

Über das Problem der Im-Kopf-Lokalisation

von G. PLENGE

Mitteilung aus dem Heinrich-Hertz-Institut, Berlin-Charlottenburg

Zusammenfassung

Zur Entstehung der Im-Kopf-Lokalisation (IKL) sind bisher Theorien aufgestellt worden, die in der Regel von der IKL im Zusammenhang mit elektroakustischen Darbietungen ausgehen. Dabei ergeben sich Widersprüche zwischen den Theorien, die von der Kopfhörerbeschallung ausgehen, und denen, die an IKL bei Lautsprecherbeschallung anknüpfen.

Es wird eine neue Hypothese eingeführt, die eine widerspruchsfreie Erklärung aller beobachteten Fälle von IKL ermöglichen soll. Obwohl IKL meist im Zusammenhang mit elektroakustischen Darbietungen auftritt, geht die Hypothese davon aus, daß die IKL grundsätzlich nicht durch bestimmte Eigenheiten elektroakustischer Übertragungsverfahren erklärbar ist. Es wird angenommen, daß eine korrekte Lokalisation unter Umständen erst nach kurzzeitigen Lernprozessen über Eigenheiten der Schallquelle und des Raumes, in dem die Quelle tönt, möglich ist. Bei Störungen dieses Ablaufes kann IKL auftreten.

Über die Durchführung von drei Versuchsreihen und deren Ergebnisse wird berichtet.

1. Zunächst wurde versucht, einen gleitenden Übergang zwischen Außer-Kopf-Lokalisation (AKL) und IKL zu schaffen, um die IKL gegebenenfalls quantitativ abgrenzen zu können. Die Ergebnisse zeigen, daß ein solcher Übergang nicht herstellbar ist.

2. Sodann wurde ein Vergleich kopfbezogener elektroakustischer Speicherungen mit dem Originalsignal durchgeführt. Dabei ergab sich, daß Original und Speicherung nicht voneinander unterschieden werden konnten. Dies zeigt, daß in Bezug auf die IKL kein grundsätzlicher Unterschied zwischen Kopfhörer- und Lautsprecherbeschallung besteht.

3. Schließlich wurden die oben erwähnten Störungen bei der Lokalisation künstlich herbeigeführt, indem ein Erlernen von Schallquellen- und Raumeigenschaften unterbunden wurde. In diesen Fällen wurden die Schallquellen in der Regel im Kopf geortet.

Abschließend wird versucht, die bisher vorliegenden und die hier berichteten Ergebnisse in eine umfassende Theorie zur IKL einzuordnen.

On the problem of "In Head Localization"

Summary

Most of the existing theories of the origin of "In Head Localization" (IKL) concentrate on IKL arising in connection with sound produced by electroacoustic devices. In doing so, contradictions arise between the theories based on the application of headphones and those considering IKL in connection with the use of loudspeakers.

The new hypothesis presented below is to render possible a non-conflicting explanation of all observed cases of IKL. Although IKL mostly appears in connection with sound produced by electroacoustic devices, this hypothesis assumes that, as a matter of principle, IKL cannot be explained by certain characteristics of electroacoustic transmission procedures. It is assumed that under certain circumstances a correct localization is possible only after a brief learning process on the characteristics of the sound source and the room where it sounds. A disturbance of this process can be the reason of the appearance of IKL.

Report is given on the procedure and results of three tests:

1. At first an attempt was made to establish a sliding transition between the outer head localization (AKL) and IKL in order to eventually delimit IKL quantitatively. The results show that this transition cannot be established.

2. Thereafter a comparison was made between electroacoustic reproductions with the artificial head and the original signal. The results show that original and reproduction cannot be distinguished from each other. This shows that with respect to IKL there is no fundamental difference between the sounds emanating from headphones and those emanating from loudspeakers.

3. Finally, the above mentioned disturbances of localization were brought about artificially by preventing the test participants from getting acquainted with the characteristics of sound source and room. In these cases, as a rule, the sound sources were localized in the head.

As a conclusion, an attempt is made to co-ordinate the existing results with the results published here in order to establish one comprehensive theory of IKL.

Vorausgesetzt ist dabei, „daß das menschliche Gehör die Nähe der Schallquelle am Ohr eindeutig feststellen kann“. REICHARDT und HAUSTEIN hatten – wie bereits erwähnt – IKL auch bei einer von vorn strahlenden Quelle beobachtet, wenn die Ohrmuscheln an den Schädel gedrückt waren. Sie erklären diesen Effekt damit, daß durch die Deformation der Ohrmuschel eine von vorn einfallende Welle wie eine seitlich einfallende Welle wahrgenommen wird. Sie führen weiter aus: „Mit der neuen Theorie stünde dieses Ergebnis in Einklang, wenn die Umwertung ‚seitlicher Einfall‘ in ‚nahe am Ohr‘ erklärt werden könnte.“

Dieser Frage ist HAUSTEIN [4] in einer weiteren Untersuchung nachgegangen. Die gefundenen Ergebnisse liefern einen Beitrag zum Problem der einohrigen Entfernungswahrnehmung, können jedoch die Fragen zum Einfluß der Entfernungswahrnehmung auf die IKL nicht beantworten. Einohrige Entfernungswahrnehmung ist nach seinem Ergebnis nur bei bekannten Signalen möglich. Bestünde ein Zusammenhang zwischen Entfernungswahrnehmung und IKL, so wäre die paradoxe Folgerung unausweichlich, IKL trete nur oder bevorzugt bei bekannten Signalen auf; das Gegenteil ist die Regel. Die Untersuchungen von TOOLE [5] zu dieser Frage ergaben keinen Einfluß der Signalart auf die IKL. Die eigenen Untersuchungen haben das Gegenteil ergeben.

SCHIRMER, REICHARDT sowie HAUSTEIN gingen davon aus, daß auch mit kopfbezogenen Mikrophonanordnungen bzw. Kunstköpfen – bei Abhören mit Kopfhörern – immer IKL auftritt. Das Problem gewönne einen neuen Aspekt, gelänge es, eine Mikrophonanordnung bzw. einen Kunstkopf zu entwickeln, der diesen Mangel nicht zeigt. Offensichtlich war bereits der von KOENIG [6] benutzte Kunstkopf frei von diesem Mangel. Er hat die IKL nicht erwähnt. Dasselbe gilt für LERCHE und PLATH [7] und für DAMASKE und WAGENER [8]. NORDLUND et al. [9] berichteten von einem Kunstkopf, bei dem IKL nur dann auftrat, wenn beim Abhören von der Originallautstärke abgewichen wurde.

Auch KÜRER et al. [10] haben von einem Kunstkopf berichtet, bei dem IKL nicht auftritt. Mit diesem Kunstkopf sind auch die später beschriebenen eigenen Versuche durchgeführt worden.

SONE et al. [11] deuteten das oben beschriebene Phänomen durch mangelnden Knochenschall bei Kopfhörerbeschallung. Es ist den Autoren jedoch nicht gelungen, durch zusätzliche Anregung der Stirn mittels eines Körperschallgebers die IKL bei Kopfhörerempfang zu verhindern.

Als letztes sei noch die Arbeit von TOOLE [5] erörtert, die in ihren experimentellen Ansätzen bereits bewußt die bisher immer stillschweigend gemachte Voraussetzung verläßt, die IKL hinge so oder so mit bestimmten Eigenheiten elektroakustischer Übertragung zusammen.

TOOLE hat unterschiedliche Signale, Musik und Sprache, Rauschen verschiedener Bandmittenfrequenz und verschiedener Bandbreiten von den Versuchspersonen (Vpn) unsichtbaren Einzellautsprechern und Lautsprecherkombinationen abgestrahlt.

Dabei ergab sich, daß auch ein einzelner, von vorn oder hinten strahlender Lautsprecher zu IKL führte, häufiger bei der Schalleinfallrichtung „vorn“ als „hinten“. Strahlen zwei Lautsprecher gleichzeitig entweder links und rechts, oder vorn und hinten, so nimmt die Häufigkeit der Fälle von IKL zu, strahlen schließlich vier Lautsprecher aus den genannten Richtungen gleichzeitig, so wurde in mehr als 90° der Fälle IKL beobachtet. Mit zunehmender Bandbreite wächst die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der IKL. Damit ist die von TOOLE geäußerte Hoffnung, mit genauer quantitativer Untersuchung der IKL auch ihre Ursachen erkennen zu können, für ihn nicht erfüllt. Er vermutet schließlich, daß mehr komplexe Faktoren, akustische und psychologische zur Erklärung herangezogen werden müssen.

Diese Schlußfolgerung entspricht in etwa der im nächsten Abschnitt aufgestellten Hypothese, mit der die beschriebenen Versuche 1969 begonnen wurden; über Teilergebnisse ist bereits berichtet worden [12], [13]. Danach ist für das Auftreten der IKL wesentlich, welche Schallreize der Hörende zuvor wahrgenommen hatte.

2. Problemstellung

Sieht man von dem in diesem Sinne trivialen Phänomen der Vor- und Rückwärtsverdeckung ab, bei der zwischen verdecktem und verdeckendem Schall stets eine erhebliche Pegeldifferenz vorliegt, so haben zunächst CREMER [14] und wenig später WALLACH, ROSENZWEIG und NEWMANN [15] auf die Abhängigkeit der Wahrnehmung eines Schalles von seinem zeitlichen Kontext hingewiesen. Ihre Beobachtungen beziehen sich darauf, daß in einem halligen Raum die von einer Schallquelle ausgesendete und zuerst bei dem Beobachter eintreffende Wellenfront gegenüber in der Stärke ebenbürtigen jedoch später eintreffenden Wellenfronten (Reflexionen) allein für die Ortung der Quelle herangezogen wird. CREMER bezeichnete das Phänomen mit dem „Gesetz der ersten Wellenfront“, ROSENZWEIG und

NEWMANN prägten den Begriff „precedence effect“. Dieses Gesetz gilt auch dann, wenn Reflexionen dem Direktschall in der Schallstärke überlegen sind, wie MEYER und SCHODDER haben nachweisen können [16].

Dieses Problem in allgemeiner Fassung ist von BLAUERT [17] genau umrissen worden. Mit den beiden Termen „Schallereignis“ und „Hörereignis“ werden physikalischer Sachverhalt und Hörempfindung voneinander geschieden. Er führt aus, daß:

„... einerseits nicht bei jedem Schallereignis ein Hörereignis folgt sowie auch andererseits nicht jedem Hörereignis ein Schallereignis vorangeht...“

Ferner:

„Die genauest mögliche Beschreibung (der Verknüpfung von Schallereignis und Hörereignis) gibt lediglich an, daß bestimmte, jeweils genau erläuterte Schallereignisse und bestimmte, jeweils genau erläuterte Hörereignisse unter bestimmten, jeweils genau erläuterten Umständen miteinander oder nacheinander vorkommen.“

Auf den speziellen durch das Gesetz der ersten Wellenfront (precedence effect) beschriebenen Sachverhalt angewendet bedeutet dies:

Die Wahrnehmung der Herkunftsrichtung einer Reflexion in einem Raum ist von den jeweils „genau zu erläuternden Umständen“, in diesem Fall der zeitlichen und räumlichen Nachbarschaft weiterer Reflexionen abhängig, die die eine als ein Echo mit wahrnehmbarer Herkunftsrichtung erkennen lassen oder nicht. Wichtig ist allerdings festzuhalten: Direktschall, diskrete Reflexionen und Nachhall werden im Sinne der Gestalttheorie als ein Ganzes – ein Hörereignis – erlebt; die betrachtete Zeitspanne ist – bei fortlaufendem Sendesignal z. B. Sprache – in der Regel kleiner als 1 s.

Folgende auf dem im vorangegangenen beschriebenen Sachverhalt aufbauenden Hypothesen seien nun eingeführt:

1. Ein Hörereignis wird auch dann von anderen Schallereignissen beeinflusst, wenn diese in wesentlich entfernterer zeitlicher Nachbarschaft stattgefunden und anders als in den bisher betrachteten Fällen zu ihrerseits selbständigen Hörereignissen mit eigener erlebter Gestalt geführt haben.
2. Beginn und Ende dieser Beeinflussung sind nicht sprunghaft; sie haben adaptiven Charakter.

Angewendet auf das Problem der IKL bedeutet dies: Ob ein bestimmtes Schallereignis ein Hörereignis bedingt, dessen Ort innerhalb des Kopfes oder ein anderes Hörereignis, dessen Ort außerhalb des Kopfes liegt, hängt davon ab, welche Hörereignisse vorangegangen sind.

Es ist evident, daß diese Hypothese allein der Erklärung der IKL nicht genügen kann; es gibt Schallereignisse, die unabhängig von der Vorgeschichte immer zur IKL führen, die Ursache ist dann in der Natur der Schallereignisse selbst zu suchen.

Die im folgenden beschriebenen Versuche wurden mit dem Ziel durchgeführt:

1. ein Kriterium zu finden, das eine sichere Unterscheidung ermöglicht zwischen den Schallereignissen, deren Natur eine Außer-Kopf-Lokalisation nicht gestattet, und solchen, die entweder im oder außerhalb des Kopfes geortet werden können,
2. die oben genannte Hypothese der Kontextabhängigkeit eines Hörereignisses in Bezug auf die Frage der Im- bzw. Außer-Kopf-Lokalisation zu überprüfen.

3. Versuchsreihe I

3.1. Versuchsplanung

Zunächst sollte versucht werden, mit Hilfe von zwei Lautsprechern in Stereoaufstellung – Öffnungswinkel 30° gegen die Blickrichtung – einen gleitenden Übergang zwischen IKL und AKL zu schaffen, um – wie oben erwähnt – ein Kriterium zu finden für die Unterscheidung zwischen solchen Signalen, die stets im Kopf und solchen, die auch außer Kopf lokalisiert werden können.

IKL mit dieser Lautsprecheraufstellung kann erzeugt werden, wenn beide Lautsprecher mit demselben Signal gespeist werden, jedoch gegenphasig strahlen.

Dieser Effekt ist mehrfach berichtet und bestätigt worden, zuerst von SANDEL et al. [18], danach von SCHODDER [19], von HANSON und KOCK [20], von JEFFRES [21] und schließlich GARDNER [22], der den Effekt auch in Abhängigkeit von Pegelunterschieden der beiden Lautsprecher untersuchte.

HANSON [23] hat sich in einer weiteren Veröffentlichung (1969) u. a. auch um eine Erklärung dieses Effektes bemüht; er kommt zu dem Schluß, daß eine korrekte Lokalisation nur dann stattfindet, wenn die auftretenden Zeit- und Pegelunterschiede an beiden Ohren so geartet sind, daß sie auch von einer realen Quelle stammen könnten. Diese Bedingung ist bei den in Gegenphase strahlenden Lautsprechern natürlich in keiner Weise erfüllt. Eine ähnliche Theorie – allerdings ohne Bezug auf die IKL erzeugt durch elektroakustische Mittel – hatten bereits SAYERS u. CHERRY [24] vertreten. Ein gleitender Übergang zwischen gleich- und gegen-

phasiger Abstrahlung – auch für breitbandige Signale – ist auf folgende Weise möglich:

Gibt man weißes Rauschen (A) über einen Summierverstärker auf einen Lautsprecher, so entsteht ein Hörereignis, dessen Ort in aller Regel der tönende Lautsprecher ist. Gibt man ein weiteres weißes Rauschen (B) aus einem zweiten Generator über den Summierverstärker auf denselben Lautsprecher, so erhöht sich lediglich die Lautstärke des Hörereignisses. Ort und „Gestalt“ des Hörereignisses sind dieselben geblieben, die beiden Rauschen zu einer Einheit verschmolzen. Dieser Eindruck bleibt auch dann bestehen, wenn man den einen Lautsprecher durch zwei Lautsprecher, die in normaler stereophoner Anordnung mit gleicher Amplitude strahlen, ersetzt. Ändert man die Anordnung dergestalt, daß das Rauschen B gegenphasig abgestrahlt wird, dieses Rauschen allein also im Kopf geortet werden müßte, so sind folgende Änderungen im Höreindruck zunächst denkbar (Fig. 1):

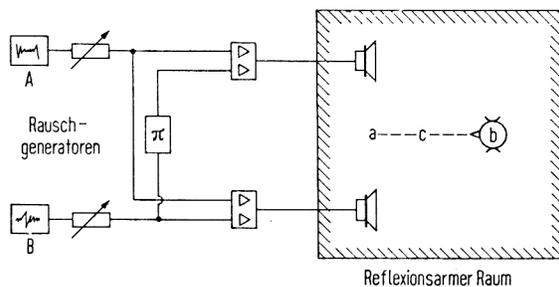


Fig. 1. Versuchsanordnung zur Erzeugung von Im-Kopf-Lokalisation (IKL) und Außer-Kopf-Lokalisation (AKL) sowie Übergangsstufen zwischen IKL und AKL.

Rauschgenerator A allein: Hörereignisort a (AKL),
Rauschgenerator B allein: Hörereignisort b (IKL).

1. Es treten zwei Hörereignisse auf mit den Orten a und b,
2. Es tritt ein Hörereignis auf mit zwei Orten a und b,
3. Es tritt ein Hörereignis auf mit einer Art „Summenlokalisierung“ a + b.

Gelten die bekannten Gesetze der Summenlokalisierung, so befindet sich der Ort auf der Verbindungslinie zwischen a und b; bei gleichem Anteil der Rauschen A und B etwa am Ort c.

Bei Vergrößern des Anteiles A verschiebt sich der Ort nach a, bei Vergrößern des Anteiles B nach b.

3.2. Versuchsdurchführung

Die Beobachtungen von zwölf Vpn mit bandbegrenztem Rauschen (300 Hz Bandbreite, 400 Hz Bandmittenfrequenz) ergaben, daß in der Regel ein

Hörereignis mit zwei Orten entsteht, nur bei starkem Überwiegen des einen oder anderen Anteils behält das Hörereignis einen Ort. Treten zwei Orte auf, liegen diese allerdings nie auf der Linie a – b, sondern stets seitlich. Die Ergebnisse zeigen die Fig. 2 bis 5. Sie sind auf folgende Weise gewonnen: Jede Vp erhielt Blätter, in die die gehörten Orte des Hörereignisses als Flächen einzuzeichnen waren. Die Positionen der Lautsprecher und des Ortes der Vp sowie die seitlichen Begrenzungen des reflexionsarmen Raumes waren in diesen Blättern als Orientierungshilfen bereits eingetragen. Bei gleichem Pegel erzeugt das Rauschen A allein ein lauterer Hörereignis als das Rauschen B allein. Der Pegel des Rauschens A wurde um 5 dB gemindert, so daß gleiche Lautstärken auftraten. Es wurden jeder Vp neun verschiedene Mischungsverhältnisse der Rauschen angeboten (Tabelle I).

Tabelle I.

Mischungsverhältnisse der aus zwei Rauschvorgängen A und B gebildeten Signale, die bei den Beobachtungen verwendet wurden. $\Delta = \Delta_A - \Delta_B$; Δ = Lautstärkepegel.

Signal Nr.	Δ dB	Bemerkungen
1	> 25	Überwiegen des AKL-Teiles
2	13	
3	7	
4	4	
5	0	
6	- 4	Überwiegen des IKL-Teiles
7	- 7	
8	- 13	
9	< - 25	

Die Ausdehnung der Schallquelle wurde teils als eng begrenzt, teils als gemessen an den Raumdimensionen groß mit weichen fließenden Grenzen beschrieben.

Die Tatsache, daß einem Hörereignis teilweise zwei Entstehungsorte zugeordnet werden mußten, wurde von allen Vpn als fremdartiges oder auch unwirkliches Hörerlebnis geschildert. Dieses Hörereignis ist grundsätzlich verschieden von denen, die andere Autoren bei Lateralisationsversuchen beschrieben haben. In diesen Versuchen war es gelungen, zwei Schallquellenorte im Kopf entstehen zu lassen (TOOLE und SAYERS [25]) oder auch vier gesondert wahrgenommene Orte, zwei direkt an den Ohren und zwei innerhalb des Kopfes (MORAY et al. [26] „The four eared man“).

In allen Fällen ist jedoch jedem Hörereignisort auch ein eigenständiges Hörereignis zugeordnet worden. Durch Phasenumkehr hatten TOOLE und SAYERS lediglich Schallquellenverbreiterung, jedoch keine Trennung in zwei „Teilorte“ erhalten. Die Figuren

2 bis 5 zeigen eine Auswahl aus den Ergebnissen. Es sind jeweils für ein Signal die von allen Vpn angegebenen Orte übereinander gezeichnet worden. Der Grad der Schwärzung ist dabei ein Maß für die Häufigkeit des Bezeichnens eines Flächenelements. Fig. 2 Signal 1 - $\Delta > 25$ dB - zeigt das für eine übliche Phantomschallquelle erwartete Bild.

Fig. 3 Signal 3 - $\Delta = 4$ dB - zeigt weitgehende Raumerfüllung; auffällig ist, daß auch die im Blatt vorgegebenen Raumbegrenzungen ignoriert werden,

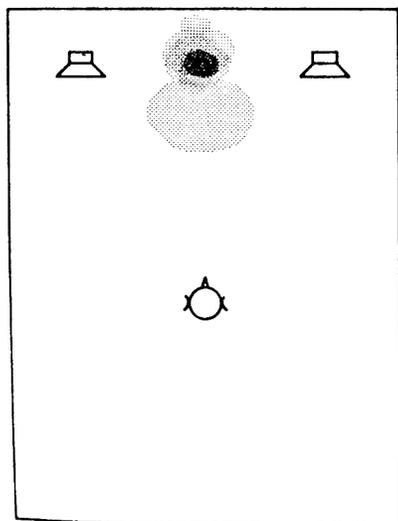


Fig. 2. Hörereignisortsangaben von 10 Vpn für das Signal 1, $\Delta > 25$ dB, konphas abgestrahltes Rauschen. (Nähere Angaben im Text.)

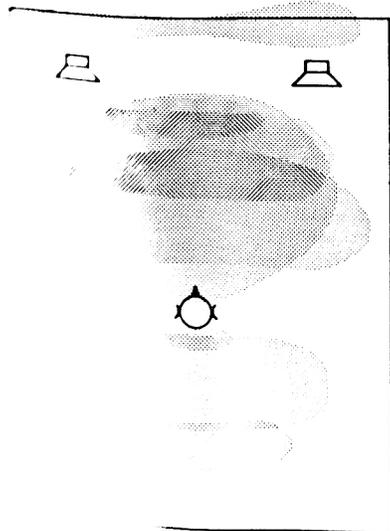


Fig. 3. Hörereignisortsangaben von 10 Vpn für das Signal 3, $\Delta = 4$ dB, überwiegend konphas abgestrahltes Rauschen. (Nähere Angaben im Text.)

die Vpn also den Ort der Schallquelle an einen sehr unwahrscheinlichen Ort verlegen.

Fig. 4 Signal 6 - $\Delta = -4$ dB - zeigt dieselbe Erscheinung. Auffällig ist, daß fast alle Orte seitlich oder hinter dem Beobachter liegen und der Bereich zwischen den Lautsprechern geradezu ausgespart bleibt.

Fig. 5 Signal 9 - $\Delta < -25$ dB - zeigt den reinen IKL-Fall. Nicht alle Orte liegen im Kopf. Die seitlichen Abweichungen treten stets dann auf, wenn sich der Kopf der Vpn nicht auf der Lautsprecher-mittelachse befunden hatte.

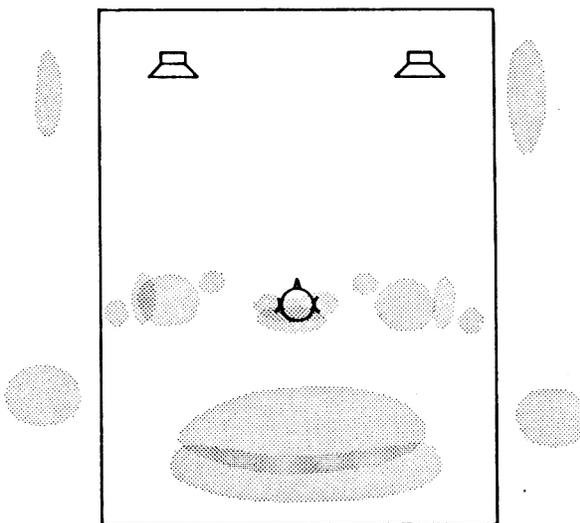


Fig. 4. Hörereignisortsangaben von 10 Vpn für das Signal 6, $\Delta = -4$ dB, überwiegend gegenphasig abgestrahltes Rauschen. (Nähere Angaben im Text.)

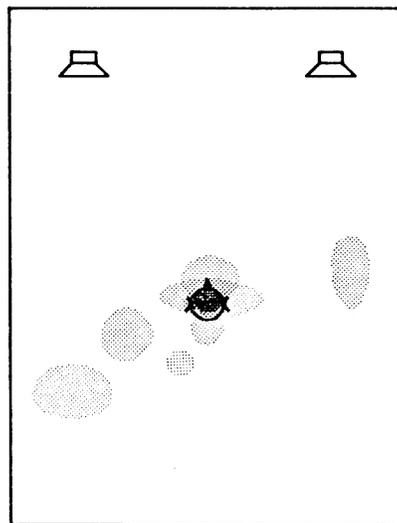


Fig. 5. Hörereignisortsangaben von 10 Vpn für das Signal 9, $\Delta < -25$ dB, gegenphasig abgestrahltes Rauschen. (Nähere Angaben im Text.)

Ein gleitender Übergang zwischen IKL und AKL ist — ähnlich wie bei den Versuchen von TOOLE [5] — auch mit diesen Signalen nicht eindeutig herstellbar. Bereits geringe Anteile des Schallereignisses, die im Sinne von SAYERS und CHERRY [24] einer realen Quelle zugeordnet werden könnten, verhindern in diesem Fall — bei der überwiegenden Mehrzahl der Beobachter bereits bei Signal 8 — $\Delta = -13$ dB — die IKL. Sie führen zu einer Ortung des Gesamt ereignisses, die außerhalb des Kopfes liegt, allerdings genau so unnatürlich empfunden wird wie die IKL.

4. Versuchsreihe II

4.1. Versuchsplanung

In weiteren Versuchen sollte einwandfrei geklärt werden, ob das Tragen von Kopfhörern bzw. die Wiedergabe über Kopfhörer IKL zwar nicht erzeugt — dies wurde nach den bereits vorliegenden Ergebnissen ausgeschlossen —, immerhin aber begünstigt.

Eine Klärung wäre dann rasch herbeizuführen, gelänge es, sowohl durch Lautsprecher als auch durch Kopfhörer Schallereignisse zu erzeugen, die dasselbe Hörergebnis bedingen.

Böte man diese verschiedenen Schallereignisse einer Vp mehrmals in stochastischer Folge an, so wäre das Tragen und die Übertragung über Kopfhörer als Ursache der IKL dann ausgeschlossen, wenn die Vp nicht in der Lage wäre, die beiden elektroakustischen Darbietungsweisen voneinander zu unterscheiden.

Folgende Bedingungen müßten ferner eingehalten werden:

1. Die Signale müssen so geartet sein, daß mit beiden Darbietungsarten sowohl AKL als auch IKL erzeugt werden kann.
2. Die Vp darf nicht aus Nebenumständen auf die eine oder andere Darbietungsart schließen können.

Es wurden von den Signalen 1, 3, 6 und 9 aus der Versuchsreihe I kopfbezogene Aufnahmen hergestellt, wobei der Kunstkopf den Platz einnahm, den sonst die Vp innehatte. Diese Aufnahmen müssen bei der Wiedergabe — korrekte Reproduktion des Hörereignisses durch den Kunstkopf vorausgesetzt — dieselben Hörereignisse wie der Lautsprecherschall erzeugen, also sowohl AKL (Signal 1) als auch IKL (Signal 9) als auch die Zwischenstufen (Signal 3 und 6).

Die zweite Bedingung erfordert:

1. Die Vp muß auch bei Anhören des Lautsprecherschalles, also während des gesamten Versuches die Kopfhörer aufbehalten. Das ist möglich bei Kopfhörern sogenannter offener Bauart, die das Hören von außen einfallenden Schalles kaum behindern. Nach einer Untersuchung von WETTSCHURECK [27] erwies sich der Kopfhörer HD 414 (SENNEHEISER) für diese Zwecke als geeignet. Beeinträchtigungen in der Lautstärke und wahrgenommenen Richtung eines Schallereignisses treten erst oberhalb 1 kHz auf; das verwendete Signal enthält nur Frequenzen unterhalb 1 kHz.
2. Die Vp muß während der Darbietung der 3 s dauernden Rauschimpulse den Kopf ruhig halten; sie könnte anderenfalls aus der Kopfdrehung und Mitlaufen bzw. Stillstand der Schallquelle auf die Darbietungsart schließen. Das Einhalten dieser Forderung wurde durch eine Fernsehkamera im reflexionsarmen Raum überwacht.
3. Wenn die Vp während der Kopfhörerdarbietung ihren Kopf auch nur geringfügig gegen die 0°-Richtung verdreht hält, erscheint der Ort des Hörereignisses entsprechend seitlich verschoben. Solche geringfügigen Änderungen der Kopfhaltung sind ohne Festklammern des Kopfes unvermeidbar. Dieser Fehler bleibt aber ohne Wirkung, wenn auch das Lautsprechersignal nicht immer aus der 0°-Richtung, sondern ab und zu geringfügig nach der einen oder anderen Seite verschoben erscheint. Dies ließ sich durch geringe Pegeldifferenzen in den Lautsprecherkanälen erreichen, wodurch die Phantomquelle etwas seitlich auswanderte. Häufigkeit, Grad der Verschiebung und Verschiebungsrichtung erfolgten in Zufallsfolgen. Diese Maßnahme wurde auch während der Kunstkopfaufnahmen beibehalten.

4.2. Versuchsdurchführung

Es nahmen 20 Vpn an den Versuchen teil. Jedes Signal wurde 60mal angeboten, davon 30mal als Original und 30mal als Kunstkopfübertragung. Den Versuchsablauf verdeutlicht die Fig. 6; Der Raum A ist mit Raum B identisch; das Kunstkopfsignal wurde zuvor auf Magnetband gespeichert. Es war lediglich die Frage zu beantworten, ob die Vp eine Darbietung des Rauschimpulses für Kopfhörerschall oder Lautsprecherschall hielt.

Im Versuchsraum waren außer den tatsächlich benutzten Lautsprechern noch weitere zu sehen, teils seitlich, teils hinter der Vp; auch ein Lautsprecher über ihr. Es wurde nicht erwähnt, daß nur die Lautsprecher vorn strahlten. Dies war nötig, um den Vpn die Möglichkeit zu geben, seitlich gehörte Quellen auch Lautsprechern zuordnen zu können.

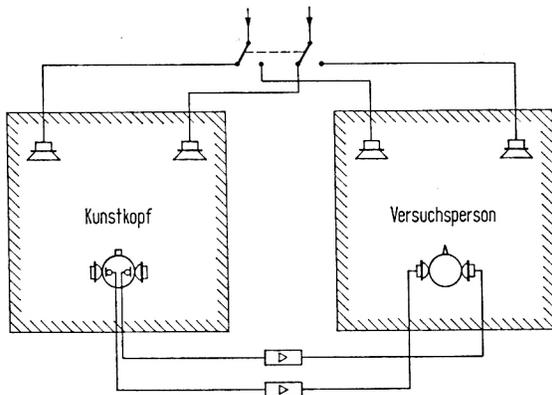


Fig. 6. Versuchsaufbau zur Erzeugung gleicher Hörereignisse durch Lautsprecherschall und durch Kopfhörerschall. Vp und Kunstkopf tragen beide offene Kopfhörer; die des Kunstkopfes sind nicht beschaltet und haben lediglich die Aufgabe, für von außen einfallenden Schall die gleichen Bedingungen zu schaffen wie für die Vp.

4.3. Versuchsergebnisse

Eine Zusammenfassung der 4800 Einzelurteile zeigt die durchgezogene Linie der Fig. 7. Aufgetragen ist die Prozentzahl der richtigen Urteile über den vier verschiedenen Signalen.

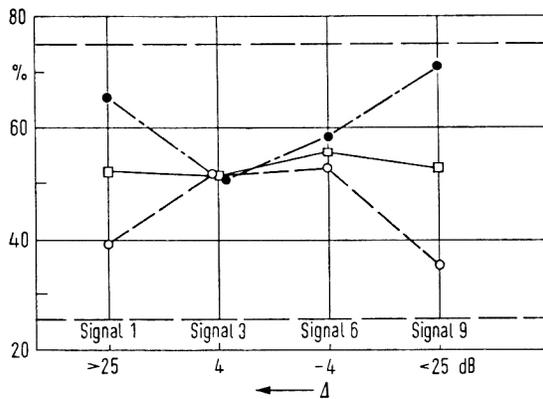


Fig. 7. Unterscheidbarkeit der Erzeugung eines Hörereignisses durch Lautsprecher- oder Kopfhörerschall.

Relative Häufigkeit (%) der richtigen Urteile für die Signale 1, 3, 6, 9.
 □ — □ Auswertung aller Darbietungen,
 ○ - - - ○ Auswertung der Lautsprecherdarbietungen.
 ● - · - · ● Auswertung der Kopfhörerdarbietungen.

Für Alternativurteile ist die Ratewahrscheinlichkeit 50% richtige Urteile, die Schwelle der Erkennbarkeit 75%. Die Zahlen liegen für alle Signale dicht bei 50%, maximal bei 55,5% (Signal 3), das entspricht völliger Unsicherheit; das Auftreten der IKL

war nach wie vor nur abhängig von der gleich- oder gegenphasigen Abstrahlung der Lautsprecher, damit unabhängig von der Kopfhörerwiedergabe. Auch eine Begünstigung der IKL durch Kopfhörerhören findet nach diesem Ergebnis nicht statt.

Trägt man die richtigen Antworten gesondert für Kopfhörerwiedergabe (● - · - · ●) und für Lautsprecherwiedergabe (○ - - - ○) auf (Fig. 7), so zeigt sich für Signal 1 (normale Phantomschallquelle) und Signal 9 (reine IKL) deutlich die Tendenz, diese Fälle unabhängig von der tatsächlichen Wiedergabe den Kopfhörern zuzuordnen.

4.4. Diskussion der Ergebnisse

Diese Versuche, die die Unabhängigkeit der IKL von der elektroakustischen Wiedergabe erwiesen haben, unterstützen die Annahme von HANSON [23], eine (korrekte) Lokalisation finde nur statt, wenn die auftretenden Differenzen zwischen Schallfeldgrößen an beiden Ohren so geartet sind, daß sie auch einer realen Quelle zugeordnet werden können. Die Umkehrung dieses Schlusses läßt dann die IKL nicht mehr als einen Lokalisations„fehler“ erscheinen, sondern als eine sinnvolle Fehleranzeige. Die Signale, die keiner realen Quelle außerhalb des Kopfes zugeordnet werden können und dürfen — sie dürfen mit keiner realen Quelle verwechselbar sein —, müssen sozusagen am einzig verbleibenden Ort, dort wo keine Schallquelle auftreten kann, nämlich im Kopf „untergebracht“ werden.

Die zu Beginn der Versuche gestellte Frage nach dem Unterscheidungskriterium, das eine sichere Unterscheidung ermöglicht zwischen den Schallereignissen, deren Natur eine Außer-Kopf-Lokalisation nicht gestattet, und solchen, die entweder im oder außerhalb des Kopfes geortet werden können, ist damit für die Fälle beantwortet, in denen Differenzen an den beiden Ohren vorliegen.

Ob anderenfalls alle beliebigen Signale — wenn sie nur an beiden Ohren gleich sind — außerhalb des Kopfes in der Medianebene geortet werden können, muß zunächst offen bleiben. Die folgenden Versuche werden auch zur Klärung dieser Frage beitragen.

5. Versuchsreihe III

5.1. Versuchsplanung

Diese Versuche wurden durchgeführt, um die oben aufgestellte Hypothese, die Lokalisation eines Hörereignisses sei von der Vorgeschichte im weiteren Sinne abhängig, zu überprüfen.

Dieses Phänomen mit einbezogen, läßt sich die akustische Ortung allgemein durch das Modell in Fig. 8 beschreiben.

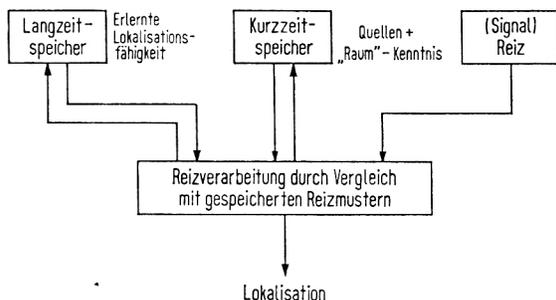


Fig. 8. Modell zur Lokalisation (Richtung und Entfernung).

Jede Ortung hat zunächst zur Voraussetzung, daß die Zuordnung von Hörereignissen zu Schallereignissen in sehr früher Kindheit erlernt worden ist; darunter möge neben der eigentlichen Richtungs- und Entfernungswahrnehmung auch die individualgenetisch frühere Verschmelzung beider Ohrinformationen zu einem Hörbild verstanden sein. Die im Zuge dieses Lernprozesses gespeicherten Daten werden automatisch bei Eintreffen eines Schallereignisses (Schallreizes), sofern dieses ein Hörereignis bedingt, abgerufen. Dieser Speicher kann nur langsam gelöscht und nur langsam wieder aufgefüllt werden. Ein Umlernen z. B. auf einen anderen Ohrabstand dauert mehrere Tage, wie ein Versuch von HELD [28] ergeben hat. Sobald der kindliche Kopf bzw. der Ohrabstand seine endgültige Größe erreicht hat, wird in diesem Langzeitspeicher nichts mehr verändert, es sei denn, Lernprozesse sind erneut durch Ohrerkrankungen oder im höheren Alter durch allmählichen Verlust der Hörfähigkeit erforderlich.

Der Vergleich von Signalen mit im Langzeitspeicher gespeicherten Reizmustern kann unter Umständen für eine korrekte Lokalisation nicht ausreichen. Dies gilt insbesondere für die Entfernungswahrnehmung, diese ist an die Kenntnis der Lautstärke und Klangfarbe der Quelle, wie auch an die Kenntnis der Eigenschaften des Raumes, in dem die Quelle tönt, gebunden.

Diese Quellen- und Raumkenntnisse werden sinnvoll nur kurzzeitig gespeichert.

Die oben aufgestellte Hypothese besagt nun nichts weiter, als das IKL dann auftritt, wenn die im Kurzzeitspeicher vorliegenden Informationen über Quellen, Raum und Quellenorte in diesem mit eintreffenden Schallereignissen nicht vereinbar sind.

Dieser Fall wird bei der Wahrnehmung realer Quellen nicht eintreten; ein Hörer kennt immer den Raum, in dem er sich aufhält, er wird in der Regel informiert sein, welche Schallquellen mit welchen

Eigenschaften wo tönen werden. Verläßt er diesen Raum und betritt er einen anderen, so erfolgt zwangsläufig Löschen des Kurzzeitspeichers und Speichern der der neuen Situation eigenen Informationen.

Dieser „normale“ Ablauf ist jedoch empfindlich gestört, wenn mit elektroakustischen Mitteln sowohl Quellen als auch Raumeigenschaften als auch Quellenorte simuliert werden.

5.2. Versuchsverlauf

An den Versuchen nahmen 34 Versuchspersonen teil. In einem reflexionsarmen Raum wurde ein synthetisches Schallfeld erzeugt, das die Illusion eines in einem Konzertsaal spielenden Orchesters hervorruft. Ausgangsmaterial war die stereofone nachhallfreie Orchesteraufnahme der BBC (RICHARD WAGNER: Siegfried-Idyll), die eigens für solche Zwecke hergestellt worden ist. Das synthetische Feld enthielt: Direktschall, drei frühe Reflexionen, verzögerten diffusen Nachhall, insgesamt verteilt auf sechs Einfallsrichtungen der Horizontal- und Medianebene.

Jede Vp wurde zunächst mit dem Phänomen der IKL vertraut gemacht.

IKL wurde durch monofones Signal an beiden Kopfhörern und Lautsprecher in Gegenphase demonstriert, AKL durch konphase Lautsprecher und durch eine reale Quelle (Sprecher). Ferner wurde noch die Ortung direkt am Kopf durch Beschallung mit nur einem Kopfhörer demonstriert.

Die Orchestermusik wurde sodann über 3 min im verdunkelten Raum abgehört. Diese Zeit ist für die Adaption an das dargestellte Schallfeld auch ohne zusätzliche optische Eindrücke sicher ausreichend. Die Verdunklung ist nötig, damit nicht der sichtbare Versuchsraum, der im Vergleich zu einem Konzertsaal sehr klein ist, die Illusion eines großen Raumes behindert.

Danach wurde die nachhallfreie Aufnahme eines Sprechers über einen 2 m entfernten Lautsprecher in Blickrichtung der Vp zusätzlich in die laufende Musik eingeblendet. Die Dauer der Einblendung (2,5 s) wurde so kurz gehalten, daß eine Adaption im Sinne einer Änderung der Information im Kurzzeitspeicher nicht möglich war.

Nach weiteren 2 min Musikdarbietung wurde die Einblendung wiederholt. Die Vp gab an, ob sie den Sprecher jeweils im, am oder außerhalb des Kopfes lokalisiert hatte. Das Ergebnis lautete:

Im-Kopf: 44 Angaben,
Am-Kopf: 23 Angaben,
Außer-Kopf: 1 Angabe.

Zur Kontrolle wurde nach dem Versuch nach der Ortung des Orchesters gefragt. Die Antwort lautete

in allen Fällen: Außerhalb des Kopfes, meist mit dem Zusatz „weit entfernt“.

Leider blieb trotz des nicht geringen Aufwandes für das synthetische Schallfeld die Raumillusion unbefriedigend.

Da nach unseren Erfahrungen kopfbezogene stereofone Aufnahmen bei Einhaltung bestimmter Bedingungen, unter anderem der genauen Reproduktion der Originallautstärke, nach Adaption eine vorzügliche Raumillusion ohne IKL hervorrufen, wurde bei den weiteren Versuchen das synthetische Schallfeld durch die Kopfhörerwiedergabe (offene Hörer HD 414) einer Konzertsalaufnahme ersetzt (L. VAN BEETHOVEN: 5. Symphonie, Großer Sendesaal, Sender Freies Berlin). Die Einblendungen erfolgten jedoch wiederum über den 2 m entfernten Lautsprecher, die Kopfhörer wurden während des gesamten Versuches aufbewahrt. Die Versuchsanordnung zeigt die Fig. 9.

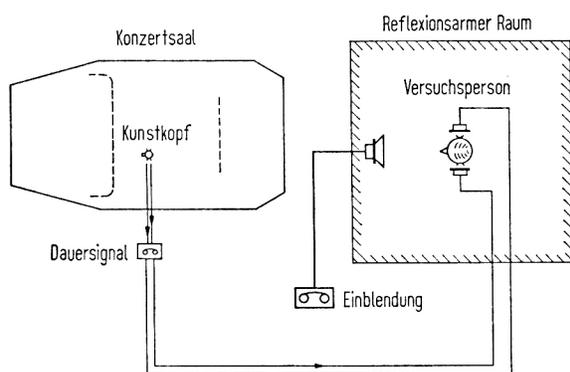


Fig. 9. Versuchsanordnung zur Ermittlung der Hörereignisorte bei Adaptation auf Raum und Schallquelle (Dauersignal) und ohne Adaptation (Einblendung).

Die Lautstärke des über den Lautsprecher wiedergegebenen Sprechers wurde durch die Kopfhörer nicht, die Klangfarbe nur geringfügig verändert. Um eine IKL des von außen einfallenden Schalles allein durch eine Veränderung der Form der Ohrmuscheln auszuschließen, wie sie REICHARDT und HAUSTEIN beobachtet hatten, wurden die Kopfhörer schräg gestellt, so daß sie am Schläfenbein aufsaßen und die Ohrmuscheln nicht berührten.

Bei diesem Versuch wurde der Musik in einem halligen Raum Sprache in einem nachhallfreien Raum gegenübergestellt.

Als nächstes wurde geprüft, ob auch bei Änderung nur eines Parameters mangelnde Adaption zur IKL führt. Der Sprecher wurde durch Musik ersetzt, diese zwar stereofon jedoch nachhallfrei über zwei Lautsprecher in üblicher stereofoner Anordnung abgestrahlt (Aufnahme der BBC, W. A. MOZART: Jupiter-Symphonie).

In weiteren Versuchen wurde nicht wie bisher auf ein Orchester in einem halligen Konzertsaal adaptiert, sondern auf ein nachhallarmes Schallfeld. Über die Kopfhörer wurde jetzt eine mit dem Kunstkopf gewonnene Außenaufnahme dargeboten. In dieser Aufnahme waren Straßenlärm, entfernte Baustellen-geräusche etc. zu hören. Außerdem führten mehrere Personen in einer Entfernung von ca. 5 m ein Gespräch. Die Einblendungen (2,5 s Dauer) fanden ebenfalls zweimal nach 3 min und nach 5 min statt.

Es wurden zunächst wiederum beide Parameter gewechselt, also hallige Musik einblendet (Intensitätsstereofone Aufnahme, L. VAN BEETHOVEN, 5. Symphonie, Großer Sendesaal Sender Freies Berlin, sendereigene Aufnahme).

Sodann wurde lediglich ein Parameter geändert und ein Sprecher hallig einblendet oder Musik hallfrei.

5.3. Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse zeigt Tabelle II. Bei allen Dauersignalen wurden die Schallquellen stets außerhalb des Kopfes geortet. Die Urteile „am Kopf“ kamen meist dann zustande, wenn die Vp den Kopf gedreht hatte und der Lautsprecherschall seitlich einfiel.

Tabelle II.
Ergebnisse der Hörversuche.

Dauersignal	Einblendung	Zahl der Angaben der Lokalisation der Einblendung		
		im Kopf	am Kopf	außer Kopf
Musik, hallig	Sprecher, hallfrei	37	30	1
	Musik, hallfrei	49	18	1
Außenaufnahme mehrere Sprecher usw. hallfrei	Musik, hallig	53	13	2
	Sprecher, hallig	36	29	3
	Musik, hallfrei	55	13	0

Aus diesem Ergebnis in Verbindung mit den Ergebnissen der ersten Versuchsreihen läßt sich schließen, daß eine Im-Kopf- bzw. Am-Kopf-Lokalisation wahrscheinlich dann auftreten wird, wenn dem angegebenen Modell folgend:

1. der Kurzzeitspeicher keine auswertbare Information enthält – fehlende, mangelhafte oder falsche Schallquellen und -feldkenntnis – und/oder
2. die Signale und damit die Reize so geartet sind, daß sie keinem im Langzeitspeicher enthaltenem Reizmuster zugeordnet werden können.

6. Diskussion der Ergebnisse

Bei der Aufgabenstellung zu allen Versuchen war die Forderung gestellt worden, eine befriedigende

Erklärung der IKL müsse nach Möglichkeit alle beobachteten und berichteten Fälle der IKL umfassen. Im folgenden wird versucht, die verschiedenen schon beschriebenen Fälle in die neu aufgestellte Theorie einzuordnen; schließlich wird auch die Frage einer Hierarchie der verschiedenen Möglichkeiten, IKL zu verhindern, zu erörtern sein.

Die Beschallung mit Kopfhörern als Ursache der IKL ist insbesondere nach den Ergebnissen der letzten Versuchsreihe stets auszuschließen. Die Versuchsanordnung nach Fig. 8 hätte nach bisheriger Auffassung das genau entgegengesetzte Ergebnis bringen müssen: AKL des Lautsprecherschalles und IKL des Kopfhörerschalles.

6.1. Beobachtete IKL bei elektroakustischer Übertragung

6.1.1. Horizontal- und Medianebene

1. Die IKL bei kopfbezogener Stereophonie [3], [29], [30], [32] ist Folge mangelhafter Kopfnachbildung, die auftretenden Differenzen der Ohrsignale sind fehlerhaft.

Dazu kann kommen:

- a) Fehlende Adaption.
- b) Falsche Wiedergabelautstärke,
- c) Optische Informationen, die dem dargestellten Schallfeld nicht entsprechen.

2. IKL bei Summenlokalisierung von zwei gegenphasig schwingenden Lautsprechern [18], [19], [20], [21], [22]: Die beiden Ohrinformationen entsprechen keinem bekannten Reizmuster des Langzeitspeichers.

6.1.2. Nur Medianebene

1. IKL bei Einzellautsprechern (TOOLE [5]): Die Vpn kannten nicht den Ort der Schallquelle – Kurzzeitspeicher nicht oder fehlerhaft besetzt –

2. Monofone Signale mit Kopfhörern abgehört: – Kurzzeitspeicher fehlerhaft besetzt –

3. IKL bei Summenlokalisierung von zwei gleichphasig schwingenden Lautsprechern seitlich [1], [5], [32] oder vorn und hinten [5], oder vier Lautsprechern [5]:

Widerspruch zwischen Richtungsinformation aus Klangfarbenänderungen durch die Ohrmuschel (seitlich) und Kopfdrehungen (oben).

Dreht eine Vp, die von Lautsprechern links + rechts, oder vorn + hinten beschallt wird, den Kopf um die senkrechte Achse, so treten an den Ohren keine Laufzeit- und Intensitätsdifferenzen auf. Diese sind – strahlt eine Quelle allein – immer zu erwarten, es sei denn, die Quelle befände sich im Zenit oder Nadir des Hörers.

Die Ortung „oben“ bzw. „unten“ wird aber verhindert durch die Information, die durch die fre-

quenzgangbeeinflussende Wirkung der Ohrmuscheln geliefert wird; bei Schalleinfall von rechts + links „seitliche Quelle“, bei Schalleinfall von vorn + hinten „vorn“ oder „hinten“, je nachdem, welcher Einfluß überwiegt.

Auf diese Weise ist auch die merkwürdige Tendenz in den Versuchen von TOOLE [5] verständlich, daß nämlich mit zunehmender Bandbreite die Häufigkeit des Auftretens der IKL wächst. Bei schmalbandigen Schallereignissen erzeugt die Wirkung der Ohrmuscheln lediglich Lautstärkeveränderungen, erst bei breitbandigen Schallereignissen wird eine Klangfarbenänderung erzeugt, die einer bestimmten Richtungswahrnehmung aus der Medianebene entspricht, die in diesem Falle mit der aus der Kopfdrehung ermittelten Schalleinfallrichtung „oben“ bzw. „unten“ nicht vereinbar ist.

Fig. 5 Beispiel C (p. 947) in [5] zeigt deutlich die Zunahme der IKL-Urteile mit wachsender Bandbreite, und zwar dann besonders stark, wenn der Kopf frei beweglich ist!

6.2. Beobachtete IKL ohne elektroakustische Übertragung

1. Große Lautstärke [2]: Tritt bei großen Lautstärken ein Sättigungseffekt durch Änderungen der Bewegungen der Gehörknöchel auf, so sind die Differenzen zwischen den Ohrsignalen unter Umständen nicht mehr einer Quelle außerhalb des Kopfes zuzuordnen; IKL ist die Folge.

2. Änderung der Form der Ohrmuscheln [1]: Bei Schalleinfall von vorn kann durch Abdecken oder Anpressen beider Ohrmuscheln IKL entstehen. Diese Maßnahmen verfälschen die frequenzgangbeeinflussenden Wirkungen der Ohrmuscheln. Es kommt zu keiner Richtungsabbildung in der Medianebene, die Quelle wird im Kopf geortet.

3. Verlängerung der Ohrkanäle durch Rohre [1], [33]: Durch das Fehlen der Ohrmuscheln entfällt die frequenzgangbeeinflussende Wirkung. Es kommt ebenfalls zu keiner Richtungsabbildung in der Medianebene.

6.3. Die Möglichkeiten, IKL zu verhindern

Abschließend sei die Wirksamkeit der verschiedenen Möglichkeiten, die IKL zu verhindern, betrachtet. Es ist nützlich, dabei zwischen Ungleichheit und Gleichheit der Signale an beiden Ohren zu unterscheiden.

Fast immer gelingt es, mit Hilfe optischer Informationen, die IKL zu beeinflussen, selbst dann, wenn den Signalen an den Ohren keine im Langzeitspeicher vorhandenen Reizmuster zugeordnet werden können.

Dies zeigt besonders deutlich ein Versuch von JEFFRES und TAYLOR [34].

Ähnlich dominant wie optische Informationen sind mit den Kopfdrehungen synchron ablaufende Änderungen der Ohrsignale, die eine ortsfeste Quelle simulieren. Dies beweisen die vielen Beobachtungen bei mitbewegten Kunstköpfen [29], [30], [31], [35]. AKL fand auch dann statt, wenn die Kunstköpfe keine Ohrmuscheln besaßen.

Fehlen optische und aus Kopfbewegungen gewonnene Informationen, so kann AKL bei Ungleichheit wie auch bei Gleichheit der Ohrsignale nur stattfinden, wenn diese einem Reizmuster im Langzeitspeicher entsprechen, also kopfbezogen sind.

Damit ist aber noch nicht endgültig entschieden, ob IKL oder AKL stattfinden wird.

Bei seitlichen Quellen ist entscheidend, ob zusätzlich eine Information über die Entfernung der Quelle in den Signalen enthalten ist.

Hat nicht zuvor eine Adaption auf das dargestellte Schallfeld stattgefunden — z. B. freies Feld oder großer Raum, hallig oder nicht etc. —, so werden diese Quellen, wenn sie stark seitlich liegen, am Kopf, wenn sie in der Nähe der Medianebene liegen, im Kopf geortet.

Bei Gleichheit der Ohrsignale spielt die Adaption eine wesentlich größere Rolle. Ohne Adaption werden keine Quellen außer Kopf lokalisiert.

Aber auch nach Adaption ist eine Entfernungsinformation nötig, ohne diese werden Quellen der Medianebene entweder im Kopf oder — trotz Schalleinfall von vorn oder oben — stets hinten geortet.

Dies gilt in gleicher Weise für Lautsprecher und Kopfhörerschall, wie die Untersuchungen von TOOLE [5] und PLENGE und BRUNSCHEN [36] ergeben haben.

Dies unterstreicht die Hypothese, daß für eine korrekte Lokalisation im Kurzzeitspeicher Information sowohl über das Schallfeld (Raumgröße, Halligkeit) als auch über Quellen und Quellenorte (Entfernungen) vorliegen müssen.

Mein Dank gilt Herrn Prof CREMER für viele fördernde Diskussionen; Herrn Dipl.-Ing. P. LEHMANN für seine Hilfe bei der Durchführung der Versuche sowie den Teilnehmern an den oft mühevollen und langwierigen Versuchen.

Ferner danke ich dem Sender Freies Berlin, der die Aufnahmen in seinen Räumen gestattete und seine eigenen Aufnahmen für Vergleiche ausschnittsweise zur Verfügung stellte.

(Eingegangen am 28. September 1971.)

Literatur

[1] REICHARDT, W. und HAUSTEIN, B. G., Hochfrequenztech. Elektroakust. **77** [1968], 183.

- [2] FRANSSEN, N. V., Diss. Delft 1960, S. 63.
 [3] SCHIRMER, W., Acustica **17** [1966], 228.
 [4] HAUSTEIN, B. G., Hochfrequenztech. Elektroakust. **79** [1969], 45.
 [5] TOOLE, F. E., J. Acoust. Soc. Amer. **48** [1970], 943.
 [6] KOENIG, W., J. Acoust. Soc. Amer. **22** [1950], 61.
 [7] LERCHE, E. und PLATH, P., Pflügers Arch. **274** [1961], 91.
 [8] DAMASKE, P. und WAGENER, B., Acustica **21** [1969], 30.
 [9] NORDLUND, B., KIHLMAN, B. und LINDBLAD, S., J. Acoust. Soc. Amer. **44** [1968], 148.
 [10] KÜRER, R., PLENGE, G. und WILKENS, H., 37. AES Convention New York 1969, Preprint 666 (H-3).
 [11] SONE, T., EBATA, M. und NIMURA, T., Proc. 6. Int. Congr. Acoust., Tokyo 1968, A-3-6.
 [12] STRUNZ, D., Studienarbeit am Institut für Technische Akustik, TU Berlin 1970.
 [13] PLENGE, G., Ein Beitrag zur Erklärung der Im-Kopf-Lokalisation. DAGA-Tagung 1970, VDI-Verlag, Düsseldorf 1971.
 [14] CREMER, L., Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Bd. I, Geometrische Raumakustik. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1948, S. 126.
 [15] WALLACH, H., ROSENZWEIG, M. R. und NEWMANN, E. B., Amer. J. Psychol. **62** [1949], 315.
 [16] MEYER, E. und SCHODDER, G. R., Nachr. Akad. Wiss. Göttingen **II a 6** [1952], 31.
 [17] BLAUERT, J., Kybernetik **5** [1969], 45.
 [18] SANDEL, T. T., TEAS, D. C., FEDDERSEN, W. E. und JEFFRES, L. A., J. Acoust. Soc. Amer. **27** [1955], 842.
 [19] SCHODDER, G. R., Acustica **6** [1956], 482.
 [20] HANSON, R. L. und KOCK, W. E., J. Acoust. Soc. Amer. **29** [1957], 145.
 [21] JEFFRES, A., J. Acoust. Soc. Amer. **27** [1955], 208.
 [22] GARDNER, M. B., J. Acoust. Soc. Amer. **46** [1969], 339.
 [23] HANSON, R. L., J. Acoust. Soc. Amer. **31** [1959], 830.
 [24] SAYERS, B. MCA. und CHERRY, E. C., J. Acoust. Soc. Amer. **28** [1957], 973.
 [25] TOOLE, F. E. und SAYERS, B. MCA., J. Acoust. Soc. Amer. **37** [1965], 319.
 [26] MORAY, N., BATES, A. und BARNETT, T., J. Acoust. Soc. Amer. **37** [1965], 196.
 [27] WETTSCHURECK, R., Vortrag AES Convention Europe Köln, März 1971. Rundfunktech. Mitt. (In Vorbereitung.)
 [28] HELD, R., Amer. J. Psychol. **68** [1955], 526.
 [29] WALLACH, H., Psychol. Forsch. **22** [1938], 238.
 [30] DE BOER, K. und VAN URK, A. T., Philips Tech. Rdsch. **6** [1941], 363.
 [31] FRANSSEN, N. V., Ref. [2], S. 55.
 [32] KRUMBACHER, G., Acustica **21** [1969], 228.
 [33] KIETZ, H., Acustica **3** [1953], 73.
 [34] JEFFRES, A. und TAYLOR, R. W., J. Acoust. Soc. Amer. **33** [1961], 482.
 [35] KOCK, W. E., J. Acoust. Soc. Amer. **22** [1950], 801.
 [36] PLENGE, G. und BRUNSCHEN, G., Proc. 7. Int. Congr. Acoust., Budapest 1971, 19-H-10.