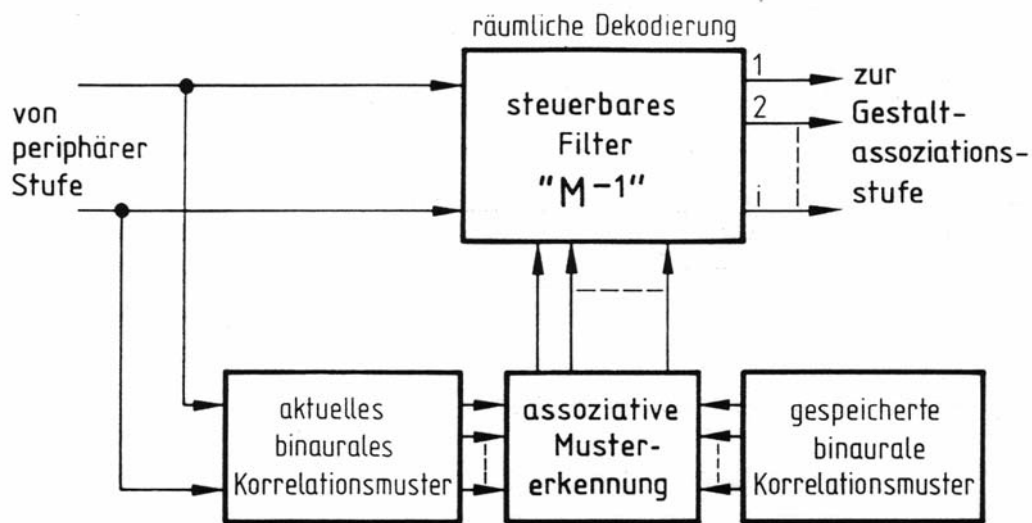


Bild 13:

Funktionsschema der Ortsassoziationsstufe

Mit anderen Worten: Das ankommende Signal wird mit Hilfe des ortangepaßten Filters „ M^{-1} “ von der Beeinflussung durch das Außenohr entsprechend dem Schallquellenort befreit, die Bewertung des Sendesignals durch die wirksame Übertragungsfunktion wird aufgehoben, das reine Sendesignal sowie die gewonnene Richtungs- und Entfernungsinformation werden **getrennt** weitergeleitet.

3.2 Das Assoziationsmodell

Das neue Lokalisationsmodell wird „Assoziationsmodell“ genannt. Vor der Darstellung der Wirkungsweise des gesamten Lokalisationsmodells sei an dieser Stelle noch etwas näher auf den grundlegenden Ansatz eingegangen, Lokalisation als Folge eines Wahrnehmungsprozesses anzusehen, der allein aufgrund der Hörerfahrung möglich ist.

3.2.1 Empfindungs- oder Wahrnehmungsmodell?

Im sensorischen System entspricht der hypothetische Assoziationsvorgang der Funktion eines hochwirksamen Filters zur Informationsreduktion, welche zwischen peripherer Rezeption und bewußter Wahrnehmung stattfindet. Gespeicherte Assoziationsmuster, die aufgrund früherer Erfahrungen geprägt werden, bewirken einerseits eine sinnvolle Informationsselektion. Andererseits ermöglichen sie, trotz reduzierter Information die streng determinierten Reizkonfigurationen der Umwelt mit ausreichender Genauigkeit zu erkennen (MARKO 1971, KEIDEL 1973).

Können wegen mangelnder Erfahrung, fehlender Adaption oder aus organischen Gründen keine Assoziationen gebildet werden, entstehen anstelle bewußter Wahrnehmungen nur bedeutungslose Empfindungen. Man kennt diese Erscheinung in der Neurophysiologie. Eine Ausschaltung der sogenannten Assoziationsfelder im sensorischen System hat Wahrnehmungsstörungen zur Folge, und zwar fehlt die Fähigkeit, die Sinneseindrücke, die empfunden werden, zu erkennen (Agnosie). Agnosien können sich beim Menschen für verschiedene Sinnesmodalitäten entwickeln. Wird z.B. das akustische Assoziationsfeld (im linken Temporallappen) zerstört, so geht u.a. das Sprachverständnis verloren. Obwohl der Betroffene noch hören kann, bleibt ihm die Bedeutung des Signals verborgen. Es ist allerdings nicht bekannt, ob sich ebenso die Lokalisationsfähigkeit unterbinden läßt (ein derartiger physiologischer Nachweis der Ortsassoziation wäre sehr aufschlußreich).

Die Bedeutung von Assoziationsprozessen für bewußte Wahrnehmungen führt auf eine sinnvolle Möglichkeit, die Begriffe „Empfindung“ und „Wahrnehmung“ terminologisch zu trennen.

Definition :

Empfindungen sind die durch Reize ausgelösten, nicht weiter gliederbaren Sinnesereignisse, die sich gegenüber Lernvorgängen und bewußten oder unbewußten Interpretationen invariant verhalten; sie kommen nicht durch Assoziationen zustande.

Definition :

Wahrnehmungen sind die durch Reize ausgelösten Sinnesereignisse, die infolge der Sinneserfahrung der Außenwelt zugeordnet auftreten, und die deshalb durch Lernvorgänge und bewußte oder unbewußte Interpretationen beeinflußt werden können; sie kommen durch Assoziationen zustande.

Aus dieser Abgrenzung folgt für die Entwicklung von Perceptionsmodellen, daß grundsätzlich geklärt sein sollte, ob ein Empfindungs- oder Wahrnehmungsmodell den Prozeß beschreiben soll bzw. kann.

Das Grundproblem bei der Untersuchung von Wahrnehmungsvorgängen ist damit die erforderliche Abgrenzung. Hier liegen Fehlerquellen, weil ohne Kenntnis des gesamten Zusammenhanges nicht entschieden werden kann, ob oder mit welcher Einschränkung aus dem Wahrnehmungsprozeß bestimmte Teilbereiche herausgelöst beschrieben werden können.

Es ist mit Vorbehalt wohl möglich, das räumliche Hören abgetrennt von der visuellen Wahrnehmung zu betrachten. Doch wie läßt sich begründen, das Richtungshören abgetrennt vom Entfernungshören zu betrachten? '

Richtung und Entfernung sind nur Koordinaten des Hörereignisortes; es gibt keine Richtung ohne Entfernung. Ein Modell für das Richtungshören ist kein Wahrnehmungsmodell, es beschreibt deshalb nicht zwangsläufig eine spezielle Funktion des Gehörs beim räumlichen Hören. Ebenso fragwürdig ist die Untersuchung der Lokalisation mit Tönen: wie könnte das Gehör die Entfernung einer Schallquelle, die einen reinen Ton abstrahlt, bestimmen (vgl. 4.2.4)?

Bei dem zu beschreibenden Lokalisationsmodell wird davon ausgegangen, daß Richtung und Entfernung untrennbare Größen der räumlichen Wahrnehmung sind.

Auffällig ist, daß auf dem Gebiet der visuellen Wahrnehmung viele echte Wahrnehmungsmodelle bekannt sind, dagegen für das Hören kaum. Das ist aus neurophysiologischer und informationstheoretischer Sicht nicht einzusehen, denn hier bestehen für das Auge und das Ohr, in ihrer Eigenschaft als Nachrichtenempfänger, keine prinzipiellen Unterschiede. Aber es ist aus zwei Gründen verständlich: Erstens besteht für technische Anwendungen der visuellen Wahrnehmungsmodelle (Datenreduktion durch geeignete Quellenkodierung für die Bildübertragung, beispielsweise Nachbildung von Mustererkennungsprinzipien mit Hilfe von Klassifikationsprozessen oder adaptiven Filtern) aus kommerziellen Gründen ein wesentlich größeres Interesse. Zweitens sind Mustererkennungs- und Assoziationsprinzipien beim Sehen offensichtlicher vorhanden als beim Hören.

Zwei Wahrnehmungsmodelle, je eines aus dem visuellen und aus dem akustischen Bereich, sollen an dieser Stelle kurz umrissen werden, weil sie Mechanismen des neuen Lokalisationsmodells enthalten.

Als Nachbildung des visuellen Systems wurde von MARKO 1974, 1978 ein systemtheoretisch orientiertes Modell, das sog. "Schichtenmodell" für die Mustererkennung vorgeschlagen (Bild 14).

Die „Schicht“ soll eine Neuronenschicht symbolisieren, auf der Erregungsmuster zu denken sind. Die Schraffierung der Schicht soll andeuten, daß am Ausgang Schwellenelemente vorhanden sind, so daß nur überschwellige Signale fortgeleitet werden. Systemtheoretisch entspricht die Anordnung einer mehrstufigen Schwellwertlogik. Die durch die Schwellenelemente gegebene Nichtlinearität ist entscheidend für den Klassifikationsprozeß. In den einzelnen Stufen werden örtliche Filterungen durchgeführt (Richtungsfiler, Ecken-Kanten-Detektion), durch die folgende nichtlineare Verzerrung (z.B. Maximum-Detektion) erfolgt die Klassifikation. - Bemerkenswert an diesem Klassifikationsmodell ist das Stufenprinzip:

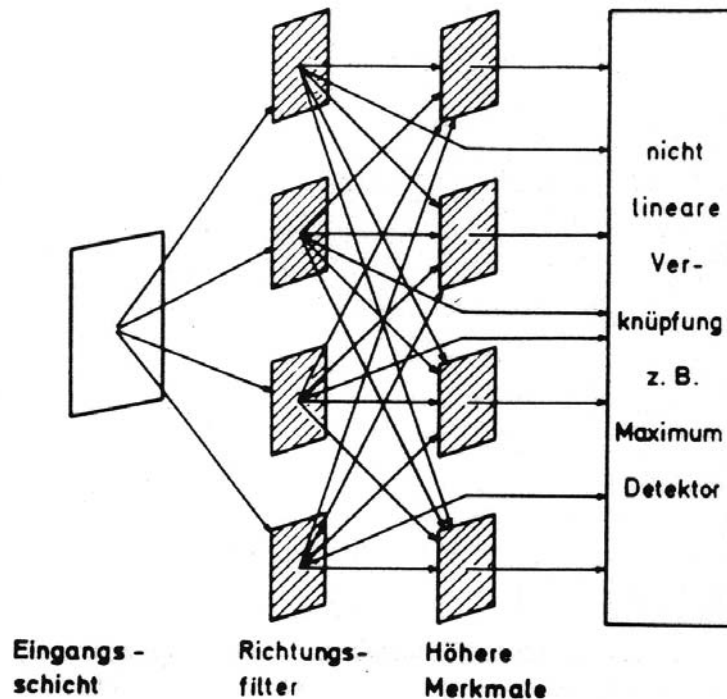


Bild 14 :

Schichtenmodell für die Mustererkennung mit örtlichen Filterungen in den einzelnen Stufen und folgende nichtlineare Verrechnung (nach MARKO 1978)

Die Mustermerkmale werden nacheinander diskriminiert und weitergeleitet, sie ergänzen sich nach Durchlaufen aller Schichten zum vollständigen Muster. Dies ist auch ein Prinzip des Assoziationsmodells.

Ein konsequentes Wahrnehmungsmodell für das Hören stellt das hörpsychologisch orientierte Lokalisationsmodell von PLENKE 1973 dar, das vermutlich eine umfassende Erklärung der Im-Kopf-Ortung zulässt (Bild 15).

Es enthält einen Kurzzeit- und Langzeitspeicher und einen Reizverarbeitungsmechanismus, welcher gespeicherte Reizmuster mit aktuellen Reizmustern vergleicht. Die Reizverarbeitung führt dann nicht zur Lokalisation (außerhalb des Kopfes), wenn entweder der Kurzzeitspeicher keine oder (noch) falsche Informationen über Schallquellen und Darbietungsort enthält, oder wenn die Reize so geartet sind, daß „sie keinem im Langzeitspeicher enthaltenen Reizmuster zugeordnet werden können“.

MODELL ZUR LOKALISATION (RICHTUNG u. ENTFERNUNG)

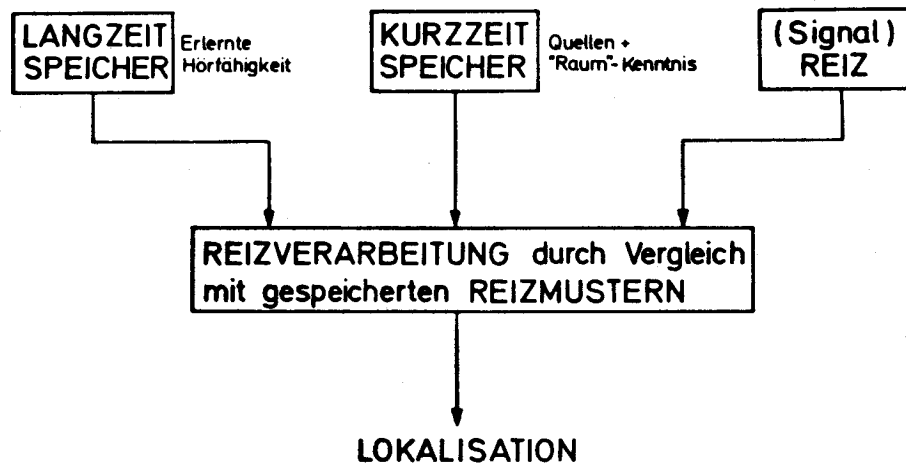


Bild 15:

Lokalisationsmodell zu Erklärung der Im-Kopf-Ortung (nach PLENGE 1973)

Bemerkenswert daran ist, daß die Lokalisation auf einen Lernprozeß zurückgeführt wird und dabei sowohl dem Kurzzeitgedächtnis als auch dem Langzeitgedächtnis eine spezielle Bedeutung zukommt. Der Ansatz „Reizverarbeitung durch Vergleich mit gespeicherten Reizmustern“ ist im Assoziationsmodell enthalten, die beschriebene „assoziativ gesteuerte Mustererkennung“ läßt sich als dessen Weiterentwicklung ansehen.

3.2.2 Die Wirkungsweise des Assoziationsmodells

Die vorangegangenen Überlegungen führen auf das folgende Funktionsprinzip des Assoziationsmodells (Bild 16).

Es umfaßt neben der peripheren Stufe, in der die Ohrsignale zunächst mit Hilfe von Filterbänken im Bereich etwa konstanter relativer Bandbreite spektral zerlegt werden (vgl. ZWICKER / FELDKELLER 1967, DUIFHUIS 1972, BLAUERT 1974, 1978), die beiden zentralen Verarbeitungsstufen „Ortsassoziationsstufe“ und „Gestaltassoziationsstufe“. Jeder der beiden Verarbeitungsprozesse geschieht auf dem Wege einer assoziativ gesteuerten Musterselektion: bestimmte Ohrsignale lösen nach der peripheren Verarbeitung in der ersten zentralen Stufe eine Ortsassoziationsstufe und in der höhergelagerten Stufe eine Gestaltassoziationsstufe aus. Beide Stufen bestimmen stets gemeinsam die Höreigenschaften.

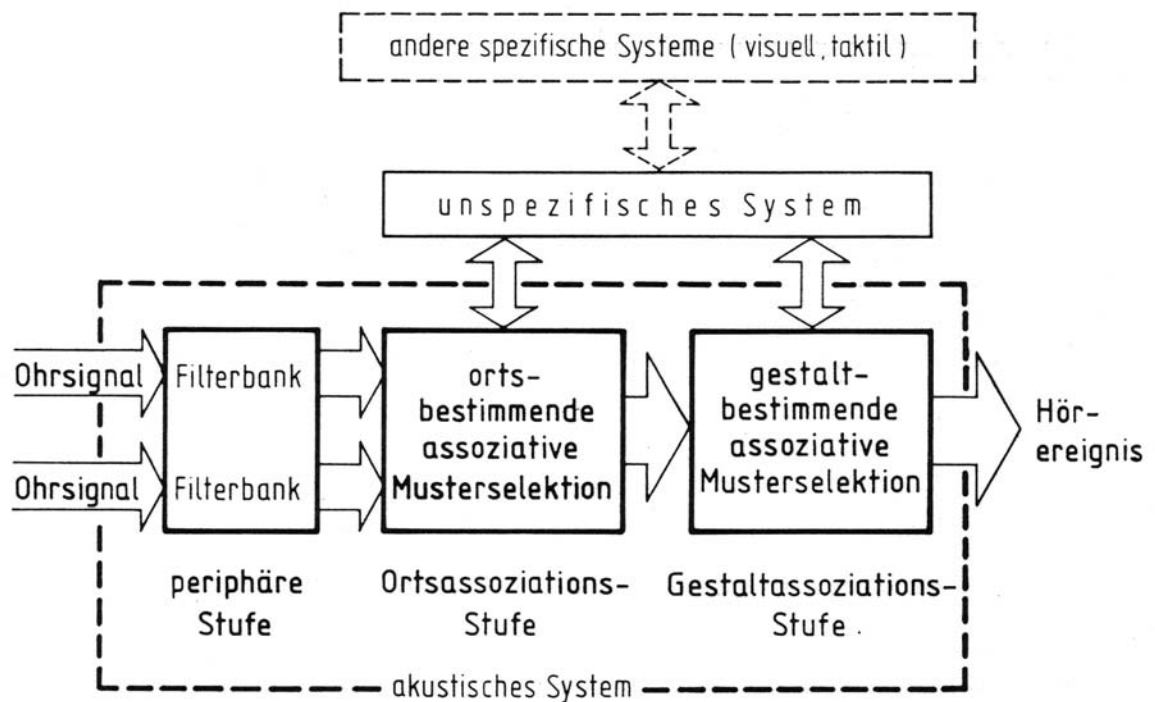


Bild 16 :

Das Funktionsprinzip des Assoziationsmodells

Die konsequente Unterscheidung der beiden Reizauswertungsstufen entspricht völlig den zwei elementaren Bereichen der Hörerfahrung: Die empfangenen Ohrsignale sind zurückzuführen auf die zwei voneinander unabhängigen, stets paarweise auftretenden Schallquelleneigenschaften „Ort“ und „Signal“.

Beide zentralen Auswertungsstufen enthalten deshalb auch die im Prinzip gleichen Verarbeitungsmechanismen. Ebenso wie der für die Ortsassoziationsstufe bereits beschriebene Mechanismus zur Lokalisationsreizselektion enthält die Gestaltassoziationsstufe einen Mechanismus zur Selektion der Gestalt.

Es wird angenommen, daß die Funktion des akustischen Assoziationsystems von einem sogenannten "unspezifischen System" im Sinne einer Assoziationslenkung beeinflusst wird (vgl. 3.1.2). (In der Neurophysiologie weiß man, daß dieses „Retikulär-system“ mit allen Bereichen des Großhirns in Verbindung steht und man vermutet, daß es eine Koordination der Erregungsverarbeitung, beispielsweise der Verarbeitung akustischer und optischer Erregungen, sowie eine bewußtseins- und aufmerksams-abhängige Erregungsauswahl bewirkt, vgl. z.B. CASPERS 1973). Beide Verarbeitungsstufen des akustischen Systems sind Bestandteil des Kurzzeitgedächtnisses und des Langzeitgedächtnisses; sie wirken im Sinne der für den Wahrnehmungsvorgang notwendigen Informationsreduktion.

Die Eigenschaft der Ortsassoziationsstufe wurde bereits in Abschnitt 3.1.3 dargestellt. Die Gestaltassoziationsstufe hat die Eigenschaft, einen empfangenen Reiz unabhängig von seiner räumlichen Information zu verarbeiten. Diese Stufe repräsentiert alle Mechanismen, die für eine inhaltliche Wahrnehmung des Reizes erforderlich sind, und deren Teilbereiche für eine Vielzahl unterschiedlicher Hörphänomene verantwortlich sind. Hierzu gehören Mechanismen der Signalverschmelzung ebenso wie der Erkennung und Bewertung von Musik und Sprache.

Von Bedeutung für das räumliche Hören sind im Assoziationsmodell die Gesetzmäßigkeiten der binauralen Signalerkennung (BMLD und BILD, siehe BLAUERT 1974, S. 206 ff), die der Gestaltassoziationsstufe zugeschrieben werden (vgl. Abschn. 5). Entsprechende Modelle, z.B. das "Akkumulationsmodell" von SCHENKEL 1967, das "EC-Modell" von DURLACH 1963, 1972, oder das "Korrelationsmodell" von OSMAN 1971, sind also der Lokalisationsreizelektion nachgeschaltet.

Das Modell zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen von TERHARDT 1972 läßt sich besonders gut mit der assoziativen Verarbeitung der Gestaltassoziationsstufe vereinbaren. Es basiert darauf, daß

„... das menschliche Gehör den Unterschied zwischen harmonischen und nicht-harmonischen Klängen von Natur aus nicht kennt.. 'Im natürlichen' Zustand des Gehörs ist jeder Klang ein kompliziertes Muster von Spektraltonhöhen und empfundenen Schallfluktuationen. ... Mit Hilfe der angelernten Kenntnis der Tonhöhenbeziehungen zwischen harmonisch verwandten Tönen und der empfundenen Frequenz der Schallfluktuationen ordnet das Gehör jedem dargebotenen Klang eine tonale Bedeutung (oder deren mehrere) zu. Diese wird als Virtuelle Tonhöhe mehr oder weniger ausgeprägt wahrgenommen.“ (TERHARDT 1972)

Das Assoziationsmodell steht auch mit diesem Modell im Einklang. Die durch die Wirkung der Ortsassoziationsstufe diskriminierten Sendesignale enthalten alle spektralen Informationen; die Wahrnehmung (vgl. Definition auf Seite 32) der Klangfarbe kann im Sinne beider Modellvorstellungen erfolgen.

An dieser Stelle muß auf ein bisher nicht explizit untersuchtes Phänomen bei der Lokalisation hingewiesen werden: Die Klangfarbe eines Hörereignisses erweist sich als weitgehend unabhängig vom Ort eines Schallereignisses, obwohl die Spektren der Ohrsignale sich im starken Maße ortsabhängig verhalten (vgl. z.B. BLAUERT 1974). Eine Versuchsperson, die sich im reflexionsarmen Raum beispielsweise vor einem Lautsprecher, der weißes Rauschen abstrahlt, langsam um 180° dreht, empfindet kaum Klangfarbenänderungen bei zweiohrigem Hören.

Das Phänomen läßt sich mit der Wirkung der Ortsassoziationsstufe leicht erklären: Infolge der Lokalisationsreizselektion gelangt allein das diskriminierte Sendesignal an die Gestaltassoziationsstufe; erst hier erfolgt der Prozess, der zur Klangfarbenwahrnehmung führt.

Wie wirkt das Modell im überlagerten Schallfeld? Dies soll zunächst anhand der Phantomschallquellensituation dargestellt werden.

Es geschieht zweckmäßigerweise mit Hilfe von „Impulsdiagrammen“, welche die binauralen Zeitmerkmale auf einfache Weise wiedergeben. Eine Berechtigung dieser Darstellung sei mit der bekannten Hypothese gegeben, daß das Gehör jedes Ohrsignal zunächst ähnlich einer Autokorrelationsanalyse auswertet (z.B. LICKLIDER 1951), allerdings für schmale Frequenzbänder separat (z.B. ZWICKER / FELDKELLER 1967, DUIFHUIS 1972, BLAUERT 1974, 1978). Die relative Lage der Maxima gibt dann die interaurale Zeitdifferenz je Frequenzband wieder (vgl. Abschn. 4.1). - Unter der Vereinfachung, daß die interauralen Zeitdifferenzen, welche von der Schalleinfallsrichtung herrühren, frequenzunabhängig sind, soll ein Impulspaar A_L / A_R die Zeitmerkmale, die von einer diskriminierbaren, ausreichend breitbandigen Schallquelle A herrühren, repräsentieren (Bild 17).

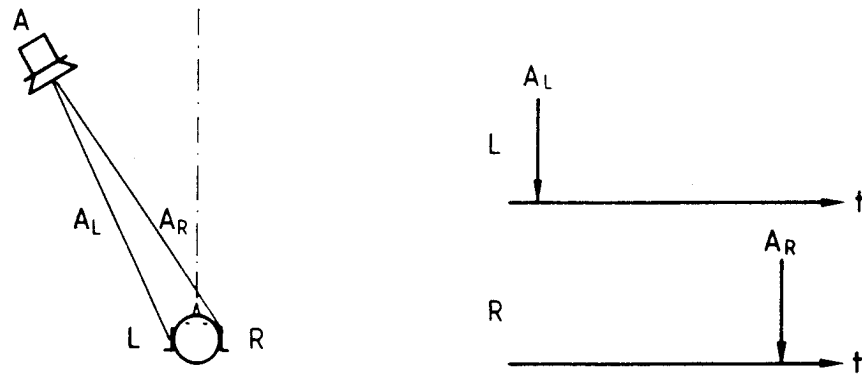


Bild 17 :

Darstellung der binauralen Zeitmerkmale eines Schallereignisses

Umgekehrt ist das Diagramm entsprechend der hypothetischen Assoziationsleistung des Gehörs folgendermaßen zu interpretieren: Enthalten die Ohrsignale, welche diese Zeitmerkmale tragen, genau „korrespondierende“ spektrale Eigenschaften, so lösen die Ohrsignale eine Ortsassoziation aus. Korrespondierende Zeit- und spektrale Merkmale liegen vor, wenn sie von einer bestimmten Schallquelle an einem bestimmten Ort herrühren können.

In der Phantomschallquellsituation könnte das Assoziationsmodell dann auf folgende Weise wirken (die Diskussion folgt in Abschn. 4):

Die Ortsassoziationsstufe vollzieht auf der Grundlage assoziativ gesteuerter Mustererkennung die Lokalisationsreizselektion. Sie liefert der Gestaltassoziationsstufe entsprechend Bild 18 a zwei getrennte Reizantworten A' und B', welche die Sendesignalmerkmale der Schallquelle A bzw. B enthalten. Die Gestaltassoziationsstufe verarbeitet die Reizantworten A' und B' in einem Prozeß, der zur Hörereignisgestalt führt: Erst an dieser Stelle verschmelzen die beiden Reizantworten zu einer einzigen Reizantwort, weil die (verschiedenen) räumlichen Informationen hier nicht ausgewertet werden, sondern die (identischen) Informationen der Sendesignale. Sofern beide Lautsprecher hinreichend ähnliche Signale abstrahlen, tritt in dieser Stufe der Verarbeitung eine vollständige Verschmelzung auf. Es gibt deshalb nur ein Hörereignis, also auch nur einen gemeinsamen Hörereignisort, den Ort der Phantomschallquelle.

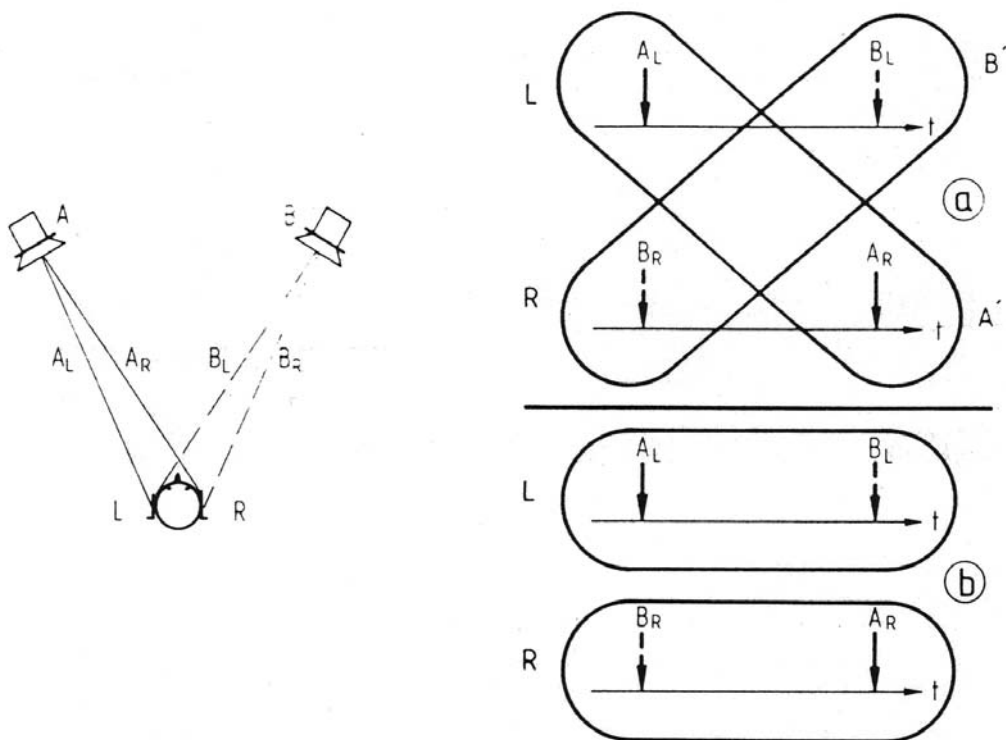


Bild 18 :

Auswertung der Ohrsignale in einer Phantomschallquellsituation

a) Assoziationsprinzip

b) Summenlokalisationsprinzip

Mit der hypothetischen Ortsassoziation ist das Gehör in der Lage, aus den überlagerten Schallfeldern $A_L + B_L$ und $B_R + A_R$ diejenigen Anteile „wiederzufinden“, die von je einem Lautsprecher herrühren. Die Anteile A_L / A_R und B_L / B_R lösen wegen korrespondierender Zeit- und spektraler Merkmale je eine Ortsassoziation aus. Im Gegensatz dazu ist in Bild 18 b das Summenlokalisationsprinzip dargestellt. Man erkennt den Unterschied zum Assoziationsprinzip: Die Summensignale $A_L + B_L$ und $B_R + A_R$ werden ausgewertet; sie enthalten die spektralen Veränderungen infolge des vorhandenen Kammfilters (vgl. Abschn. 2.2.1).

Offenbar gibt das Assoziationsmodell eine plausible Erklärung für die Unwirksamkeit des Kammfiltereffektes in der Phantomschallquellsituation - vermutlich ist das die einzig mögliche Erklärung.

Im folgenden Abschnitt soll das Assoziationsmodell anhand spezieller Hörphänomene, die bei bestimmten Konstellationen des überlagerten Schallfeldes auftreten, diskutiert werden.

4. Die Lokalisation im überlagerten Schallfeld - Diskussion des Assoziationsmodells

Das im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Lokalisationsmodell sagt aus, daß das Gehör mit Hilfe seiner Assoziations-eigenschaften in der Lage ist, gleichzeitig wenigstens zwei Schallereignisse zu diskriminieren, auch dann, wenn sich diese Schallereignisse lediglich hinsichtlich ihrer räumlichen Merkmale unterscheiden. Die hypothetische Abgrenzung der Orts- und Gestaltassoziationsstufe, dazu die Annahme, daß beide Stufen infolge einer assoziativen Signalverarbeitung eine spezifische Musterselektion vornehmen, bilden eine mögliche Grundlage für die Erklärung der Leistungsfähigkeit unseres Gehörs im überlagerten Schallfeld.

Geht man davon aus, daß beide Assoziationsprozesse nur aufgrund verschiedener gespeicherter Merkmalsmuster unterschiedlich wirken, so kann von den Fähigkeiten der Gestaltassoziationsstufe in bestimmten Grenzen (vgl. Abschn. 4.1) geschlossen werden auf die Fähigkeiten der Ortsassoziationsstufe: Die Fähigkeit der Gestaltassoziationsstufe beispielsweise, zwei (oder mehr) Schallereignisse auch bei identischer räumlicher Eigenschaft gleichzeitig diskriminieren zu können, entspricht der hypothetischen Fähigkeit der Ortsassoziationsstufe, zwei (oder mehr) Schallereignisse bei identischer Gestalteeigenschaft gleichzeitig diskriminieren zu können.

Die Grenzen der Lokalisationsreizselektion sind aus informationstheoretischer Sicht erreicht, wenn die Informationsreduktion, die bei der assoziativen Signalverarbeitung erreicht wird, optimal genutzt wird. Sie sollen im Rahmen dieser Arbeit aber nur in Hinblick auf die gleichzeitige Diskriminierbarkeit von **zwei** bestimmten Schallereignissen beliebiger räumlicher Konstellation näher untersucht werden.

4.1 Grenzen der Lokalisationsreizselektion

Die hypothetische Lokalisationsreizselektion im Schallfeld von zwei Schallquellen läßt sich nach Abschnitt 3.1 auffassen als Wirkung eines adaptiven Filters, das die räumliche Dekodierung entsprechend der Gleichungen (5) und (6) vornimmt, sofern der entsprechende Mustererkennungsprozeß die für die Steuerung des Filters notwendige Information liefern kann.

Es ist nun zu überprüfen, ob und mit welchen Einschränkungen eine Lokalisationsreizselektion angenommen werden kann. Für die Abschätzung der Grenzen sollen die beiden zugrunde gelegten Mechanismen, adaptives Filter und assoziative Mustererkennung, herangezogen werden.

Als Voraussetzung für die räumliche Dekodierung gilt, daß eine ausreichende Mustererkennung stattfinden kann. Deshalb muß zunächst ein zweckdienliches Signalmuster angegeben werden, mit dessen Hilfe sich die Möglichkeit der Muster-

erkennung nachweisen läßt. Hierzu wird entsprechend vieler bekannter Hörtheorien das Gehör als Korrelationsempfänger aufgefaßt (vgl. LICKLIDER 1951, SAYERS / CHERRY 1957, SCHREIBER 1965, GRUBER 1967, OSMAN 1971, SCHROEDER 1975, BLAUERT 1974, 1978).

Es wird angenommen, daß die Ohrsignale zunächst mit Hilfe einer Filterbank in Bereiche etwa konstanter relativer Bandbreite spektral zerlegt werden (vgl. ZWICKER / FELDKELLER 1967, DUIFHUIS 1972, BLAUERT 1974). Die am Ausgang der Filter anliegenden Signale werden sowohl einer Kurzzeit-Autokorrelationsanalyse der Form

$$\Phi(\tau) = \overline{x(t) \cdot x(t-\tau)} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t-\tau) dt$$

als auch einer Kurzzeit-Kreuzkorrelationsanalyse der Form

$$\Phi_{LR}(\tau) = \overline{x_L(t) \cdot x_R(t-\tau)} = \frac{1}{T} \int_0^T x_L(t) \cdot x_R(t-\tau) dt$$

unterworfen, so daß in den diversen Funktionen von τ das auswertbare Muster vorliegt. Es wird im Folgenden das „**binaurale Korrelationsmuster**“ genannt.

Das binaurale Korrelationsmuster liefert sowohl monaurale als auch interaurale Zeit- und spektrale Informationen. Eine entfernte Schallquelle erzeugt im binauralen Korrelationsmuster Maxima, deren relative Lagen, Höhen und Breiten deshalb den Hörereignisort bestimmen können. Es läßt sich daraus eine Unterscheidbarkeit verschiedener ortsbestimmender Muster, die im überlagerten Schallfeld gleichzeitig vorliegen, ableiten: sie sei beschrieben mit der Unterscheidbarkeit der Maxima im Verzögerungsbereich τ .

Bildet man beispielsweise die Autokorrelationsfunktion eines Ohrsignals, das in der Phantomschallquellsituation auftritt, wenn beide Lautsprecher (Stereo-standardaufstellung) kohärentes weißes bandbegrenztes Rauschen ($\Delta f = 10$ kHz) abstrahlen, so findet man zwei ausgeprägte Maxima im Abstand $\tau = 250 \mu s$, wie sie in Bild 19 skizziert sind (nur positive τ -Achse).

Der minimale Abstand der Maxima, der für ihre Unterscheidung notwendig ist, sei die Grenzauflösung τ_{Smin} . τ_{Smin} vermindert sich mit der Breite $\Delta\tau$ der Maxima. Wegen

$$\Delta\tau = \frac{1}{2\Delta f}$$

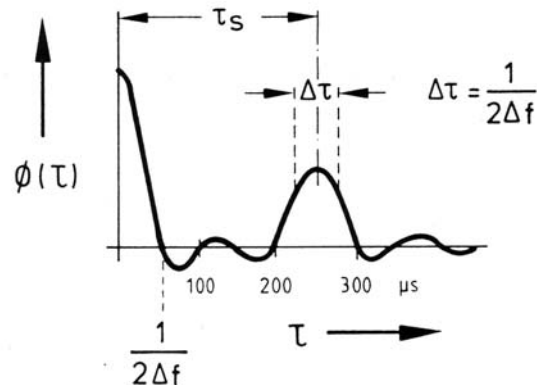


Bild 19 :

AKF eines Ohrsignals, stereofone Lautsprecherstandardaufstellung,
Lautsprechersignale : Bandpaßbräuschen $f_0 = 10 \text{ kHz}$

existiert also eine minimale Signalbandbreite, die für eine ausreichende Mustererkennung erforderlich ist. Würde man annehmen, daß zwei Maxima noch diskriminiert werden können, wenn ihr Abstand τ_s nicht kleiner ist als ihre Breite $\Delta\tau$, wenn also gilt

$$\tau_{\text{Smin}} = \Delta\tau$$

dann ergäbe sich für die Phantomschallquellensituation mit $\tau_s = 250 \mu\text{s}$ für Signalbandbreiten unterhalb

$$\Delta f = \frac{1}{2\tau_s} = \frac{1}{2 \cdot 250 \mu\text{s}} = 2 \text{ kHz}$$

schon eine gestörte Mustererkennung. Jedoch berücksichtigt die geschätzte Grenzauflösung noch nicht die Wirkung einer assoziativen Signalverarbeitung. In dem Maße, wie mit Hilfe der gespeicherten, binauralen ortsbestimmenden Muster verdeckte Anteile eines aktuellen Musters erkannt werden können (vgl. Abschn. 3.1.2), gelingt die Lokalisationsreizselektion auch bei entsprechend geringerer Bandbreite.

Eine weitere Einschränkung für die Wirksamkeit der Lokalisationsreizselektion leitet sich ab aus der maximalen Verzögerungszeit τ_{max} der Korrelationsprozesse. Die in der Literatur zu findenden Werte variieren stark und liegen etwa zwischen 2 und 20 ms. BLAUERT 1974 schließt auf eine begrenzte Verzögerungszeit, weil die seitliche Auslenkung des Hörereignisses bei Überschreitung einer bestimmten interauralen Phasenlaufzeit verschwindet (BLODGETT et al. 1956).

Nimmt man an, daß ein τ_{\max} existiert, so können kohärente Signalanteile nur dann zu unterschiedlichen Lokalisationsreizen führen, wenn ihr Laufzeitunterschied $\Delta t < \tau_{\max}$ ist. Zwei Signale, deren Laufzeitunterschied τ_{\max} überschreitet, bewertet das Gehör als vollständig inkohärent, ihre Summe ergibt in der Autokorrelationsfunktion nur ein Maximum. Die räumliche Dekodierung ist dann nicht mehr möglich, sofern die Signale hinreichend ähnlich sind.

Die Hypothese läßt sich leicht mit einem modifizierten Experiment nach Bild 3, Abschnitt 2.2 überprüfen: Die Klangfarbe ändert sich bei seitlicher Kopfbewegung auch bei zweiohrigem Hören, wenn ein Laufzeitglied, z.B. 3 ms, in einen Kanal eingefügt wird. Offenbar ist τ_{\max} ...kleiner 3 ms, so daß beide Lokalisationsreize im τ -Bereich untrennbar zusammenfallen; damit sind die resultierenden Kammfilterwirkungen an den Ohren hörbar (vgl. Abschn. 4.3.1).

Liegt ein hinreichend breitbandiges Signal vor, so besteht eine dritte Einschränkung für die Wirksamkeit der Lokalisationsreizselektion, und zwar bei den spektralen Anteilen unterhalb einer kritischen Frequenz f_k .

In Abschnitt 3.1.1 wurde angegeben, daß unter bestimmten Bedingungen eine inverse Matrix „ M^{-1} “ existiert, welche die Verknüpfung der Ohrsignale, die infolge der Matrix M auftritt, wieder vollständig aufhebt. Voraussetzung dafür ist nicht nur der assoziative Mustererkennungsprozeß nach Abschn. 3.1.2, der die für die Steuerung der Matrix „ M^{-1} “ notwendige Information liefert. Die dritte Einschränkung ergibt sich vielmehr bei näherer Betrachtung der Matrix „ M^{-1} “:

Setzt man eine optimal an die Schallquelle angepaßte Dekodiermatrix nach Bild 11 voraus (liegen also ausreichend breitbandige Sendesignale zur Mustererkennung vor, z.B. weißes Rauschen), dann läßt sich die Funktion dieser Matrix „ M^{-1} “ numerisch beschreiben. Es läßt sich zeigen, daß das System für tiefe Frequenzen keine eindeutige Aussage liefert, weil die akustischen **Obertragungsfaktoren** bei Frequenzen, die unterhalb der kritischen Frequenz f_k liegen, gegen eins gehen.

Der Sachverhalt deckt sich mit der Feststellung, daß die tieffrequenten Anteile eines Schallereignisses sehr wenig zur Bildung des Hörereignisortes beitragen. Beispielsweise verhält sich der Hörereignisort bei Lautsprecherwiedergabe unabhängig vom Ort des beteiligten Tieftonlautsprechers, wenn die Übergangsfrequenz der Weiche unterhalb etwa 250 Hz liegt (vgl. Abschn. 4.2.2).

Zusammenfassend soll angenommen werden, daß die zwei Lokalisationsreize, die von den Lautsprechern einer stereofonen Anordnung herrühren und eine "Phantom-schallquelle" verursachen, selektiert werden können. Einschränkend gilt:

1. Die Zeitdifferenz der überlagerten Signale darf bei gegebener Bandbreite Δf einen kritischen Wert Δt nicht unterschreiten. Umgekehrt darf bei gegebenem Δt die Bandbreite einen kritischen Wert Δf nicht unterschreiten. In der Stereo-standardaufstellung ist $\Delta f < 2$ kHz (Schätzwert).
2. Die Zeitdifferenz Δt der überlagerten Signale darf einen bestimmten Wert nicht überschreiten.
3. Unterhalb einer kritischen Frequenz f_K ist die Lokalisationsreizselektion nicht mehr möglich. Es ist $f_K < 500$ Hz (Schätzwert).

4.2 Zwei kohärente Schallquellen

Innerhalb des qualitativ angegebenen Gültigkeitsbereichs wird für die Phantomschallquellensituation eine Lokalisationsreizselektion angenommen. Es soll nun gezeigt werden, daß sich mit dieser Hypothese die spektralen und zeitlichen Eigenschaften der Ohrsignale mit der Richtung, Entfernung, Elevation, Ausdehnung und Klangfarbe des Hörereignisses vereinbaren lassen.

Auch die Grenzen der Lokalisationsreizselektion müssen mit den beobachtbaren Hörereigniserscheinungen übereinstimmen, wenn das Assoziationsmodell in der beschriebenen Weise die Funktion des Gehörs bei der Lokalisation im überlagerten Schallfeld von zwei kohärenten Sendern beschreiben soll. Wie sich zeigen wird, trifft das tatsächlich für verschiedene Phantomschallquellenphänomene zu. Dazu gehören:

1. die Lokalisation bei tiefen Frequenzen
2. die Klangfarbe der Phantomschallquelle
3. die Lokalisation seitlicher Phantomschallquellen
4. die Hörereignisse bei schmalbandigen Signalen.

Im Folgenden wird das Assoziationsmodell anhand verschiedener bekannter Phantomschallquellenerscheinungen und der Ergebnisse des Hörversuchs (Abschn. 2.2.2) diskutiert.

4.2.1. Die Elevation und Entfernung der Phantomschallquelle

Der Phantomschallquellenort ist also möglicherweise nicht bestimmt von den resultierenden Summensignalen an den Ohren, sondern eher von den Lokalisationsreizen, die die Lautsprecher signale getrennt hervorrufen. Weil die Verschmelzung nach erfolgter räumlicher Dekodierung geschieht, sei der Phantomschallquellenort eindeutig bestimmt mit dem Mittelwert der Entfernung und Richtung der diskriminierten Orte. Die Entfernungswahrnehmung verhält sich aus diesem Grunde ungestört vom Kammfiltereffekt, die linearen Verzerrungen (vgl. Abschnitt 2.2.1) verursachen weder eine Im-Kopf-Ortung noch verhindern sie die Vorn-hinten-Orientierung (THEILE 1975).

Aus der Selektion der Lokalisationsreize erklärt sich ebenfalls der Elevationseffekt. Werden die beiden Lautsprecher symmetrisch zur Medianebene auf einem Kreis in der Horizontalebene mit der Versuchsperson als Mittelpunkt bewegt, so bewegt sich der Hörereignisort auf der Medianebene mit der diskriminierten mittleren Entfernung. Der Mittelwert der Entfernung und Richtung liegt auf einem Kreis in der Medianebene. Der Elevationswinkel resultiert aus Klangfarbenmerkmalen, die infolge der Lokalisationsreizselektion von der Kammfilterwirkung nicht beeinflusst sind.

Das beweist die in Abschnitt 2.2 beschriebene Tatsache, daß äquivalente Intensitäts- und Zeitdifferenzen zwischen den Lautsprechersignalen (die Lautsprecher befinden sich auf der Ohrenachse), keine unterschiedlichen Elevationen erzeugen, obwohl im interessierenden Frequenzbereich um 8 kHz (vgl. BLOOM 1977) spektrale Unterschiede auftreten. Bewegt man den Kopf auf der Ohrenachse aus der Mitte heraus um wenige Zentimeter in Richtung eines Lautsprechers, dann ändert sich das für die Elevation wichtige Spektrum ganz verschieden von der Änderung, die eine entsprechende Drehung des Kopfes vor einer Ersatz-Realschallquelle verursachen würde.

Das wirksame Spektrum für die Elevation ist nicht das resultierende Spektrum der Ohrsignale, sondern das mittlere Spektrum der beiden Ohrsignale, die die Lautsprecher einzeln erzeugen. Wenn infolge der Lokalisationsreizselektion der Phantomschallquellenort hinsichtlich Entfernung e und Horizontalrichtung φ festliegt, dann liegt der Ort dadurch auf einem Kreisbogen mit dem Radius e , dessen Ebene senkrecht auf der Horizontalebene steht und die Ausrichtung φ aufweist.

Der Ort auf dem Kreisbogen ist bestimmt durch das mittlere Spektrum; er liegt so, daß die Klangfarbenmerkmale möglichst genau von einer Ersatzschallquelle herrühren können.

Diese Vorstellung erklärt die Meßergebnisse von DAMASKE 1969/70, der den Elevationswinkel in Abhängigkeit vom Stereobasiswinkel $\Delta\Omega = 2|\Omega_A| = 2|\Omega_B|$ mit Bandpassrauschen 0,65 bis 4,5 kHz als Testsignal bestimmt hat. Er hat im Prinzip eine mit $\Delta\Omega \rightarrow 180^\circ$ ansteigende Elevation $\varepsilon \rightarrow 90^\circ$ festgestellt, obwohl das richtungsbestimmende Band „oben“ im Rauschsignal nicht enthalten ist. Leider macht er keine Angaben über die zugeordneten Hörereignisentfernungen. Das Ergebnis steht im Widerspruch zum Ansatz Summenlokalisierung.

Weiterhin sagt das Assoziationsmodell eine Abhängigkeit der Elevation und Entfernung der Phantomschallquelle von der Bandbreite des Signals voraus. Liegt die Bandbreite unterhalb eines kritischen Werts, so ist die Lokalisationsreizselektion zerstört; die Elevation und Entfernung resultieren dann nicht mehr aus den Spektren, die die Lautsprecher einzeln erzeugen.

Zur orientierenden Überprüfung dient ein leicht durchzuführendes Experiment. Im reflexionsarmen Raum wird kohärentes tiefpaßgefiltertes Rauschen mit $f_0 = 500$ Hz auf das stereofone Lautsprecherpaar gegeben, die Versuchsperson steht vor den Lautsprechern, $\Delta\Omega \approx 150^\circ$. Das Hörereignis tritt dicht vor dem Kopf auf, wie erwartet ist die Entfernungsinformation zerstört (ein einzelner Lautsprecher führt zu einer angemessenen Hörereignisentfernung), die Elevation ist Null. An diesem Ergebnis ändert sich auch nichts, wenn die Versuchsperson sich rückwärts bewegt. Auffällig ist die geringe Ausdehnung des Hörereignisses.

Wird plötzlich der hochfrequente Anteil dem Rauschsignal zugeschaltet, so tritt ein interessanter Effekt auf: im ersten Moment erscheint neben dem tieffrequenten ein zweites, hochfrequentes Hörereignis, klar räumlich getrennt, oberhalb des ersten und unter einer größeren Entfernung. Erst danach verschmelzen die beiden Hörereignisse, das tieffrequente Ereignis wandert nach oben, der resultierende Hörereignisort liegt am Ort des hochfrequenten Ereignisses.

Auch dieses Phänomen, das bisher noch nicht beschrieben wurde, erklärt das Assoziationsmodell. Das Zuschalten der hochfrequenten Rauschanteile bewirkt wegen der erhöhten Signalbandbreite eine deutliche Verbesserung der Mustererkennung, so daß die Merkmale der selegierten Lokalisationsreize die Entfernung und Elevation der Phantomschallquelle bestimmen. Obwohl die Anteile im tieffrequenten Bereich nicht selegerbar sind (vgl. Abschn. 4.1), werden sie der Phantomschallquelle zugeordnet. Dies geschieht offenbar infolge der Assoziationsprozesse.

4.2.2 Die Klangfarbe der Phantomschallquelle

Der nicht selegerbare tieffrequente Bereich macht sich in der Phantomschallquellenklangfarbe ebenfalls bemerkbar. Bei vollständiger räumlicher Dekodierung muß sich die Klangfarbe ergeben aus dem mittleren Spektrum der beiden Ohrsignale, die die beiden Lautsprecher einzeln erzeugen. Ein Klangfarbenvergleich Phantomschallquelle - Realschallquelle, beide in der Medianebene am gleichen Ort mit gleicher Lautheit (Testsignal weißes Rauschen), macht deutlich, daß im tieffrequenten Bereich die Lautsprechersignale nicht vollständig genug diskriminiert werden können, um die Pegelanhebung unterhalb etwa 500 Hz (etwa + 5 dB, vgl. Abschn. 2.2.1, Bild 4 und 5) völlig zu unterdrücken: Jeder der beiden selegierten Lokalisationsreize enthält die tieffrequente Pegelanhebung; die Klangfarbe der Phantomschallquelle ist dunkler als die der Realschallquelle. Auch dies ist eine Bestätigung des Assoziationsmodells.

Weiter soll das Modell anhand der Ergebnisse des Hörversuchs, Abschnitt 2.2.2, diskutiert werden. Das Ziel des Experiments war der Nachweis, daß die Kammfilterwirkung an den Ohren, wie sie in Abschnitt 2.2.1 angegeben ist, die Klangfarbe der Phantomschallquelle nicht in dem Maße beeinflußt, wie es die Summenlokalisations-theorien erfordern.

Gemessen wurde ein inverser Zusammenhang zwischen der Wahrnehmbarkeit von Klangfarbenänderungen und Richtungsänderungen des Hörereignisses, wenn der Kunstkopf vor der Phantomschallquellenanordnung sich seitlich bewegt und im Übertragungssystem unterschiedlich gravierende Fehler eingefügt sind (Testsignale B1 B6).

Dieses Ergebnis wird vom Assoziationsmodell vorhergesagt. Die Lokalisationsreizselektion erfordert eine ausreichende Mustererkennung, die durch Übertragungsfehler mehr oder weniger stark gestört ist. Der Grad der Lokalisationsreizerstörung bestimmt, in welchem Maße die spektralen Veränderungen der Ohrsignale hörbar sind.

Das Teilergebnis für das Testsignal B5 (Abschn. 2.2.2, Punkt 6, Bild 10) macht deutlich, daß die eingefügten Übertragungsfehler eine verminderte Selegierbarkeit der Lokalisationsreize verursachen. Die fehlenden Außenohren am Kunstkopf führen kaum zu Veränderungen der interauralen Pegel- und Zeitbeziehungen sondern im Wesentlichen zu linearen Verzerrungen der Ohrsignale. Diese linearen Verzerrungen setzen die Wahrnehmbarkeit der Richtungsänderungen herab. Das ist nur mit einer graduellen Zerstörung der Lokalisationsreize erklärbar, auch dann, wenn die resultierenden Ohrsignale schon zur Im-Kopf-Ortung führen. Denn sowohl im Lokalisationsexperiment (eine Schallquelle) als auch im Lateralisationsexperiment können lineare Verzerrungen der auftretenden Größenordnung die Wahrnehmbarkeit der Hörereignisrichtung bzw. -auslenkung nicht beeinträchtigen.

Es läßt sich zeigen, daß der interaurale Kohärenzgrad von den Außenohren nur unwesentlich beeinflußt wird; er ist in der Phantomschallquellsituation klein und würde im Prinzip zu einer erhöhten Ausdehnung des Hörereignisortes führen (vgl. JEFFRESS/ BLODGETT/ DEATHERAGE 1962). Nur die spektrale Wirkung der Ohrmuscheln gibt dem Gehör die Möglichkeit, zwei Lokalisationsreize deutlich zu unterscheiden, so daß trotz des gleichbleibend geringen interauralen Kohärenzgrades ein definierter Hörereignisort auftritt.

Interessant an dieser Stelle ist die Tatsache, daß die Lokalisationsreizselektion offenbar auch bei ungestörter Kunstkopfübertragung nicht vollständig gelingt. Im Vergleich zu einer entsprechenden Drehbewegung des Kunstkopfes vor einer Realschallquelle (Punkt 3., Bild 9, Testsignal A1 und C2) ist die Wahrnehmbarkeit der Richtungsänderung geringer. Man könnte daraus schließen, daß das benutzte Kunstkopfsystem noch Abbildungsfehler verursacht, doch sind dazu weitere Hörversuche notwendig. Die Reproduktion einer Phantomschallquelle mit Kunstkopfsignalen erfordert eine sehr hohe Genauigkeit der Ohrsignale, weil die Lokalisationsreizselektion schwieriger ist als im natürlichen überlagerten Schallfeld.

Die Ohrmuschel hat in der Phantomschallquellsituation eine besonders große Bedeutung. Man kann zeigen, daß ihr Einfluß auf die Klangfarbe der Phantomschallquelle größer ist als auf die Klangfarbe der Realschallquelle.

Die Unterdrückung der Klangverfärbung geschieht also abhängig von der Lokalisationsreizselektion. Ist diese zerstört, so wirken die resultierenden Spektren entsprechend des Summenlokalisationsprinzips. Zwischen ungestörter und gestörter Lokalisationsreizselektion gibt es einen stetigen Übergang.

4.2.3 Seitliche Phantomschallquellen

Eine Störung der Lokalisationsreizselektion tritt nicht nur infolge einer Zerstörung der Lokalisationsreize (z.B. bei einohrigem Hören) auf, sondern ebenso in den Fällen, wo die beiden Reize sich im binauralen Korrelationsmuster nicht ausreichend unterscheiden lassen. Bei breitbandigen Signalen geschieht das, wenn die Zeitdifferenz Δt der überlagerten Signale entweder zu groß ist oder zu klein (vgl. Abschn. 4.1).

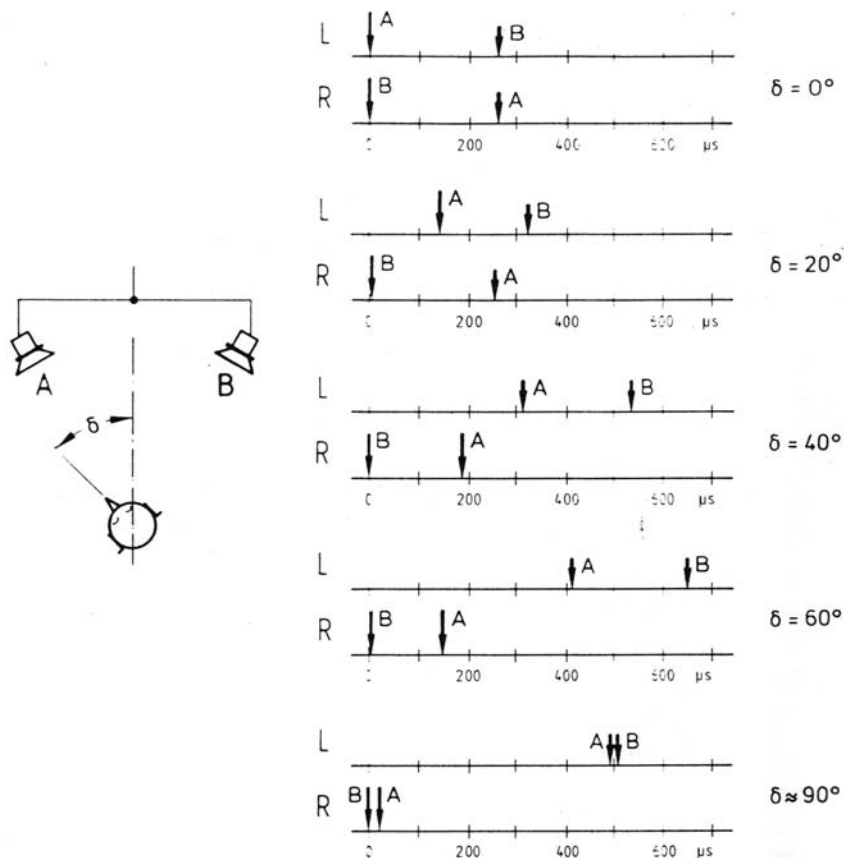


Bild 20:

Die interauralen Zeitmerkmale bei Drehung des Kopfes im überlagerten Schallfeld einer Stereostandaraufstellung

Eine zu kleine Zeitdifferenz Δt liegt beispielsweise bei frontalsymmetrischer Lautsprecheranordnung vor (Bild 20, $\delta = 90^\circ$). An jedem Ohr befinden sich beide Maxima an denselben Stellen; die Lokalisationsreize sind nicht unterscheidbar. Demzufolge verschwindet die Unterdrückung der Klangverfärbung, was experimentell entsprechend Abschnitt 2.2.2, Punkt 5, Bild 9b, Testsignal A4, bestätigt wurde. Weiterhin ist Bild 9b eine mit $\delta \rightarrow 90^\circ$ ansteigende Wahrnehmbarkeit der Klangverfärbung zu entnehmen, was mit dem abnehmenden Δt (Bild 20) übereinstimmt.

Die Phantomschallquellenrichtungen in Abhängigkeit von δ wurde von THEILE / PLENGE 1977 untersucht. Den Ergebnissen läßt sich folgendes entnehmen:

1. Für $\delta = 90^\circ$ befindet sich das Hörereignis entweder am vorderen oder am hinteren Lautsprecher, je nach dem Pegelverhältnis der Lautsprechersignale. Seitliche Phantomschallquellen treten praktisch nicht auf. Dies erklärt das Lokalisationsmodell, wenn man annimmt, daß die Lokalisationsreize wegen der identischen interauralen Zeitdifferenzen bei gleichen Intensitäten nicht diskriminiert werden können, das jedoch bei ungleichen Intensitäten das eine oder andere Spektrum dominiert.
2. Die Lokalisationsunschärfe der Phantomschallquelle nimmt stark zu für $\delta > 60^\circ$. Die Zeitdifferenzen der überlagerten Signale kommen hier in die Größenordnung $\Delta t < 200 \mu\text{s}$ (vgl. Bild 20). Offenbar liegt hier die Verwischungsschwelle der Lokalisationsreize.
3. Mit $\delta \rightarrow 90^\circ$ verharrt die Richtung der Phantomschallquelle nicht in Basismitte der Lautsprecher, sondern verschiebt sich um maximal etwa 10° in Richtung $\varphi = 0^\circ$. Der Effekt steht im Einklang mit der Tatsache, daß bei seitlich versetzter Lautsprecherbasis die Lokalisationsreize nicht gleichzeitig vorliegen. Ein Lokalisationsreiz ist natürlich erst diskriminierbar, wenn er binaural vorhanden ist. Das ist bei dem Signal des Lautsprechers, welcher der Frontalebene näherliegt, später der Fall (Signal B in Bild 20). Das Modell erklärt also die Verschiebung aus der Basismitte mit einer Laufzeitdifferenz der Lokalisationsreize; sie betragen maximal etwa $220 \mu\text{s}$, was nach Meßergebnissen z.B. von WENDT 1963 einer Änderungen der Phantomschallquellenrichtung um $\varphi = 10^\circ \dots 15^\circ$ entspricht (vgl. Abschn. 4.3.1).

4.2.4 Hörereignisse bei schmalbandigen Signalen

Das Assoziationsmodell basiert auf einem Mustererkennungsprozeß, der mit einer assoziativen Reizverarbeitung ermöglicht wird. Die Lokalisation setzt deshalb eine Schallquelle voraus, die die Entfernungswahrnehmung ausreichend gewährleistet (vgl. Abschn. 3.2.1). Dies ist der Fall, wenn spektrale Merkmale des aktuellen Reizes auswertbar sind. Die assoziative Reizverarbeitung erfordert einen hinreichend breitbandigen Reiz.

In der Phantomschallquellensituation findet nur dann eine Lokalisationsreizselektion statt, wenn eine minimale Signalbandbreite vorliegt. Diese Bandbreite leitet sich ab aus der Betrachtung des Gehörs als Korrelationsempfänger; sie reduziert sich möglicherweise unter der Annahme, daß eine assoziative Mustererkennung wirksam ist.

Strahlen die beiden Lautsprecher also schmalbandige Signale ab, dann trifft die Bezeichnung "Summenlokalisierung" den Sachverhalt. Dem Lokalisationsmodell ist zu entnehmen, daß eine Untersuchung der Phantomschallquelle mit reinen Tönen keine Schlüsse auf die Funktion des Gehörs bei der Lokalisation von breitbandigen Schallquellen zuläßt. Selbst die Übertragung dieser Ergebnisse auf die Abbildungsgesetzmäßigkeiten bei Stereophonie ist fragwürdig.

Ein Beispiel dafür stellt der FRANSSEN-Effekt dar (FRANSSEN 1960). Der Lautsprecher A wird mit einem Ton von einigen Sekunden Dauer angesteuert, der mit exponentieller Hüllkurve an- und abklingt [Signal $u_A(t)$] Lautsprecher B erhält ein Signal $u_B(t)$, das so beschaffen ist, daß die Summe $u_A(t) + u_B(t)$ einen Ton mit rechteckiger Hüllkurve ergeben würde. Lautsprecher B gibt also den (breitbandigen) Einschaltvorgang wieder, dagegen Lautsprecher A den von Schaltvorgängen befreiten (schmalbandigen) Ton. Es zeigt sich, daß der Hörereignisort ausschließlich vom Einschaltvorgang bestimmt ist. Das stimmt mit dem Assoziationsmodell überein, wenn man annimmt, daß der Ton keinen Lokalisationsreiz darstellt, sondern wegen fehlender Entfernungsinformation dem vorhandenen Lokalisationsreiz zugeordnet wird. Entsprechend hat WENDT 1964 festgestellt, daß hartgeschaltete Töne sich bei Stereophonie ebenso verhalten wie breitbandige Signale. Sie stehen mit den Hörereignisorten, die er für Dauertöne und Tonimpulse ermittelt hat, in keinem erkennbaren Zusammenhang.

Es gibt keine einheitliche Summenlokalisierungstheorie, die sowohl für Dauertöne (oder Gaußtöne, vgl. BOERGER 1965) als auch für breitbandige Signale richtige Vorhersagen zuläßt. Dies ist nicht möglich, weil in einem Fall lediglich die seitlichen Auslenkungen, verursacht von den resultierenden interauralen Phasendifferenzen, als Richtung des Hörereignisses gewertet werden (durch entsprechende Voreingenommenheit der Versuchsperson, vgl. z. B. JEFFRESS/ TAYLOR 1961, PLENGE 1973). Im anderen Fall selektiert das Gehör zunächst zwei Lokalisationsreize, die erst danach einem Fusionsprozess unterworfen werden.

An dieser Stelle deutet sich schon eine wichtige Erkenntnis an: Entfernte Sender, welche reine Töne abstrahlen, liefern bei fixiertem Kopf im Fernfeld keine Entfernungsinformation. Die resultierenden interauralen Phasen- und Intensitätsbeziehungen sind einer entsprechenden Kopfhörerbeschallung äquivalent.

In beiden Fällen liefert die Ortsassoziationsstufe des Lokalisationsmodells keine räumliche Information, sie wird ohne Wirkung durchlaufen (vgl. Bild 16). Das Zusammenwirken von interauralen Zeit- und Intensitätsbeziehungen unterliegt deshalb in beiden Fällen den gleichen Gesetzmäßigkeiten. Diese Gesetzmäßigkeiten liegen aber in der Wirkung der Gestaltassoziationsstufe begründet (vgl. Abschn. 5).

4.2.5. Hörereignisse bei gegenphasigen Signalen

Weiterhin gibt die Hörereigniskonstellation im Schallfeld gegenphasiger Sendesignale eine Bestätigung des Assoziationsmodells. Sie ist mehrfach für schmal- und breitbandige Signale untersucht worden, in neuerer Zeit z.B. von GARDNER 1969, PLENGE 1972, MATSUDAIRA / FUKAMI 1973, LOY 1978.

LOY 1978 hat die Phantomschallquellenrichtungen für reine Töne nach dem Vorbild von SANDEL / FEDDERSEN / JEFFRESS 1955 rechnerisch dadurch bestimmt, daß aus der resultierenden interauralen Phasendifferenz eine interaurale Phasenlaufzeit abgeleitet wird, welcher entsprechend der Verhältnisse bei der Lokalisation einer Realschallquelle eine bestimmte Hörereignisrichtung zugeordnet ist. Dieses Verfahren ist ebenfalls bei LEAKEY 1959, WENDT 1963, 1965 u. a. angewendet worden. Daraus ergeben sich für Frequenzen unterhalb 2 kHz Hörereignisrichtungen $\varphi > 30^\circ$, also Hörereignisse außerhalb der Lautsprecherbasis (mit abnehmender Frequenz geht $\varphi \rightarrow 90^\circ$). Die Vorhersagen konnte er experimentell mit Gaußtönen bestätigen, doch es war eine sehr hohe Streubreite der Meßwerte festzustellen, die ansteigt, wenn die Pegeldifferenz der Lautsprecher-signale $\Delta L \rightarrow 0$ geht. Für $\Delta L = 0$ war keine Richtungsangabe mehr möglich.

Die Untersuchung gibt keine Auskunft über die Hörereignisentfernungen. Entsprechend des Assoziationsmodells verursachen Gaußtöne keine Ortsassoziationen, weder im Schallfeld einer Realschallquelle noch in der Phantomschallquellsituation. Hier führen die interauralen Signaldifferenzen lediglich zu einer seitlichen Auslenkung, die aufgrund der Versuchsbedingung als Richtung des Hörereignisses gedeutet wird (z.B.: Kenntnis der VP, daß die Schallquelle entfernt steht, Abfrage der Hörereignisrichtung anstelle des Hörereignisortes).

Überraschenderweise decken sich aber diese Ergebnisse mit Messungen anderer Autoren, die breitbandige Testsignale benutzt haben. GARDNER 1969 sowie PLENGE 1972 haben festgestellt, daß das Hörereignis bei Pegelgleichheit der Lautsprecher-signale ($\Delta L = 0$) in der Nähe des Kopfes liegt. Wenn ein Pegelunterschied ($\Delta L \neq 0$) vorliegt, verschiebt sich der Ort des Hörereignisschwerpunktes abhängig von ΔL bis auf Lautsprecherentfernung in einer Richtung außerhalb der Lautsprecherbasis, etwa entsprechend der Ergebnisse von LOY 1978. Charakteristisch daran ist die hohe Lokalisationsunschärfe.

MATSUDAIRA / FUKAMI 1973 haben die Hörereignisrichtung der Phantomschallquelle in Abhängigkeit von der Phasendifferenz Θ der Lautsprecher-signale gemessen; als Testsignale wurden Sprach- und Musikaufnahmen benutzt. Sie geben an, daß bis zu $\Theta \approx 90^\circ$ die Lokalisationsunschärfe klein ist; die Hörereignisrichtung verschiebt sich für $\Theta \rightarrow 90^\circ$ auf $\Theta \rightarrow 25^\circ$. Für noch größere Phasendifferenzen $\Theta \rightarrow 180^\circ$ steigt die Lokalisationsunschärfe stark an; die Zentralwerte der Hörereignisrichtung gehen aber zurück auf $\Theta \rightarrow 0^\circ$. Hörereignisse außerhalb der Lautsprecherbasis treten nicht auf. Die genannten Effekte sind nur dann zu beobachten, wenn die Signale Spektralanteile unterhalb etwa 2 kHz enthalten (BLAUERT 1974). Die niederfrequenten Anteile bestimmen die Hörereignisauslenkung, es findet offenbar keine Verschmelzung der selektierten Lokalisationsreize statt, wie in Abschn. 4.2.1 beschrieben. In der Ortsassoziationsstufe erfolgt die Lokalisationsreizelektion voraussetzungsgemäß (vgl. Abschn. 3.2.2) unabhängig von der Phasenlage der Sendesignale, erst in der Gestaltassoziationsstufe kommt die Beziehung der Sendesignale zur Wirkung.

Eine ansteigende Phasendifferenz $\Theta \rightarrow 180^\circ$ führt dazu, daß beide hochfrequenten Lokalisationsreize zunehmend getrennte Hörereignisse verursachen, ähnlich des Hörbildes bei inkohärenten Sendesignalen (vgl. DAMASKE 1967/68); das Hörbild zerfällt zunehmend, die Lokalisationsunschärfe steigt an. Bei $\Theta = 180^\circ$, $\Delta L = 0$ ist "die Lokalisation fast gänzlich unbestimmt" (MATSUDAIRA / FUKAMI 1973), die Hörereignisschwerpunkte liegen am Kopf (tieffrequenter Anteil) und an den Lautsprecherorten (hochfrequenter Anteil). Im median-unsymmetrischen Fall ($\Delta L \neq 0$) dominiert ein hochfrequentes Hörereignis gegenüber dem zweiten; die Richtung des Hörereignisschwerpunktes ist vom resultierenden tieffrequenten Anteil bestimmt.

Auch an dieser Stelle deutet sich wieder als wichtige Konsequenz an, daß Lateralisationsexperimente keine Rückschlüsse auf die Ortsassoziationsstufe zulassen. Auffällig ist, daß bei Beschallung mit Kopfhörern und bei Beschallung im freien Schallfeld die Beziehung der Sendesignale ähnliche Hörereignismerkmale verursachen. Dies gilt, wie in Abschnitt 5 dargestellt wird, nicht nur für die Kohärenz- und Phasenbeziehungen, sondern auch für Intensitäts- und Zeitdifferenzen der Signale.

In diesem Abschnitt spielt die Phasenbeziehung eine besondere Rolle. Gegenphasige Ereignisse führen an der Gestaltassoziationsstufe offenbar zu einer Diskriminierbarkeit, die vom Signalspektrum abhängt. Dies stimmt überein mit den Gesetzmäßigkeiten, die für die Signalerkennung bekannt sind, und die vorwiegend im Lateralisationsexperiment nachgewiesen werden. Die BMLD (Definition z.B. BLAUERT 1974, S. 206) beträgt z.B. für $N_\pi S_0$ oder $N_0 S_\pi$ etwa 12 dB, was sich im Assoziationsmodell interpretieren läßt als die Fähigkeit der Gestaltassoziationsstufe, gegenphasige Reizantworten der Ortsassoziationsstufe zu unterscheiden, gleichphasige Reizantworten dagegen nicht. Das entspricht dem von SAYERS 1964 mitgeteilten Sachverhalt, daß im Lateralisationsexperiment interaurale Phasendifferenzen, die in der Nähe von $\Theta = 180^\circ$ liegen, zwei Hörereignisse erzeugen können.

4.3 Zwei inkohärente Schallquellen

Für die qualitative Abschätzung der Grenzen der Lokalisationsreizselektion wurde das binaurale Korrelationsmuster zugrunde gelegt. Aus der Unterscheidbarkeit der Maxima im Verzögerungsbereich τ wurde auf eine mögliche Unterscheidbarkeit der Sendesignale geschlossen. Dieser Ansatz kann für zwei kohärente Schallquellen einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich der Lokalisationsreizselektion begründen, doch liefert er für zwei *inkohärente* Schallquellen keine ausreichende Grundlage zur räumlichen Dekodierung: zwei Sprecher an verschiedenen Orten beispielsweise erzeugen zwei Hörereignisorte, aber in jedem Bereich des binauralen Korrelationsmusters nur ein Maximum.

Das Gehör verfügt offenbar über wesentlich wirksamere Prozesse zur Lokalisationsreizselektion im überlagerten Schallfeld. Es wird angenommen, daß wichtige Selektionseigenschaften des Gehörs, sowohl solche der Ortsassoziationsstufe als auch solche der Gestaltassoziationsstufe, auf die Wirkung der hypothetischen assoziativen Reizverarbeitung zurückzuführen sind. So ist das Phänomen der „simultanen Hörereignisse“ bei Darbietung verschiedener Signale über einen Lautsprecher eine Folge der Reizverarbeitung in der Gestaltassoziationsstufe; entsprechend können „simultane Ortsassoziationen“ aufgrund ähnlicher Mechanismen der Ortsassoziationsstufe ausgelöst werden.

Beide Stufen ermöglichen das gleichzeitige Erkennen unterschiedlicher Muster, weil „simultane Hörereignisse“ nicht nur durch unterschiedliche Hörereignisgestalten, sondern zusätzlich durch unterschiedliche Hörereignisorte gekennzeichnet sein können. Das ist schon möglich bei zwei Sendesignalen mit identischer Hüllkurve, wenn die Spektren weit genug auseinander liegen („Doppellokalisierung“ zweier Gaußtöne, vgl. BOERGER 1965); es ist besonders gut möglich, wenn die Sendesignale unkorrelierte Hüllkurvenverläufe aufweisen (Cocktail-Party-Effekt).

Der Gültigkeitsbereich des Assoziationsmodells im überlagerten Schallfeld ist mit der Diskriminierbarkeit der Sendesignale gegeben. Im Fall kohärenter Schallquellen hängt die Verwischungsschwelle der Lokalisationsreize entsprechend Abschn. 4.1 vom Signalspektrum ab und von der resultierenden Laufzeitdifferenz Δt der überlagerten Signale. Im Fall inkohärenter Schallquellen sei diese Verwischungsschwelle definiert mit der „maximalen Gestaltauflösung“ des Gehörs, die sich bei räumlicher Identität der Schallereignisse ergibt.

Jedes Hörereignis, welches im überlagerten Schallfeld auftritt, enthält infolge der Ortsassoziationsstufe eine ihm zugeordnete räumliche Information. Selegierbare Lokalisationsreize sind aber nicht nur bei entsprechend unähnlichen Sendesignalen vorhanden, sondern unter bestimmten Bedingungen (vgl. 4.1) ebenfalls bei räumlich getrennten Sendern, die identische Signale abstrahlen. Dies ist die wichtige Aussage des Lokalisationsmodells.

4.3.1 Das „Gesetz des ersten Lokalisationsreizes“

Folgt man der Annahme in Abschnitt 4.1, daß das Gehör zwei kohärente Signale, deren gegenseitiger Laufzeitunterschied einen Wert $\Delta t = \tau_{\max}$ überschreitet, als inkohärent bewertet, so deutet sich ein interessanter Zusammenhang an zwischen der Lokalisationsreizelektion und dem „Gesetz der ersten Wellenfront“ (CREMER 1948).

Die Phantomschallquellenrichtung wandert in einer Stereo-Standardaufstellung von $\varphi = 0^\circ$ nach $\varphi = 30^\circ$, wenn die Laufzeitdifferenz der breitbandigen Lautsprecher-signale von Null auf etwa $600 \mu\text{s}$ vergrößert wird. Diese Erscheinung (Laufzeitstereofonie ebenso wie Intensitätsstereofonie) könnte das Assoziationsmodell mit Gesetzmäßigkeiten der Gestaltassoziationsstufe erklären: Der erste an der Gestaltassoziationsstufe eintreffenden Lokalisationsreiz hat gegenüber dem zweiten ein größeres Gewicht (äquivalent dazu der Lokalisationsreiz größerer Intensität bei Intensitätsstereofonie). Beide Lokalisationsreize sind trotz ihrer Identität und ihrer gegenseitigen Verzögerung selektierbar, weil sie beide im binauralen Korrelationsmuster vollständig und unterscheidbar vorliegen (vgl. Abschn. 4.1).

Eine weitere Vergrößerung der Kanal-Laufzeitdifferenz führt jedoch dazu, daß die maximale Verzögerungszeit τ_{\max} überschritten wird. Das hat bei stationären breitbandigen Signalen (Dauerrauschen) eine Störung der Lokalisationsreizelektion zur Folge, die sich beispielsweise in verringerter Unterdrückung der Kammfilterwirkung ausdrückt. In dieser Schallfeldkonstellation kann das Gesetz der ersten Wellenfront in Übereinstimmung mit dem Assoziationsmodell nicht beobachtet werden. Es sind keine auswertbaren Wellenfronten vorhanden, die eine Lokalisationsreizelektion für die eintreffenden Schallanteile zulassen würden.

Bei instationären impulshaltigen Signalen (Knacke, Sprache, Tonimpulse) dagegen wirkt sich die Vergrößerung der Kanal-Laufzeitdifferenz anders aus. Im Assoziationsmodell gewährleistet die Hüllkurvenauswertung, daß der Primärschall und der verzögerte Schallanteil (Rückwurf) als Lokalisationsreize selektiert werden können. Entsprechend einer hypothetischen Funktion der Gestaltassoziationsstufe bestimmt der primäre Lokalisationsreiz das Hörereignis, dies umso mehr, je größer die Zeitdifferenz der eintreffenden Lokalisationsreize wird. Erst nach Überschreitung einer Zeitdifferenz von etwa $10 \dots 30 \text{ ms}$ bekommt der nacheilende Lokalisationsreiz wieder zunehmendes Gewicht, er wird oberhalb der Echschwelle (Definition z.B. BLAUERT 1974) als getrenntes Hörereignis wahrnehmbar.

Offenbar läßt sich das „Gesetz der ersten Wellenfront“ als das „**Gesetz des ersten Lokalisationsreizes**“ interpretieren.

Darüber hinaus vermittelt das Modell, daß im gesamten Zeitdifferenzbereich zwischen 0 und $10 \dots 30 \text{ ms}$ kein prinzipieller Unterschied in der Reizauswertung besteht.

Vielmehr wird angenommen, daß die Gesetzmäßigkeiten sowohl der Laufzeitstereofonie als auch des Gesetzes der ersten Wellenfront auf eine zeitabhängige Bewertung der nacheinander eintreffenden Lokalisationsreize zurückführbar sind.

Das Gesetz des ersten Lokalisationsreizes ist natürlich immer nur dann gültig, wenn eine Lokalisationsreizselektion erfolgen kann. Das erfordert die Einhaltung der in Abschnitt 4.1 und 4.3 besprochenen Schallfeldbedingungen. Insbesondere gilt auch für das Gesetz der ersten Wellenfront die Voraussetzung, daß ausreichend breit-bandige Signale abgestrahlt werden. Das zeigt deutlich eine Untersuchung von BLAUERT / COBBEN 1978, die die Hörereignisrichtung für schmalbandgefilterte und breitbandige Impulse in Abhängigkeit der Laufzeitdifferenz entsprechend Bild 21 gemessen haben.

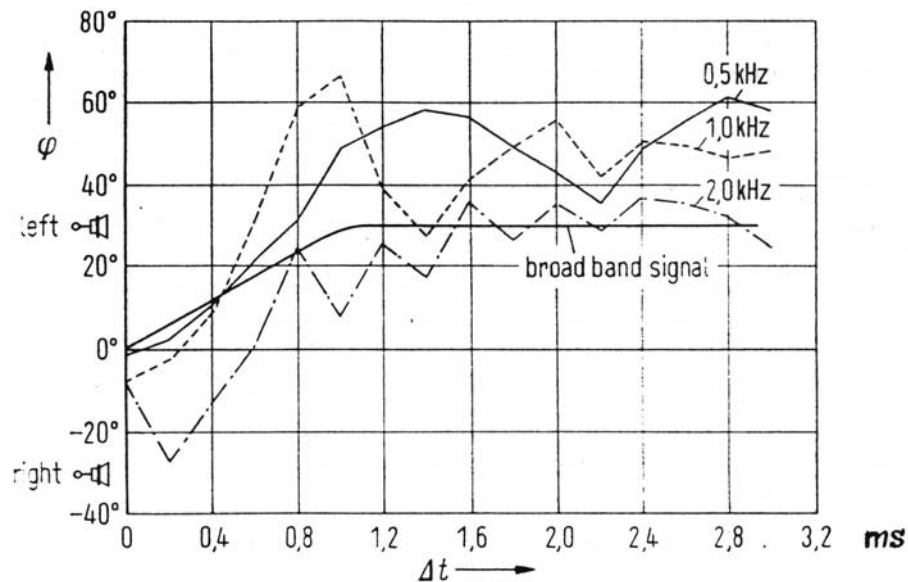


Bild 21:

Hörereignisrichtung φ als Funktion der Verzögerung Δt des rechten Lautsprechersignals (nach BLAUERT/ COBBEN 1978)

Die Lokalisationskurven der tieffrequenten Schmalbandsignale decken sich weder im Bereich der Laufzeitstereofonie noch bei größeren Laufzeitdifferenzen mit der Kurve, die für das breitbandige Signal gemessen wurde. Man erkennt an der Periodizität dieser Kurven, daß im ganzen Verzögerungsbereich Summenlokalisierung stattgefunden hat, daß also die resultierenden interauralen Signaldifferenzen die Hörereignisrichtung bestimmt haben. Das Gesetz der ersten Wellenfront ist in Übereinstimmung mit dem Assoziationsmodell für tieffrequente Schmalbandsignale nicht gültig. Diese „Anomalie des Gesetzes der ersten Wellenfront“ (BLAUERT / COBBEN 1978) ist äquivalent zu entsprechenden Anomalien bei Laufzeitstereofonie (vgl. WENDT 1963); beide Erscheinungen beruhen auf unzureichende Signalbandbreite.

Das vermutete „Gesetz des ersten Lokalisationsreizes“ wird besonders durch die Tatsache gestützt, daß sowohl die Gesetzmäßigkeiten der Laufzeitstereofonie als auch das Gesetz der ersten Wellenfront ebenso dann gelten, wenn die Lautsprecher-signale nicht ein überlagertes Schallfeld erzeugen, sondern wenn man über Kopfhörer das erste Signal ausschließlich dem einen Ohr und das verzögerte Signal ausschließlich dem anderen Ohr zuführt. Wie in Abschnitt 5 näher gezeigt wird, durchlaufen die Reize bei dichotischer Darbietung die Ortsassoziationsstufe unbeeinflusst. Sofern eine ausreichende räumliche Dekodierung erfolgt (vgl. Abschn. 4, Bild 12), liegen demnach sowohl bei Lautsprecherbeschallung als auch bei entsprechender Kopfhörerbeschallung identische Reizantworten A' bzw. B' an den Eingängen der Gestaltassoziationsstufe an. Da das „Gesetz des ersten Lokalisationsreizes“ auf die zeitabhängige Bewertung nacheinander eintreffender Reize in der Gestaltassoziationsstufe zurückgeführt wird, muß dessen Gültigkeitsbereich die dichotische Kopfhörerdarbietung einschließen. Im einzelnen trifft das für folgende Erscheinungen zu:

1. Die maximale seitliche Auslenkung des Hörereignisses tritt für Lautsprecher- und Kopfhörerbeschallung bei Laufzeitdifferenzen im Bereich 655 ... 800 μ s auf (vgl. TOOLE / SAYERS 1965, WENDT 1963).
2. Die Lokalisationsunschärfe und die Lateralisationsunschärfe einer Phantomschallquelle in der Medianebene betragen für Knacke etwa 20 μ s (vgl. KLEMM 1920, WENDT 1963, HALL 1964).
3. Das Gesetz der ersten Wellenfront gilt bei beiden Beschallungsarten für Sprache im Verzögerungsbereich 0,8 ... 20 ms (Echoschwelle als Schwellendefinition, vgl. BLAUERT 1974).
4. Die Echoschwelle verhält sich in beiden Fällen stark signalabhängig. Je steiler die Flanken der Signale sind, bei umso kürzerer Verzögerungszeit zerfällt das Hörereignis in ein Primärhörereignis und ein Echo.
5. Wird der Pegel des Rückwurfs gegenüber dem Primärschall erhöht, so sinkt in beiden Fällen die für die Echoentstehung notwendige Verzögerungszeit; bei Erniedrigung des Rückwurfpegels gilt das Umgekehrte (vgl. BABKOFF/ SUTTON 1966, BLAUERT 1974).

Das Assoziationsmodell sagt also aus, daß bei impulshaltigen, breitbandigen Signalen solche Hörereigniserscheinungen, die infolge von Laufzeitdifferenzen der Sendesignale auftreten, mit dem „Gesetz des ersten Lokalisationsreizes“ erklärt werden können. Das bedeutet: die jeweils zuerst an der Gestaltassoziationsstufe eintreffenden Reizantworten dominieren im Verarbeitungsprozeß dieser Stufe, die späteren werden unterdrückt. Das Modell sagt weiter aus, daß Laufzeitstereofonie auch für stationäre breitbandige Signale möglich ist, dagegen das Gesetz der ersten Wellenfront nur an Signalen mit ausgeprägten Hüllkurven nachzuweisen ist. Und es sagt drittens aus, daß die durch Signalverzögerungen verursachten Effekte im Prinzip auch bei Kopfhörerdarbietung beobachtbar sein müssen, sofern eine ausreichende Lokalisierbarkeit der Einzelschallquellen vorliegt.

4.3.2. Der Cocktail-Party-Effekt

Die Selektionseigenschaften sowohl der Ortsassoziationsstufe als auch der Gestaltassoziationsstufe ermöglichen es, gleichzeitig unterschiedliche Muster zu diskriminieren. Abhängig von den Orten der Sender und von den Eigenschaften der Sendesignale treten die zugeordneten Ortsassoziationen und Gestaltassoziationen auf. Wenn davon ausgegangen wird, daß jede Selektionsstufe gleichzeitig wenigstens zwei Muster diskriminieren kann, ergibt sich ein prinzipieller Ansatz, um auch den Cocktail-Party-Effekt mit Hilfe des Assoziationsmodells erklären zu können.

Die Phantomschallquelle verschwindet, sobald die zwei Lautsprecher signale hinreichend unähnlich werden, d.h. sobald sie unterschiedliche Hörereignisgestalten hervorrufen. Dies ist der allgemeine, natürliche Fall eines überlagerten Schallfeldes. Zwei Schallquellen rufen normalerweise nicht nur zwei verschiedene Ortsassoziationen, sondern *zusätzlich* zwei verschiedene Gestaltassoziationen hervor. Die resultierenden beiden Hörereignisse treten dann also nach zweistufiger Selektion auf, woraus sich die größtmögliche Auflösung ableitet. Trägt nur die Gestaltassoziationsstufe zur Hörereignisauflösung bei, weil beide Lautsprecher sich am gleichen Ort befinden, so geht die Hörereignisauflösung auf einen Grenzwert zurück (Grenzauflösung der Gestaltassoziationsstufe, vgl. Abschn. 4.3). Man erkennt auch hier die Bedeutung der Gestaltassoziationsstufe für das räumliche Hören: simultane Hörereignisorte können nur auftreten, wenn die auslösenden Reizmuster zusätzlich verschiedene Hörereignisgestalten hervorrufen.

Umgekehrt ergibt sich der Cocktail-Party-Effekt als Wirkung der Ortsassoziationsstufe; simultane Hörereignisgestalten können unter bestimmten Bedingungen erst auftreten, wenn die auslösenden Reizmuster zusätzlich als Lokalisationsreize wirken. Beispielsweise kann aus einem ausreichend vielstimmigen Stimmgewirr nicht ein bestimmter Sprecher "herausgehört" werden, wenn ein Ohr verschlossen wird, weil damit die Ortsassoziationsstufe keinen Selektionsbeitrag mehr liefern kann. Die Lokalisationsreizselektion ist ein sinnvoller Vor-Selektionsprozeß, der der höhergelagerten Mustererkennung vorangeht. Jede der beiden Verarbeitungsstufen selektiert die Muster hinsichtlich unterschiedlicher, voneinander unabhängiger Merkmale. Die resultierende Auflösung der unterschiedlichen Muster gewährleistet dann, daß das Gehör einzelne Hörereignisse unterscheiden kann. Dabei könnte die Konzentration auf ein Hörereignis dazu führen, daß infolge einer entsprechenden Assoziationslenkung die Auflösung eines bestimmten Musters weiter erhöht wird (Assoziationslenkung durch das Bewußtsein).

Die Lokalisation im überlagerten Schallfeld ist nach dieser Darstellung ein zweistufiger Prozeß, der aufgrund der Hörerfahrung die Hörereigniszuordnung leistet. Eine grundlegende Hörerfahrung lautet: Die empfangenen Ohrsignale sind zurückzuführen auf einen bestimmten Sendeort und auf ein bestimmtes Sendesignal. Beide Senderei-

genschaften verhalten sich voneinander unabhängig; sie treten nur paarweise auf. Das Assoziationsmodell ist dieser Hörerfahrung angepaßt : Die auftretenden Hörereignisse sind zurückzuführen auf die Wirkung einer Ortsassoziationsstufe und einer Gestaltassoziationsstufe. Beide Stufen arbeiten voneinander unabhängig; sie bestimmen stets gemeinsam die Hörereigniseigenschaften.

Die Fähigkeiten unseres Gehörs setzen sich aus zwei elementaren Bereichen der Hörerfahrung zusammen. Ihre gemeinsame Wirkung beim räumlichen Hören kommt im überlagerten Schallfeld besonders deutlich durch den Cocktail-Party-Effekt zum Ausdruck.

5. Eine Konsequenz des Assoziationsmodells

Die grundsätzliche Unterscheidung einer ortbestimmenden und einer gestaltbestimmenden Verarbeitungsstufe im Gehör führt auf ein besonderes Verständnis für Hörphänomene, die im überlagerten Schallfeld auftreten. Speziell solche Erscheinungen, die von der Beziehung der Sendesignale abhängen (Phantomschallquelle, Gesetz der ersten Wellenfront, Cocktail-Party-Effekt), lassen sich im Assoziationsmodell infolge der zweidimensionalen Verarbeitung prinzipiell erklären. Die Ortsassoziationsstufe diskriminiert einzelne Sendesignale aufgrund der räumlichen Informationen (vgl. Abschn. 3.1 und 4.); erst die Reizantworten dieser Stufe unterliegen in der nachfolgenden Stufe der gestaltbestimmenden Verarbeitung, erst hier kommt also die Beziehung der Sendesignale zur Wirkung. Sofern die beteiligten Sender selektierbare und simultane Lokalisationsreize hervorrufen, können bei festen Sendeorten durch Verändern der Sendesignalbeziehungen nur die Gesetzmäßigkeiten der Gestaltassoziationsstufe untersucht werden, -und zwar auch dann, wenn die Sendesignalbeziehungen den Hörereignisort beeinflussen.

Besonders in der Phantomschallquellsituation wurde deutlich, daß der Hörereignisort (Richtung, Entfernung und Elevation nicht einem Verarbeitungsprozeß zugeschrieben werden kann, welcher der Lokalisation einer entsprechenden Ersatzschallquelle gleichkommt. Das Assoziationsmodell befindet sich mit diesem Sachverhalt in Übereinstimmung, weil nicht grundsätzlich der eigentliche ortbestimmende Verarbeitungsprozeß den Hörereignisort festlegt. Vielmehr führen im Modell die Ortsassoziationen nur in Verbindung mit zugeordneten Gestaltassoziationen zu Hörereignissen; es gibt keinen Hörereignisort ohne zugeordnete Hörereignisgestalt.

Unterschiedliche Verarbeitungsprozesse im Gehör können also im Prinzip identische Hörereignisorte hervorbringen. Dies geschieht abhängig von den Ohrsignalen immer dann, wenn unterschiedliche Orts- und Gestaltassoziationen in ihrer Gesamtwirkung zur gleichen Lokalisation führen. Zwei Lautsprecher in Stereostandaraufstellung beispielsweise können mit bestimmten Signalen genau die Ohrsignale erzeugen, die eine einzige Realschallquelle verursachen würde (z. B. TRADIS-Verfahren, DAMASKE / MELLERT 1969/79); der Hörereignisort kommt als Folge *einer* Ortsassoziation zustande, die fiktive Schallquelle ist eine **Ersatzschallquelle**. Zwei andere Lautsprechersignale können aber auch ein Schallfeld erzeugen, welches entsprechend der wirksamen Schallereignisorte *zwei* Ortsassoziationen auslöst und dennoch den gleichen Hörereignisort wie im ersten Fall verursacht; die fiktive Schallquelle ist in diesem Fall eine **Phantomschallquelle**.

Diese Aussage des Assoziationsmodells entspricht nicht dem in der Literatur zu findenden Verständnis über die Funktion des Gehörs beim räumlichen Hören. Man geht bisher davon aus, daß der überaus komplexe Prozeß, der zur Lokalisation führt, eindeutig beschreibbar sein müsse, wenn nur die räumlichen Eigenschaften des

Hörereignisses eindeutig festliegen. Die Vorstellung ist unrichtig, weil unterschiedliche Ohrsignale die gleichen räumlichen Hörereigniseigenschaften hervorrufen können, sobald mehr als eine Schallquelle das Hörereignis bestimmen. Man geht weiterhin davon aus, daß der Lokalisationsprozeß grundsätzlich auf die Wirkung einer ortbestimmenden Verarbeitungsstufe im Gehör zurückführbar sein müsse. Diese Vorstellung ist nicht zwingend und erscheint unwahrscheinlich, weil dann die ortbestimmende Verarbeitungsstufe bestimmte Ohrsignale unterschiedlich interpretieren würde.

Demgegenüber ergeben sich die Zusammenhänge beim räumlichen Hören nach dem Assoziationsmodell wie folgt:

1. Eine Einzelschallquelle ruft in der ortbestimmenden Stufe (unter bestimmten Bedingungen) eine Ortsassoziation hervor, welche allein den Hörereignisort festlegt.
2. Zwei Schallquellen, die hinsichtlich Ort und Sendesignale verschieden und unabhängig sind, rufen (unter bestimmten Bedingungen) in der ortbestimmenden Stufe zwei Ortsassoziationen und in der gestaltbestimmenden Stufe zwei Gestaltassoziationen hervor. Entsprechend der Schallereignisse sind auch die Hörereignisse hinsichtlich Ort und Gestalt „entkoppelt“, so daß die Lokalisation allein auf die Wirkung der Ortsassoziationsstufe zurückzuführen ist.
3. Zwei Schallquellen, die nur hinsichtlich des Ortes verschieden und hinsichtlich des Sendesignals verkoppelt sind, rufen (unter bestimmten Bedingungen) in der ortbestimmenden Stufe nach wie vor zwei Ortsassoziationen hervor. In der Gestaltassoziationsstufe kann aber entsprechend der Verkopplung der Sendesignale keine Entkopplung stattfinden. Da ein Hörereignis grundsätzlich von beiden Verarbeitungsstufen bestimmt ist, treten infolge der gemeinsamen Gestalteigenschaften entsprechend verkoppelte Hörereignisse auf. Identität der Sendesignale führt deshalb zur vollständigen Hörereignisverschmelzung, also auch zur Verschmelzung der Hörereignisorte. In diesem Fall muß die Lokalisation sowohl auf die Wirkung der Orts- als auch Gestaltassoziationsstufe zurückgeführt werden.

Allgemein gilt, daß die Lokalisation nur dann mit der Funktion einer ortbestimmenden Verarbeitungsstufe erklärt werden kann, wenn allein *ein* Lokalisationsreiz zur Bildung des Hörereignisses beiträgt. Ein Lokalisationsreiz liegt vor, wenn hinreichend breitbandige, binaurale Ohrsignale ausschließlich durch die Wirkung von Kopf und Außenohren im Schallfeld miteinander verkoppelt seien können.

5.1 Lateralisation - die Lautsprecherentfernung Null

Binaurale Ohrsignale oder Ohrsignalanteile, die keinen Lokalisationsreiz darstellen, sondern beliebig miteinander verkoppelt sind, unterliegen nicht den Gesetzmäßigkeiten einer ortbestimmenden Verarbeitungsstufe. Dieser Sachverhalt ist besonders bei Lateralisationsexperimenten gegeben. Er läßt sich noch deutlicher darstellen, wenn die Wirkung der beiden Verarbeitungsstufen im Assoziationsmodell betrachtet wird:

Die Ortsassoziationsstufe ist der Gestaltassoziationsstufe vorgeschaltet. Damit erhält das Gehör die Eigenschaft, aus einem aktuellen Reizangebot vorzugsweise Lokalisationsreize zu selektieren. Die Lokalisationsreizelektion wirkt im überlagerten Schallfeld als Filter zur Diskrimination einzelner Sendesignale (vgl. Abschn. 4), so daß prinzipiell erst in der Gestaltassoziationsstufe eine etwaige Verkopplung der Sendesignale zum Tragen kommt. In der Phantomschallquellsituation beispielsweise verhindert die Ortsassoziationsstufe Summenlokalisierung; die Lokalisationsreizelektion bewirkt, daß trotz der Schallfeldüberlagerung in der Gestaltassoziationsstufe die gleichen Signale verarbeitet werden wie bei Kopfhörerbeschallung.

Lateralisationsexperimente geben lediglich Auskunft über die Funktion der Gestaltassoziationsstufe, weil die beiden Sendesignale unabhängig von der Senderentfernung einzeln diskriminiert und der Gestaltassoziationsstufe zugeführt werden. Lateralisationsexperimente lassen deshalb grundsätzlich keine Rückschlüsse zu auf die Funktion der Ortsassoziationsstufe; sie führen nur auf Gesetzmäßigkeiten der Phantomschallquelle („Phantomschallquelle im Kopf“). Eine „Ersatzschallquelle im Kopf“ ist nicht vorhanden.

Die Relevanz von Lateralisationsexperimenten für das räumliche Hören ist bisher unbekannt. Man nimmt an, daß der Lokalisationsprozeß zerlegbar ist in Teilaspekte, welche sich mit Hilfe von Kopfhörern isoliert untersuchen lassen. Stellvertretend für das in der Literatur zu findende Verständnis hierzu sei BLAUERT 1974 (S. 131) zitiert:

„Die Entstehung von Hörereignissen in seitlichen Richtungen setzt unterschiedliche Ohrsignale voraus. Ohrsignalunterschiede spezifischer Art entstehen infolge Beugung, Abschattung und Resonanzen an Kopf und Außenohren. Durch Lateralisationsversuche mit Kopfhörern kann man diese sehr differenzierten Signalunterschiede auf ihre „wirksamen“ Bestandteile untersuchen.“

Speziell im Zusammenhang zur Summenlokalisierung heißt es (S. 169)

„Es liegt nahe, den Einfluß der einzelnen Signalanteile auf die Hörereignisrichtung näher zu untersuchen. Dies kann z. B. so geschehen, daß man synthetisch erzeugte Impulsgruppen über Kopfhörer darbietet. Die einzelnen Signalanteile sind dann beliebig variierbar.“

Man geht davon aus, daß die „Auswertung unterschiedlicher Ohrsignale“ (Kapitel 2.4 in BLAUERT 1974), die das Gehör bei der Lokalisation einer Schallquelle vornimmt, sich mit zwei hinreichend nahe an den Ohren befindlichen Schallquellen untersuchen läßt. Man beachtet zwar die resultierende Im- oder Am-Kopf-Ortung formal, indem das Experiment als Lateralisationsexperiment, also als „Experiment mit mangelhafter Entfernungswahrnehmung“ ausgewiesen wird. Es gibt jedoch keinen Nachweis für die in der Literatur bisher gültige Annahme, daß die Ergebnisse aus Lateralisationsexperimenten - und die daraus abgeleiteten Hypothesen bezüglich der Vorgänge bei der Bildung von Hörereignissen in seitlichen Richtungen - sich „auch auf das räumliche Hören im freien Schallfeld verallgemeinern lassen“ (BLAUERT 1974).

Die „mangelhafte Entfernungswahrnehmung“ bei Lateralisationsexperimenten erklärt das Assoziationsmodell mit der „Lautsprecherentfernung Null“ ^F: auch die Schallquellenorte „an den Ohren“ verursachen Lokalisationsreize, die zwei Ortsassoziationen auslösen (vgl. Abschn. 4.2.1). Das geschieht wegen der fehlenden Schallfeldüberlagerung sogar besonders leicht (das Ohrsignal bei monotonischer Darbietung bleibt bei dichotischer Darbietung erhalten).

Weil also die Signale erst in der Gestaltassoziationsstufe verschmelzen, dürfen die seitlichen Auslenkungen von Hörereignissen, die durch Pegel- oder Zeitdifferenzen der Kopfhörersignale auftreten, nicht in Zusammenhang gebracht werden mit der Richtungswahrnehmung bei der Lokalisation einer Schallquelle.

Die Auswertung unterschiedlicher Ohrsignale, die das Gehör bei der Lokalisation einer Schallquelle vornimmt, kann prinzipiell nur unter Lokalisationsbedingungen untersucht werden.

^F **Definition :**

Die Schall- oder Hörereignisentfernung Null liegt am Kopf. Im Gegensatz zu LAWS 1972 u.a., die die Entfernung von Kopfmittelpunkt (Koordinatenursprung) aus messen, kann im Sinne des Assoziationsmodells die Entfernung Null nur an den Begrenzungsflächen des Empfängers vorliegen. Ein Schallereignis im Kopf gibt es nicht. Ein Hörereignis im Kopf kann deshalb auch nicht aufgrund eines Lokalisationsprozesses auftreten; es widerspricht der Hörerfahrung. Ein "Hörereignis *ohne* Entfernung" kennzeichnet die Im-Kopf-Ortung.

5.2 Zeit-Intensitäts-Äquivalenz bei Kunstkopfsignalen

Die Lokalisation einer Schallquelle geschieht durch Auswertung interauraler Signaldifferenzen, bei denen sich „zwei Klassen von Merkmalen isolieren lassen“ (BLAUERT 1974, S.132). Es sind dies die interauralen Zeitdifferenzen (Frequenzfunktion des interauralen Phasenmaßes) und die interauralen Pegeldifferenzen (Frequenzfunktion des interauralen Übertragungsmaßes). Stellt man die Frage nach der relativen Bedeutung der beiden Merkmalsklassen und ihrem wechselseitigen Zusammenwirken, so können nach Aussage des Assoziationsmodells nur Lokalisationsexperimente relevante Antworten bringen.

Die zur Messung dieser Zeit-Pegel-Äquivalenz üblichen Lateralisationsexperimente, die bisher mit breitbandigen Signalen bei mittleren Schalldruckpegeln zwischen 40 und 80 dB durchgeführt wurden, führen auf einen durchschnittlichen Äquivalenzfaktor von etwa $50 \mu\text{s}/\text{dB} \pm 25 \mu\text{s}/\text{dB}$ (Mittelwert und Standardabweichung aus Angaben von V.BEKESY 1959, DEATHERAGE / HIRSCH 1959, DAVID / GUTTMAN / V. BERGEIJK 1959, HARRIS 1960, FRANSSSEN 1960, HAFTER / JEFFRESS 1968). Vergleicht man diesen Durchschnittswert mit denjenigen für Intensitäts- und Laufzeitstereofonie, so kommt man nach Messungen von DE BOER 1940 (etwa $30 \mu\text{s}/\text{dB}$), nach Messung von WENDT 1963 (im Mittel etwa $60 \mu\text{s}/\text{dB}$) und nach eigenen Messungen (etwa $45 \mu\text{s}/\text{dB}$) auf einen Durchschnittswert von $45 \mu\text{s}/\text{dB}$. Beide Äquivalenzfaktoren liegen in der gleichen Größenordnung, ihr Schwankungsbereich ist hoch. Auch diese Ähnlichkeit, auf die schon WENDT 1963 hingewiesen hat, deutet auf die Möglichkeit, daß bei beiden Beschallungsarten die Sendesignalbeziehungen aufgrund der gleichen Verarbeitungsmechanismen zum Tragen kommen.

Ähnliche Äquivalenzwerte für Lautsprecher- und Kopfhörerdarbietung bestätigen indes noch nicht die Vermutung, daß der Lokalisationsprozeß anderen Gesetzmäßigkeiten unterworfen ist als solche, die im Lateralisationsexperiment gefunden werden. Wenn diese Äquivalenzwerte hierzu eine Aussage liefern sollen, müssen sie verglichen werden mit Äquivalenzwerten, die tatsächlich bei der Lokalisation einer Real- oder Ersatzschallquelle vorliegen. Eine entsprechende Durchsicht der Literatur brachte jedoch keine Hinweise, bisher sind offenbar noch keine Äquivalenzwerte im Lokalisationsexperiment ermittelt worden. Vermutlich ist neben experimentellen Schwierigkeiten der Grund darin zu sehen, daß die Relevanz von Lateralisationsexperimenten für die Lokalisation nie in Frage gestellt worden ist.

In Hinblick auf diesen Sachverhalt wurde in einem Hörversuch der Äquivalenzwert mit Kunstkopfsignalen untersucht. Gemessen wurde die Verschiebung der Hörereignisrichtung bei Darbietung von Kunstkopfsignalen über Kopfhörer, die durch Einfügung einseitiger Ohrsignalverzögerung bzw. Pegelsenkung auftritt. Die Messung geschah mit zwei Kunstkopfsignalen:

- a) Sprecher im reflexionsarmen Raum,
Entfernung zum Kunstkopf 2 m,
Schalleinfallrichtung $\Omega = 135^\circ$

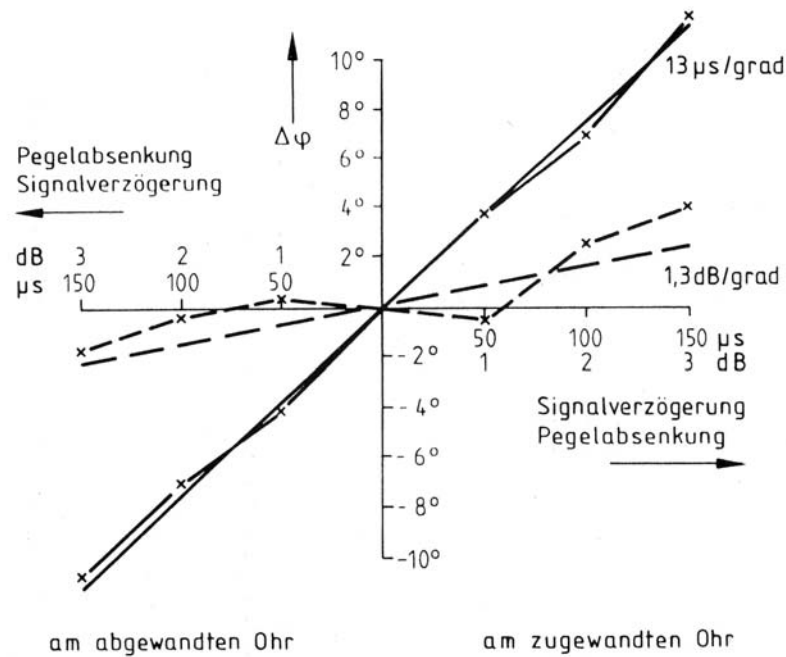
- b) Sprecher im reflexionsarmen Raum,
Entfernung zum Kunstkopf 2 m,
Schalleinfallrichtung jedoch $\Omega = 180^\circ$

Der Sprecher befand sich in beiden Fällen hinter dem Kunstkopf (NEUMANN), weil damit die Lokalisation besser gelingt als im vorderen Abbildungsbereich. Die Ergebnisse lassen sich aber auf die Situationen $\Omega = 45^\circ$ und $\Omega = 0^\circ$ übertragen. Die eingefügten zusätzlichen Ohrsignaldifferenzen bei den Darbietungen betragen 0, 50, 100, 150 μs und 0, 1, 2, 3 dB - im Fall a) sowohl am abgewandten als auch am zugewandten Ohr, im Fall b) nur an einem Ohr. Die Darbietung der verschiedenen Testsignale geschah in zufälliger Reihenfolge; die 20 Versuchspersonen gaben je Testsignal 4 Richtungsurteile ab.

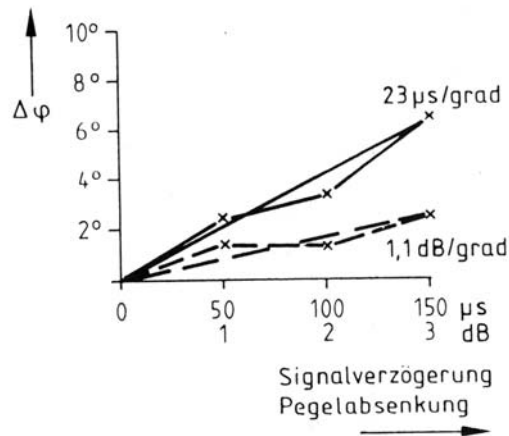
Die arithmetischen Mittelwerte der Verschiebungen $\Delta\varphi$ der Hörereignisrichtungen gehen aus Bild 22 hervor. Sie sind als Funktion der einseitig eingefügten Laufzeit bzw. Pegelabsenkung dargestellt. Die Standardabweichungen liegen im Fall a) zwischen 12° und 16° , im Fall b) zwischen 2° und 5° . Die eingetragenen Geraden geben die mittleren Steigungen der Kurvenverläufe wieder. Daraus ergeben sich die Äquivalenzfaktoren

10 $\mu\text{s}/\text{dB}$ im Fall a)
und 21 $\mu\text{s}/\text{dB}$ im Fall b).

Die Problematik dieser Untersuchung liegt darin, daß durch Einfügung der zusätzlichen Ohrsignaldifferenzen der ursprüngliche Lokalisationsreiz schon weitgehend zerstört werden kann. Aus diesem Grunde betragen die eingefügten Differenzen maximal 150 μs bzw. 3 dB. Doch auch dafür ließ sich nicht sicher ermitteln, ob oder in welchem Maße das Lokalisationsexperiment zu einem Lateralisationsexperiment entartet war. Das gegebene Kunstkopfübertragungssystem gewährleistet die Reproduktion eines Sprechers im reflexionsarmen Raum für diese Anwendung noch nicht ausreichend genau; die Entfernungsurteile schwanken interindividuell zu stark und liegen im Mittel zu dicht am Kopf. Es gibt indes noch keine sinnvoll definierte und überprüfbare Abgrenzung zwischen Lokalisation und Lateralisation. Dazu muß zunächst der Zusammenhang dieser beiden Prozesse eindeutig geklärt sein.



a: $\Omega = 45^\circ$ (135°)



b: $\Omega = 0^\circ$ (180°)

Bild 22:

Verschiebung der Hörereignisrichtung bei Kunstkopfsignalen durch einseitige Signalverzögerung bzw. Pegelabsenkung

Offenbar läßt sich aus dem Versuchsergebnis aber folgender Schluß ziehen: Die gegenseitige Bedeutung der interauralen Zeit- und Pegeldifferenzen bei der Lokalisation einer Schallquelle unterscheidet sich von derjenigen bei Lateralisation. Die Richtungswahrnehmung geschieht vornehmlich durch Auswertung der Zeitmerkmale; die seitlichen Auslenkungen von Hörereignissen bei Lateralisation unterliegen - zumindest quantitativ - anderen Gesetzmäßigkeiten.

Im Fall b (Schallquelle in der Medianebene) wurde allerdings ein doppelt so großer Äquivalenzfaktor ermittelt wie im Fall a (seitliche Schallquelle). Das stimmt überein mit der Tatsache, daß mit Kunstkopfsignalen die Lokalisation in der Medianebene gegenüber derjenigen bei seitlichen Schalleinfallrichtungen schwieriger und instabiler ist. Der größere Äquivalenzfaktor im Fall b läßt sich mit einer größeren Lokalisationsreizstörung erklären, die die eingefügten Ohrsignaldifferenzen hier bewirken.

Eine weitere Vergrößerung der eingefügten Ohrsignaldifferenzen würde demnach bedeuten, daß verstärkt die Gesetzmäßigkeiten der Lateralisation zum Tragen kommen, daß der Äquivalenzfaktor also weiter ansteigt. Das konnte in orientierenden Versuchen aber nicht uneingeschränkt bestätigt werden. In vielen Fällen zerfiel das Hörereignis bei vergrößerter einseitiger Pegelabsenkung in zwei Teile: Der erste Anteil war offenbar durch die Zeitinformation bestimmt, der Ort dieses Hörereignisses ließ sich kaum vom Pegel, wohl aber von der Laufzeit beeinflussen. Der zweite Anteil befand sich an dem Ohr, welches mit der entsprechend unnatürlichen größeren Intensität beschallt wurde. Möglicherweise deutet sich hier eine Erklärung an für das Auftreten eines „time-image“- und eines „intensity-image“-Anteiles bei Lateralisations-Trading-Versuchen (vgl. z. B. WHITWORTH / JEFFRESS 1961, HAFTER / JEFFRESS 1968). Auffällig ist zumindest, daß nach Angaben dieser Autoren der Äquivalenzfaktor für den "time-image-Anteil" im Mittel etwa $10 \mu\text{s}/\text{dB}$ und für den "intensity-image-Anteil" $50 \mu\text{s}/\text{dB}$ beträgt.

6. Abschluß

Die Funktion des Gehörs beim räumlichen Hören resultiert nach dem vorgestellten Assoziationsmodell prinzipiell aus zwei unterschiedlichen Verarbeitungsprozessen.

Jeder der beiden Verarbeitungsprozesse geschieht auf dem Wege einer assoziativ gesteuerten Musterselektion: ein aktueller Reiz, welcher von einer ausreichend breitbandigen Schallquelle herrührt, löst infolge der Hörerfahrung in der ersten Verarbeitungsstufe eine Ortsassoziation und in einer höher gelagerten Verarbeitungsstufe eine Gestaltassoziation aus. Beide Stufen arbeiten voneinander unabhängig; sie bestimmen aber stets gemeinsam die Eigenschaften eines Hörereignisses oder mehrerer simultaner Hörereignisse.

Die konsequente Unterscheidung dieser beiden Reizauswertungsstufen entspricht völlig den zwei elementaren Bereichen der Hörerfahrung: Die empfangenen Ohrsignale sind zurückzuführen auf die zwei voneinander unabhängigen, stets paarweise auftretenden Schallquelleneigenschaften „Ort“ und „Signal“.

Das Assoziationsmodell in der dargestellten Form steht deshalb im Einklang mit vielen Erscheinungen der Lokalisation im überlagerten Schallfeld. Es vermittelt auf diese Weise neue Ansätze für die Erklärung einiger wichtiger Hörphänomene. Sie lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen :

- 1) Bei Stereophonie treten im überlagerten Schallfeld Hörereignisse auf, die sich ebenso mit entsprechend zugeordneten Einzelschallquellen im freien Schallfeld erzeugen lassen. Es ist aber nicht möglich, den in beiden Fällen identischen Hörereignissen entsprechende identische Ohrsignale zuzuordnen. Relativ große Unterschiede der Ohrsignalmerkmale hinsichtlich Spektrum und interauralem Kohärenzgrad führen zu dem Schluß, daß keine Summenlokalisierung stattfindet: die „Phantomschallquelle“ läßt sich nicht als Ersatzschallquelle auffassen. Vielmehr muß angenommen werden, daß die Sendesignale aufgrund der unterschiedlichen Sendeorte im Gehör zunächst diskriminiert werden (Wirkung der Ortsassoziationsstufe). Erst nach erfolgter räumlicher Dekodierung verschmelzen die Reize, weil die Lautsprecher hinreichend ähnliche Signale abstrahlen (Wirkung der Gestaltassoziationsstufe).
- 2) Die Grenze für den Gültigkeitsbereich des „Gesetzes der ersten Wellenfront“ wird zu kleinen Verzögerungszeiten hin durch den Übergang zur „Summenlokalisierung“ definiert. Beide Phänomene lassen sich zurückführen auf die zeitabhängige Bewertung nacheinander eintreffender Reizantworten der Ortsassoziationsstufe an der Gestaltassoziationsstufe. Die Ortsassoziationsstufe wirkt im überlagerten Schallfeld als Filter zur Dis-

krimation der Sendesignale, so daß nur in der nachgeschalteten Gestaltassoziationsstufe die Sendesignalbeziehung bewertet wird. Zwei Sendesignale mit Laufzeitunterschieden führen dazu, daß zwei Lokalisationsreize nicht zeitgleich eintreffen. Alle resultierenden Gesetzmäßigkeiten für die zugeordneten Hörereignisorte lassen sich als „Gesetz des ersten Lokalisationsreizes“ verstehen.

- 3) Der „Cocktail-Party-Effekt“ besagt, daß ein Nutzsignal, das aus einer bestimmten Richtung einfällt, von einem Störsignal, das aus einer anderen Richtung einfällt, bei zweiohrigem Hören weniger stark verdeckt wird als bei einohrigem Hören. Der Effekt ist zurückzuführen auf die Wirkung der Ortsassoziationsstufe: Zwei Schallquellen rufen normalerweise nicht nur zwei verschiedene Ortsassoziationen, sondern **zusätzlich** zwei verschiedene Gestaltassoziationen hervor. Die resultierenden beiden Hörereignisse treten dann also nach zweistufiger Selektion auf, woraus sich die größtmögliche Auflösung ergibt. Bei einohrigem Hören geht die Selektionswirkung der Ortsassoziationsstufe zumindest teilweise verloren, weil die ortsbestimmenden Reizmuster unvollständig vorliegen. Die gemeinsame Wirkung der beiden Verarbeitungsstufen, die von den elementaren Bereichen der Hörerfahrung geprägt werden, kommt besonders deutlich durch den Cocktail-Party-Effekt zum Ausdruck.
- 4) Lateralisationsexperimente geben Aufschlüsse über die Auswertung interauraler Signalunterschiede. Sie geben aber nur Auskunft über die Funktion der Gestaltassoziationsstufe, weil die beiden Sendesignale unabhängig von der Senderentfernung einzeln diskriminiert und der Gestaltassoziationsstufe zugeführt werden. Lateralisationsexperimente lassen deshalb grundsätzlich keine Rückschlüsse zu auf die Funktion des Gehörs bei der Lokalisation einer Einzelschallquelle. Sie führen vielmehr auf Gesetzmäßigkeiten einer „Phantomschallquelle im Kopf“ (Lautsprecherentfernung Null). Eine „Ersatzschallquelle im Kopf“ gibt es nicht bei adaptiertem Gehör. Die Auswertung unterschiedlicher Ohrsignale, die das Gehör bei der Lokalisation einer Schallquelle vornimmt, läßt sich prinzipiell nicht mit zwei hinreichend nahe an den Ohren befindlichen Schallquellen untersuchen. Hörversuche mit Kopfhörern sind Hörversuche mit zwei Schallquellen - es sei denn, es werden Kunstkopfsignale dargeboten (es existiert eine Ersatzschallquelle).
- 5) Die Funktion des Gehörs bei der Lokalisation einer Schallquelle kann nur unter Lokalisationsbedingungen untersucht werden. Das setzt voraus, daß das Schallereignis ein ausreichend breitbandiges Spektrum aufweist. Der Wahrnehmungsprozeß, der zur Lokalisation führt, ist nur möglich, wenn spektrale Merkmale die Zuordnung der Hörereignisentfernung zulassen.

Das Assoziationsmodell führt die Lokalisation auf einen Prozess zur Selektion eines Lokalisationsreizes zurück. Ein Lokalisationsreiz liegt vor, wenn hinreichend breitbandige Ohrsignale sich hinsichtlich der Zeit- und spektralen Merkmale einem einzigen Schallereignisort zuordnen lassen. Im überlagerten Schallfeld sind unter bestimmten Bedingungen gleichzeitig mindestens zwei Lokalisationsreize selektierbar. Sowohl in der Phantomschallquellsituation als auch im Lateralisationsexperiment führen zwei selektierte Lokalisationsreize zu einem einzigen Hörereignisort.

Literaturverzeichnis

- ALLEN, J.B., BERKLEY, D.A., BLAUERT, J. (1977): Multimicrophone signal-processing technique to remove room reverberation from speech signals. *J. Acoust. Soc. Amer.* 62, 912 - 915.
- BABKOFF, H., SUTTON, S. (1966): End point of lateralization of dichotic clicks. *J. Acoust. Soc. Amer.* 39, 87 - 102.
- von BEKESY, G. (1930): Zur Theorie des Hörens : über das Richtungshören bei einer Zeitdifferenz oder Lautstärkeungleichheit der beidseitigen Schalleinwirkungen. *Phys. Z.* 31, 824 -838 und 857 - 868.
- BLAUERT, J. (1969): Untersuchungen zum Richtungshören in der Mediane eben bei fixiertem Kopf. Dissertation Techn. Hochschule Aachen.
- BLAUERT, J. (1970): Ein Versuch zum Richtungshören bei gleichzeitiger optischer Information. *Acustica* 23, 118 - 119.
- BLAUERT, J. (1970): Zur Trägheit des Richtungshörens bei Laufzeit- und Intensitätsstereofonie. *Acustica* 23, 287 - 293.
- BLAUERT, J., LAWS, P. (1973): Verfahren zur orts- und klanggetreuen Simulation von Lautsprecherbeschallungen mit Hilfe von Kopfhörern. *Acustica* 29, 273 -277.
- BLAUERT, J. (1974): Räumliches Hören. Hirzel-Verlag Stuttgart.
- Blauert, J., COBBEN, W. (1978): Some consideration of binaural cross correlation analysis. *Acustica* 39, 96 - 103.
- BLAUERT, J., MELLERT, V., PLATTE, H.-J., LAWS, P., POULSEN, T., GOTTLÖB, D., PLENGE, G. (1978): Wissenschaftliche Grundlagen der kopf-bezogenen Stereofonie. Vorkolloquium zur DAGA, Bochum.
- Blauert, J. (1978): Neuere Ergebnisse zum räumlichen Hören. Vortrag vor der Rheinisch-Westfälischen Akademie der Wissenschaften (im Druck).
- BLODGETT, H. C., WILBANKS, W. A., JEFFRESS, L. A. (1956): Effect of large interaural time differences upon the judgement of sidedness. *J. Acoust. Soc. Amer.* 28, 639 - 643.
- BLOOM, P.J. (1977): Creating source elevation illusions by spectral manipulation. *J. Audio Eng. Soc.* 25, 560 - 565.

de BOER, K. (1940): Plastische Klangwiedergabe. Philips techn. Rdsch. 5, 107 -115.

BOERGER, G. (1965): Die Lokalisation von Gaußtönen. Dissertation Techn. Universität Berlin.

BOHN, G. (1973): A structure for associative information processing. Biol. Cybernetics 29, 193 -200.

BOWER, J. S. (1975): The subjective effects of interchannel phase-shifts on the stereophonic image localization of wideband audio signals. BBC Research Department Report BBC RD 27.

CASPERS, H. (1973): Zentralnervensystem. In : Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie, Hrsg. W. D. KEIDEL. Georg-Thieme-Verlag Stuttgart, 467 - 524.

CHERRY, E.C. (1953): Some experiments on the recognition of speech with one and with two ears. J. Acoust. Soc. Amer. 25, 975 - 979.

CHERRY, E.C., TAYLOR, W.K. (1954): Some further experiments upon recognition of speech, with one and with two ears. J. Acoust. Soc. Amer. 26, 554 - 559.

CREMER, L. (1948): Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Bd. 1. Hirzel-Verlag Stuttgart.

DAMASKE, P. (1967/68): Subjektive Untersuchung von Schallfeldern. Acustica 19, 199 - 213.

DAMASKE, P., MELLERT, V. (1969/70): Ein Verfahren zur richtungstreuen Schallabbildung des oberen Halbraumes über zwei Lautsprecher. Acustica 22, 154 - 162.

DAMASKE, P. (1969/70): Richtungsabhängigkeit von Spektrum und Korrelationsfunktionen der an den Ohren empfangenen Signale. Acustica 22, 191 - 204.

DANILENKO, L. (1967): Binaurales Hören im nichtstationären, diffusen Schallfeld. Dissertation Techn. Hochschule Aachen.

DANNENBRING, G.L., BREGMAN, A.S. (1978): Streaming vs. fusion of sinusoidal components of complex tones. Perception & Psychophysics 24, 369 - 376.

DAVID, E.E., GUTTMAN, N., van BERGEJK, W.A. (1959): Binaural interaction of high-frequency complex stimuli. J. Acoust. Soc. Amer. 31, 774 - 782.

DEATHERAGE, B.H., HIRSCH, I.J. (1959): Auditory localization of clicks. *Journal Acoust. Soc. Amer.* 31, 486 - 492.

DEATHERAGE, B. H. (1966): Examination of binaural interaction. *J. Acoust. Soc. Amer.* 39, 232 -249.

DOMNITZ, R.H., COLBURN, H.S. (1976): Analysis of binaural detection models for dependence on interaural target parameter. *J. Acoust. Soc. Amer.* 59, 598 - 601

DOMNITZ, R.H., COLBURN, H.S. (1977): Lateral position and interaural discrimination. *J. Acoust. Soc. Amer.* 61, 1586 - 1598.

DUIFHUIS, H. (1972): Perceptual analysis of sound. Dissertation Techn. Hochschule Eindhoven.

DURLACH, N.I. (1963): Equalization and cancellation theory of binaural masking level differences. *J. Acoust. Soc. Amer.* 35, 1206 - 1218.

DURLACH, N.I. (1972): Binaural signal detection Equalization and cancellation theory. In : TOBIAS, J. V. (Hrsg.) : *Foundation of modern auditory theory*. Academic Press, New York, Bd. 2, 369 - 462.

ENGEL, W. (1966): Eine neue Methode zur Entkopplung mehrfach geregelter Systeme. Dissertation Techn. Hochschule München.

FLECHTNER, H.J. (1972): *Grundbegriffe der Kybernetik*. Hirzel-Verlag Stuttgart.

FRANK, H. (1970): *Kybernetik, Brücke zwischen den Wissenschaften*. Umschau-Verlag Frankfurt.

FRANSSEN, N.V. (1960): Some considerations of the mechanism of direction hearing. Dissertation Techn. Hochschule Delft

FRANSSEN, N. V. (1963): *Stereophonie*. Philips techn. Bibl., Eindhoven.

FUKUSHIMA, K. (1973): A model of associative memory in the brain. *Kybernetik* 12, 58 - 63.

FUKUSHIMA, K., MIYAKE, S. (1978) : A self-organizing network with a function of associative memory : Feedback-type cognitron. *Biol. Cybernetics* 28, 201 208.

GARDNER, M.B. (1969): Image fusion, broadening and displacement in sound localization. *J. Acoust. Soc. Amer.* 46, 339 - 349.

GARDNER, M. (1973): Some single- and multiple-source localization effects. *Journal Audio Eng. Soc.* 21, 430 - 437.

GRUBER, J. (1967): Hörversuche mit moduliertem Rauschen unterschiedlicher interauraler Korrelation. Dissertation Technische Universität Berlin.

HAFTER, E.R., JEFFRESS, L.A. (1968): Two image lateralizations of tones and clicks. *J. acoust. Soc. Amer.* 44, 563- 569.

HAFTER, E.R. (1977): Lateralization model and the role of time-intensity tradings in binaural masking : Can the data be explained by a time-only hypothesis? *J. Acoust. Soc. Amer.* 62, 633 - 635.

HAFTER, E.R., DYE, R.H., GILKEY, R.H. (1979): Lateralization of tonal signals which have neither onsets nor offsets. *J. acoust. Soc. Amer.* 65, 471 -477.

HALL, J.L. (1964): Minimum detectable change in interaural time or intensity difference for brief impulsive stimuli. *J. Acoust. Soc. Amer.* 36, 2411 - 2413.

HARRIS, G. G. (1960): Binaural interaction of impulse stimuli and pure tones. *J. acoust. Soc. Amer.* 32, 685 - 692.

HAWKINS, D. B., YOUNG, L. L., PARKER, C. A. (1978) : An investigation of the interaural time difference threshold for speech. *Perception & Physophysics* 24, 168 - 170.

JEFFRESS, L.A., TAYLOR, R.W. (1961): Lateralisation versus localization. *Journal Acoust. Soc. Amer.* 33, 482 - 483.

JEFFRESS, L.A., BLODGETT, H.C., DEATHERAGE, B.H. (1962): Effect of interaural correlation on the precision of centering a noise. *J. Acoust. Soc. Amer.* 34, 1122 - 1123.

KEIDEL, W.D. (1973) : Informationsverarbeitung. In: *Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie*, Hrsg. W. D. KEIDEL. Georg-Thieme-Verlag Stuttgart.

KLEMM, O. (1909): Lokalisation von Sinneseindrücken bei disparaten Nebenreizen. *Psychol. Stud.* 5, 73 - 162.

KLEMM, O. (1920): Untersuchungen über die Lokalisation von Schallreizen IV : Über den Einfluß des binauralen Zeitunterschiedes auf die Lokalisation. Arch. ges. Psychol. 40, 117 - 145.

KOENIG, A.H., ALLEN, J.B., BERKLEY, D.A. (1977): Determination of masking-level differences in a reverberant environment. J. Acoust. Soc. Amer. 61, 1374 - 1376.

KOHONEN, T., REUKALA, E., MAEKISARA, K., VAINIO, L. (1976): Associative recall of images. Biol. Cybernetics 22, 159 - 168.

KOHONEN, T., OJA, E. (1976): Fast adaptive formation of orthogonalizing filters and associative memory in recurrent network of neuron-like elements. Biol. Cybernetics 21, 85 - 95.

KOHONEN, T. (1977): Associative memory. Berlin - Heidelberg - New York Springer-Verlag.

LAWS, P. (1972): Zum Problem des Entfernungshörens und der Im-Kopf-Lokalisiertheit von Hörereignissen. Dissertation Technische Hochschule Aachen.

LAWS, P., BLAUERT, J., PLATTE, H-J. (1976/1977): Anmerkungen zur stereofonen kopfbezogenen Übertragungstechnik. Acustica 36, 45 - 47.

LEAKEY, D.M. (1959): Some measurement on the effects of interchannel intensity and time differences in two channel sound systems. J. Acoust. Soc. Amer. 31, 977 - 986.

LEHRINGER, F. (1979) : Ober die Beeinflussung der Hörereignisrichtung durch das Sehereignis bei der Personendarstellung in Telekonferenzen. Acustica 42, 240 - 248.

LICKLIDER, J.C.R. (1951): A duplex theory of pitch perception. Experientia 7, 128 - 134.

LOY, P. (1978): Phantomschallquellenbildung bei zwei in der Phase gedrehten Signalen. Diplomarbeit Techn. Universität Berlin.

MAKITA, Y. (1962): On the directional localization of sound in the stereophonic sound field. Europ. Broadcasting Union Rev. Part A, 73, 102 - 108.

MARKO, H. (1971): Ein Funktionsmodell für die Aufnahme, Speicherung und Erzeugung von Informationen im Nervensystem. Röntgen-Blätter 24.

- MARKO, H. (1974): A biological approach to pattern recognition. IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, vol. SMC - 4, 34 - 39.
- MARKO, H. (1978): Modelle der visuellen Wahrnehmung. NTG-Fachberichte 65, 19 - 29.
- MASSARO, D., WARNER, D. (1977): Dividing attention between auditory and visual perception. Perception & Psychophysics 21, 569 - 573.
- MATSUDAIRA, T. K., FUKAMI, T. (1973): Phase difference and sound image localization. J. Audio Eng. Soc. 21, 792 - 797.
- MERTENS, H. (1965): Directional hearing in stereophony theory and experimental verification. Europ. Broadcasting Union Rev. Part A, 92, 1 - 14.
- MILLS, A. W. (1972): "Auditory localization", Chapter 8 of : Foundations of modern auditory theory (ed. J.V. TOBIAS) vol. II, Academic Press, New York.
- MURAKAMI, K., AKAISHI, S., AIBARA, T. (1978): On optimal associative recall by an incomplete key. Biol. Cybernetics 30, 95 - 97.
- NAKAMURA, S., KOMORI, S., KOYASU, M. (1976): On the importance of the individual shape of pinnae for the construction of a recording dummy head. J. Acoust. Soc. Japan 32, 618 - 620.
- ORTMEYER, W. (1966): Über die Lokalisierung von Schallquellen bei Zweikanalstereophonie. Hochfrequenztechn. u. Elektroakustik 75, 77 - 87.
- ORTMEYER, W. (1966): Schallfelduntersuchungen bei Zweikanalstereophonie. Hochfrequenztechn. u. Elektroakustik 75, 137 - 145.
- OSMAN, E. (1971): A correlation model of binaural masking level differences. J. Acoust. Soc. Amer. 50, 1494 - 1511.
- PALEF, S. R., NICKERSON, R.B. (1978): Representing auditory space. Perception & Psychophysics 23, 445 - 450.
- PLENGE, G. (1972): über das Problem der Im-Kopf-Lokalisation. Acustica 26, 241 - 252.
- PLENGE, G. (1973): über das Problem der intracranialen Ortung von Schallquellen bei der akustischen Wahrnehmung des Menschen. Habilitationsschrift TU-Berlin.

PLENGE, G. (1974): On the differences between localization and lateralization. *J. Acoust. Soc. Amer.* 56, 944 - 951.

PLENGE, G., TILSE, U. (1975): Cocktail-Party-Effekt with and without conflicting visual cues. 50th AES-Convention, London.

POGIO, T. (1975): On optimal nonlinear associative recall. *Biol. Cybernetics* 19, 201 - 209.

POLLACK, I. (1977): Continuation of auditory frequency gradients across temporal breaks : The auditory Poggendorff. *Perception & Psychophysics* 21, 563 - 568.

RATLIFF, P. A. (1974): Properties of hearing related to quadrophonic reproduction. BBC Research Department Report BBC RD 38.

REICHARDT, W., HAUSTEIN, B.-G. (1968): Zur Ursache des Effektes der Im-Kopf-Lokalisation. *Hochfrequenztechn. u. Elektroakustik* 77, 183 - 189.

ROESER, D. (1965): Schallrichtungsbestimmung bei krankhaft verändertem Gehör. Dissertation Techn. Hochschule Aachen.

SAKAMOTO, N., GOTOH, T., SHIMBO, M., KOGURE, T. (1977): Some considerations of an advanced stereophonic reproducing system. 19th Intern. Congr. on Acoustics, Madrid.

SANDEL, T.T., TEAS, D.C., FEDDERSEN, W.E., JEFFRESS, L.A. (1955): Localization of sound from single and paired sources. *J. Acoust. Soc. Amer.* 27, 842 - 852.

McSAYERS, B.A. (1964): Acoustic-image lateralization judgement with binaural tones. *J. Acoust. Soc. Amer.* 36, 923 - 926.

SCHENKEL, K.D. (1967): Accumulation theory of binaural-masked thresholds. *J. Acoust. Soc. Amer.* 41, 20 - 30.

SCHREIBER, L. (1965): Hörtheorien im Spiegel elektrischer Analogien. *Frequenz* 19, 255 - 261.

SCHROEDER, M. (1975): Models of hearing. *Proc. of the IEEE* 63, 1332 - 1350.

TERHARDT, E. (1972): Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen I und II. *Acustica* 26, 173 - 186 und 187 - 199.

- THEILE, G. (1975): Seitliche Phantomschallquellen. Diplomarbeit Technische Universität Berlin.
- THEILE, G., PLENGE, G. (1977): Localization of lateral phantom sources. 9. Audio Eng. Soc. 25, 196 - 200.
- THEILE, G. (1978): Weshalb ist der Kammfiltereffekt bei Summenlokalisierung nicht hörbar? Vortrag Tonmeistertagung Berlin.
- TOOLE, F.E., McSAYERS, B.A. (1965): Lateralization judgements and the nature of binaural acoustic images. J. Acoust. Soc. Amer. 37, 319 - 324.
- WARNCKE, H. (1941): Die Grundlagen der raumbezüglichen stereophonischen Übertragung im Tonfilm. Akust. Z. 6, 174 - 188.
- WENDT, K. (1963): Das Richtungshören bei der Überlagerung zweier Schallfelder bei Intensitäts- und Laufzeitstereophonie. Dissertation Techn. Hochschule Aachen.
- WENDT, K. (1964): Das Richtungshören bei Zweikanal-Stereophonie. Rundfunk-techn. Mitt. 8, 171 - 179.
- WESS, O., ROEDER, U. (1977): A holographic model for associative memory chains. Bio. Cybernetics 27, 89 - 98.
- WETTSCHUREK, R. (1976): Über die Abhängigkeit raumakustischer Wahrnehmungen von der Lautstärke. Dissertation Techn. Hochschule Berlin.
- WHITWORTH, R.H., JEFFRESS, L.A. (1961): Time versus intensity in the localization of tones. J. Acoust. Soc. Amer. 33, 925 - 929.
- WIGSTROEM, H. (1974): A model of a neural-network with recurrent inhibition. Kybernetik 16, 103 - 112.
- WILLWACHER, G. (1976): Fähigkeiten eines assoziativen Speichersystems im Vergleich zu Gehirnfunktionen. Biol. Cybernetics 24, 181 - 198.
- ZWICKER, E., FELDKELLER, R. (1967): Das Ohr als Nachrichtenempfänger. Hirzel-Verlag Stuttgart.

Herrn Prof. Dr. phil. G. Plenge danke ich für viele fruchtbare Anregungen und seine stete Unterstützung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. L. Cremer und Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Boerger danke ich für weiterführende Diskussionen und viele wertvolle Hinweise.

Allen Versuchspersonen danke ich für ihre Teilnahme an den oft mühevollen Hörversuchen.

Bei meinen Kollegen, stellvertretend sei hier Herr Dr.-Ing. P. Schöne genannt, ferner bei Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Blauert bedanke ich mich für anregende Diskussionen.

Frl. A. Gatermann möchte ich besonders danken für ihre Sorgfalt und Geduld bei den Schreibarbeiten.

Dem Heinrich-Hertz-Institut, Berlin, und dem Institut für Rundfunktechnik, München, danke ich für die Möglichkeit, die experimentellen Untersuchungen durchzuführen.

LEBENS LAUF

	Günther T h e i l e
11. Oktober 1943	geboren in Rotenburg / Hann.
April 50 - Febr. 63	Schulbesuch in Bremen, Abschluß Abitur
1.4.63 - 31.3.65	Bundeswehr-Dienst
1.4.65 - 30.9.65	Praktikum, Lloyd-Dynamowerke in Bremen
2.2.66 - 9.9.66	Praktikum, Klöckner-Werke in Bremen
WS 66/67 - SS 69	Studium Elektrotechnik an der Ingenieur- akademie Bremen, Abschluß „Ing.-grad.“
15.8.69 - 30.6.70	Entwicklungs-Ing. bei Philips-Electrologica
WS 70/71 - SS 75	Studium an der Technischen Universität Berlin, Schwerpunkt Akustik / Nachrichten- technik
15.2.71 - 22.7.75	Mitarbeiter bei den Isophon-Werken GmbH
1.5.71 - 15.7.72	Tutor an der Technischen Fachhochschule Berlin, Lehrgebiet „Technische Akustik“
1.2.72 - 31.8.73	Stud. Mitarbeiter am Institut für Kommuni- kationswissenschaft, TU-Berlin
1.6.74 - 31.7.75	Mitarbeiter am Institut für Technische Akustik, TU Berlin, Forschungsprojekt „Modellakustik“
Oktober 75	Abschluß des Studiums mit Diplom- Hauptprüfung
1.10.75 - 14.4.77	Wiss. Mitarbeiter am Heinrich-Hertz- Institut, Berlin, Forschungsprojekt „Tele- konferenz“
seit 15.4.77	Wiss. Mitarbeiter am Institut für Rundfunk- technik, München