

# Stereophonie = Stéréophonie

Autor(en): **Acker, Hans**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri**

Band (Jahr): **51 (1973)**

Heft 3

PDF erstellt am: **05.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-875281>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

*Zusammenfassung. Dieser Artikel befasst sich zunächst mit den verschiedenen Theorien über das menschliche Richtungshören. Dann wird dieses Richtungshören der Theorie der Stereophonie gegenübergestellt.*

*In einer spätern Fortsetzung wird die Praxis der Stereophonie in den Studios, die Übermittlung stereophoner Signale vom Studio zum Sender, die Sender- und Empfangsseite sowie die Weiterentwicklungen der Stereophonie untersucht und auf deren Probleme aufmerksam gemacht.*

*Résumé. L'auteur traite d'abord des différentes théories de la perception de la direction par l'homme. Puis, il compare cette perception de la direction à la théorie de la stéréophonie.*

*Dans une suite à paraître ultérieurement, il sera question de la pratique de la stéréophonie dans les studios, de la transmission des signaux stéréophoniques du studio à l'émetteur, de l'émission et de la réception ainsi que des développements de la stéréophonie.*

## **La stereofonia**

*Riassunto. L'autore espone avantutto le diverse teorie che si riferiscono alla facoltà dell'udito di individuare mediante l'ascoltazione binauricolare la direzione di provenienza di un suono. Questi fenomeni vengono quindi messi a confronto con la teoria della stereofonia.*

*In una continuazione che seguirà in un secondo tempo, si esamineranno il lato pratico della stereofonia negli studi, la trasmissione di segnali stereofonici dallo studio alla stazione trasmittente, la trasmittente e il ricevitore, come pure la realizzazione della stereofonia e se ne descriveranno i rispettivi problemi.*

Dem Radio – neben Fernsehen und Zeitung das wohl wichtigste und allgegenwärtigste Masseninformationsmittel – fällt heute unter anderem die äusserst schwierige Aufgabe zu, unter Verzicht auf die das menschliche Empfinden und das Vorstellungsvermögen am stärksten ansprechende optische Information, nur Kraft seiner akustischen Aussage, eine wirklichkeitsnahe, der Natur entsprechende Ton-Reproduktion zu vermitteln. UKW-Rundspruch, Stereophonie und High Fidelity sind die Merkmale der heutigen Entwicklungsstufe.

Seit vor rund einem Jahrhundert die erste Sprechmaschine anfang, ihre quäckende Botschaft einer überraschten Welt zu vermitteln, erfolgte eine ununterbrochene Suche nach besseren, einwandfreieren und verfeinerten Methoden der Aufnahme und Wiedergabe von Klängen. Die hauptsächlichsten Durchbrüche gelangen in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten: die erste Langspiel-Schallplatte, die Erfindung der stereophonen Aufnahme und Wiedergabe, der Anfang des FM- und des FM-Stereo-Rundspruchs, die Entwicklung rauscharmer Verstärker, die Einführung der Halbleitertechnik in NF-Ausrüstung und, vor kurzem, das Aufkommen des «Vier-Kanal-Stereo-Tones».

Angesichts dieser Entwicklung von der Sprechmaschine über den frequenzmodulierten Rundspruch vorläufig bis zur Super-High-Fidelity-Stereoanlage erscheint es angezeigt, sich mit dem Grundsätzlichen der Stereophonie auseinanderzusetzen und die im Zusammenhang mit dem stereophonen Rundfunk stehenden studio-, übermittlungs-, sender- und empfangsseitigen Voraussetzungen zu beleuchten.

La radio qui est parallèlement à la télévision et à la presse le moyen d'information des masses le plus important et le plus répandu doit faire face aujourd'hui à une tâche extrêmement difficile. Privée du secours de l'information optique, dont le pouvoir sur la faculté d'interprétation de l'être humain est le plus grand, et disposant uniquement de moyens d'expression acoustiques, elle doit transmettre et restituer des sons avec le maximum de fidélité pour serrer de près la réalité. Le stade actuel de son développement est caractérisé par la radiodiffusion à modulation de fréquence sur ondes ultra-courtes, la stéréophonie et la haute fidélité.

Depuis un siècle environ, c'est-à-dire depuis que la première machine parlante fit entendre ses balbutiements à un monde émerveillé, les chercheurs se sont inlassablement efforcés de trouver des méthodes tendant à améliorer, à perfectionner et à raffiner l'enregistrement et la reproduction des sons. C'est au cours des deux ou trois dernières décennies que les principaux progrès ont été réalisés, avec le disque longue de durée, l'enregistrement et la reproduction stéréophoniques, les débuts de la radiodiffusion à modulation de fréquence et de la radiodiffusion stéréophonique à modulation de fréquence, la construction d'amplificateurs avec un recul du bruit de fond très important, l'apparition de la technique des semi-conducteurs dans les équipements à basse fréquence et, tout récemment, de la quadriphonie, ou stéréophonie à quatre canaux.

Si l'on considère le développement des machines parlantes jusqu'à celui des installations stéréophoniques dites de «super haute fidélité», en passant par la radiodiffusion à modulation de fréquence, il semble utile d'analyser les prin-

## 1. Das natürliche menschliche Richtungshören

Einmal hat der griechische Philosoph Zeno gesagt: «Die Natur hat dem Menschen eine Zunge, aber zwei Ohren gegeben, auf dass wir doppelt so viel hören wie sprechen können.» Was auch immer der tiefere Sinn dieser Aussage gewesen sein mag, so wird doch damit auf die für den Menschen wichtige Bedeutung des Gehörsinnes aufmerksam gemacht.

Bis vor knapp einem Jahrhundert waren noch alle Klänge «live» und flüchtig wie ein Echo. Heute begleiten sie uns überallhin, gespeichert auf Tonbändern und Schallplatten, auf breitester Ebene vermittelt durch Radiowellen. Was früher nur ein kleiner Kreis von Privilegierten im exklusiven Konzertsaal oder an andern Treffpunkten der gehobenen Gesellschaft erleben konnte, wird heute im Wohnzimmer der Familie Jedermann oder sogar im Fahrzeug zugänglich gemacht. Im Laufe der Entwicklung hat in jeder Beziehung ein Wandel der Hörfunktion stattgefunden, der nicht ohne Einfluss auf die menschlichen Richtungshörgewohnheiten geblieben ist.

Für die meisten Menschen gilt es als eine Selbstverständlichkeit, Schallquellen mit den Ohren lokalisieren zu können. Dennoch kann, trotz Kenntnis der Mechanik des Gehörs, seiner Funktion und gewisser Wechselbeziehungen zwischen beiden Ohren, nach wie vor die Erklärung der Vorgänge beim Richtungshören nur aufgrund von Hypothesen gegeben werden und muss demgemäss äusserst spekulativ bezeichnet werden. Der Weg der Ergründung des binauralen Hörens ist ebenfalls noch nicht ganz hundert Jahre alt und gekennzeichnet durch eine Reihe von Theorien aus einem ansehnlichen Kreis von Wissenschaftlern. Auf die wichtigsten dieser Theorien soll zunächst eingegangen werden.

### 1.1 Die Intensitätstheorie

Die Theorie der Intensitätsverhältnisse oder Intensitätsunterschiede war einer der ersten Versuche einer Erklärung des Richtungshörens. Aufgrund der 1876 durchgeführten Versuche fand der englische Physiker *John William Strutt* (*Lord Rayleigh*), dass ein direkt vor ihm erzeugter Ton nicht von einem genau hinter ihm erzeugten Ton unterschieden werden kann. Hingegen sind Töne ausserhalb dieser beiden Richtungen einigermaßen genau zu lokalisieren. Einschränkend musste er aber feststellen, dass man den Klang einer Stimmgabel mit tiefem Ton schwieriger ermitteln kann als einen hohen Ton oder ein gesprochenes Wort. Nach Rayleighs Argumentation erreicht ein Ton, wenn er sich von einer Seite des Kopfes her nähert, zuerst das ihm zugewandte Ohr. In jenem Ohr ist die Schallintensität grösser als in dem der Schallquelle abgekehrten Ohr, da der Kopf eine Art «Schallschatten» wirft. Bei niedrigen Frequenzen ist die Schattenwirkung weniger stark, bei sehr niedrigen Frequenzen sogar unwesentlich; die Wellenlänge ist bei

cipes de la stéréophonie et d'examiner les répercussions de cette évolution sur la conception des moyens de transmission, des équipements d'émission et de réception pour la radiodiffusion stéréophonique.

## 1. Le sens directif naturel de l'ouïe chez l'être humain

Le philosophe grec Zénon a déclaré jadis: «La nature a donné à l'être humain deux oreilles, mais une seule langue, afin qu'il puisse entendre deux fois plus qu'il ne parle». Quel que soit le sens profond de cette pensée, elle souligne l'importance de l'ouïe pour l'être humain. Il y a à peu près un siècle, tous les sons n'existaient que dans l'immédiat et s'envolaient comme l'écho. Aujourd'hui, ils nous accompagnent partout, emmagasinés sur des rubans magnétiques, gravés sur des disques, transmis dans un vaste espace par les ondes radiophoniques. Ce qui n'était autrefois que le privilège de l'auditoire des salles de concert ou de quelques invités assistant à une réception pénètre aujourd'hui dans le foyer de n'importe quelle famille et peut même être capté dans une voiture. Une évolution de la fonction auditive s'est accomplie parallèlement à ce développement et elle n'a pas été sans exercer une influence sur les aptitudes directionnelles du sens de l'ouïe des êtres humains.

La faculté de localiser les sources sonores par les oreilles est une chose naturelle pour la plupart des êtres humains. Cependant, malgré la connaissance de la mécanique de l'ouïe, de son fonctionnement, de certaines corrélations entre les deux oreilles, il n'est pas possible d'expliquer le processus de la perception auditive directionnelle sans avoir recours à des hypothèses, rendant les théories proposées très spéculatives. Les recherches entreprises quant à l'audition binaurale datent de cent ans à peine et toute une série d'opinions ont été émises par un grand nombre de savants. Les théories les plus importantes sont exposées ci-après.

### 1.1 La théorie de l'intensité

La théorie des rapports d'intensité ou de la différence d'intensité représente une des premières tentatives d'explication de la perception auditive directionnelle. Sur la base d'essais effectués en 1876, le physicien anglais *John William Strutt* (*Lord Rayleigh*) découvrit qu'il était impossible de discerner une différence entre un son produit exactement devant lui et un autre son produit exactement derrière lui. Par contre, il constata que les sons provenant d'autres directions pouvaient être assez exactement localisés. Il remarqua en outre qu'il était plus difficile de situer la résonance d'un diapason au son bas que celle d'un diapason au son haut ou celle de la parole. Selon Rayleigh, quand un son parvient à la tête latéralement, il atteint d'abord

niedrigen Frequenzen so gross, dass die Länge einer einzelnen Welle den Kopf umhüllt und den Schatten überwindet.

Die Rayleighschen Feststellungen wurden später durch *Sivian* und *White* bestätigt, allerdings nur für eine Schallquelle rein sinusförmiger Töne, die sich kreisförmig um den Kopf bewegt. Seine Feststellungen sind in *Figur 1* dargestellt.

Die beiden Forscher stellten zudem aber auch fest, dass bei Schalleindrücken von ständig wechselnder Zusammensetzung, beispielsweise Sprache, sich der Intensitätsunterschied zwischen den beiden Ohren fortwährend ändert und nur von einem mittleren Intensitätsunterschied gesprochen werden kann (*Fig. 2*).

Mit Hilfe der in *Figur 1* und *2* dargestellten Kurven hat schliesslich *DeBoer* die Intensitätsverhältnisse bei Sprache zwischen beiden Ohren als Funktion der Richtung berechnet und dargestellt (*Fig. 3*).

Grundsätzlich hat also die Intensitätstheorie nur im oberen Hörbereich Gültigkeit. Wie verhält es sich nun aber mit den niedrigeren Frequenzen, die nicht mit Hilfe von Binauralverhältnissen (Rayleighscher Ausdruck für Intensitätsunterschiede) lokalisiert werden?

### 1.2 Die Phasentheorie

Rayleigh selbst war sich der Unzulänglichkeit seiner Intensitätstheorie bewusst. Auf der Suche nach einer besseren Erklärung fand er 1907 eine zweite Theorie der zweiohrigen Schalllokalisierung. Sie besagt, dass der an den Ohren auf-

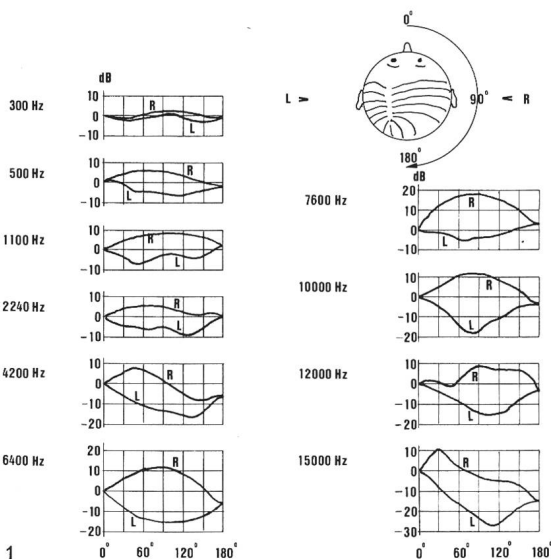


Fig. 1 An den Ohren auftretende Intensitätsveränderungen, wenn eine Schallquelle, die sinusförmige Töne abstrahlt, um den Kopf kreist (nach *Sivian* und *White*)

Variations de l'intensité du son pour les oreilles, lorsqu'une source sonore qui rayonne des sons sinusoidaux tourne autour de la tête (d'après *Sivian* et *White*)

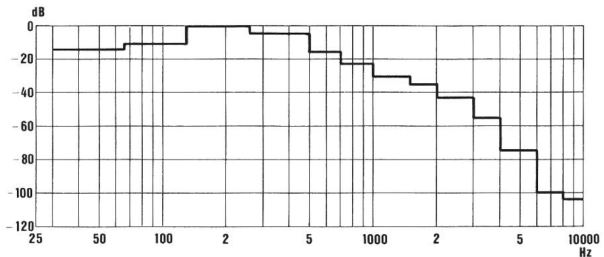


Fig. 2 Spektrale Verteilung einer durchschnittlichen Männerstimme  
Répartition dans le spectre d'une voix masculine courante

l'oreille placée du côté de la source sonore. L'intensité sonore qui frappe cette oreille est plus forte que celle qui atteint l'oreille située sur le côté opposé, la tête jouant le rôle d'un obstacle produisant une « ombre sonore ». L'effet d'« ombre » est plus faible pour les fréquences basses et devient même insignifiant pour des fréquences très basses; pour des fréquences basses, la longueur de l'onde est telle que celle de chaque onde individuelle enveloppe la tête et supprime l'effet d'ombre.

Les observations de Rayleigh furent confirmées plus tard par *Sivian* et *White* mais toutefois uniquement pour une source sonore émettant des sons sinusoidaux qui se propagent circulairement autour de la tête. Ses constatations sont illustrées par la *figure 1*.

Les deux savants observèrent en outre que lors de la perception de sons dont les composantes changent continuellement, comme c'est le cas pour la parole par exemple, la différence d'intensité entre les deux oreilles se modifie sans cesse et qu'il n'est plus possible alors de parler d'autre chose que d'une moyenne de la différence d'intensité (*fig. 2*).

En utilisant les courbes représentées dans les figures 1 et 2, *DeBoer* a finalement défini le rapport d'intensité entre les deux oreilles pour la parole comme fonction de la direction et il en a donné une représentation graphique (*fig. 3*). En principe, la théorie de l'intensité n'est applicable que dans le domaine des fréquences auditives élevées. Que se passe-t-il avec les fréquences basses qui ne peuvent pas être localisées dans la perception « biauriculaire » (selon l'expression utilisée par Rayleigh)?

### 1.2 La théorie des phases

Rayleigh se rendait compte lui-même des lacunes que présentait sa théorie de l'intensité. En cherchant une meilleure explication, il conçut en 1907 une deuxième théorie de la localisation biauriculaire des sons. Elle consistait à affirmer que le déphasage de la perception entre les deux oreilles devait être déterminant pour détecter la direction (*fig. 4*).



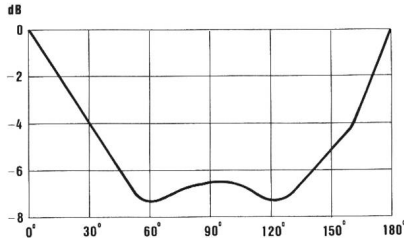


Fig. 3

Errechnete Intensitätsunterschiede zwischen beiden Ohren beim Wahrnehmen von Sprache (nach DeBoer)  
 Calcul des différences d'intensité entre les deux oreilles dans la perception de la parole (d'après DeBoer)

treten. Phasenunterschied für die Richtungsbestimmung entscheidend sein müsse (Fig. 4).

Tatsächlich könnte man meinen, dass eine Schallwelle, die unter einem bestimmten Winkel einfällt, nicht beide Ohren des Hörers gleichzeitig erreicht. Folglich werden die Minima und Maxima zuerst mit dem einen, dann mit dem anderen Ohr gehört (Fig. 4); die Töne in beiden Ohren werden ein wenig «phasenverschoben» sein. Trotzdem Rayleigh mit seiner zweiten Theorie wesentlich zur Verfeinerung der Untersuchung des zweiohrigen Hörens beitragen konnte, blieb er den endgültigen Beweis schuldig. Immerhin gelang ihm der Nachweis, dass der Mensch bei Tönen mit einer Frequenz von rund 130 Hz einen Phasenunterschied bis zu einer halben Wellenlänge lokalisieren kann. Spätere Versuche mit verfeinerten Untersuchungsmethoden wiesen sogar nach, dass eine Phasenlokalisierung auch noch bei Frequenzen bis zu 1000 Hz stattfinden kann. Verschiedene Forscher stellen sich aber auf den Standpunkt, dass eine Wahrnehmung von Phasendifferenzen zur Schalllokalisierung nicht möglich ist. Diese Stellungnahme beruht darauf, dass ein bestimmter Entfernungsunterschied zwischen beiden Ohren und der Schallquelle bei zunehmender Frequenz einem immer grösser werdenden Phasenunterschied entspricht. Wird der Phasenunterschied zwischen beiden Ohren in der Entfernung zur Quelle  $180^\circ$  oder mehr, so ist es dem Menschen nicht mehr möglich festzustellen, an welchem Ohr ein Phasenvorsprung oder Phasenrückstand vorliegt. Ein bestimmter Phasenunterschied kann dann je nach Frequenz einer anderen Richtung entsprechen.

### 1.3 Die Zeittheorie

Unter solchen Umständen wird es leicht verständlich, dass sich in den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts die beiden deutschen Psychophysiker *E. M. von Hornbostel* und *Max Wertheimer* überlegten, ob nicht anstelle der Phasenunterschiede, die zwischen den beiden Ohren auftretenden Zeitunterschiede massgeblich an der Schalllokalisierung beteiligt seien. Die beiden auf elektroakustischer Basis durchgeführten Versuche mit verschiedenen Personen ergaben denn auch, dass von einem

Il était effectivement possible de penser qu'une onde sonore frappant l'auditeur sous un angle donné n'atteint pas les deux oreilles au même moment. Par conséquent, les minima et les maxima sont perçus d'abord par une oreille, puis par l'autre (fig. 4); les sons dans les deux oreilles accusent un léger déphasage. Malgré l'importante contribution apportée par Rayleigh à l'étude de la perception biauriculaire par sa deuxième théorie, il restait à fournir la preuve indiscutable de cette explication. Il réussit à démontrer que l'être humain était en mesure de percevoir une différence de phase allant jusqu'à une demi-longueur d'onde pour des sons d'une fréquence d'environ 130 Hz. Des essais réalisés plus tard, à l'aide de méthodes de recherche perfectionnées, prouvèrent même qu'un déphasage pouvait être ressenti pour des fréquences atteignant 1000 Hz. Plusieurs chercheurs estiment cependant que la perception des différences de phase n'explique pas la localisation des sources sonores. Cette opinion repose sur le fait qu'en raison d'une certaine différence d'éloignement des deux oreilles par rapport à la source sonore, la différence de phase devient d'autant plus grande que la fréquence augmente. Lorsque le déphasage entre les deux oreilles atteint  $180^\circ$  ou davantage, selon l'éloignement de la source sonore, l'être humain ne peut plus constater pour quelle oreille se produit une avance ou un retard de phase. Une différence de phase donnée peut par conséquent, selon la fréquence, correspondre à une autre direction.

### 1.3 La théorie du temps

On comprendra que, dans de telles circonstances, les psychophysiciens allemands *E. M. von Hornbostel* et *Max Wertheimer* se soient demandés, vers 1920, si ce n'était pas la différence de temps de propagation affectant les deux oreilles plutôt que le déphasage qui permettait de localiser l'origine des sons. Les essais effectués par les deux savants sur une base électroacoustique avec plusieurs personnes, montrèrent qu'à partir d'une différence de temps de

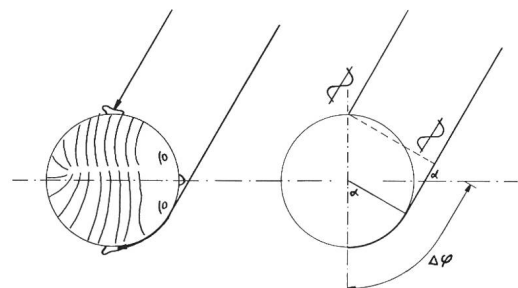


Fig. 4

Phasenunterschiede zwischen beiden Ohren als Folge des Wegunterschiedes  
 Déphasage produit entre les deux oreilles par la différence de trajet

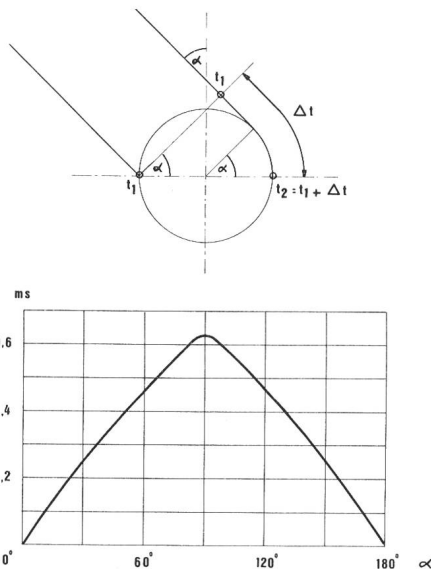


Fig. 5  
 Laufzeitunterschied als Funktion des Winkels  
 Différence de la durée du parcours en fonction de l'angle

Unterschied von rund  $30 \mu\text{s}$  an, die Testperson eine scheinbare Bewegung der Schallquelle festzustellen glaubte. Je grösser der Zeitunterschied war, desto weiter schien sich der Klang nach links oder rechts zu bewegen, je nachdem welches Ohr zuerst einen Klangeindruck erhielt. Nimmt man den Kopf als eine Kugel an, an der die Ohren diametral angeordnet sind, so lassen sich die Wegdifferenzen und damit auch die Zeitdifferenzen für ein aus einer bestimmten Richtung einfallendes Schallereignis berechnen und darstellen (Fig. 5).

Groot und Van Soest stellten die Existenz einer Schwelle von  $3 \times 10^{-5}$  s in Frage; bei den von ihnen durchgeführten Versuchen ermittelten sie eine solche von  $10^{-6}$  s und brachten sie in Abhängigkeit von der Hörroutine. Tatsächlich verfügt die Zeittheorie über eine viel grössere Beweis-

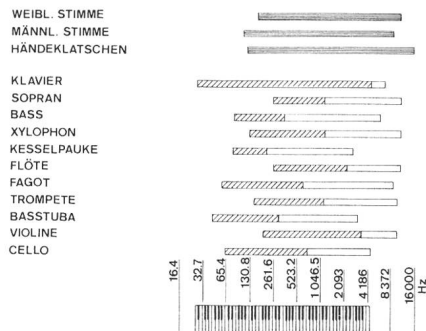


Fig. 6  
 Grund- und Oberton-Reichtum einiger Instrumente und Stimmen  
 Son fondamental et éventail des harmoniques de quelques instruments et de voix

propagation de  $30 \mu\text{s}$ , le témoin examiné avait l'impression que la source sonore se déplaçait. Plus la différence de temps de propagation était grande et plus la source paraissait se déplacer à gauche ou à droite, suivant quelle était l'oreille atteinte la première par le son. Si l'on considère la tête comme une boule sur laquelle les oreilles sont diamétralement opposées, il est possible de déterminer la différence entre les trajets et également celle du temps pour un phénomène sonore en provenance d'une direction donnée et d'en faire une représentation graphique (fig. 5).

Groot et Van Soest mirent en doute l'existence d'un seuil de perception de  $3 \times 10^{-5}$  s; au cours de leurs essais, ils purent déceler des différences de temps de propagation de  $10^{-6}$  s. Ils attribuèrent toutefois cette faculté de discernement à une certaine routine de l'audition. La théorie du temps est certainement plus probante que celle de la phase, d'autant plus que l'on ne peut parler de la phase d'un certain signal que lorsqu'il est sinusoïdal. Les oscillations sinusoïdales ne se présentent que très rarement dans la nature, dans la pratique tous les phénomènes sonores auxquels l'être humain est exposé sont de caractère très complexe.

#### 1.4 La théorie du timbre

La figure 6 permet de se rendre compte que, dans une exécution orchestrale, par exemple, on ne perçoit que des sons composés chacun de nombreux éléments particuliers, dans lesquels le signal de chaque instrument est constitué par sa sonorité de base et des harmoniques.

La figure 1 illustre de quelle façon une différence d'intensité entre les deux oreilles, dépendant de la fréquence, résultait de l'inflexion des ondes sonores autour de la tête. Tenant compte de ce facteur, on peut déduire que dans le cas de la perception d'un son composé de nombreux éléments particuliers, on obtient des timbres différents suivant l'angle d'incidence, et que cette différence de timbre entre les deux oreilles peut fournir l'indication qui permet de déceler la direction d'où provient le son perçu. La figure 7 reproduit la caractéristique de fréquence de l'inflexion du son autour de la tête pour trois angles d'incidence différents. Les courbes se fondent sur des mesures que F. M. Wiener a réalisées en 1947 en reportant les différences d'intensité pour les fréquences de tierce en tierce. Il est frappant de constater que, lorsque l'angle d'incidence et la fréquence augmentent, il en résulte de grandes différences d'intensité sonore entre les deux oreilles. Dans les recherches faites par Wiener, il faut cependant relever les écarts relativement importants apparaissant entre les courbes obtenues par l'expérimentation et celles qui sont calculées; ces écarts doivent être attribués à la différence de comportement de l'ouïe dans la perception des sons de mesure sinusoïdaux et des phénomènes sonores aperiodiques.

kraft als die Phasentheorie, um so mehr als von der Phase eines bestimmten Signals nur dann gesprochen werden kann, wenn dieses rein sinusförmig ist. Rein sinusförmige Schwingungen kommen in der Natur aber nur äusserst selten vor; praktisch alle Schallereignisse, denen der Mensch ausgesetzt ist, weisen eine ausgesprochen komplexe Zusammensetzung auf.

#### 1.4 Die Klangfarbentheorie

Aufgrund der Darstellung in *Figur 6* lässt sich gut vorstellen, dass zum Beispiel bei einer Orchesteraufführung nur ein teiltonreicher Schall anfällt, bei dem je Instrument jedes einzelne Signal aus Grundton und Obertönen zusammengesetzt ist.

In *Figur 1* wurde gezeigt, wie durch Beugung um den Kopf eine von der Frequenz abhängige Intensitätsdifferenz zwischen beiden Ohren auftritt. Bedingt durch diese Abhängigkeit kann nun bei einem teiltonreichen Schalleindruck eine vom Einfallswinkel her bestimmte Klangfarbenänderung abgeleitet und können die Klangfarbenunterschiede zwischen beiden Ohren als Massstab für die Richtungsfestlegung bei einem bestimmten Schalleindruck aufgeführt werden. In *Figur 7* ist die Frequenzcharakteristik der Schallbeugung um den Kopf für drei Einfallswinkel festgehalten. Die Kurven gehen auf Messungen zurück, die 1947 *F. M. Wiener* als über Terzbreiten ermittelte Intensitätsunterschiede über der Frequenz aufgezeichnet hat. Auffallend ist, dass mit grösser werdendem Schalleinfallswinkel und steigender Frequenz grosse Lautstärkeunterschiede zwischen beiden Ohren auftreten. Bei den von Wiener durchgeführten Untersuchungen fällt allerdings auf, dass zwischen den experimentell und den rechnerisch bestimmten Kurven verhältnismässig grosse Unstimmigkeiten vorhanden waren, die auf das unterschiedliche Verhalten des menschlichen Gehörsinnes bei sinusförmigen Messtönen und nichtperiodischen Schalleignissen zurückgeführt werden müssen.

Somit liegt der grosse Nachteil der Klangfarbentheorie darin, dass für die Ermittlung von Klangfarbenunterschieden Erfahrungen vorausgesetzt und mitberücksichtigt werden müssen. Eine Richtungswahrnehmung, die weniger eine eindeutige Richtungsbestimmung als vielmehr eine Richtungsinterpretation ist, führt zu Vorgängen psychologischer Natur.

#### 1.5 Richtungshören nach dem Prinzip der Wahrscheinlichkeit

An dieser Tatsache ändert auch der Umstand nichts, dass von anderen Forschern noch zahlreiche zusätzliche Theorien aufgestellt worden sind, wie die binaurale Frequenzanalyse, die Bedeutung der Einsätze oder die für die Stereophonie so wichtige Zeit-Intensitäts-Kombination. Jede einzelne dieser Theorien ist nichts anders als eine Teilerklärung eines äusserst komplexen Vorganges.

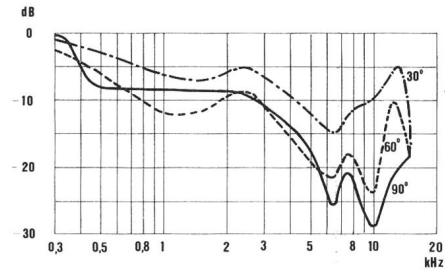


Fig. 7

Intensitätsunterschiede zwischen beiden Ohren als Funktion der Frequenz für die Schalleinfallswinkel 30, 60 und 90 Grad gegen die Kopfsymmetrie

Différences d'intensités entre les deux oreilles, selon la fréquence, pour des angles d'incidence de 30, 60 et 90 degrés par rapport à la symétrie des oreilles

La grande faiblesse de la théorie du timbre réside dans le fait que pour déceler des différences de timbre, il faut faire preuve d'une grande expérience d'audition. Une sensation de la direction qui est moins une détermination précise qu'une interprétation conduit à des processus de nature psychologique.

#### 1.5 Perception auditive directionnelle selon le principe de la probabilité

Le fait que d'autres chercheurs aient échafaudé de nombreuses théories soit sur l'analyse binaurale des fréquences, soit sur l'importance de l'ordre d'entrée des sons, soit encore sur les combinaisons de temps et d'intensité, si importants en stéréophonie, ne modifie en rien ce qui précède. Chacune de ces théories n'apporte que l'explication partielle d'un processus d'une extrême complexité.

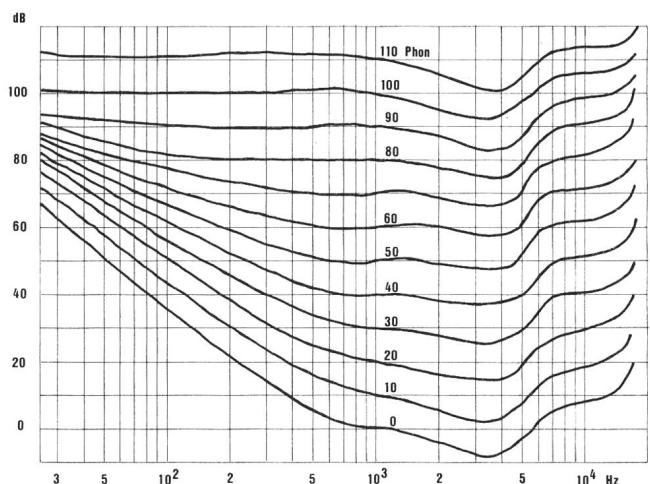


Fig. 8

Hörkurven gleicher Lautstärke

Courbes de l'audition pour des volumes du son égaux

Das Zustandekommen der binauralen Schalllokalisierung wird am besten mit der Arbeit eines Computers verglichen, der eine Vielzahl von Parametern auszuwerten hat.

Ein an den beiden Ohren eintreffendes Schallereignis wird zunächst einmal nach verschiedenen Gesichtspunkten analysiert. Die Grundlagen dieser Gesichtspunkte müssen in den verschiedenen vorgängig erwähnten Theorien gesucht werden, und die Verarbeitung erfolgt aufgrund gesammelter Erfahrungen je nach Art des Schallereignisses. Gleichzeitig mit der Analyse läuft ein Vergleich mit gespeicherten Erfahrungen visueller und auditiver Art, die unmittelbar oder mittelbar gesammelt worden sein können. Analyse und Vergleich ergeben eine aufgrund des vorhandenen Wissens nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit erarbeitete imaginäre Darstellung des Zusammenhangs von Schallereignis, Schallereignis verursachendem Gegenstand und mutmasslichem Standort des betreffenden Gegenstandes, bezogen auf den augenblicklichen Aufenthaltsort des Hörers. Vermag die Projektion der imaginären Darstellung der Zusammenhänge nach aussen noch nicht zu genügen, so werden durch unbewusstes und unmittelbar erfolgreiches Kopfdrehen um wenige Grade in die vermutete Schallrichtung weitere akustische, vorab aber auch visuelle Informationen gesammelt und dem laufenden Analysen- und Vergleichsprozess zugeführt. In dem Augenblick, wo die imaginäre Darstellung mit dem äusseren Erscheinungsbild übereinstimmt, ist die Schallquelle lokalisiert. Selbstverständlich wird der ganze Vorgang gespeichert und als weiterer Erfahrungsfall für spätere Schallrichtungsbestimmungen aufgespart. Die Schalllokalisierung ist demnach nichts anderes, als eine auf dem Wissen aufbauende, nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit erfolgende Synthese von Schallereignis, Schallereignis verursachendem Gegenstand und auf die Umgebung bezogenem, mutmasslichem Aufenthaltsort des Gegenstandes. Mit dem Prinzip der Wahrscheinlichkeit ist aber die menschliche Fähigkeit noch nicht vollständig umschrieben. Der Lebensbereich eines Menschen muss als beschränkt bezeichnet werden, und es kann ohne weiteres vorausgesetzt werden, dass innerhalb dieses Bereichs alle den Menschen für seine tägliche Arbeit interessierenden Schallquellen und Schallquellenorte bekannt sind. Somit wird aber innerhalb dieses Bereichs eine Schallortung im eigentlichen Sinn überflüssig, denn sofort beim Eintreten eines bestimmten Schallereignisses ist der Ort und somit auch die Richtung bekannt.

## **2. Das menschliche Richtungshören und die Theorie der Stereophonie**

Die im vorangehenden Kapitel angeschnittene Materie der Phänomenologie des menschlichen Richtungshörens kann angesichts der Komplexität und des zur Verfügung

La localisation binaurale des sons est comparable au travail d'un ordinateur qui aurait à délivrer un résultat basé sur l'analyse de nombreux paramètres.

Un phénomène sonore qui parvient aux deux oreilles est analysé tout d'abord selon différents critères dont les principes doivent être cherchés dans les différentes théories citées plus haut. Quant à la synthèse elle-même, elle s'opère sur la base des expériences acquises, selon la nature du phénomène sonore. Une comparaison entre des sensations visuelles et auditives emmagasinées dans la mémoire dans l'immédiat ou le passé s'effectue parallèlement à l'analyse instantanée. Toutes deux permettent d'élaborer, sur la base des connaissances acquises et selon les lois de la probabilité, une représentation imaginaire du phénomène sonore, de l'objet qui le produit, de l'emplacement où il est logique de le supposer par rapport à la place occupée par l'auditeur. Si les conclusions de la représentation imaginaire ne paraissent pas suffisantes, des mouvements inconscients et immédiats font tourner la tête de quelques degrés dans la direction supposée de la source sonore, afin d'obtenir des informations d'abord visuelles et acoustiques, à introduire dans le processus d'analyse et de comparaison en cours. A l'instant où la représentation imaginaire correspond à l'image extérieure, la source sonore est localisée. Il est évident que tout le processus est emmagasiné et qu'il sera mis de côté au titre d'expérience complémentaire servant ultérieurement à la détermination de la direction d'une source sonore. La localisation du son n'est par conséquent rien d'autre qu'une synthèse reposant sur la connaissance, obéissant à la loi des probabilités et tenant compte du phénomène sonore, de l'objet qui le produit et de l'endroit où il peut logiquement se trouver.

Le principe de la probabilité ne donne pas une définition complète des aptitudes de l'homme. L'homme se meut dans un espace limité et on peut admettre que dans cet espace toutes les sources sonores qui interviennent dans son activité quotidienne et leurs emplacements lui sont familiers. Dans cet espace, la localisation devient en quelque sorte superflue car, aussitôt qu'un phénomène sonore est perçu, la direction et l'emplacement sont connus.

## **2. La perception auditive directionnelle de l'être humain et la théorie de la stéréophonie**

Le sujet abordé dans le chapitre précédent traitant de la phénoménologie de la perception auditive directionnelle de l'être humain est d'une telle complexité que la place disponible ici ne permet pas de le traiter à fond. Les aptitudes auditives humaines dépassent de loin ce qui vient d'être exposé.

Si l'on prend comme exemple l'audition d'un orchestre, dans une salle de concert, où de nombreux instruments sont répartis dans un espace relativement vaste, on peut

stehenden Platzes begreiflicherweise nur unvollständig dargestellt sein. Die menschlichen Hörfähigkeiten gehen noch weit über das Dargestellte hinaus.

Nimmt man als Beispiel das Anhören eines Orchesterkonzertes im Konzertsaal, wo über einen verhältnismässig grossen Raum eine grosse Zahl von Instrumenten verteilt ist, lässt sich nämlich zudem feststellen, dass der Mensch doch offensichtlich verschiedene Richtungen gleichzeitig feststellen oder zumindest verschiedene Richtungseindrücke festhalten kann. Aus anderen Beispielen ist aber auch bekannt, dass am Ohr wohl eintreffende, aber für eine Bestimmung nicht unbedingt notwendige Schallteile einfach unterdrückt und in einem laufenden Richtungsbestimmungsprozess nicht berücksichtigt werden. Zusätzlich steht aber auch fest, dass für das Erkennen eines bestimmten Schallereignisses und somit der Schallquelle und dessen Ortes, nicht einmal mehr das vollständige, für das Ereignis spezifische Schallbild anfallen muss; fehlende Teile werden einfach ergänzt und das Schallbild zum gewohnten Umfang aufgerundet.

Gerade diese erstaunlichen Fähigkeiten sind es, die zur Verwirklichung der stereophonen Übertragung ausgenutzt werden und die «plastische» Tonwiedergabe ermöglichen.

### 2.1 Die Zeit-Intensitäts-Kombination

Mit absoluter Sicherheit steht fest, dass unter normalen Bedingungen die Schallrichtung durch die zwischen den beiden Ohren vorhandenen Differenzen bestimmt wird. Welche Art von Differenzen dabei ausschlaggebend sind, gehört in das Reich der Hypothesen. Richtig ist sicherlich auch die Feststellung, dass derartige Differenzen bei einer künstlichen Schallübertragung von einem Ort zum anderen erhalten bleiben müssen. Die Lösung des Übertragungsproblems wurde dabei über zwei verschiedene Wege versucht, die schliesslich zu einem gemeinsamen Ziel führten.

*Fletcher* ging bei seiner Realisierung der stereophonen Schallübertragung von der Annahme einer völligen Identität von Aufnahme- und Wiedergaberaum aus. Er stellte sich im Aufnahmezimmer einen Vorhang vor, der mit einer unendlichen Zahl von Mikrofonen besetzt ist und der im Wiedergaberaum einen äquivalenten Vorhang mit einer gleich grossen Zahl mit den entsprechenden Mikrofonen verbundener Lautsprecher hat. Aus praktischen Gründen konnte er jedoch sein Vorhaben nicht verwirklichen; der Not gehorchend, vereinfachte er sein System und beschränkte sich zunächst auf die Anlage von drei Mikrofonen und drei Lautsprechern. Später verringerte er die Anzahl sogar auf zwei, und auch auf diese Weise zeigte sich ihm eine befriedigende stereophone Wiedergabe als möglich.

Von Anfang an materiell weniger aufwendig erreichte *DeBoer* die stereophone Schallübertragung. Er stellte vor den Schallquellen ein Kopffantom auf, das anstelle

konstatieren, dass der Mensch fähig ist, gleichzeitig mehrere Richtungen der Schallherkunft zu erkennen oder zumindest die Empfindung davon zu empfangen. D'autres exemples nous apprennent que des éléments sonores perçus par l'oreille mais non indispensables pour la détermination de la direction sont simplement écartés et que le processus en cours se déroule sans en tenir compte. On a constaté aussi que l'identification d'un phénomène sonore et par conséquent la localisation de sa source et de son emplacement ne nécessitent pas la perception de l'image sonore spécifique complète du phénomène, les éléments manquants étant simplement reconstitués dans le processus auditif qui rétablit l'image sonore dans sa forme habituelle.

La réalisation de la transmission stéréophonique tire parti de ces aptitudes surprenantes pour arriver à donner à la restitution du son un relief acoustique.

### 2.1 La combinaison temps-intensité

Il est absolument certain que dans des conditions normales, la direction d'où provient le son est identifiée grâce aux différences constatées entre la perception par l'une et l'autre des oreilles. La question de savoir lesquelles de ces différences jouent le rôle principal appartient au domaine des hypothèses. Il est certain également que dans la transmission artificielle du son d'un endroit à un autre, les différences mentionnées doivent être conservées. On a cherché à résoudre ce problème en recourant à deux voies séparées conduisant au même but.

Pour réaliser sa transmission stéréophonique, *Fletcher* supposa une identité parfaite des locaux d'enregistrement et de reproduction. Il imagina, dans le local de prise de son, un rideau supportant un nombre infini de microphones. Dans le local de réception, le même nombre de haut-parleurs étaient placés sur un rideau identique et chaque microphone était relié à l'un d'eux. Pour des raisons pratiques, il ne put réaliser son projet. Obéissant à la nécessité, il réduisit le nombre des microphones et haut-parleurs à trois, puis par la suite à deux. Il obtint, de cette façon également, une reproduction stéréophonique satisfaisante.

*DeBoer* réussit à obtenir une transmission stéréophonique du son sans avoir recours à des moyens aussi importants. Il installa devant la source sonore une tête artificielle pourvue de deux microphones à la place des oreilles et relia ces microphones aux deux pavillons d'un casque d'écoute. Il reconnut cependant bien vite les lacunes que présentait la reproduction à l'aide d'un casque d'écoute. Comme nous l'avons souligné sous 1.5, dans la confrontation de l'image fictive du cerveau avec la réalité, les mouvements de la tête jouent un rôle très important dans la détermination exacte de la direction d'où provient le son. Dans la reproduction à l'aide d'un casque d'écoute, l'image fictive suit les mouvements de la tête et, au lieu d'une image du son



der Ohren mit zwei Mikrofonen versehen war, die er mit den beiden Muscheln eines Kopfhörers verband. DeBoer musste allerdings rasch die Feststellung einer mit Mängeln behafteten Kopfhörerwiedergabe machen. Wie in 1.5 erwähnt, ist für die Projektion der fiktiven Darstellung nach aussen die relative Kopfbewegung in bezug auf die Schallquelle zur eindeutigen Ausmachung einer Schallrichtung äusserst wichtig. Bei der Wiedergabe über Kopfhörer folgt jedoch das fiktive Schallbild der Kopfbewegung, und anstelle eines weitauseinandergezogenen Schallbildes ausserhalb des Kopfes tritt ein eng zusammengedrängtes in oder kurz über dem Kopf auf. Weitere Nachteile zeigte seine Versuchsanordnung im materiellen Aufwand bei einer Wiedergabe für einen grösseren Kreis von Zuhörern. DeBoer entschloss sich deshalb, die Kopfhörerwiedergabe zu verlassen und zur Wiedergabe über zwei Lautsprecher überzugehen; der eine links vorn und der andere rechts vorn aufgestellt. In erster Überlegung könnte nun angenommen werden, da jedes Ohr Signale von beiden Lautsprechern empfängt, es müsse eine Vermischung der stereophonen Wirkung eintreten. Dies ist jedoch nicht der Fall; die stereophonische Schallübertragung ist absolut zufriedenstellend.

Obwohl Fletcher und DeBoer bei ihren Versuchen zwei völlig verschiedene Aufnahmeverfahren angewandt hatten, fällt die gleichwertige Resultatausbeute auf. Dies musste zwangsläufig zur Überlegung führen, dass beiden Übertragungsverfahren gemeinsame Elemente zugrunde liegen. Weitere Untersuchungen zeigten nun, dass durch die Anordnung eines Kopfphantoms zwischen den beiden Mikrofonen oder durch die Anordnung der beiden Mikrophone in grossem Abstand voneinander, zwischen diesen Mikrofonen und somit auch den beiden Lautsprechern, Intensitäts- und Zeitunterschiede auftreten.

DeBoer ist dem Einfluss von Intensitäts- und Zeitdifferenzen zwischen zwei Lautsprechern auf die scheinbare örtliche Lage einer fiktiven Schallquelle nachgegangen. In einer ersten Versuchsreihe legte er den Einfluss fest, den

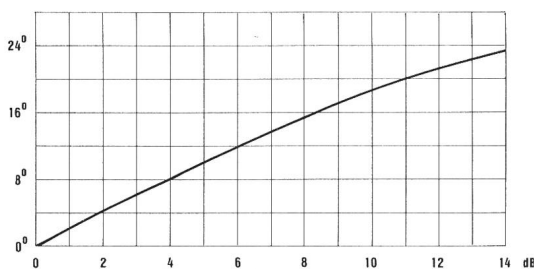


Fig. 9  
Einfluss des Intensitätsunterschieds auf die stereophonische Wahrnehmung  
Influence de la différence d'intensité dans la perception de la stéréophonie

extérieure très étirée, n'intervient qu'une image comprimée à l'intérieur de la tête ou directement au-dessus de celle-ci. Ce procédé avait encore un autre désavantage, celui d'exiger passablement de matériel lorsqu'il s'agissait d'une reproduction destinée à un cercle d'auditeurs étendu. DeBoer décida d'abandonner la reproduction à l'aide de casques d'écoute et de passer à la reproduction dans deux haut-parleurs placés en face, l'un à gauche et l'autre à droite. On aurait pu s'attendre à une confusion de l'effet stéréophonique puisque chaque oreille recevait les signaux des deux haut-parleurs. Tel n'est pas le cas et la transmission stéréophonique du son de cette manière est tout à fait satisfaisante.

Bien que Fletcher et DeBoer aient utilisé des procédés absolument différents dans la prise de son ils arrivèrent singulièrement au même résultat. Cela devait conduire à envisager que des éléments communs étaient à la base des deux procédés de transmission. Les recherches qui suivirent montrèrent que l'utilisation d'une tête artificielle entre les deux microphones ou celle de deux microphones placés à une grande distance l'un de l'autre avaient pour conséquence des différences d'intensité et de temps entre ces microphones, donc entre les deux haut-parleurs. DeBoer a examiné l'influence des différences d'intensité et de temps de propagation entre deux haut-parleurs sur la position apparente d'une source sonore fictive. Dans une première série d'essais, il détermina l'influence exercée par différentes valeurs de différence d'intensité produites artificiellement entre deux haut-parleurs – pour ce faire, il appliqua un signal identique mais d'intensité différente aux deux haut-parleurs. La *figure 9* illustre l'effet constaté de la différence d'intensité sur la perception stéréophonique. Il convient de préciser que la déviation maximum possible pour une image sonore correspond aux directions des haut-parleurs. Dans les essais faits par DeBoer, cette déviation maximum était environ de  $27^\circ$ . Des essais effectués avec d'autres valeurs ont montré un rapport à peu près proportionnel entre la déviation de l'image sonore et l'angle d'ouverture entre les haut-parleurs.

DeBoer consacra une deuxième série d'essais à la détermination de l'influence exercée par les différences de temps de propagation entre les haut-parleurs sur la position apparente de la source sonore artificielle. Le résultat de ces recherches est représenté dans la *figure 10*. La déviation de l'image sonore dans ces essais, compte tenu d'une différence de temps donnée, montre également un rapport à peu près proportionnel à l'angle d'ouverture entre les haut-parleurs.

Si les différences d'intensité et de temps sont capables à elles seules de créer l'illusion d'une image sonore stéréophonique, il est permis de supposer qu'il est possible de leur faire jouer un rôle sur l'importance de la déviation de



die Grösse einer zwischen zwei Lautsprechern künstlich hervorgerufenen Intensitätsdifferenz – es wurde beiden Lautsprechern dasselbe Signal, jedoch mit unterschiedlicher Intensität zugeführt – ausübt. In *Figur 9* ist der von ihm festgestellte Einfluss des Intensitätsunterschieds auf die stereophonische Wahrnehmung dargestellt. Ergänzend muss gesagt werden, dass die mögliche Maximalabweichung eines Schallbildes natürlich den Richtungen der Lautsprecher selbst entspricht. Bei der Versuchsanordnung von DeBoer betrug diese Maximalabweichung ungefähr  $27^\circ$ . Versuche mit anderen Werten haben eine beinahe proportionale Abhängigkeit der Abweichung des Schallbildes vom Öffnungswinkel zwischen den Lautsprechern gezeigt.

In einer zweiten Versuchsreihe widmete sich DeBoer dem Einfluss von Zeitdifferenzen zwischen den Lautsprechern auf die scheinbare örtliche Lage der fiktiven Schallquelle. Das Resultat dieser Untersuchungen ist in *Figur 10* dargestellt. Auch bei diesen Versuchen gilt für die Abweichung des Schallbildes bei einer bestimmten Zeitdifferenz die beinahe proportionale Abhängigkeit vom Öffnungswinkel zwischen den Lautsprechern.

Wenn Intensitäts- oder Zeitunterschiede allein die fiktive Abbildung eines stereophonischen Schallbildes ermöglichen, so liegt die Vermutung nahe, dass durch eine entsprechende Kombination von Intensitäts- und Zeitunterschieden ein Einfluss auf die Grösse der Abweichung des wahrgenommenen Schallbildes ausgeübt werden kann. Tatsächlich erweist sich nun die Abweichung als grösser, wenn Intensitäts- und Zeitdifferenzen gleichzeitig und im gleichen Sinn vorhanden sind. Sind die beiden Differenzarten gleichzeitig, jedoch gegensinnig vorhanden, zeigt sich die resultierende Abweichung als kleiner. Bei einem bestimmten entgegengesetzten Mass an Intensitäts- und Zeitdifferenz kann sogar überhaupt keine Abweichung des fiktiven Schallbildes wahrgenommen werden.

Wenn bei einer ganz bestimmten Kombination keine Abweichung des Schallbildes von der Mitte zustande kommt, so muss es aber auch Grenzwerte oder Grenzbedingungen geben, unter denen die Schallquelle gerade noch bei einem Lautsprecher wahrgenommen werden kann. Der in *Figur 11* dargestellte Einfluss der Kombination aus Intensitäts- und Zeitunterschied ist den ausführlichen Messungen von Meyer und Schodder zu verdanken. Ihre Untersuchungen galten besonders den beiden Extremen, das heisst der Kombination von Intensitäts- und Zeitunterschied, bei der keine Abweichung des Schallbildes von der Mitte festgestellt und bei der die Schallquelle gerade noch bei einem Lautsprecher lokalisiert werden kann. Als «geometrische Orte» der Zusammenhänge zwischen Intensitäts- und Zeitdifferenz bei bestimmter Abweichung des Schallbildes gelten Linien mit ungefähr proportionalem Verlauf zur Abweichung zwischen den gezeichneten Kurven L und R.

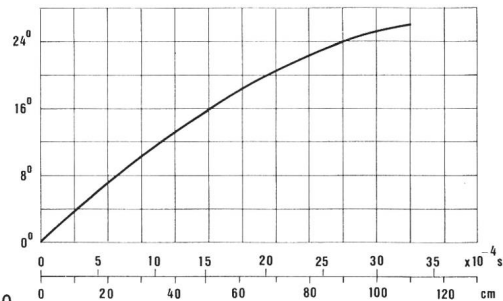


Fig. 10 Einfluss des Zeitunterschieds auf die stereophonische Wahrnehmung  
Influence des différences de temps dans la perception de la stéréophonie

l'image sonore perçue, en les combinant de façon appropriée. Effectivement, la déviation est supérieure lorsque les différences d'intensité et de temps interviennent simultanément et dans le même sens. Si les deux sortes de différences interviennent simultanément mais en sens inverse, la déviation qui en résulte est plus faible. Pour une certaine valeur de l'opposition entre les différences d'intensité et de temps, on ne perçoit plus aucune déviation de l'image sonore.

Si pour une combinaison donnée, l'image sonore n'accuse plus aucune déviation par rapport au milieu, il doit cependant exister des valeurs ou des conditions limites pour lesquelles on peut constater la présence de la source sonore dans un haut-parleur. L'influence de la combinaison des différences d'intensité et de temps que montre la *figure 11* a été établie d'après les mesures très poussées de Meyer et Schodder. Leurs recherches ont porté en particulier sur

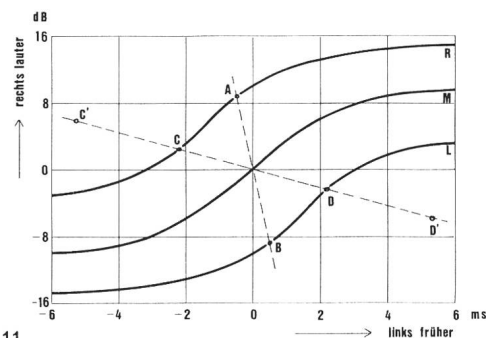


Fig. 11 Einfluss der Kombination aus Intensitäts- und Zeitunterschied auf die stereophonische Wahrnehmung  
Influence de la combinaison des différences d'intensité et de temps dans la perception de la stéréophonie

## 2.2 Das Grundprinzip der stereophonen Aufnahmetechnik

Der Sinn und Zweck einer stereophonen Wiedergabe liegt nun eigentlich nicht in der Darstellung fiktiver Schallbilder, sondern man möchte die an einem Ort eingefangenen Schallereignisse an einem anderen Ort mit der möglichst gleichen räumlichen Aufteilung (in der Horizontalebene gesehen) wiedergeben.

In Abschnitt 2.1 ist das Zustandekommen fiktiver Schallbild Darstellungen entweder aufgrund von Intensitäts-, Zeit- oder einer Kombination von Intensitäts- und Zeitunterschieden aufgezeigt worden. Anhand von *Figur 11* lassen sich nun sehr gut die verschiedenen Möglichkeiten einer Mikrofonanstellung für die stereophonische Aufnahme zeigen. Für das Erlangen einer beispielsweise nur aus Intensitätsunterschieden aufbauenden stereophonischen Aufnahme muss an die Aufstellung der beiden notwendigen Mikrophone die Bedingung gestellt werden, dass sich Zeitunterschiede nicht auswirken können. Praktisch wird dies bereits dann erreicht, wenn beide Mikrophone auf einer Achse senkrecht dicht übereinander angeordnet sind. Als richtungsabhängiges Intensitätsmerkmal kann bei einer solchen Mikrofonanordnung nur die Richtcharakteristik herangezogen werden. Intensitätsunterschiede sind dann vorhanden, wenn entweder die Richtcharakteristiken der beiden Mikrophone verschieden sind, die Hauptachsen der beiden Charakteristiken verschiedene Richtungen haben oder beides der Fall ist. Die Richtung, nach der die Aufnahme erfolgt, verläuft in diesem Fall entlang der vertikalen Achse von *Figur 11*.

Als gebräuchliche Richtcharakteristiken von einzelnen Mikrophenen stehen die Kugel-, Achter- oder Nierenform zur Verfügung (*Fig. 12*). Bei den möglichen Charakteristik-Kombinationen für Stereo-Mikrophone bei reiner Intensitäts-Stereophonie muss zwischen zwei Gattungen unterschieden werden. Handelt es sich um Kombinationen von Kugel-, Nieren- oder Achtercharakteristik mit einer quergerichteten Acht, so dass die Achse ihrer kleinsten Empfindlichkeit in Richtung des Schwerpunktes der Schallquelle weist (*Fig. 13a*), so wird von einem M/S- (Mitten-Seiten-) Mikrophen gesprochen. Sind es dagegen Kombinationen von zwei gleichen nieren- oder achterförmigen Richtcharakteristiken, deren Hauptachsen unter einem beliebigen Winkel nach rechts und links gerichtet sind, so handelt es sich um ein sogenanntes X/Y-Mikrophen (*Fig. 13b*).

Bei der Verwendung von M/S-Mikrophenen tritt eine zunächst ungewohnt anmutende Aufteilung des stereophonischen Signals auf – die, wie noch gezeigt wird, von grossem Wert sein kann –, denn die an den beiden Mikrophenausgängen anfallenden Signale können nicht direkt den beiden Lautsprechern zugeführt werden. Für die eigentliche stereophonische Wiedergabe müssen sie in ein linkes

les conditions extrêmes, c'est-à-dire pour la combinaison des différences de l'intensité et du temps pour laquelle aucune déviation de l'image sonore par rapport au centre n'intervient et pour celle où la source sonore peut encore être localisée dans un haut-parleur. Les «lieux géométriques» des rapports entre différence d'intensité et différence de temps pour une déviation donnée de l'image sonore se situe sur des courbes dont le tracé est à peu près proportionnel à la déviation entre les courbes L et R.

## 2.2 Le principe de base de la technique de la prise de son stéréophonique

Le sens et le but de la reproduction stéréophonique ne visent pas à la représentation artificielle d'une image sonore, ce que l'on désire, c'est d'arriver à reproduire en un endroit un phénomène sonore capté à un autre endroit, avec la même répartition spatiale (considérée sur le plan horizontal).

Sous 2.1 nous avons expliqué l'apparition d'images sonores soit du fait des variations de l'intensité ou du temps, soit par la combinaison des différences d'intensité et de temps. La figure 11 illustre fort bien les différentes possibilités de placer les microphones pour la prise de son stéréophonique. Pour obtenir par exemple une prise de son stéréophonique n'utilisant que les différences d'intensité, il faut placer les deux microphones de façon que les différences de temps ne puissent jouer aucun rôle. En pratique, cette condition est remplie quand les deux microphones sont installés très près l'un de l'autre sur un axe vertical. Pour une telle disposition, seule la caractéristique directionnelle des microphones peut être prise en considération

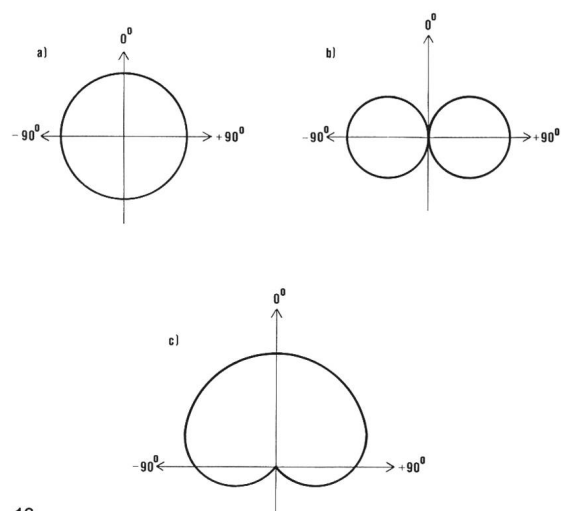


Fig. 12  
Mikrophen-Richtcharakteristiken  
Caractéristiques directionnelles des microphones

- a) Kugelform  
Sphérique omnidirectionnel
- b) Achterform  
Sphérique en 8
- c) Nierenform  
Sphérique cardioïde

und ein rechtes Signal für die beiden Lautsprecherkanäle umgewandelt werden.

Addiert und subtrahiert man graphisch zum Beispiel die beiden Richtkurven Kugel und Acht, so erhält man zwei entgegengesetzt nach links beziehungsweise nach rechts gerichtete Nieren. Diese Anordnung entspricht der eines X/Y-Mikrophons. Das Resultat lässt den Schluss zu, dass durch Bildung der Summe und der Differenz der beiden Signale des M/S-Mikrophons die «ohrgerichten» Signale des X/Y-Mikrophons entstehen. Das heisst also, dass das Mikrofon, dessen Achse der grössten Empfindlichkeit auf den Schwerpunkt der Schallquelle gerichtet ist, ein Signal abgibt, das dem vollen Toninhalt der Schallquelle, also dem monophonen Signal entspricht. Das andere Mikrofon mit der Achse der kleinsten Empfindlichkeit in Richtung auf den Schwerpunkt liefert dagegen ein Signal, das den Richtungsinhalt wiedergibt. Damit ist auch die Bezeichnung M/S erklärt, denn M weist auf Mitte- oder Summensignal, und S gibt den Hinweis auf Seiten- oder Differenzsignal; X und Y sind die Bezeichnungen für den linken und rechten Kanal bei Intensitätsstereophonie. Die Umwandlung des M/S- in eine X/Y-Signal kann algebraisch wie folgt dargestellt werden:

$$\frac{M + S}{2} = X \quad (1)$$

$$\frac{M - S}{2} = Y \quad (2)$$

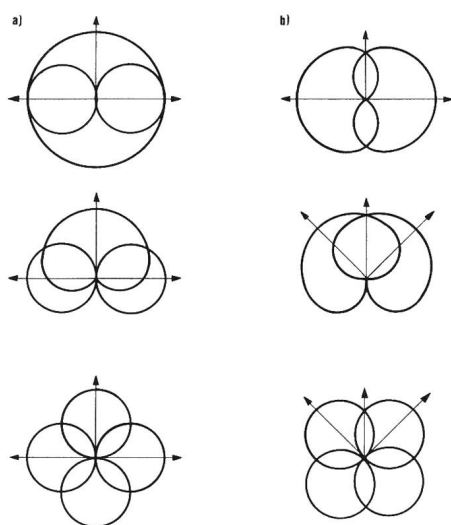


Fig. 13  
Charakteristik-Kombinationen für Stereo-Mikrophone  
Combinaisons de caractéristiques dans les microphones stéréophoniques

a) M/S-Mikrophone  
Microphones M/S

b) X/Y-Mikrophone  
Microphones X/S

pour agir sur les propriétés de l'intensité. Des différences d'intensité dans la prise de son n'apparaissent que si les caractéristiques des deux microphones sont différentes, que si les axes principaux de celles-ci sont orientés dans des directions distinctes ou lorsque ces deux conditions sont remplies. En ce cas, la direction de prise de son se situe dans l'axe vertical de la figure 11.

Les microphones utilisés peuvent être omnidirectionnels, en 8, ou cardioïdes (fig. 12). Pour la stéréophonie basée sur l'intensité, il faut distinguer deux sortes de combinaisons des caractéristiques microphoniques. Lorsqu'il s'agit de combinaisons des caractéristiques omnidirectionnelles, cardioïdes ou en 8, avec un microphone en 8 en position transversale, de manière que l'axe de la sensibilité la plus faible soit dirigé vers le centre de gravité de la source sonore (fig. 13 a), on parle d'un microphone centre-côtés (M/S). Par contre, dans les combinaisons qui utilisent deux microphones cardioïdes ou en 8, dont les axes principaux sont dirigés à droite et à gauche selon un angle choisi à volonté, il s'agit d'un microphone X/Y (fig. 13 b).

Avec l'utilisation de microphones M/S intervient une répartition inhabituelle du signal stéréophonique – qui peut être de grande valeur, comme nous l'expliquerons – car les signaux qui alimentent les deux sorties des microphones ne peuvent pas être directement acheminés aux deux haut-parleurs. Pour une reproduction stéréophonique proprement dite, ils doivent être transformés en signal de droite et signal de gauche pour les deux canaux des haut-parleurs.

Si l'on additionne et soustrait graphiquement par exemple les courbes omnidirectionnelles et en 8, on obtient deux cardioïdes dirigés en opposition soit à droite, soit à gauche. Cette disposition correspond à celle d'un microphone X/Y. Le résultat permet de conclure qu'en faisant la somme et la différence des deux signaux d'un microphone M/S on obtient les signaux «acceptables pour l'oreille» du microphone X/Y. Cela signifie que le microphone dont l'axe de sensibilité la plus forte est dirigé vers le centre de gravité de la source sonore livre un signal contenant la totalité des informations sonores de la source, c'est-à-dire un signal monophonique. L'autre microphone, dont l'axe de sensibilité la plus faible est dirigé vers le centre de gravité fournit un signal contenant les informations directionnelles. La désignation M/S est ainsi parfaitement claire, M désigne le signal médian ou la somme du signal et S le signal latéral ou la différence des signaux; X et Y sont les appellations des canaux gauche et droit dans la stéréophonie d'intensité. La transformation du signal M/S en un signal X/Y peut être exprimée algébriquement de la façon suivante:

$$\frac{M + S}{2} = X \quad (1)$$

$$\frac{M - S}{2} = Y \quad (2)$$

Durch Addition und Subtraktion der Formeln (1) und (2) erhält man die folgenden Beziehungen:

$$\frac{X + Y}{2} = M \quad (3)$$

$$\frac{X - Y}{2} = S \quad (4)$$

Tatsächlich würde bei einer graphischen Addition ( $X + Y$ ) und Subtraktion ( $X - Y$ ) der beiden Mikrophonausgangsspannungen eines aus der Kombination zweier Nieren, deren Hauptachsen einen Winkel von  $180^\circ$  einschliessen, gebildeten Stereo-Mikrophons wiederum als Summe eine Kugel und als Differenz eine quergerichtete Acht, also ein einem M/S-Mikrophon entsprechendes Kurvenpaar entstehen. Aus diesem Beispiel geht hervor, dass die beiden Gattungen M/S und X/Y physikalisch gleichwertig sind. Damit liegt die Entscheidung über die Kombination und Gattung für einen bestimmten Aufnahmzweck allein in der Hand des verantwortlichen Tontechnikers und wird hauptsächlich vom aufzunehmenden Schallbild und vom Aufnahme-raum abhängen.

Findet eine von der M/S- oder X/Y-Gattung unabhängige Mikrophonaufstellung statt, das heisst, werden zwei Mikrophone örtlich getrennt aufgestellt, so fallen nicht nur Intensitätsunterschiede, sondern auch Zeitdifferenzen an. Dies ist bereits dann schon der Fall, wenn beispielsweise ein Kopffantom Anwendung findet. Eine derartige Aufnahme wird entsprechend Figur 11 durch die Linie A-B dargestellt. Bringt man die Mikrophone in noch grösserer Entfernung voneinander und auch zur Schallquelle, so treten immer mehr die Zeitdifferenzen in den Vordergrund, und das Aufnahmeverfahren entspricht etwa der Linie C-D in Figur 11.

Anhand der Darstellung von Figur 11 wird aber auch offensichtlich, welche Folgen eine verkehrte Aufnahmetechnik haben kann. Werden zum Beispiel bei einer Aufnahme die beiden Mikrophone zu weit auseinander aufgestellt, so dass die maximalen Intensitäts- und Zeitunterschiede nicht mehr den Punkten C und D in Figur 11 entsprechen, sondern C' und D', so tritt das bei der Wiedergabe von bewegten Schallbildern vielfach bekannte «Loch in der Mitte» in Erscheinung. Bewegt sich nämlich eine Schallquelle durch den von den Mikrophonen erfassten Raum von der einen Seite zur anderen, so verändern sich die Intensitäts- und Zeitdifferenzen dauernd. Ist der Startpunkt der Schallquelle identisch mit dem Punkt C', so ändert sich auf der Wiedergabeseite so lange nichts, bis die Schallquelle den Punkt C erreicht hat. Während der ganzen Bewegungszeit von C' nach C wird die Schallquelle immer nur im linken Lautsprecher wahrgenommen. Bei der Weiterbewegung wird nun sehr schnell der Punkt D erreicht, bei dem der Schall aus dem rechten Lautsprecher zu kommen scheint. Nachher verändert sich in der Wiedergabe nichts mehr, wenn auch die Schallquelle auf der Aufnahme-

Par addition et soustraction des formules (1) et (2), on obtient les relations suivantes:

$$\frac{X + Y}{2} = M \quad (3)$$

$$\frac{X - Y}{2} = S \quad (4)$$

Effectivement, on obtiendrait par une addition ( $X + Y$ ) et une soustraction ( $X - Y$ ) graphiques des deux tensions de sortie des microphones une combinaison de deux cardioïdes dont les axes principaux font un angle de  $180^\circ$ , un microphone stéréophonique ayant pour somme le signal d'un microphone omnidirectionnel et pour différence un microphone en 8 en position transversale, c'est-à-dire une paire de courbes correspondant à celles d'un microphone M/S. Cet exemple démontre que les deux espèces, M/S et X/Y, sont physiquement de même valeur. Le choix de la combinaison et du genre de microphones (M/S ou X/Y) pour une prise de son donnée est affaire de l'ingénieur du son qui en a la responsabilité. Il dépendra principalement de l'image sonore à enregistrer et du local d'enregistrement.

Si l'on a affaire à une position des microphones indépendante de M/S ou de X/Y, c'est-à-dire si l'on doit installer deux microphones séparément, on devra tenir compte non seulement des différences d'intensité mais aussi des différences de temps. Tel est déjà le cas si l'on utilise une tête artificielle par exemple. Une prise de son de ce genre est représentée par la ligne A-B dans la figure 11. Si la distance entre les microphones ou entre eux et la source sonore augmente, les différences de temps prendront de plus en plus d'importance et la prise de son correspondra à la ligne C-D de la figure 11.

Les conséquences d'une technique de prise de son maladroite sont également visibles dans la figure 11. Si par exemple les microphones sont placés trop loin l'un de l'autre, de telle façon que les différences maximales d'intensité et de temps ne correspondent plus aux points C et D de la figure 11, mais à C' et D', on constatera dans la reproduction «le trou du milieu» de l'image sonore, ce qui se produit souvent lorsqu'ils sont mobiles. Si une source sonore se déplace d'un côté à l'autre dans l'espace «couvert» par les microphones, les différences d'intensité et de temps se modifient constamment. Lorsque le point de départ de la source sonore s'identifie à C', rien ne change du côté de la reproduction, tant que la source sonore n'a pas atteint le point C. Aussi longtemps que la source sonore se déplace de C' à C, elle ne sera perçue que dans le haut-parleur de gauche. Si le déplacement continue, le point D à partir duquel le son paraît sortir du haut-parleur de droite sera très vite atteint. Ensuite, aucun changement ne se produira dans la reproduction, même si la source se déplace encore du côté de la prise de son, de D à D'. Lorsqu'elle est captée de cette manière, une source sonore sera pratiquement toujours

seite noch von D nach D' weiterwandert. Derart aufgenommen, wird eine Schallquelle beinahe immer in einem der Lautsprecher festgestellt, nur selten im Raum dazwischen.

Der Abschnitt über das Grundprinzip der stereophonen Aufnahmetechnik wäre im Rahmen des vorliegenden Artikels nur unvollständig behandelt, wenn nicht noch besonders auf die Möglichkeit der Gewinnung von stereophonischen Signalen mit nur einem gewöhnlichen, monophonischen Mikrofon hingewiesen würde.

Führt man sich den Versuchsaufbau vor Augen, der schliesslich die Darstellung der Ergebnisse in den Figuren 9, 10 und 11 erlaubte – das Signal eines einfachen Tongenerators wurde mit unterschiedlicher Intensität und/oder Zeit auf zwei Lautsprecher gegeben –, so bedarf es keiner weiteren Erläuterungen mehr, dass die Intensitäts- und Zeitunterschiede zwischen den beiden Übertragungskanälen ohne weiteres künstlich erzeugt werden können. Somit wird die Wiedergabe stereophonischer Klangbilder unabhängig von stereophonischen Aufnahmemethoden, das heisst ein stereophonisches Klangbild kann auch mit monophonischen Mitteln erreicht werden.

### 2.3 Grundprinzipien der stereophonischen Wiedergabe

Aus den vorangehenden Abschnitten geht hervor, wie das räumliche Klangbild bei einer stereophonischen Schallwiedergabe durch Intensitäts- und Zeitunterschiede zwischen zwei Lautsprechern hervorgerufen wird. Dabei wird es offensichtlich, dass die Aufstellung der Lautsprecher massgebenden Einfluss auf die Hörfläche des richtigen stereophonischen Eindrucks ausüben muss.

Damit ein Zuhörer die jeder stereophonischen Aufnahme eigenen Intensitäts- und Zeitunterschiede bei der stereophonischen Wiedergabe richtig wahrnehmen kann, muss er sich in jedem Fall in genau gleicher Entfernung von den beiden Lautsprechern aufhalten, das heisst auf der Mittelsenkrechten der Verbindungslinie der Lautsprecher.

Lautsprecher haben frequenzabhängige Abstrahlungseigenschaften. Das Poldiagramm eines elektrodynamischen Lautsprechers zum Beispiel ergibt bei tieferen Frequenzen (unter etwa 800 Hz) ein ungefähr rundes Strahlungsdiagramm, das bei höheren Frequenzen (über etwa 8000 Hz) zu einer schmalen, gerichteten Ellipse werden kann. Dazu zeigen in der Hauptstrahlungsrichtung gemessene Schalldruckkurven bei bestimmten Frequenzen bevorzugte Werte. Je nach Basisbreite der aufgestellten Lautsprecher und Richtung der Hauptachse der Strahlungsrichtung entsteht in einer bestimmten Entfernung eine mehr oder weniger grosse Zone gleicher Hörsamkeit, die durch entsprechende Wahl der Lautsprecher (Tief-, Mittel- und Hochton-Kombinationen) beeinflusst werden kann. Eine zusätzliche,

entendue comme sortant de l'un ou de l'autre haut-parleur et très rarement de l'espace intermédiaire.

Le paragraphe consacré au principe de base de la technique d'enregistrement de la stéréophonie serait traité de façon très incomplète dans cet article s'il n'était pas fait allusion à la possibilité d'obtenir des signaux stéréophoniques au moyen d'un microphone ordinaire utilisé pour la monophonie.

Si l'on se réfère aux essais dont les résultats ont permis d'établir les représentations graphiques des figures 9, 10 et 11, – le signal d'un générateur de son ordinaire transmis sur deux haut-parleurs en recourant à des différences d'intensités ou de temps – il n'est pas besoin de longues explications pour faire comprendre que les différences d'intensité et de temps entre les deux voies de transmission peuvent être produites artificiellement. De cette façon, la reproduction stéréophonique devient indépendante des méthodes de prise de son stéréophoniques, autrement dit une image sonore stéréophonique peut être obtenue également avec un équipement de prise de son en monophonie.

### 2.3 Les principes fondamentaux de la reproduction stéréophonique

Ce qui a été exposé dans le paragraphe précédent montre que l'image sonore à relief peut être suscitée dans une reproduction stéréophonique au moyen des différences d'intensité et de temps entre les deux haut-parleurs.

Il est évident que la position des haut-parleurs jouera un rôle essentiel sur les dimensions de l'emplacement à l'intérieur duquel l'effet stéréophonique sera nettement perceptible. Pour qu'un auditeur puisse percevoir correctement les différences d'intensité et de temps de la reproduction, il faut qu'il se tienne dans tous les cas à égale distance des deux haut-parleurs, autrement dit sur une ligne médiane perpendiculaire à celle qui relie les deux haut-parleurs.

Les haut-parleurs ont des caractéristiques de rayonnement qui dépendent de la fréquence. Le diagramme de rayonnement d'un haut-parleur électrodynamique montre par exemple que pour les fréquences basses (au-dessous de 800 Hz) le rayonnement est à peu près circulaire et que pour les fréquences élevées (au-dessus de 8000 Hz) il peut prendre une forme elliptique. En outre, dans la direction principale du rayonnement les courbes de pression sonore relevées accusent des valeurs particulières pour certaines fréquences. Selon la largeur de base des haut-parleurs installés et l'orientation de l'axe principal de la direction du rayonnement, il se forme, à une certaine distance, une zone plus ou moins grande où les conditions d'audition sont pareilles. Cette zone peut être modifiée par le choix de haut-parleurs appropriés (combinaisons de haut-parleurs pour fréquences élevées, moyennes et basses). Une correction supplémentaire négative se manifeste dans l'espace d'au-



negative Korrektur erfährt die Hörfläche durch eine praktisch immer bestehende, unterschiedliche Raumreflexion, die von verschiedenen Faktoren abhängig ist.

Der kleinste zulässige Abstand von den Lautsprechern wird durch den auch von DeBoer festgestellten und näher untersuchten «Elevationseffekt» bestimmt. Bei grossen Abständen tritt er kaum merkbar in Erscheinung, aber schon bei Winkeln zu den Lautsprechern von  $\pm 45^\circ$  hebt sich das Schallbild um etwa  $40^\circ$  über die Verbindungslinie der beiden Lautsprecher an, um auf etwa  $90^\circ$  anzusteigen beim Abhören auf der Verbindungslinie selbst (letzteres eine ähnliche Erscheinung wie bei der Kopfhörerwiedergabe).

Bei der Originaldarbietung im Konzertsaal unterscheidet man zwischen akustisch guten und weniger guten Plätzen. Die akustisch günstigen Plätze liegen dort etwa auf der Mittellinie des Orchesters in einem Abstand, der ungefähr der Breitenausdehnung des Klangkörpers entspricht. Obwohl die akustischen Verhältnisse des Wiedergaberaumes niemals mit jenen der Aufnahmeseite verglichen werden können, gilt für den besten Platz innerhalb der stereophonisch richtigen Hörfläche ein Abstand von der Mitte der Lautsprecherbasis, der etwa der Basis selbst entspricht. Dies gilt als allgemeine Regel, die aber in jedem einzelnen Fall im Wiedergaberaum auf ihre Gültigkeit hin überprüft werden muss.

dition par l'effet pratiquement toujours existant des différentes réflexions du local qui dépendent de divers facteurs.

La distance la plus faible tolérable entre les haut-parleurs est déterminée par «l'effet d'élévation» découvert et analysé par DeBoer. Cet effet est à peine perceptible lorsque l'écart est assez grand. Quand les angles par rapport aux haut-parleurs sont déjà de  $\pm 45^\circ$ , l'image sonore s'élève d'environ  $40^\circ$  au-dessus de la ligne reliant les haut-parleurs, pour atteindre environ  $90^\circ$  quand l'écoute a lieu sur la ligne même (phénomène analogue à ce qui se produit dans la restitution par casque d'écoute).

Lors d'une audition en direct dans une salle de concert, on fait la distinction entre les places où l'acoustique est bonne et celle où elle l'est moins. Les places les plus favorables du point de vue de l'acoustique se situent sur une ligne médiane par rapport à l'orchestre, à une distance qui correspond environ à la largeur de la source sonore. Bien que les conditions acoustiques d'un local de reproduction ne puissent en aucune façon être comparées à celles de l'endroit de la prise de son, la meilleure place dans l'espace où l'audition stéréophonique est correcte se situe à une distance du milieu de la base des haut-parleurs qui est égale à cette base. Il s'agit là d'une indication générale dont la validité doit cependant être contrôlée dans le local de reproduction.