

Weshalb ist der Kammfilter-Effekt bei Summenlokalisation nicht hörbar?

Zusammenfassung:

In der Phantomschallquellsituation setzen sich die an den beiden Ohren auftretenden Schallfelder aus je zwei gegeneinander verzögerten Anteilen zusammen. Infolgedessen enthält jedes der an den beiden Ohren auftretenden Signale lineare Verzerrungen entsprechend des Kammfilter-Effekts, die sich aber nicht auf die Phantomschallquelle auswirken. Die Phantomschallquelle läßt sich hinsichtlich ihres Spektrums nicht als Realschallquelle auffassen („spektraler Einwand“ zur Summenlokalisation). Das wird besonders deutlich an der Phantomschallquellen-Klangfarbe: die spektrale Veränderung ist beim einohrigen Hören deutlich wahrnehmbar, nicht jedoch bei zweiohrigem Hören.

Der spektrale Einwand stellt die Summenlokalisationstheorien in Frage. Er führt auf die Hypothese, daß das Gehör die Komponenten der Summensignale, die an den Ohren auftreten, wieder trennen kann. Eine derartige Gehörfähigkeit erscheint möglich, wenn die Lokalisation als Assoziationsprozeß aufgefaßt wird. Ein daraus entwickeltes „Assoziationsmodell“ erklärt das Ausbleiben der auf Grund des Kammfiltereffektes zu erwartenden Klangfärbung.

Der „spektrale Einwand“ zur Summenlokalisation

Die Phantomschallquelle hat nicht nur hinsichtlich ihrer Anwendung bei der elektroakustischen Übertragung von räumlich verteilten Schallquellen eine besondere Bedeutung. Die Lokalisation im überlagerten Schallfeld kann

außerdem wichtige Einblicke in die Funktion des Gehörs beim räumlichen Hören geben. Die Gesetzmäßigkeiten für Phänomene der Phantomschallquelle sind daher auch in einer Vielzahl von Untersuchungen beschrieben worden, und es wurden für deren Erklärung unterschiedliche Theorien entwickelt.

Alle bekannten Phantomschallquellentheorien basieren gemeinsam auf der grundsätzlichen Annahme, daß „Summenlokalisierung“ 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 Real-schallquelle 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 [22], Franssen [11], Makita [24], Wendt [40], Mertens [27].

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, so daß jedes der an den beiden Ohren auftretenden Signale eine spektrale Veränderung entsprechend der Kammfilterwirkung enthält.

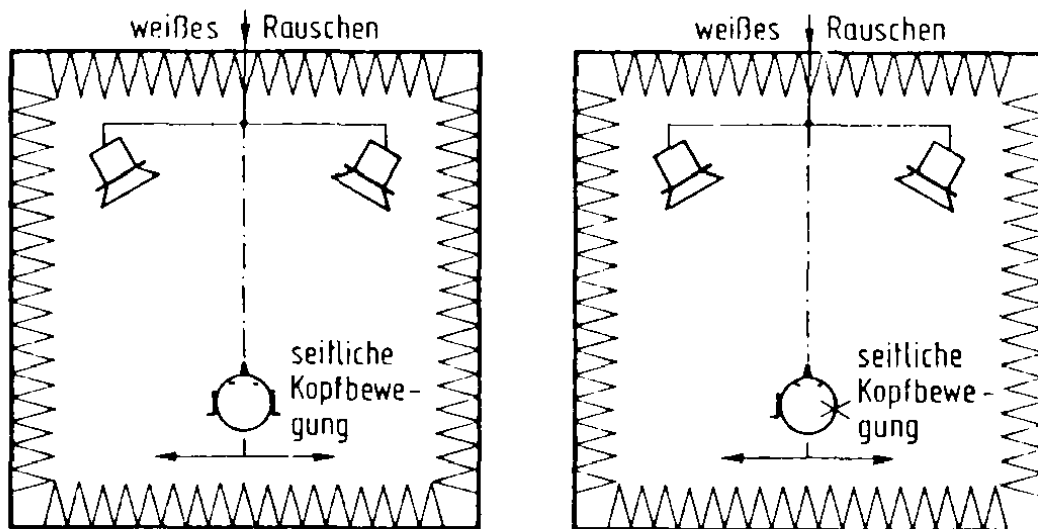
Die jüngsten Erfahrungen mit kopfbezogenen stereofonen Aufnahme-Wiedergabesystemen haben gezeigt, daß bereits geringe lineare Verzerrungen zur Im-Kopf-Ortung führen können (Plenge [31], Nakamura [28], Laws et. al. [21], Blauert et. al. [4]). Die Lokalisation, d. h. das Auftreten von Hörereignissen außerhalb des Kopfes, setzt ge-

nau 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 Lautsprecher signale einzeln hervorrufen würden (Reichardt/Haustein [35]). 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 [1]); die Elevation eines Hörereignisses ergibt sich entsprechend aus den spektralen Merkmalen der Ohrsignale. 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.

Besonders deutlich läßt sich die Unwirksamkeit des Kammfilter-Effektes in einem einfachen Hörversuch zeigen (Bild 1): Man stelle sich im reflexionsarmen Raum symmetrisch die beiden Lautsprecher vor, 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 tue man, während ein Ohr zugehalten wird: man nimmt deutlich eine stark wechselnde Klangfarbe wahr. Die Klangverfärbung, die vom Kammfilter hervorgerufen wird, und die an jedem Ohr einzeln hörbar ist, verschwindet bei zweiohrigem Hören, d. h. sobald eine Phantomschallquelle auftritt. Ihr Auftreten impliziert die Unterdrückung der Klangverfärbung. Dieser Effekt ist bisher noch nicht beschrieben worden.



zweiohriges Hören :
Phantomschallquelle wandert
Klangfarbe ändert sich kaum

einohriges Hören :
keine Phantomschallquelle
Klangfarbe ändert sich stark

Bild 1: Versuch zur Klangverfärbungsunterdrückung: Die Kammfilterwirkung ist nur bei einohrigem Hören wahrnehmbar

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.

Dieser „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 vollständigen Erklärung der Phantomschallquelle hinsichtlich des Ortes führt, der also die allgemeinen Erkenntnisse zur Im-Kopf-Ortung, zum Entfernungshören und zum Richtungshören einheitlich berücksichtigt.

Das Assoziationsmodell

Der „spektrale Einwand“ weist darauf hin, daß nicht die an den Ohren tatsächlich auftretenden Spektren wirksam sind, sondern offenbar diejenigen Spektren, welche die Lautsprecher einzeln an den Ohren hervorrufen. Diese Tatsache führt auf die Vermutung, daß das Gehör die Komponenten der Summensignale, die an den Ohren auftreten, wieder trennen kann. Eine derartige Gehörfähigkeit erscheint zwar nicht mit den herkömmlichen Methoden der Signalanalyse erklärbar, aber sie muß in Betracht gezogen werden: es läßt sich nicht nachweisen, daß sie theoretisch unmöglich ist.

Es gibt ähnliche Gehörfähigkeiten, die nachgewiesen, aber nachrichtentechnisch nicht erklärbar sind. Dazu gehört beispielsweise das Phänomen der „simultanen Hörereignisse“ bei Darbietung verschiedener Signale über ei-

nen Lautsprecher. Das entspricht nachrichtentechnisch dem Empfang getrennter Signale nach Übertragung über einen einzigen Kanal mit der Bandbreite eines Signals.

Eine wichtige Arbeitshypothese für die Entwicklung entsprechender Wahrnehmungsmodelle stellt die Annahme dar, daß bestimmte aktuelle Reize ganz bestimmte Assoziationsprozesse auslösen. Die Annahme von Assoziationsprozessen bei Wahrnehmungsvorgängen ist aus verschiedener Sicht begründet:

Aus neurophysiologischer Sicht gilt ein „sensorisches Assoziationssystem“ in der nervösen Verarbeitung des zentralen Nervensystems als erwiesen (z. B. Caspers [6]). Zerstört man z. B. das „akustische Assoziationsfeld“ (im linken Temporallappen des menschlichen Gehirns), so geht u. a. das Sprachverständnis verloren. Obwohl der Betroffene noch hören kann, bleibt ihm die Bedeutung des Signals verborgen. Assoziative Informationsspeicherung und assoziativer Informationsaufruf stellen offenbar ein Grundprinzip der Funktion des menschlichen Gehirns dar, welches in jüngerer Zeit mit verschiedenen Modellen nachgebildet und untersucht wurde (z. B. Fukushima [12], Wigstroem [42], Poggio [34], Kohonen et. al. [17], Kohonen/Oja [18], Kohonen [19], Wess/Roeder [41], Bohn [5], Fukuschima/Miyake [13]). Das Modell von Willwacher [43] ist in der Lage, parallele und serielle Assoziationen, die Zuordnung von Mustern aus zwei Systembereichen, die Assoziation einer wahrscheinlichen Musterfolge, die Störung des Assoziationsvorganges, das Umlernen und anderes nachzuahmen.

Aus informationstheoretischer Sicht entspricht der Assoziationsvorgang der Funktion eines hochwirksamen Filters zur Informationsreduktion, welche zwischen peripherer Rezeption (ca. 10^9 bit/s) und bewußter Wahrnehmung (ca. 20 bit/s) stattfindet (z. B. Frank [10]). Gespeicherte Assoziationsmuster, die aufgrund früherer Erfahrungen geprägt werden, bewirken einerseits eine sinnvolle Informationsselektion. Andererseits ermöglichen sie, trotz reduzierter Information die determinierten Reizkonfigurationen der Umwelt mit ausreichender Genauigkeit zu erkennen (z. B. Trincker [38, 39]; Marko [25], Keidel [15]).

Aus wahrnehmungspsychologischer Sicht geben Assoziations- und Mustererkennungsmechanismen die oft einzig mögliche Erklärung bestimmter Phänomene der visuellen und akustischen Wahrnehmung. Das gilt auch für Phänomene des räumlichen Hörens. Folgende Beispiele legen nahe, daß der Zusammenhang zwischen Hörereignisort und Schallquellenort mit den Assoziationseigenschaften des Gehörs gegeben ist:

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 [1]) und zur Prägung von richtungsbestimmenden Reizmustern führen.
2. Die Hörereignisentfernung steht bei Signalkennntnis im direkten Zusammenhang mit Signalpegel und -spektrum (z. B. Laws [20]). Bei Lautsprecherdarbietung im freien Schallfeld verhält sie sich abhängig von der Hörerfahrung (Plenge [31]): entscheidend ist das Verhältnis der Lautheit und Klangfarbe zur assoziierten Lautstärke und „Tonlage“ der Schallquelle.
3. Die Hörereignisrichtung entspricht nicht der Schalleinfallrichtung bei Fehlanpassung an die bisherige Hörerfahrung, beispielsweise nach plötzlicher Normalisierung eines einseitig krankhaft veränderten Gehörs (Operation, Roeser [36]).
4. Der Hörereignisort läßt sich, in bestimmten Grenzen unabhängig vom Schallquellenort, durch Assoziationslenkung beeinflussen, beispielsweise durch begleitende akustische oder optische Reize [z. B. Klemm [16] („räumliche Komplikation“), Blauert [2], Plenge [31], Plenge/Tilse [33], Massaro/Warner [26]].
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 [30, 32]). Im-Kopf-Ortung tritt auf, sobald der Reiz sich nicht einem ortsbestimmenden Reizmuster zuordnen läßt; sie kann durch Assoziationslenkung verhindert werden (z. B. passende optische Informationen) (Jeffres/Taylor [14]).

Wie sich zeigen wird, ergibt der hypothetische Assoziationsprozeß ebenso eine plausible Erklärung für die vermutete Fähigkeit des Gehörs, die Komponenten eines überlagerten Schallfeldes unterscheiden zu können. Deshalb lautet der grundlegende Ansatz für ein umfassendes Lokalisationsmodell.

Die Lokalisation geschieht über eine assoziativ gesteuerte Mustererkennung.

Das Prinzip dieses „Assoziationsmodells“ geht aus Bild 2 hervor.

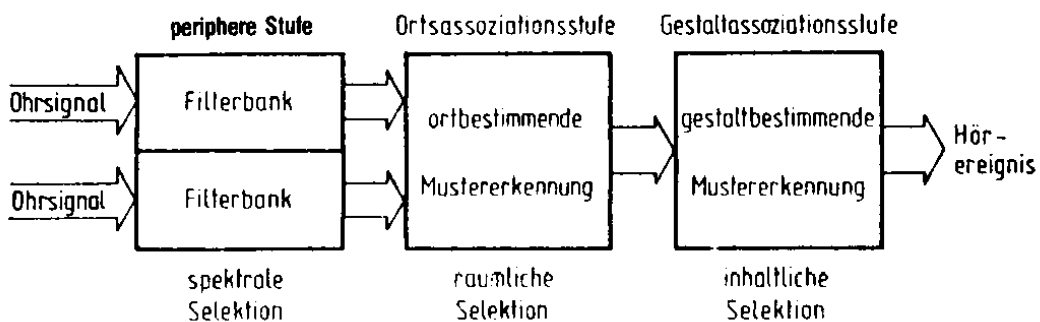


Bild 2

Es enthält neben der ersten Stufe, in der die Ohrsignale zunächst mit Hilfe von Filterbänken im Bereich etwa konstanter relativer Bandbreite spektral zerlegt werden, zwei nachfolgende Stufen der Reizauswertung: Die erste, binaurale Verarbeitungsstufe beschreibt den Mechanismus der assoziativ gesteuerten Mustererkennung (Ortsassoziationsstufe), die zweite Verarbeitungsstufe enthält die Prozesse, welche in der Literatur unter „Signalerkennung“ beschrieben werden, und welche die eigenschaftlichen Merkmale des Hörereignisses mit Ausnahme der räumlichen Merkmale bestimmen (Gestaltassoziationsstufe).

Beide Verarbeitungsstufen wirken im Sinne der notwendigen Informationsreduktion; sie sind Bestandteil des Kurzzeitgedächtnisses und des Langzeitgedächtnisses. Sie müssen durchlaufen werden, damit der Reiz in der beschriebenen Weise zu einer Wahrnehmung führt.

Die Ortsassoziationsstufe hat die Eigenschaft, einen empfangenen Reiz vorzugsweise als „Lokalisationsreiz“ zu deuten, d. h. sie vergleicht spontan den aktuellen Reiz mit Reizmustern, welchen infolge der Erfahrung bestimmte Hörereignisorte zugeordnet sind. Nur ein Lokalisationsreiz führt zur Lokalisation. Er liegt vor, wenn die Ohrsignalmerkmale hinsichtlichliche Zeit und Spektrum eine *Ortsassoziation* auslösen. Damit ist das Gehör in der Lage, aus einer Summe von Signalen die für einen Schallquellenort charakteristischen Signalanteile zusammenzufassen und geschlossen weiterzuleiten (Lokalisationsreizelektion). „Geschlossen weiterleiten“ heißt dabei: Der Ortsassoziationsprozeß 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 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 und Signalverdeckung ebenso wie der Erkennung und Bewertung von Musik und Sprache. Von besonderer Bedeutung für das räumliche Hören sind im Assoziationsmodell die Gesetzmäßigkeiten der binauralen Signalerkennung (BMLD und BILD, s. Blauert [3], S. 206ff.), die dieser Stufe zugeschrieben werden. Entsprechende Modelle, z. B. das „Akkumulations-Modell“ von Schenkel [37], das „EC-Modell“ von Durlach [8, 9], oder das „Korrelationsmodell“ von Osman [29], sind also der Signalverarbeitung, die den Lokalisationsprozeß beschreibt, nachgeschaltet.

Die Wirkungsweise des Assoziationsmodells in der Phantomschallquellsituation ist in Bild 3 anhand von Impulsdiagrammen dargestellt.

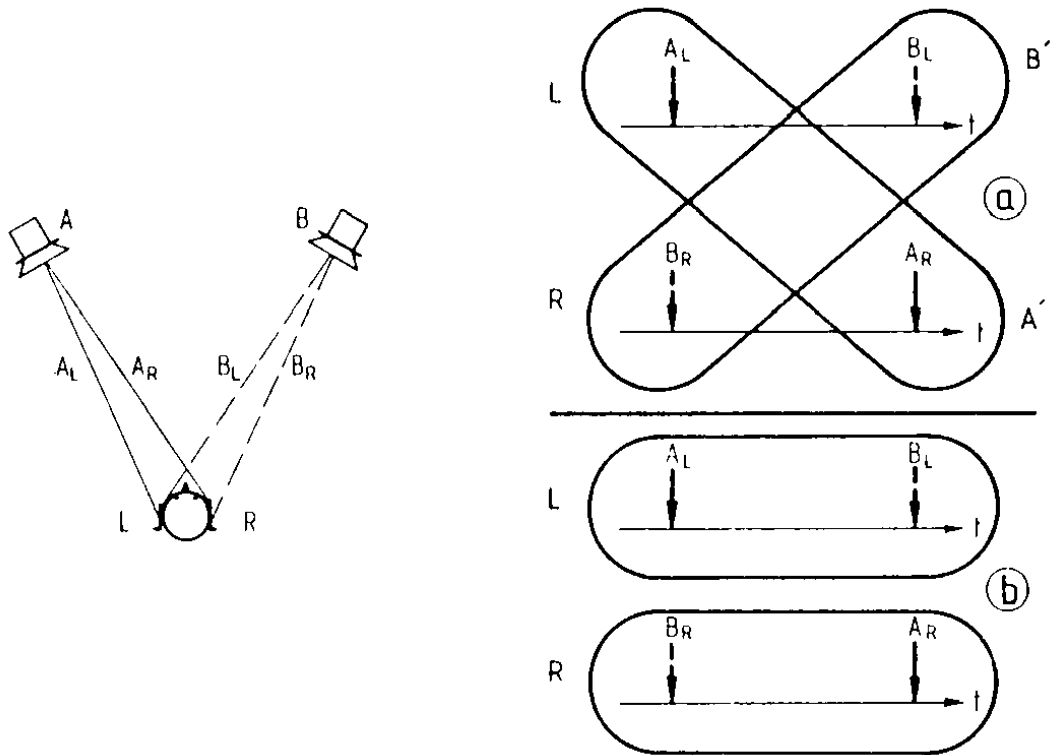


Bild 3: Auswertung der Ohrsignale in einer Phantomschallquellsituation
a) Assoziationsprinzip
b) Summenlokalisationsprinzip

Die Berechtigung dieser Darstellung ist mit der Annahme gegeben, daß das Gehör jedes Ohrsignal zunächst ähnlich einer Autokorrelationsanalyse auswertet (z. B. Licklider [23]), und zwar für schmale Frequenzbänder separat (z. B. Zwicker/Feldkeller [44], Duifhuis [7], Blauert [3]). Die relative Lage der Maxima gibt dann die interaurale Zeitdifferenz je Frequenzband wieder. – Unter der Vereinfachung, daß die interauralen Zeitdifferenzen, welche von der Schalleinfallrichtung herrühren, frequenzunabhängig sind, repräsentieren die Impulspaare A_L/A_R und B_R/B_L die Zeitmerkmale ausreichend breitbandiger Schallquellen.

Infolge seiner Assoziations-eigenschaften 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_R/B_L lösen wegen korrespondierender Zeit- und spektraler Merkmale je eine Ortsassoziation aus (Bild 3a). Nach dieser assoziativ gesteuerten Umkodierung existieren nur noch die beiden Reizantworten A' und B' ; sie enthalten die eigenschaftlichen Merkmale, die von der Schallquelle A bzw. B herrühren. Im Gegensatz dazu ist in Bild 3b 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.

Die Reizantworten A' und B' der Ortsassoziationsstufe gelangen an die Gestaltassoziationsstufe (vgl. Bild 2) und werden hier u. a. dem Prozeß der Signalerkennung unterworfen. 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. –

Das Assoziationsmodell erklärt damit im Gegensatz zu Summenlokalisationsmodellen die Unwirksamkeit der linearen Verzerrungen, die infolge des Kammfilter-Effektes im überlagerten Schallfeld einer Phantomschallquellen-situation auftreten.

Literatur:

- [1] Blauert, J. (1969): Untersuchungen zum Richtungshören in der Medianebene bei fixiertem Kopf. Dissertation Techn. Hochschule Aachen.

- [2] Blauert, J. (1970): Ein Versuch zum Richtungshören bei gleichzeitiger optischer Information. *Acustica* 23, 118–119.
- [3] Blauert, J. (1974): Räumliches Hören. Hinzel Verlag Stuttgart.
- [4] Blauert, J., Mellert, V., Platte, H.-J., Laws, P., Poulsen, Gottlob, D., Plenge, G. (1978): Wissenschaftliche Grundlagen der kopfbezogenen Stereophonie. Vorkolloquium zur DAGA, Bochum.
- [5] Bohn, G. (1978): A structure for associative information processing. *Biol. Cybernetics* 29, 193–200.
- [6] Caspers, H. (1973): Zentralnervensystem. In: Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie, Hrsg. W. D. Keidel. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 467–524.
- [7] Duifhuis, H. (1972): Perceptual analysis of sound. Dissertation Techn. Hochschule Eindhoven.
- [8] Durlach, N. I. (1963): Equalization and cancellation theory of binaural masking-level differences. *J. acoust. Soc. Amer.* 35, 1206–1218.
- [9] 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.
- [10] Frank, H. (1970): Kybernetik-Brücke zwischen den Wissenschaften. Umschau Verlag Frankfurt.
- [11] Franssen, N. V. (1960): Some considerations of the mechanism of directional hearing. Dissertation Techn. Hochschule Delft.
- [12] Fukushima, K. (1973): A model of associative memory in the brain. *Kybernetik* 12, 58–63.
- [13] Fukushima, K., Miyake, S. (1978): A self-organizing network with a function of associative memory: Feedback-type cognitron. *Biol. Cybernetics* 28, 201–208.
- [14] Jeffres, L. A., Taylor, R. W. (1961): Lateralisation versus localization. *J. acoust. Soc. Amer.* 33, 482–483.
- [15] Keidel, W. D. (1973): Informationsverarbeitung. In: Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie, Hrsg. W. D. Keidel. Georg Thieme Verlag Stuttgart.

- [16] Klemm, O. (1909): Lokalisation von Sinneseindrücken bei disparaten Nebenreizen. *Psychol. Stud.* 5, 73–162.
- [17] Kohonen, T., Reuhkala, E., Maekisara, K., Vainio, L. (1976): Associative recall of images. *Biol. Cybernetics* 22, 159–168.
- [18] Kohonen, T., Oja, E. (1976): Fast adaptive formation of orthogonalizing filters and associative memory in recurrent networks of neuron-like elements. *Biol. Cybernetics* 21, 85–95.
- [19] Kohonen, T. (1977): Associative memory. Berlin/Heidelberg/New York: Springer Verlag.
- [20] Laws, P. (1972): Zum Problem des Entfernungshörens und der Im-Kopf-Lokalisiertheit von Hörereignissen. Dissertation Techn. Hochschule Aachen.
- [21] Laws, P., Blauert, J., Platte, H.-J. (1976/77): Anmerkungen zur stereophonen kopfbezogenen Übertragungstechnik. *Acustica* 36, S. 45–47.
- [22] 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.
- [23] Licklider, J. C. R. (1951): A duplex theory of pitch perception. *Experientia* 7, 128–134.
- [24] Makita, Y. (1962): On the directional localization of sound in the stereophonie sound field. *Europ. Broadcasting Union Rev. Part A*, 73, 102–108.
- [25] Marko, H. (1971): Ein Funktionsmodell für die Aufnahme, Speicherung und Erzeugung von Informationen im Nervensystem. *Röntgen-Blätter* 24.
- [26] Massaro, D., Warner, D. (1977): Dividing attention between auditory and visual perception. *Perception & Psychophysics* 21, 569–573.
- [27] Mertens, H. (1965): Directional hearing in stereophony theory and experimental verification. *Europ. Broadcasting Union Rev. Part A*, 92, 1–14.
- [28] 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.

- [29] Osman, E. (1971): A correlation model of binaural masking level differences. *J. acoust. Soc. Amer.* 50, 1494–1511.
- [30] Plenge, G. (1972): Über das Problem der Im-Kopf-Lokalisation. *Acustica* 26, 241–252.
- [31] Plenge, G. (1973): Über das Problem der intracraniellen Ortung von Schallquellen bei der akustischen Wahrnehmung des Menschen. Habilitationsschrift TU Berlin.
- [32] Plenge, G. (1974): On the differences between localization and lateralization. *J. acoust. Soc. Amer.* 56, 944–951.
- [33] Plenge, G., Tilse, U. (1975): Cocktail-Party-Effect with and without conflicting visuel cues. 50th AES-Convention, London.
- [34] Poggio, T. (1975): On optimal nonlinear associative recall. *Biol. Cybernetics* 19, 201–209.
- [35] Reichardt, W., Haustein, B.-G. (1968): Zur Ursache des Effektes der Im-Kopf-Lokalisation. *Hochfrequenztechn. u. Elektroakustik* 77, 183–189.
- [36] Roeser, D. (1965): Schallrichtungsbestimmung bei krankhaft verändertem Gehör. Dissertation Techn. Hochschule Aachen.
- [37] Schenkel, K. D. (1967): Accumulation theory of binaural-masked thresholds. *J. acoust. Soc. Amer.* 41, 20–30.
- [38] Trincker, D. (1967): Informationsaufnahme und Kurzzeitspeicherung im Dienste der Raumorientierung von Tier und Mensch. In: *Fortschritt der Kybernetik*, Hrsg. W. Kroebe, München.
- [39] Trincker, D. (1970): Informationsspeicherung bei Lebewesen. In: *Kybernetik*, Hrsg. H. Frank, Umschau Verlag Frankfurt.
- [40] Wendt, K. (1963): Das Richtungshören bei der Überlagerung zweier Schallfelder bei Intensitäts- und Laufzeitstereophonie. Dissertation Techn. Hochschule Aachen.
- [41] Wess, O., Roeder, U. (1977): A holographic model for associative memory chains. *Biol. Cybernetics* 27, 89–98.

- [42] Wigstroem, H. (1974): A model of a neural network with recurrent inhibition. *Kybernetik* 16, 103–112.
- [43] Willwacher, G. (1976): Fähigkeiten eines assoziativen Speichersystems im Vergleich zu Gehirnfunktionen. *Biol. Cybernetics* 24, 181–198.
- [44] Zwicker, E., Feldkeller, R. (1967): Das Ohr als Nachrichtenempfänger. Hirzel Verlag Stuttgart.