

Dr. W. LIPPERT

Stereophonische Zweikanalübertragung mit dem Magnetophon

*(Mitteilung aus dem Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung,
Berlin-Charlottenburg)*

A. Einleitung

Das Problem der stereophonischen Übertragung ist ein wichtiges elektroakustisches Problem. Die Anfänge der Entwicklung liegen etwa 10 Jahre zurück [1], [2], [3]¹⁾. Kurz vor dem Kriege und zu Anfang des Krieges ist eine Reihe von theoretischen Untersuchungen und praktischen Versuchen [4], [5] [10] ausgeführt worden, die gezeigt haben, daß es möglich ist, mit Hilfe der Stereophonie eine ausreichende Lokalisierungsmöglichkeit und eine bedeutende Erhöhung des natürlichen Eindrucks für den Zuhörer zu erreichen. Diese Erfolge haben dazu geführt, daß man sich mit den technischen Bedingungen der Stereophonie immer eingehender befaßt hat. Die Anwendungsmöglichkeiten des plastischen Hörens auf den verschiedensten Gebieten der Elektroakustik sind untersucht worden [11], [12]. Vor allen Dingen war man bemüht, eine Anwendung für den Tonfilm zu schaffen. Von den vorliegenden Arbeiten über Stereophonie seien besonders die zusammenfassenden Darstellungen von H. Warncke [13] und K. de Boer [14] erwähnt.

Be dem augenblicklichen Stand der Entwicklung ist zu übersehen, daß man in Zukunft bei hochwertigen Übertragungsanlagen ohne Stereophonie nicht auskommen wird. Ihre Einführung in größerem Umfange wird vielleicht noch einige Zeit erfordern wegen der zu überwindenden Schwierigkeiten bei der Umstellung auf eine neue Technik. Es erscheint jedoch ratsam, auch jetzt schon an weitere wichtige Anwendungsmöglichkeiten, z. B. in der Übertragungstechnik des Rundfunks, zu denken.

Bei der modernen Übertragungstechnik des Rundfunks spielt das Magnetophon eine wichtige Rolle. Für eine Einführung der Stereophonie ist deshalb auf der Sendeseite des Rundfunks die Eignung des Magnetophons für stereophonische Übertragung sehr wichtig.

¹⁾ Die Zahlen in den eckigen Klammern beziehen sich auf das Literaturverzeichnis am Schluß des Berichtes.

Bereits von seiten der früheren Reichs-Rundfunk-Gesellschaft wurden Versuche für den Bau einer stereophonen Magnetophonanlage durchgeführt, die aber nicht abgeschlossen wurden. Es ist auch nicht zu ermitteln, welche Teilergebnisse erzielt wurden. Deshalb wurde die Aufgabe gestellt, eine stereophone Magnetophonübertragungsanlage, zunächst in labormäßiger Ausführung, aufzubauen und mit ihr zu experimentieren, um Unterlagen für eine Beurteilung der Eignung des Magnetophons für Stereophonie zu gewinnen. Über die Ergebnisse soll im Verlauf dieser zusammenfassenden Darstellung berichtet werden.

Die Übertragungstechnik des plastischen Hörens enthält eine ganze Reihe besonderer technischer Bedingungen, deren Erfüllung für seine erfolgreiche Anwendung wesentlich ist. Eine Begründung entsprechender technischer Maßnahmen läßt sich nur herleiten aus den dafür gültigen physikalischen Grundlagen, die im folgenden zusammengestellt werden.

B. Die physikalischen Grundlagen der Stereophonie

1. Erläuterung des Begriffs und des Wesens der Stereophonie

Wir sind gewöhnt, Schallempfindungen mit einem räumlichen Eindruck über die Herkunft des Schalles zu verbinden. Dieser räumliche Eindruck ist sogar ein wesentlicher Bestandteil einer Schallwahrnehmung. Ist eine räumliche Vorstellung über den Ort einer Schallquelle nicht möglich oder ist sie gegenüber unseren normalen Erfahrungen gefälscht, so wird das von uns als unangenehm oder zumindest unnatürlich empfunden.

Die Fähigkeit, unsere Aufmerksamkeit bei Schallwahrnehmungen auf eine bestimmte Richtung zu konzentrieren, ist sehr groß und bildet auch bei dem normalen Gebrauch des Gehörs ein gutes Mittel, um beispielsweise störende oder unerwünschte Geräusche nicht wirksam werden zu lassen. Es ist nicht überraschend, daß ein Schalldruck, bei dem die Möglichkeit fehlt, diese wichtige Fähigkeit unseres Gehörs zur Lokalisierung zu benutzen, fremd und unnatürlich erscheint.

Bei einer elektroakustischen Übertragung besteht die Aufgabe, Schallvorgänge, die sich an einem Ort abspielen, an einem anderen Ort möglichst originalgetreu hörbar zu machen. Nachdem man gelernt hatte, zwei wesentliche Faktoren, nämlich die Tonhöhe und die Tonstärke eines Schallvorganges richtig zu übertragen, blieb immer noch ein wesentlicher Unterschied übrig zwischen einer Originaldarbietung und einer Übertragung. Man sprach von einem sogenannten „Lautsprecherklang“ einer Übertragung und drückte damit aus, daß noch ein oder mehrere Faktoren bei der Übertragung eines Schallvorganges für die Natürlichkeit des Eindrucks fehlen müssen. Es dauerte einige Zeit, bis man erkannte, daß die noch fehlende wesentliche Komponente für die Natürlichkeit sich bei der Schallübertragung ergibt durch den Verlust der Empfindung für die Schallrichtung und die Verteilung der Klangvorgänge im Raum.

Man erkannte, daß eine Analogie besteht zwischen unseren optischen und akustischen Wahrnehmungen in bezug auf den räumlichen Eindruck und nannte eine akustische Übertragung, bei der man dem Ohr die Herkunftsrichtung des Schalles bei der Wiedergabe erkennbar macht, eine „stereophonische“ Übertragung.

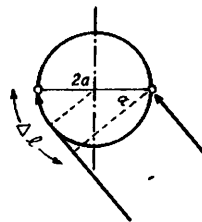


Abb. 1. Der Einfallswinkel einer ebenen Schallwelle beim Auftreffen auf den Kopf

2. Die Koordinaten für die Lokalisierung einer Schallquelle
Der Ort einer Schallquelle läßt sich für einen Hörer durch drei Koordinaten festlegen: den Abstand, die Richtung in der waagerechten Ebene (Azimut) und den Winkel mit dieser Ebene (Höhe).

Für die Abschätzung der Höhe hat man fast kein Gefühl. Man führt durch Schräghalten des Kopfes die Festlegung der Höhe auf eine Richtungsbestimmung in der „waagerechten“ Ebene zurück.

Über das Zustandekommen der Abstandsempfindung sind experimentelle und theoretische Untersuchungen von Bekesy [15] durchgeführt worden. Es zeigt sich, daß eine Reihe von Bedingungen erfüllt sein muß, damit eine richtige Abstandsempfindung zustandekommt. Bei einer Beurteilung im Freien scheint man aus der Klangfarbenänderung auf den Abstand zu schließen. Damit eine richtige Beurteilung möglich ist, muß eine Erfahrung über das Klangbild der zu beurteilenden Schallquelle vorliegen, sonst kann unter Umständen eine anscheinend sichere, mit der Wirklichkeit aber nicht übereinstimmende Entfernung geschätzt werden. Außerdem ist die Eignung eines Schallvorganges für eine Abstandsfeststellung abhängig von dem Vorhandensein von stoßartigen Unregelmäßigkeiten. Ein sinusförmiger Dauerton ergibt z. B., wie Messungen gezeigt haben, überhaupt keinen genauen Abstandseindruck.

In geschlossenen Räumen wird die Abstandsempfindung auch beeinflusst durch das Verhältnis von direktem Schall zum Nachhall. Mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle wird dieses Verhältnis nämlich kleiner, da der Nachhall annähernd konstant bleibt. Der Einfluß des Nachhalls auf den stereophonischen Effekt ist sehr wichtig und soll später noch erörtert werden.

Die wichtigste Koordinate für die Lokalisierung einer Schallquelle ist die Richtung in der waagerechten Ebene. Die Richtungsempfindung entsteht durch das Zusammenwirken der beiden Ohren. Ein Schall, dessen Herkunftsrichtung einen Winkel gegen die Symmetrieebene des Kopfes bildet, erreicht die beiden Ohren mit einem Zeitunterschied. Die um den Kopf gebeugte Welle ist außerdem geschwächt. Für diese Zeit- und Intensitätsunterschiede der beiden Ohreindrücke ist unser Gehör sehr empfindlich und deutet sie auf Grund der Erfahrung als Richtungsabweichung von der Symmetrieebene.

3. Richtungslokalisierung auf Grund von Zeitunterschieden

In Abb. 1 ist der Kopf durch eine Kugel mit dem Radius a ersetzt. Der Einfallswinkel des Schalles gegen die Symmetrieebene des Kopfes sei α . Der Wegunterschied für die beiden Ohren ist gegeben durch:

$$(1) \quad \Delta l = a (\alpha + \sin \alpha)$$

und der zugehörige Zeitunterschied Δt durch:

$$(2) \quad \Delta t = \frac{\Delta l}{c} = \frac{a}{c} (\alpha + \sin \alpha)$$

c = Schallgeschwindigkeit.

Für einen Ohrabstand von 20 cm, also $a = 10$ cm ist in Abb. 2 der Zeitunterschied Δt als Funktion des Winkels aufgetragen. Erfahrungsgemäß kann etwa eine Winkelabweichung von 3° noch wahrgenommen werden, das entspricht also einem Zeitunterschied von $\Delta t = 3 \cdot 10^{-5}$ sec.

4. Richtungslokalisierung auf Grund von Intensitätsunterschieden

Von größerer Bedeutung als die Zeitunterschiede an den beiden Ohren sind für das Richtungshören die Intensitätsunterschiede, die durch Beugung des Schalles am Kopf entstehen. In erster Näherung kann der Kopf durch eine Kugel ersetzt werden und die durch Beugung an einer Kugel entstehende Schalldruckverteilung kann berechnet werden. Die Theorie der Beugung einer ebenen Schallwelle an der Kugel ist von mehreren Autoren, z. B. in einer zusammenfassenden Darstellung von L. Schwarz [16], behandelt worden. Es sei hier das Ergebnis kurz mitgeteilt.

Eine ebene Welle mit der Wellenzahl $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ falle auf eine schallharte Kugel mit dem Radius r_0 . Aus dem Geschwindigkeitspotential Φ läßt sich der Schalldruck p herleiten. Es ist:

$$(3) \quad p = \rho \frac{\delta \Phi}{\delta t}$$

ρ = Dichte der Luft. Spaltet man von dem Geschwindigkeitspotential Φ den zeitlosen Faktor ψ ab:

$$(4) \quad \Phi = e^{i k r t} \cdot \psi$$

und führt folgende Koordinaten zur Beschreibung des rotationssymmetrischen Beugungsfeldes auf der Kugeloberfläche ein:

ϑ = geographische Breite = Winkel der Verbindungslinie Aufpunkt-Mittelpunkt der Kugel mit der Anstrahlrichtung,

$\omega = k r_0$ = dimensionslose Größe = Zahl der Wellenlängen auf den Umfang der Kugel,

so erhält man folgenden Ausdruck für das Potential des Gesamtfeldes auf der Kugeloberfläche:

$$(5) \quad \psi = \psi(\omega, \vartheta) = - \sqrt{\frac{2}{\pi \omega}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1) i^{n+1}}{n H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(\omega) - \omega H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(\omega)} \cdot P_n(\cos \vartheta)$$

Hierbei bedeutet $P_n(x)$ das Legendresche Polynom n -ter Ordnung und $H^{(2)}(\omega)$ die Hankelsche Funktion zweiter Art.

Das Verhältnis der Schalldruckamplituden von gebeugter und ungestörter Welle ist gleich:

$$(6) \quad \left| \frac{P}{P_0} \right| = |\psi|$$

Abb. 3 zeigt in Polarkoordinaten das Druckamplitudenverhältnis von gebeugter und ungestörter ebener Welle auf der Oberfläche der beugenden Kugel für mehrere ω -Werte.

Die Funktion $\psi(\omega, \vartheta)$ nach Gleichung (5) ist ausreichend tabelliert, so daß die Berechnung des Beugungsproblems am Kopf unter der Voraussetzung, daß

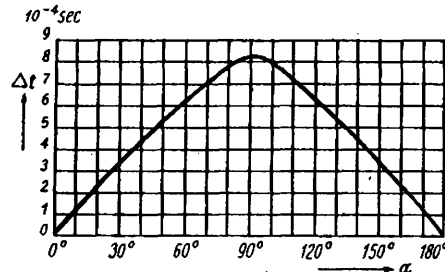


Abb. 2. Der Zeitunterschied an den beiden Ohren als Funktion des Einfallswinkels

der Kopf durch eine Kugel (von etwa 20 cm Durchmesser) ersetzt werden kann, leicht möglich ist.

Für das Intensitätsverhältnis ΔJ an den beiden Ohren bei einer Schalleinfallrichtung α (s. Abb. 1) ergibt sich:

$$(7) \quad \Delta J = \frac{|p(\omega, 90^\circ - \alpha)|^2}{|p(\omega, 90^\circ + \alpha)|^2} = \frac{|\psi(\omega, 90^\circ - \alpha)|^2}{|\psi(\omega, 90^\circ + \alpha)|^2}$$

ΔJ ist nach Gleichung (7) für einige ω -Werte ($\omega = 1, 2$ und 4) berechnet und in Abb. 4 in Dezibel über dem Winkel aufgetragen worden. Die Kurven entsprechen den Frequenzen 550, 1100 und 2200 Hz.

Der Intensitätsunterschied zwischen dem Schall am rechten und am linken Ohr als Funktion des Winkels α ist auch experimentell von Sivian und White [17] bestimmt worden. Abb. 5 zeigt das Ergebnis für die Frequenzen 300, 500, 1100 und 2240 Hz. Man erhält für kleine Einfallswinkel, die praktisch nur interessieren, eine ausreichende Übereinstimmung mit den nach der Theorie berechneten und in Abb. 4 aufgetragenen Werten.

Der Intensitätsunterschied an den beiden Ohren ist also in starkem Maße von

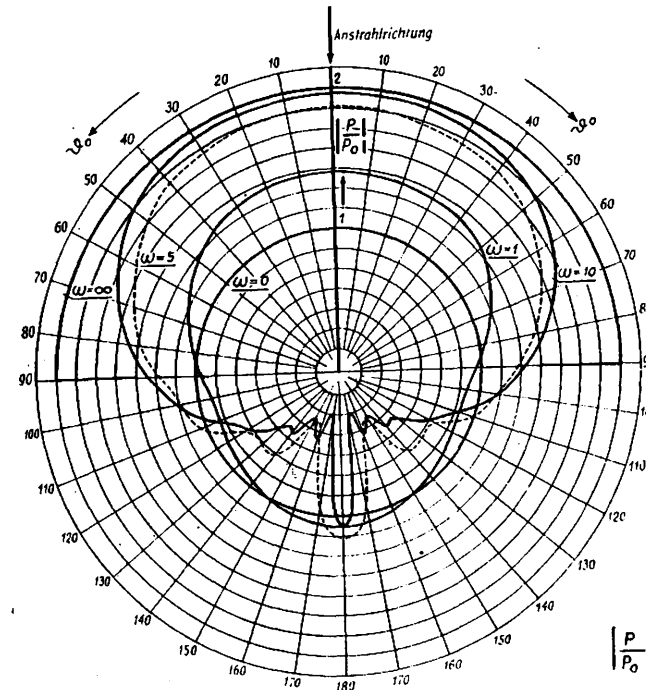
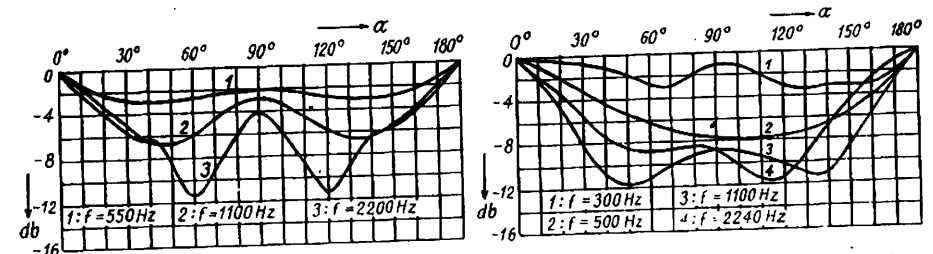


Abb. 3. Druckamplitudenverhältnis von gebeugter und ungestörter Welle auf der Oberfläche der beugenden Kugel für mehrere ω -Werte (nach L. Schwarz)



Links Abb. 4. Intensitätsverhältnis (gerechnet) für zwei gegenüberliegende Punkte auf der Kugeloberfläche in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Schalles und für verschiedene ω -Werte ($\omega = 1, 2$ und 4)
Rechts Abb. 5. Intensitätsverhältnis zwischen dem Schall am rechten und am linken Ohr als Funktion des Einfallswinkels nach Messungen von Sivian und White

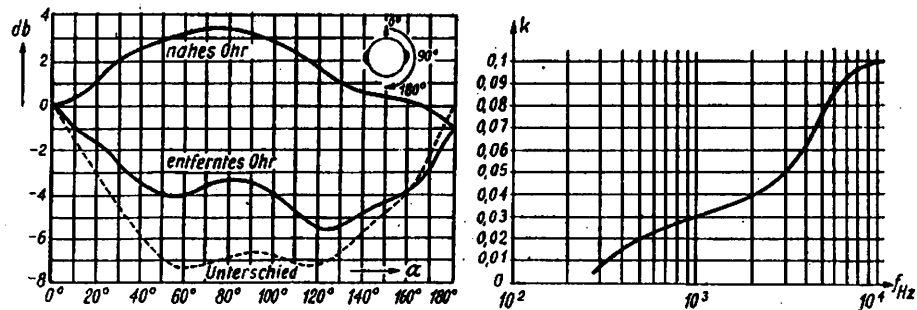


Abb. 6. Intensität und mittlerer Intensitätsunterschied am rechten und am linken Ohr als Funktion des Einfallswinkels beim Hören von Sprache. Rechts: Abb. 7. Frequenzabhängigkeit der Größe k (nach Warncke).

der Frequenz abhängig. Bei den tiefen Frequenzen, d. h. wenn die Wellenlänge groß gegen die Abmessungen des Kopfes ist, bildet der Kopf für die Schallwellen kein Hindernis und man erhält an beiden Ohren etwa den gleichen Schalldruck. Bei den hohen Frequenzen dagegen, d. h. wenn die Wellenlänge klein gegen die Abmessungen des Kopfes ist, wird die Ausbreitung des Schalles durch den Kopf unterbrochen und man erhält bei kleinen Winkelabweichungen aus der Symmetrieebene des Kopfes schon den maximalen Intensitätsunterschied. Den besten Richtungseindruck erhält man in dem mittleren Frequenzbereich etwa von 1000 bis 2000 Hz, also gerade dort, wo auch die Ohrempfindlichkeit am größten ist.

Da der Intensitätsunterschied, wie wir später noch sehen werden, die wichtigste Bestimmungsgröße für die Richtungslokalisierung bildet, ist die oben geschilderte Frequenzabhängigkeit auch für das räumliche Hören von großer Bedeutung. Für die Untersuchung stereophonischer Übertragung von Sprache kann man aus dem Frequenzspektrum der Sprache einen mittleren Wert ableiten für die Richtungsabhängigkeit des Intensitätsunterschiedes an beiden Ohren.

In Abb. 6 ist die Intensität am nahen bzw. am entfernten Ohr bezogen auf diejenige bei einem Schalleinfallswinkel von 0° und das Intensitätsverhältnis für beide über dem Einfallswinkel aufgetragen; diese Kurven ergeben sich nach Messungen von Steinberg und Snow [2] als Mittelwert für Sprache. Man erkennt, daß für Winkel zwischen 0° und 50° der Logarithmus des Intensitätsverhältnisses nahezu linear mit dem Winkel α zunimmt. Innerhalb dieses Winkelbereiches gilt für das Intensitätsverhältnis 2:

$$(8) \quad \begin{aligned} \ln i &= k\alpha \\ i &= e^{k\alpha} \end{aligned}$$

Der Proportionalitätsfaktor k ist von der Frequenz abhängig. Der ungefähre Frequenzverlauf von k ist in Abb. 7 dargestellt. Als mittleren Wert für Sprache erhält man nach Abb. 6 $k = 0,032$.

Aus Abb. 6 kann man auch ablesen, daß zu dem Winkelunterschied von 3° , der, wie gesagt, als untere Grenze der Richtungsauflösung gilt, nur ein Intensitätsunterschied von $1/2$ db gehört.

5. Richtungseindruck auf Grund von Klangfarbenunterschieden

Man kann die Frequenzabhängigkeit der Beugung auch so deuten, daß das Frequenzspektrum an beiden Ohren oder der Klangfarbeneindruck verschieden

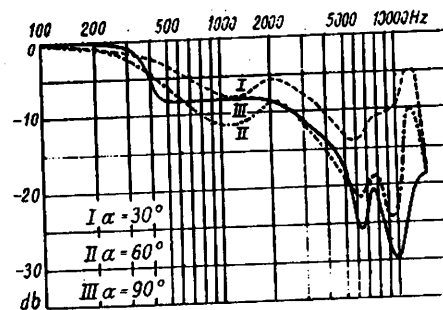


Abb. 8. Intensitätsunterschied am rechten und linken Ohr als Funktion der Frequenz für verschiedene Einfallswinkel

und vom Richtungswinkel abhängig ist. In Abb. 8 ist das Intensitätsverhältnis über der Frequenz für die Winkel $\alpha = 30^\circ, 60^\circ$ und 90° aufgetragen. Im Bereich der hohen Frequenzen treten größere richtungsabhängige Unterschiede auf. Bei der stereophonischen Übertragung von Musik ist dieser Effekt von Bedeutung.

Das Gehör reagiert ziemlich empfindlich auf Klangfarbenunterschiede, und es ist interessant, daß die Frequenzabhängigkeit der Beugung auch noch einen Beitrag zur Richtungslokalisierung bildet. Es ist nach diesen kurzen

Betrachtungen schon zu übersehen, daß die hohen Frequenzen für das richtungsmäßige Hören eine größere Bedeutung haben als die tiefen Frequenzen.

6. Kopfbezügliche und raumbezügliche stereophonische Übertragung

Nach dieser einleitenden Betrachtung über die wichtigsten physikalischen Größen, mit deren Hilfe es den beiden Ohren möglich ist, einen Richtungseindruck zu gewinnen, sollen zunächst die beiden Grundtypen einer stereophonischen Übertragung, nämlich die sogenannte kopfbezügliche bzw. die raumbezügliche Übertragung, erläutert werden.

Abb. 9 zeigt das Schema für eine kopfbezügliche stereophonische Übertragung. Im Aufnahmezimmer befindet sich ein Ersatzkopf, der z. B. aus einer Kugel von etwa 20 cm Durchmesser mit zwei Mikrofonen an den Enden eines Durchmessers besteht.

Im Wiedergaberaum besitzen die Zuhörer (A, B und C) Kopfhörer. Es wird der Schall, den jedes der beiden Mikrofone des Ersatzkopfes aufnimmt, auf den entsprechenden Kopfhörer der verschiedenen Zuhörer übertragen. Eine Schallquelle (S), die für den Ersatzkopf unter einem Lokalisierungswinkel φ erscheint, wird bei konstanter Aufstellung des Ersatzkopfes und feststehender Schallquelle auch bei dem Zuhörer unter dem Lokalisierungswinkel φ erscheinen. Jedoch wird der scheinbare Ort der Schallquelle (S'_A, S'_B, S'_C) von dem Ort des Zuhörers und seiner Kopfbewegung abhängen. Man bezeichnet deshalb nach einem Vorschlag von Warncke diese Art der stereophonischen Übertragung als „kopfbezügliche“.

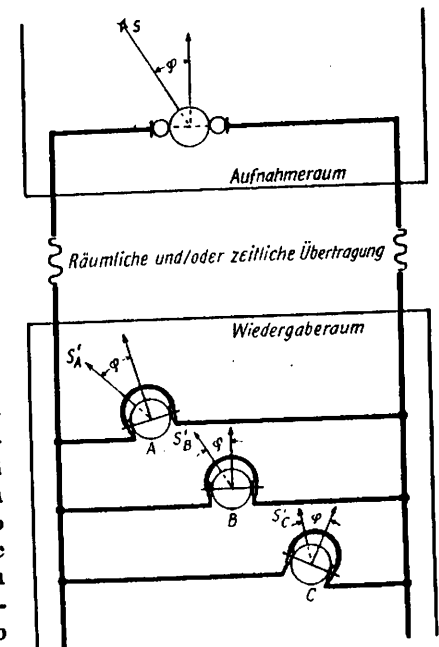


Abb. 9. Schematische Darstellung der kopfbezüglichen stereophonischen Übertragung (nach Warncke)

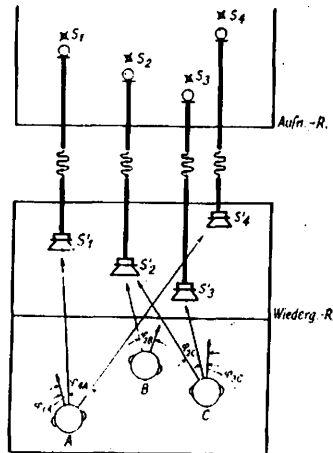


Abb. 10. Schematische Darstellung der raumbezüglichen stereophonischen Übertragung (nach Warncke)

Abb. 10 zeigt das Schema für eine raumbezügliche stereophonische Übertragung. Den verschiedenen Schallquellen (S_1, S_2, S_3, S_4), die an bestimmten Orten im Aufnahmebereich verteilt sind, werden Einzelübertragungssysteme (Mikrofon, Verstärker, Lautsprecher) zugeordnet, die im Wiedergabebereich an entsprechenden Orten endigen. Der Zuhörer lokalisiert mittels seiner beiden Ohren den Ort der Schallquellen im Wiedergabebereich an den Stellen (S'_1, S'_2, S'_3, S'_4), wo sie sich tatsächlich zu befinden scheinen. Der Lokalisierungswinkel des Zuhörers ($\varphi_{1A}, \varphi_{1B}, \varphi_{1C}$) ändert sich zwar mit der Bewegung des Kopfes, der Ort der jeweiligen Schallquelle bleibt aber im Wiedergabebereich konstant. Diese Art der stereophonischen Übertragung bezeichnet man als „raumbezüglich“.

Zwischen den beiden Arten der stereophonischen Übertragung besteht ein grundsätzlicher Unterschied. Bei der kopfbezüglichen

Übertragung brauchen lediglich zwei Schallbilder, nämlich die an den beiden Mikrofonen des Ersatzkopfes übertragen und den entsprechenden Ohren der Zuhörer zugeleitet zu werden. Der für die Stereophonie zusätzliche technische Aufwand ist dementsprechend bei der kopfbezüglichen Übertragung begrenzt und besteht im wesentlichen in einer Verdopplung des Übertragungskanals.

Bei der raumbezüglichen Übertragung besteht dagegen die Aufgabe, im Wiedergabebereich mit Hilfe von mehreren Schallsendern eine Abbildung der Schallverteilung des Aufnahmebereichs herzustellen. Dieses Übertragungsproblem ist, wie man ohne weiteres einsieht, ungemein viel schwieriger zu lösen.

Leider ist die Anwendung der kopfbezüglichen Stereophonie nicht für alle Zwecke möglich. Beispielsweise würde die Verwendung von Kopfhörern beim Tonfilm als lästig empfunden werden. Überhaupt scheidet für alle Anwendungsgebiete, bei denen der Wiedergabebereich für das Bewußtsein des Zuhörers wichtig ist, die kopfbezügliche Stereophonie aus. Vielleicht läßt sie sich aber mit Erfolg bei der Übertragung von Hörspielen über den Rundfunk verwenden. Hierbei ist es jedenfalls denkbar, daß ein einzelner Hörer, der sich auf eine bestimmte Sendung konzentrieren will, durch Abhören mit einem stereophonen Kopfhörer eine Bereicherung seines Eindrucks erfährt. Ohne die Möglichkeit, verschiedene Sprecher durch Richtungshören zu unterscheiden, wie es bei dem augenblicklichen Stand der Übertragungstechnik des Rundfunks noch der Fall ist, wirkt das Abhören eines Hörspiels wegen der großen Aufmerksamkeit, die zur Unterscheidung der verschiedenen Sprecher notwendig ist, sehr bald ermüdend. In diesem Falle könnte

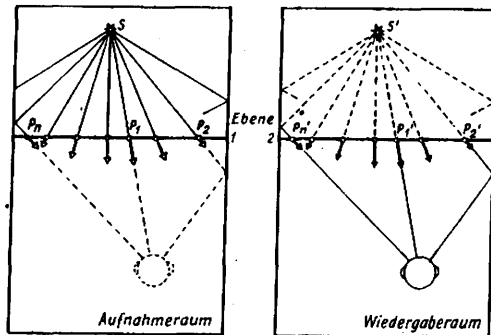


Abb. 11. Raumbezügliche Übertragung mit zwei Hilfsebenen (nach Fletcher)

also auch schon die Anwendung der kopfbezüglichen Stereophonie eine Verbesserung und Vergrößerung des künstlerischen Erlebnisses ergeben. Im allgemeinen Fall wird man aber die raumbezügliche Stereophonie verwirklichen müssen.

Überraschenderweise stellt sich nun bei einer genauen Untersuchung der Bedingungen für die raumbezügliche plastische Übertragung heraus, daß die Zahl der benötigten Übertragungskanäle auch für die raumbezügliche Übertragung sehr gering sein kann, und daß man sogar schon mit zwei Übertragungskanälen auskommt, wenn man sich auf die Übertragung von Schallvorgängen in einer Ebene beschränkt, wie sich im Verlauf der weiteren Betrachtung noch herausstellen wird.

7. Zahl der Übertragungskanäle bei der raumbezüglichen Übertragung

Für die stereophonische Übertragung beliebiger Schallvorgänge im Aufnahmebereich hat Fletcher [1] die Betrachtung zweier Hilfsebenen, die zwischen Schallquelle und Zuhörer liegen, vorgeschlagen (s. Abb. 11). Zeichnet man alle Schallvorgänge in der Ebene 1 nach Frequenz, Intensität und Einfallsrichtung auf und sorgt nach der Übertragung dafür, daß in allen entsprechenden Punkten der Ebene 2 die gleichen Schallvorgänge erscheinen, wie sie ursprünglich in der Ebene 1 aufgetreten sind, so würde der Zuhörer, wenn sich die raumakustischen Eigenschaften von Aufnahme- und Wiedergabebereich entsprechen, tatsächlich eine richtige Lokalisierung durchführen können. Die Verwirklichung dieser idealen Übertragungsbedingungen für eine raumbezügliche stereophonische Übertragung würde einen sehr großen technischen Aufwand erforderlich machen. Wegen der Forderung, daß auch die Einfallsrichtung an jeder Stelle richtig registriert bzw. wiedergegeben werden soll, müßte nämlich die Ebene 2 mit praktisch unendlich vielen Schallsendern ausgerüstet sein.

Glücklicherweise kommt man aber mit einer wesentlich einfacheren Übertragungsforderung bei den meisten praktisch auftretenden Übertragungsproblemen aus.

Man kann zunächst die akustischen Bedingungen im Aufnahmebereich durch geeignete Bedämpfung der Wände so einrichten, daß in der Ebene 1 nur der direkte Schall beim Auftreffen auf die Mikrofone wirksam wird, der indirekte also zu vernachlässigen ist. Außerdem kann man sich bei der Verteilung der Schallempfänger auf eine Aufstellung längs einer Geraden in der waagerechten Richtung beschränken, da sich die zu übertragenden Schallquellen im allgemeinen in einer waagerechten Ebene befinden. Es werden dann bei einem bestimmten Ort der Schallquelle im Aufnahmebereich unter Verwendung geeigneter Richtmikrofone auch nur ein bestimmter Schallempfänger in der Hilfsebene 1 und ein bestimmter Schallsender in der Ebene 2 wirken. Damit läßt sich nach einem Vorschlag von Warncke folgendes vereinfachte Schema für eine raumbezügliche Übertragung mit n-Kanälen aufstellen (s. Abb. 12).

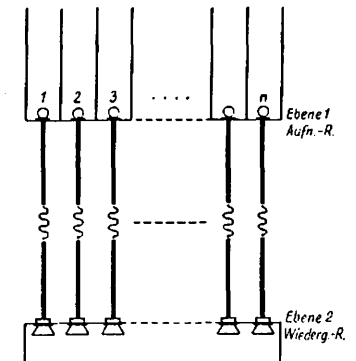


Abb. 12. Schematische Darstellung für eine vereinfachte raumbezügliche Übertragung mit n-Kanälen (nach Warncke)

Im Aufnahmebereich werden n-Mikrofone nebeneinander aufgestellt. Die Mikrofone sollen eine solche Richtwirkung haben, daß der Aufnahmebereich

in n-Zonen aufgeteilt wird. Die n-Mikrofone sind über n-Kanäle mit n-Lautsprechern verbunden, die eine entsprechende Aufstellung im Wiedergaberaum haben. Nach diesem Schema stellt die Zahl n ein Maß für das Auflösungsvermögen der raumbezüglichen Übertragung dar. Es erscheint danach günstig, die Zahl der Übertragungskanäle möglichst groß zu wählen.

Für die praktische Durchführung der raumbezüglichen Stereophonie ist die Zahl der Übertragungskanäle, die unbedingt erforderlich ist, sehr wichtig. Mit der Zahl der Übertragungskanäle wächst nicht nur der Bedarf an Mikrofonen und Lautsprechern, sondern auch das Problem der Schallaufzeichnung wird immer schwieriger zu lösen. Danach beurteilt, würde sich wohl die praktische Durchführung der raumbezüglichen Übertragung kaum verwirklichen lassen, da ja wenige Übertragungskanäle anscheinend keine ausreichende Auflösung ergeben könnten. Überraschenderweise haben aber praktische Versuche mit raumbezoglicher Übertragung mit nur zwei oder drei Kanälen recht befriedigende Ergebnisse gehabt. Diese für die ganze Stereophonie äußerst wichtige Möglichkeit beruht auf der Ausnutzung eines Effektes, den man in der Literatur als „Summenlokalisierung“ bezeichnet und der im folgenden erläutert werden soll.

8. Summenlokalisierung auf Grund von Intensitätsunterschieden

Läßt man von zwei Lautsprechern, die in einiger Entfernung voneinander aufgestellt sind, den gleichen Klang abstrahlen, so wird der scheinbare

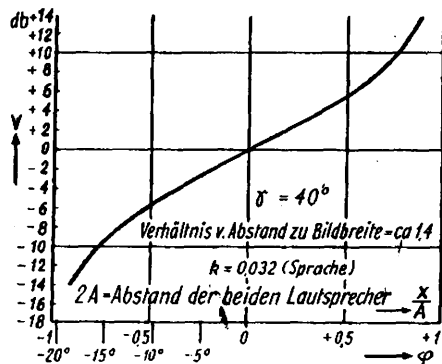


Abb. 15. Ort der scheinbaren Schallquelle zwischen den beiden Lautsprechern bei der Summenlokalisierung auf Grund von Intensitätsunterschieden für den Betrachtungswinkel $\gamma = 40^\circ$ (nach Warncke)

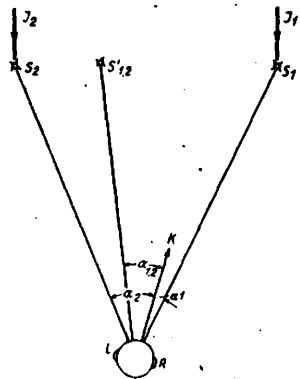


Abb. 13. Winkelkoordinaten bei der Summenlokalisierung auf Grund von Intensitätsunterschieden

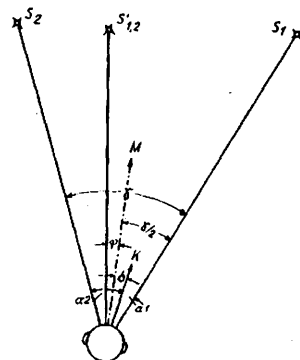


Abb. 14. Koordinaten bei der Theorie der Summenlokalisierung

Ort der Schallquelle für einen Zuhörer vor den Lautsprechern entweder mit einem der Lautsprecher zusammenfallen oder zwischen den beiden Lautsprechern liegen. Der scheinbare Ort der Schallquelle hängt dabei ab von dem Intensitätsverhältnis des von den Lautsprechern abgestrahlten Schalles.

In Abb. 13 sind zwei Schallquellen S_1 und S_2 und ein Zuhörerkopf gezeichnet. Die abgestrahlten Schallintensitäten seien J_1 und J_2 , die Schalleinfallswinkel α_1 und α_2 (von der Kopfrichtung K aus gemessen, wobei im Uhrzeigersinn positiv und entgegengesetzt negativ gerechnet wird).

Wenn nur die Schallquelle S_1 bzw. S_2 abstrahlt, wird an den beiden Ohren das Intensitätsverhältnis

$$(9) \quad i_1 = \frac{J_{R1}}{J_{L1}} \quad \text{bzw.} \quad i_2 = \frac{J_{R2}}{J_{L2}}$$

erzeugt, wobei J_R gleich der Intensität am rechten Ohr und J_L gleich der Intensität am linken Ohr ist. Strahlen S_1 und S_2 den gleichen Klang ab, so ist in entsprechender Weise das Intensitätsverhältnis an den beiden Ohren des Zuhörers.

$$(10) \quad i_{1,2} = \frac{J_{R1} + J_{R2}}{J_{L1} + J_{L2}}$$

Bei einem Verhältnis v der von den beiden Lautsprechern abgestrahlten Intensität

$$(11) \quad v = \frac{J_1}{J_2}$$

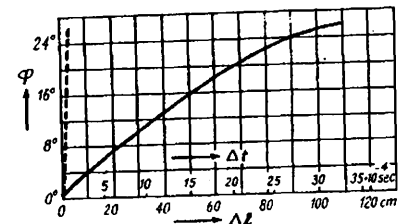
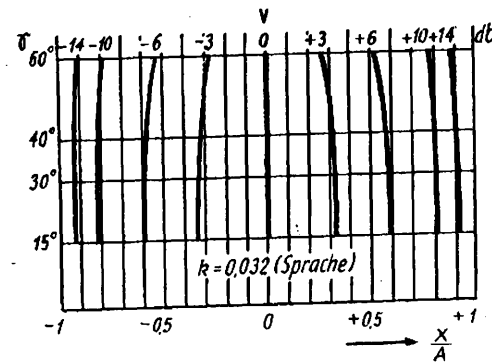


Abb. 17. Der Lokalisierungswinkel in Abhängigkeit vom Zeitunterschied bei der Summenlokalisierung auf Grund von Zeitunterschieden (nach de Boer). Links Abb. 16. Abhängigkeit des scheinbaren Schallquellenortes vom Zuhörerabstand bzw. vom Betrachtungswinkel für verschiedene Intensitätsverhältnisse (nach Warncke)

gehöre zu der scheinbaren Schallquelle $S'_{1,2}$ der scheinbare Lokalisierungswinkel $\alpha'_{1,2}$ (von der Kopfrichtung aus gemessen).

Es gilt auf Grund der Beugungsmessungen am Kopf für das Intensitätsverhältnis nach Gleichung (8)

$$(12) \quad i_{1,2} = e^{k\alpha_{1,2}}$$

Außerdem ist nach Abb. 6 für das Produkt der von einer Schallquelle herrührenden Intensitäten an beiden Ohren

$$(13) \quad \begin{aligned} J_{R1} \cdot J_{L1} &= c J_1^2 \\ J_{R2} \cdot J_{L2} &= c J_2^2, \end{aligned} \quad \text{wobei } c \text{ eine Konstante ist.}$$

Unter Benutzung der Gleichungen (10) bis (13) erhält man nach einigen einfachen Umformungen für den Lokalisierungswinkel

$$(14) \quad \alpha_{1,2} = \frac{1}{k} \left[\ln \left\{ v e^{k\alpha_1} + e^{k\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right)} \right\} - \ln \left\{ v + e^{k\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right)} \right\} \right]$$

Diese wichtige, von Warncke hergeleitete Beziehung stellt also den Zusammenhang dar zwischen dem Lokalisierungswinkel der scheinbaren Schallquelle und den Lokalisierungswinkeln der beiden abstrahlenden Lautsprecher bei einem bestimmten Intensitätsverhältnis. Sie gilt nach den Voraussetzungen der Gleichung (8), solange keiner der auftretenden Winkel 50° überschreitet, also für die meisten praktisch auftretenden Fälle.

Nach den Betrachtungen über raumbezügliche Stereophonie muß das Ergebnis der Gleichung (14) unabhängig sein von der Drehung des Kopfes. Um das zu beweisen, ist es zweckmäßig, zur Beschreibung einige andere Winkel einzuführen.

In Abb. 14 bedeutet γ den Betrachtungswinkel; die Richtung M ist die Winkelhalbierende des Betrachtungswinkels, δ ist der Kopfdrehungswinkel und φ der Lokalisierungswinkel der scheinbaren Schallquelle, beide von der Winkelhalbierenden des Betrachtungswinkels aus gemessen. Es gilt also bei Berücksichtigung der erwähnten Festsetzung über die Vorzeichen der Winkel:

$$(15) \quad \begin{aligned} \gamma &= \alpha_1 - \alpha_2 \\ \delta &= \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \\ \varphi &= \alpha_{1,2} + \delta \end{aligned}$$

Setzt man die Gleichungen (15) in Gleichung (14) ein, so erhält man in der Tat ein von der Kopfdrehung, d. h. also von δ unabhängiges Ergebnis:

$$(16) \quad \varphi = \frac{1}{k} \left[\ln \left\{ v e^{\frac{k\gamma}{2}} + 1 \right\} - \ln \left\{ v + e^{\frac{k\gamma}{2}} \right\} \right]$$

Abb. 15 zeigt den Ort (x) der scheinbaren Schallquelle zwischen den beiden Lautsprechern bezogen auf den halben Lautsprecherabstand bzw. den scheinbaren Lokalisierungswinkel φ , wie er sich nach Gleichung (16) ergibt bei Änderung des Intensitätsverhältnisses für einen Betrachtungswinkel $\gamma = 40^\circ$ entsprechend einem Verhältnis von Zuhörerabstand zu Lautsprecherabstand von 1,4 und $k = 0,032$ (Sprache).

Abb. 16 zeigt die Abhängigkeit des scheinbaren Schallquellenortes vom Abstand des Zuhörers bzw. vom Betrachtungswinkel für verschiedene Intensitätsverhältnisse. Man erkennt, daß die Änderung klein ist und mit größer werdender Entfernung des Zuhörers bzw. mit kleiner werdendem Betrachtungswinkel abnimmt.

Interessant ist noch zu klären, welche Verschiebung des scheinbaren Schallquellenortes bei seitlicher Verschiebung des Zuhörerstandortes eintritt. Für die Verschiebung Δx des Mitteneindrucks erhält man nach Warncke eine einfache Abschätzungsformel:

$$(17) \quad \Delta x = A \frac{a-b}{a+b}$$

wobei a und b die Entfernungen des Zuhörers von den beiden Lautsprechern und A der halbe Abstand der beiden Lautsprecher voneinander bedeuten.

Es kommt aber zu dieser Verschiebung Δx nach Gleichung (17) noch eine Verschiebung hinzu, die sich dadurch ergibt, daß bei einer Abweichung aus der Mittellinie ein Zeitunterschied auftritt. Es soll im folgenden erläutert werden, in welcher Weise auch Zeitunterschiede bei der Summenlokalisierung mitwirken.

9. Summenlokalisierung auf Grund von Zeitunterschieden

Der Einfluß von Zeitunterschieden auf die Summenlokalisierung bis etwa 3,5 ms, entsprechend einer Wegdifferenz von etwa 1 m, ist von de Boer [14] experimentell untersucht worden. Es zeigt sich, daß auch bei reinen Zeitunterschieden der von den beiden Lautsprechern abgestrahlten Klänge ein Lokalisierungseindruck entsteht. Die Zeitunterschiede, die dabei auftreten, sind im allgemeinen viel größer als diejenigen bei normalem Richtungshören, jedoch nicht so groß, daß für das Bewußtsein des Hörenden schon ein zeitliches Aus-

einanderfallen der Klangeindrücke entstehen könnte.

In Abb. 17 ist das Ergebnis eines Versuches wiedergegeben, bei dem der Abstand der beiden Lautsprecher voneinander und der Abstand des Zuhörers von der Lautsprecherbasis 350 cm betrug. Es ist der Lokalisierungswinkel über dem Zeitunterschied bzw. dem zugehörigen Schallwegunterschied aufgetragen. Die gestrichelte Kurve²⁾ gibt dabei zum Vergleich an, welche Zeitunterschiede beim normalen Richtungshören auftreten.

Man sieht aus Abb. 17 sehr deutlich, daß bei der Summenlokalisierung auf Grund von Zeitunterschieden auch solche richtig bewertet werden, die beim normalen Richtungshören gar nicht vorkommen.

10. Zusammenwirken von Intensitäts- und Zeitunterschieden bei der Summenlokalisierung

Für die Theorie der Stereophonie ist der Fall interessant, welche Verhältnisse sich ergeben, wenn Intensitäts- und Zeitunterschiede gleichzeitig auftreten. Auch dieser Fall ist experimentell von de Boer untersucht worden. Es zeigt sich, daß man mit guter Näherung die Richtungslokalisierung beschreiben kann, wenn man auftretende Zeitunterschiede durch äquivalente Intensitätsunterschiede bewertet und zu dem vorhandenen Intensitätsunterschied hinzurechnet. Für die Umrechnung eines Zeitunterschiedes in einen für die Summenlokalisierung äquivalenten Intensitätsunterschied ergibt sich experimentell ein in Abb. 18 dargestellter linearer Zusammenhang.

Danach entspricht einem Zeitunterschied von 1 ms etwa ein Intensitätsunterschied von 5 db zur Erzielung einer gleich großen entsprechenden Änderung des Lokalisierungswinkels bei der Summenlokalisierung.

Beim normalen Richtungshören wird übrigens der Richtungseindruck, wenn man von den tiefen Frequenzen absieht, im wesentlichen durch Intensitätsunterschiede hervorgerufen (vgl. dazu auch die gestrichelte Kurve der Abb. 17).

11. Der Ort des Schallbildes im Wiedergaberaum

Für eine raumbezügliche stereophonische Übertragung ist eine Beurteilung der Plätze im Wiedergaberaum sehr wichtig. Bei den bisherigen Betrachtungen war

²⁾ Beim Vergleich der gestrichelten Kurve mit der Abb. 2 wird man feststellen, daß der Ohrabstand in beiden Fällen etwas verschieden angenommen worden ist.

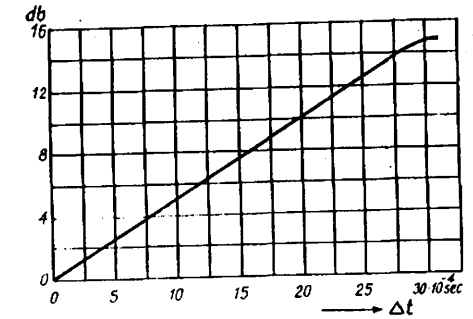


Abb. 18. Zusammenhang zwischen Zeitunterschied und Intensitätsunterschied für den gleichen Lokalisierungswinkel (nach de Boer)

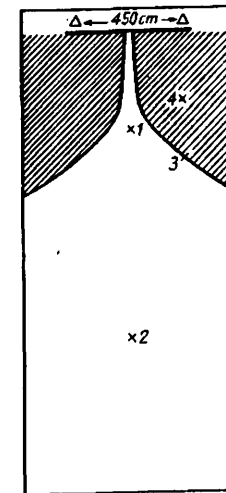


Abb. 19. Verschiedene Aufstellungen des Zuhörers im Wiedergaberaum. Lautsprecherabstand 450 cm. Einteilung des Wiedergaberaumes in zwei Zonen mit guter Richtungslokalisierung und schlechter (schraffierte Fläche) nach de Boer

zur Vereinfachung im allgemeinen angenommen worden, daß der Zuhörer sich an einem Ort auf der Symmetrielinie vor den beiden Lautsprechern befindet. Die im vorangegangenen im Zusammenhang mit Gleichung (17) erläuterte Verschiebung des Mitteneindrucks bei seitlicher Abweichung des Zuhörers von der Symmetrielinie läßt sich nach den Betrachtungen über den Einfluß der dabei auftretenden Zeitunterschiede für jeden Ort des Zuhörers im Wiedergaberaum entsprechend ergänzen und insgesamt berechnen. Man erhält für seitliche Plätze in der Nähe der Lautsprecher stärkere Verzerrungen für den scheinbaren Ort der Schallquelle.

Ein anschauliches experimentelles Ergebnis von de Boer zeigt z. B. für einen praktischen Fall, wie die Hörerverhältnisse im Wiedergaberaum aussehen. Bewegt sich z. B. für einen Beobachter auf Platz 1, wie in Abb. 19 eingezeichnet, eine Schallquelle scheinbar über die ganze Breite des Lautsprecherzwischenraumes, so erhält man auf den in der Abb. 19 eingezeichneten Plätzen 2, 3 und 4 lediglich die in Abb. 20 als Ordinaten aufgetragenen scheinbaren Änderungen des Schallbildortes. In dem in Abb. 19 schraffierten Gebiet erhält man nur Änderungen des Schallbildortes, die kleiner sind als die halbe Breite des Lautsprecherzwischenraumes. Hier ist also der zu erzielende Richtungseindruck ungenügend.

Zwei Maßnahmen bewirken eine Verkleinerung des in Abb. 19 schraffierten Gebietes: erstens nach einem Vorschlag von de Boer die Ausnutzung nicht des ganzen Lautsprecherzwischenraumes, sondern lediglich eines Teiles für die Richtungsauflösung, und zweitens nach einem Vorschlag von Warncke, die Verwendung von Lautsprechern oder Lautsprechergruppen mit einer besonderen Richtcharakteristik. Die Richtcharakteristik muß dabei so beschaffen sein, daß für einen seitlichen Platz dem Zuhörer von dem entfernteren liegenden Lautsprecher eine größere Intensität zugestrahlt wird als von dem näherliegenden (bei gleicher abgestrahlter Gesamtintensität jedes Lautsprechers). Diesem Gedanken liegt die Erfahrung zugrunde, daß man bei der Summenlokalisierung Zeitunterschiede durch Intensitätsunterschiede in gewissen Grenzen ausgleichen kann.

Diese Kompensation versagt bei den tiefen Frequenzen, denn nach Abb. 7 geht $k \rightarrow 0$, und der Lokalisierungswinkel nach Gleichung (16) wird unbestimmt. Man muß bei diesem Vorschlag der Verwendung von Lautsprechern mit besonderer Richtcharakteristik darauf Rücksicht nehmen und die tiefen Frequenzen, die den Lokalisierungseindruck für die seitlichen Plätze ohnehin stören, von den seitlichen Lautsprechern möglichst fernhalten und durch einen gemeinsamen in der Mitte aufgestellten Lautsprecher wiedergeben.

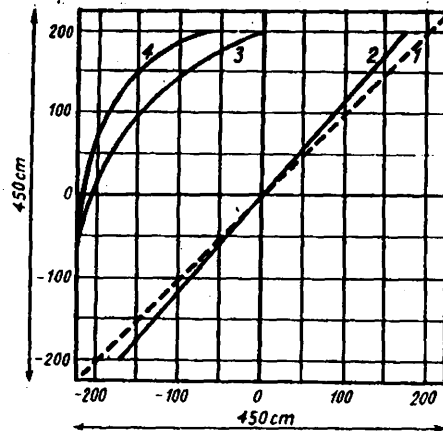


Abb. 20. Wahrzunehmende Verschiebung des Schallbildes für die verschiedenen Aufstellungen des Zuhörers im Wiedergaberaum (nach Abb. 19)

Abzisse: Scheinbarer Ort der Schallquelle zwischen den Lautsprechern für die Aufstellung 1

Ordinate: Scheinbarer Ort der Schallquelle zwischen den Lautsprechern für verschiedene Aufstellungen

Aus der einfachen Schilderung der vielen Faktoren, die bei der raumbezüglichen stereophonischen Übertragung mitwirken und die erzielbare Wirkung beeinflussen, erkennt man, daß es nur bei sehr kritischer Einstellung und bei sorgfältigstem experimentellem Vorgehen möglich ist, optimale Ergebnisse zu bekommen. Andererseits ist es aber ungemein ermutigend, daß ein im Anfang so hoffnungslos schwierig zu verwirklichendes Problem, wie das der raumbezüglichen stereophonischen Übertragung nach den Fletcherschen Bedingungen erscheint, bei einem genaueren Studium durch den Effekt der Summenlokalisierung einer praktischen Verwirklichung zugänglich wird.

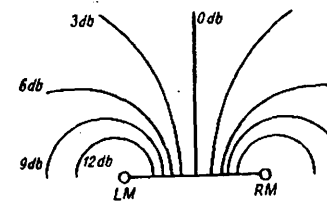


Abb. 21. Der geometrische Ort für Punkte konstanten Intensitätsverhältnisses bei zwei Aufnahmemikrofonen

Bei einer richtigen Ausnutzung dieses Effektes und bei Verzicht auf eine genauere räumliche Lokalisierung in der Tiefe des Aufnahmeortes, was bei sehr vielen praktischen Fällen möglich ist, erhält man sogar befriedigende Ergebnisse bei raumbezoglicher Übertragung mit nur zwei Übertragungskanälen. Diese Tatsache ist sehr wichtig, da die Zahl der Übertragungskanäle, z. B. gerade auch bei einer Anwendung im Rundfunk, von ausschlaggebender Bedeutung für eine praktische Verwirklichung ist.

12. Raumbezügliche Übertragung mit zwei Kanälen

Die Betrachtungen über die Summenlokalisierung haben bewiesen, daß es mit Hilfe von zwei unabhängigen Lautsprechern möglich ist, den scheinbaren Ort einer Schallquelle zwischen den Lautsprechern erscheinen zu lassen. Damit ist nachgewiesen, daß es grundsätzlich auch möglich sein muß, raumbezügliche stereophonische Übertragung bei Beschränkung auf Vorgänge in einer waagerechten Ebene mit nur zwei Übertragungskanälen durchzuführen. Das Problem besteht im wesentlichen darin, die Aufnahmebedingungen so einzurichten, daß den Lautsprechern über die beiden Übertragungskanäle die Intensität in einem Verhältnis zugeführt wird, wie es für die Wahrnehmung des entsprechenden scheinbaren Ortes der Schallquelle nach der Summenlokalisierung erforderlich ist. Die aufnahmetechnischen Bedingungen sind daraufhin genauer zu untersuchen.

Der einfachste Fall ist die Aufnahme mit zwei ungerichteten Mikrofonen im Abstand $2a$. Für ein konstantes Intensitätsverhältnis v an den beiden Mikrofonen erhält man als geometrischen Ort in der waagerechten Ebene durch die beiden Mikrofone Kreise mit dem Mittelpunkt auf der Verbindungslinie der beiden Mikrofone im Abstande x_0 von der Mitte der Mikrofone und mit dem Radius r_0 .

Es gilt:

$$(18) \quad x_0 = \frac{v+1}{v-1} a \quad \text{und} \quad r_0 = \frac{2\sqrt{v}}{v-1} a$$

Abb. 21 zeigt die entsprechenden Kreise für einige Intensitätsverhältnisse.

Längs einer solchen Kurve bleibt das Intensitätsverhältnis an den beiden Mikrofonen konstant, d. h. also ohne Berücksichtigung der Laufzeitunterschiede würde eine Schallquelle bei einer Bewegung im Aufnahmeort längs

eines solchen Kreises immer unter dem gleichen Lokalisierungswinkel φ erscheinen.

Bewegt sich eine Schallquelle auf einer Geraden parallel zur Verbindungslinie der Mikrofone in einem bestimmten Abstand, so kann man aus der Abb. 21 erkennen, welche Intensitätsunterschiede den verschiedenen Stellungen der Schallquelle entsprechen, und damit aus Gleichung (16) bzw. Abb. 15 auf den Lokalisierungswinkel schließen. Man erkennt ohne weiteres, daß bei einer Bewegung der Schallquelle um die gleiche Strecke, beispielsweise um die Breite der Mikrofonentfernung, mit zunehmendem Abstand von der Mikrofonbasis der zugehörige Lokalisierungswinkelunterschied kleiner wird und in größerem Abstand nicht mehr ausreicht. Bei zu kleinem Abstand wird dagegen in der Mitte der Mikrofone die Gesamtintensität sehr viel kleiner sein als unmittelbar vor den Mikrofonen, so daß beim Zuhörer der Eindruck entstehen wird, als ob die Schallquelle sich nicht auf einer Geraden vor den Mikrofonen, sondern in weitem Bogen von einem Mikrofon zum anderen bewegt. Es gibt also eine Abhängigkeit des Lokalisierungseindrucks bei der Wiedergabe vom Abstand vor den Mikrofonen bei der Aufnahme und einen günstigsten Abstand nach dem Erläuterten.

Im vorhergehenden wurden nur die Intensitätsverhältnisse an den Mikrofonen berücksichtigt, es treten aber noch Laufzeitunterschiede auf, die auch mitberücksichtigt werden müssen. Die Laufzeitunterschiede wirken sich im gleichen Sinne aus wie die Intensitätsunterschiede und können nach den Darstellungen in den vorigen Abschnitten in äquivalente Intensitätsunterschiede umgerechnet und zu den wirklich vorhandenen Intensitätsunterschieden hinzugegerechnet werden. Der geometrische Ort für Punkte gleicher Laufzeitdifferenz sind nun keine Kreisscharen, sondern Hyperbelscharen, und die Größe der Laufzeitdifferenzen hängt von dem Mikrofonabstand (2a) ab.

Für einen vorgegebenen Mikrofonabstand müssen also die Kurven der Abb. 21 entsprechend den auftretenden Laufzeitdifferenzen noch korrigiert werden. Es ergeben sich praktisch größere Lokalisierungswinkelunterschiede, als nach den Kurven der Abb. 21 zu erwarten ist. Durch das Mitwirken der Laufzeitunterschiede tritt daher für die Aufnahmebedingungen insofern keine Verschlechterung ein, als sich die Laufzeitunterschiede so auswirken, daß sich auch in einem größeren Abstand vor den Mikrofonen ein größerer Lokalisierungswinkelunterschied ergibt. Der Abfall der Gesamtintensität in der Mitte vor den Mikrofonen und der damit verbundene Eindruck für den Zuhörer, daß sich die Schallquelle von ihm sehr weit entfernt, kann dadurch z. T. ausgeglichen werden, daß man gerichtete Mikrofone bei der Aufnahme verwendet und die Aufstellung so vornimmt, daß die maximale Empfangsrichtung auf den mittleren Bereich vor den Mikrofonen gerichtet ist.

Im Heinrich-Hertz-Institut durchgeführte Messungen (s. Abb. 34 im nächsten Heft von FUNK UND TON) und vorliegende Erfahrungen haben gezeigt, daß man recht befriedigende Ergebnisse erhält, wenn man symmetrisch in 1,5 bis 2 m Entfernung vor einem Orchester zwei Mikrofone mit etwa kardioidförmiger Charakteristik und einem gegenseitigen Abstand von etwa 4 bis 5 m verwendet.

Bei der Verwendung von nur zwei Mikrofonen ist der Erfüllbarkeit der Aufnahmebedingungen für die raumbezügliche stereophonische Übertragung

eine Grenze gesetzt. Besondere Schwierigkeiten treten auf, wenn die räumliche Verteilung der Schallquellen sehr groß ist. Es ist nicht ohne weiteres zu übersehen, ob es möglich ist, jedes der beiden stereophonischen Mikrofone durch eine Gruppe ungerichteter Mikrofone zu ersetzen. Hierbei würden z. B. durch Laufzeitunterschiede zu den verschiedenen Mikrofonen je nach dem Ort der Schallquelle von beiden Mikrofongruppen verschiedene Frequenzspektren ein und desselben Klanges erzeugt werden, und es würde unter Umständen der dadurch bewirkte Lokalisierungseindruck falsch werden.

Das Problem der stereophonischen Aufnahme bei zwei Übertragungskanälen läßt sich nach einem Vorschlag von Warncke aber auch bei räumlich ausgedehnter Verteilung der Schallquellen lösen, wenn man eine entsprechende Anzahl sehr gut gerichteter Mikrofone zur Verfügung hat. Die Lösung des Aufnahmeproblems gelingt z. B., wenn man den Aufnahmeraum mit Hilfe von n gerichteten Mikrofonen in n Streifen unterteilen kann, so daß die Schallvorgänge in einem solchen Streifen jeweils nur auf ein Mikrofon wirken, und wenn man die Schalleistung, die dieses Mikrofon liefert, nach Abb. 22 über Dämpfungsglieder so auf die beiden Übertragungskanäle verteilt, wie es nach der Aufstellung des Mikrofons für die richtige Summenlokalisierung erforderlich ist (s. auch Abb. 15). Der Frequenzgang bei der Summenlokalisierung kann durch geeignete Frequenzabhängigkeit der Dämpfungsglieder mitberücksichtigt werden.

13. Zusammenfassung über die Abhängigkeit der stereophonischen Übertragung von der Frequenz und vom Nachhall

Im Verlauf der Betrachtungen über die physikalischen Grundlagen der raumbezüglichen Stereophonie sind verstreut eine ganze Reihe von Angaben enthalten, die erkennen lassen, in welcher Weise die stereophonischen Übertragungsbedingungen mit den für jede akustische Übertragung wichtigen Größen der Frequenz und des Nachhalls zusammenhängen. Es erscheint angebracht, diese wichtigen Zusammenhänge noch kurz zu ergänzen und zusammenzufassen.

Bei den Betrachtungen über das normale Richtungshören zeigte es sich, daß der Intensitätsunterschied an beiden Ohren sehr von der Frequenz abhängt (s. auch Abb. 8). Der Frequenzgang der hierfür charakteristischen Größe k ist aus Abb. 7 zu ersehen.

Danach erhält man also für die tiefen Frequenzen auf Grund der Beugung keinen für das Richtungshören ausnutzbaren Intensitätseffekt. Die Ergebnisse über die Summenlokalisierung werden, soweit sie sich auf die Intensitätsunterschiede beziehen, für die tiefen Frequenzen unbestimmt. Da bei der Richtungs-

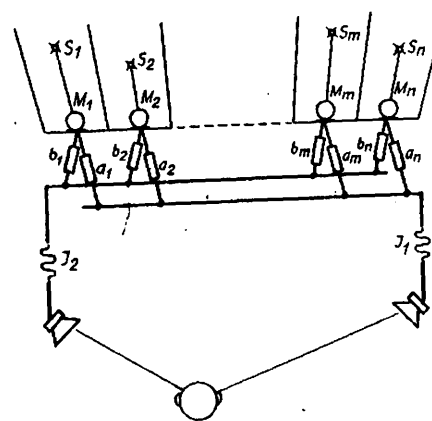


Abb. 22. Schematische Darstellung einer raumbezüglichen Zweikanalübertragung mit n gerichteten Mikrofonen (nach Warncke)

lokalisierung vor allen Dingen die Intensitätsunterschiede und erst in zweiter Linie die Laufzeitunterschiede ausgenutzt werden, sind also wie gesagt die tiefen Frequenzen für die Erzeugung des stereophonischen Eindruckes bei der Übertragung von geringerer Bedeutung als die mittleren und hohen.

In gewisser Weise stören die tiefen Frequenzen sogar den Richtungseindruck bei der Abstrahlung von seitlich aufgestellten Lautsprechern. Das ist z. B. der Fall bei der Verwendung von Lautsprechern mit besonderer Richtcharakteristik zum Ausgleich der Laufzeitunterschiede bei seitlichen Zuhörerplätzen oder bei Räumen mit geringer Dämpfung für tiefe Frequenzen. Um die Beeinträchtigung des Richtungseindruckes durch die tiefen Frequenzen klein zu halten, ist es günstig, wenn man bei der Wiedergabe die tiefen Frequenzen von den seitlichen Lautsprechern fernhält (was elektrisch sehr einfach mit Hilfe sogenannter elektrischer Weichen zu erreichen ist) und von einem besonderen mittleren Lautsprecher abstrahlen läßt. Entsprechendes läßt sich auch mit den Mikrofonen bei der stereophonischen Aufnahme durchführen. Man würde auf diese Weise an die seitlichen Mikrophone nur geringere Forderungen für den Frequenzumfang zu stellen brauchen, was u. U. gewisse technische Vorteile schaffen kann.

Bei der Bedeutung der mittleren und hohen Frequenzen für das Richtungshören erkennt man, daß der zu fordernde Frequenzbereich für eine stereophonische Übertragung sehr groß ist. Zur Wahrung der Natürlichkeit des Höreindruckes müssen selbstverständlich nicht nur die hohen Frequenzen, sondern auch entsprechende tiefe Frequenzen noch gut übertragen werden. Gute stereophonische Übertragung setzt also eine hochwertige Übertragungsanlage voraus.

Bei der Erörterung der Möglichkeiten einer Vereinfachung der Fletcherschen Übertragungsbedingungen für Stereophonie war es notwendig, zu fordern, daß bei der Aufnahme der indirekte Schall an den Mikrofonen zu vernachlässigen ist gegenüber dem direkten Schall. Der Aufnahmeraum muß groß genug und ausreichend gedämpft sein. Der für die Natürlichkeit des Höreindruckes notwendige Nachhall kann durch geeignete Einstellung der Nachhallverhältnisse des Wiedergaberaumes oder andere geeignete Maßnahmen erreicht werden. Ein unnatürlich großer Nachhall ist für eine stereophonische Übertragung ungünstig, da der Richtungseindruck durch den indirekten Schall des Nachhalls verwischt wird.

Als Ergebnis der Betrachtungen der vorangegangenen Abschnitte kann festgestellt werden, daß die technische Durchführung einer raumbezüglichen stereophonischen Zweikanalübertragung möglich ist, daß es aber zur Erzielung bester Übertragungsgüte der theoretischen und vor allen Dingen der experimentellen Klärung einer Reihe wichtiger Einzelfragen noch bedarf.

(Fortsetzung folgt)

* * *

Stereophonische Zweikanalübertragung mit dem Magnetophon

(Mitteilung aus dem Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung,
Berlin-Charlottenburg)

(1. Fortsetzung und Schluß)

C. Das Zweikanal-Magnetophon

1. Einleitung

Für ein systematisches Experimentieren und Erforschen der optimalen Übertragungsbedingungen für das räumliche Hören ist es notwendig, ein für die Aufzeichnung stereophonischer Schallvorgänge geeignetes Aufzeichnungsverfahren zu besitzen. In der Übertragungstechnik des Rundfunks setzt sich das Magnetophon als Schallaufzeichnungsgerät immer mehr durch, und eine Anwendung der Stereophonie im Rundfunk macht eine Untersuchung erforderlich, ob sich das Magnetophon für eine Aufzeichnung stereophonischer Schallvorgänge eignet.

Die Untersuchung dieser Frage ist in Angriff genommen worden, und zwar für den einfachsten, aber praktisch wichtigsten Fall einer Zweikanalübertragung. Es wurde eine stereophonische Magnetophonapparatur, die für Zweikanalübertragung geeignet ist, aufgebaut und ausprobiert. Im folgenden soll über einige wichtige technische Eigenschaften der Geräte und die durchgeführten Messungen berichtet werden.

Bei der Beschreibung wird eine normale Hochfrequenz-Magnetophonapparatur, wie sie für Einkanal-Schallaufzeichnung verwendet wird, als bekannt vorausgesetzt [18]. Es sollen also im wesentlichen nur solche Dinge besprochen werden, die speziell mit der Zweikanal-aufzeichnung zusammenhängen.

2. Die Aufzeichnung von zwei Tonspuren auf einem Band

Man könnte zunächst glauben, daß es für die Zwecke der Zweikanalstereophonie ausreichen würde, wenn man für die Schallaufzeichnung eines jeden Kanals eine normale Magnetophonapparatur benutzen würde. Das ist aber aus vielen Gründen nicht möglich. Es würde sich z. B. der Gleichlauf der beiden Magnetophone in dem Maße, wie es für die Stereophonie notwendig ist, nicht herstellen lassen. Man muß also die Aufzeichnung für die beiden Kanäle auf einem Band vornehmen.

Bei der normalen Einkanal-aufzeichnung wird ein Magnetophonband von 6,5 mm Breite und etwa 0,05 mm Dicke verwendet. Um die bereits vorhandenen Magnetophoneinrichtungen möglichst wenig bei der Umstellung auf Zweikanal-aufzeichnung abändern zu müssen, erscheint es vernünftig, die vorhandene Breite des Magnetophonbandes auch für die Aufzeichnung von zwei Tonspuren beizubehalten. Man hat dann nur die halbe Breite für die Aufzeichnung eines Kanals zur Verfügung. In der Mitte zwischen beiden Tonspuren ist ein schmaler neutraler Streifen von 0,5 bis 1 mm Breite notwendig, um die gegenseitige Beeinflussung der beiden Spuren klein zu halten und um Störungen zu vermeiden, die durch geringe Verschiebungen des Bandes senkrecht zur Bewegungs-

richtung beim Vorbeiführen an den Sprech- und Hörköpfen entstehen können. Die auf dem Band ausnutzbare Breite ist also für jede Spur etwas weniger als 3 mm.

Das Aufzeichnen bzw. Abhören muß für jede Spur durch einen besonderen Sprech- bzw. Hörkopf erfolgen. Es wäre günstig für den räumlichen Aufbau und zur Vermeidung magnetischer Beeinflussung der verschiedenen Köpfe, wenn man die beiden Sprech- bzw. Hörköpfe gegeneinander versetzen könnte. Das läßt sich jedoch nicht gut durchführen; denn abgesehen von den erheblichen konstruktiven Abänderungen der bestehenden Magnetophoneinrichtungen würden sich große Nachteile für das Cuttern der Bänder ergeben. Bei versetzten Sprechköpfen würden z. B. bei einem geraden Schnitt des Bandes von der einen Spur Teile weggeschnitten, die auf der anderen Spur aufgezeichnet sind. Die Störung an der Klebestelle würde also bei versetzten Köpfen sehr viel größer ausfallen als im normalen Fall.

Nach diesen Betrachtungen besteht also das Problem der Zweikanal-aufzeichnung mit dem Magnetophon einmal darin, in einem normalen Kopfträger den Sprech- und den Hörkopf durch einen Zwillingssprech- und Zwillingshörsprechkopf zu ersetzen und dann nachzuweisen, daß die erzielbaren Aufzeichnungs- und Übertragungseigenschaften mit den Zwillingköpfen gut und die gegenseitige Beeinflussung der beiden Übertragungskanäle ausreichend klein ist.

3. Beschreibung der Zwillingköpfe

Abb. 23 zeigt ein Foto des verwendeten stereophonischen Kopfträgers. Man erkennt die drei Köpfe: Lösch-, Sprech- und Hörkopf. Der Sprech- und Hörkopf sind als Zwillingköpfe ausgeführt. (Die Abschirmteile sind in Abb. 23 entfernt.)

Abb. 24 zeigt eine schematische Darstellung eines Zwillingkopfes. Der Zwillingkopf besteht aus zwei übereinanderliegenden magnetischen Kreisen aus lamelliertem Eisenblech. Durch eine Zwischenschicht von 1 mm dickem Messingblech wird der räumliche Abstand der beiden magnetischen Kreise und damit die Breite der neutralen Zone zwischen den beiden Tonspuren festgelegt. Um die zu jedem Kreis gehörige Spule unterzubringen, sind die Eisenbleche der einzelnen Kreise so geformt, daß sie, wie man aus der Abb. 24 erkennt, an der Spule des anderen Kreises vorbeigehen. Die beiden Luftspalte des

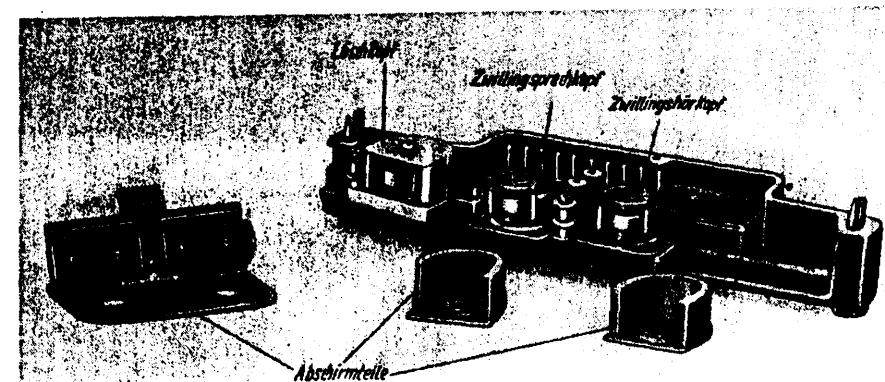


Abb. 23. Zwillingkopfräger

Zwillingssprechkopfes (ca. 40 μ breit) liegen genau übereinander, ebenso die beiden Luftspalte des Zwillingshörkopfes (ca. 20 μ breit).

Für eine praktische Anwendung ist die Messung folgender Übertragungsgrößen eines jeden Kanals wichtig:

Frequenzumfang, Dynamikumfang, Störgeräusch und die Übersprechdämpfung von einem Kanal auf den anderen. Zur Feststellung dieser Größen wurden mit dem Zwillingssprechkopfer Messungen durchgeführt, über die im folgenden berichtet werden soll.

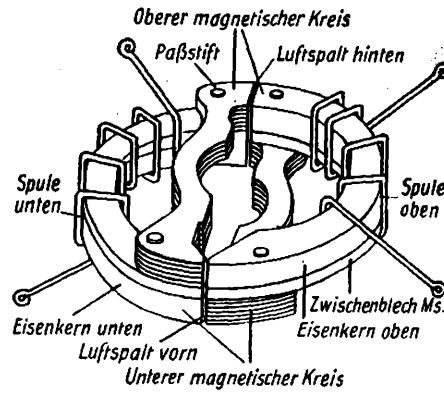


Abb. 24. Schemat. Darstellung des Zwillingssprechkopfes

4. Messung der Übertragungsgrößen bei der Zweikanal-aufzeichnung

Als Laufwerk wurde eine normale sogenannte K 7-Magnetophonmaschine³⁾ verwendet. Als zugehörige Verstärker wurden zwei sogenannte HTS-Geräte benutzt. Jedes HTS-Gerät enthält für einen Übertragungskanal den zugehörigen Aufnahmeverstärker (V 7b) und den zugehörigen Wiedergabeverstärker (V 5) mit dem Netzteil. Abb. 25 zeigt ein Foto der Gesamtapparatur.

Abb. 26 gibt ein Prinzipschaltbild der Zweikanal-Magnetophonapparatur.

³⁾ Das Magnetophon wird von der Magnetophon G. m. b. H., Berlin, hergestellt.



Abb. 25. Gesamtbild der benutzten Zweikanal-Magnetophonanlage

Bei der verwendeten Magnetophonmaschine ließ sich der stereophonische Kopfräger gegen einen normalen Kopfräger austauschen, so daß bei der Messung der Übertragungsgrößen diejenigen, die sich auf Zweikanalübertragung beziehen, mit denjenigen für normale Einkanalübertragung verglichen werden konnten.

Abb. 27 zeigt die Prinzipschaltung, wie sie bei den Messungen an der Zweikanal-Magnetophonapparatur verwendet wurde. Die Eingangsspannungen an den Aufnahmeverstärkern U_{E1} und U_{E2} wurden von einem Summer geliefert, die Ausgangsspannungen U_{A1} und U_{A2} wurden mit einem Pegelzeiger gemessen.

In den Abb. 28 und 29 sind die Ausgangsspannungen über der Frequenz bei konstanter Eingangsspannung aufgetragen, und zwar für normale Einkanal-aufzeichnung bzw. für die obere und für die untere Bandhälfte bei der Zweikanal-aufzeichnung. Man erkennt, daß die Frequenzkurven für Einkanal- und für Zweikanalaufzeichnung praktisch gleich sind.

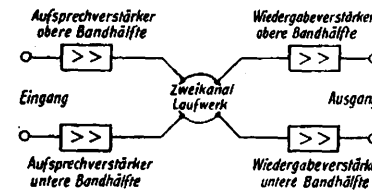


Abb. 26. Prinzipschaltbild der Zweikanal-Magnetophonanlage

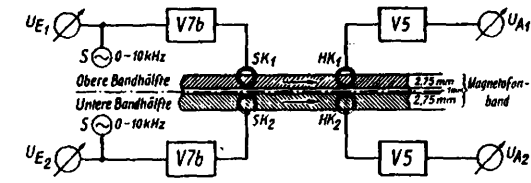


Abb. 27. Schaltung für die Messungen an der Zweikanal-Magnetophonanlage

Als nächstes wurde der Dynamikumfang gemessen. In den Abb. 30 und 31 sind die Ausgangsspannungen über der Eingangsspannung bei der konstanten Frequenz von 1000 Hz aufgetragen. (Die Pegelwerte beziehen sich auf den Normalpegel 0 Neper gleich 0,775 Volt.) Der Aussteuerungsbereich ist nach oben begrenzt durch die nichtlinearen Verzerrungen (Klirrfaktor $K \leq 10\%$) und nach unten durch die Störspannungen. Die Energieanteile der Störspannungen verteilen sich auf den gesamten Frequenzbereich, so daß es für die richtige akustische Bewertung der Störspannung nötig ist, die Frequenzabhängigkeit der Ohrempfindlichkeit in angemessener Weise zu berücksichtigen.

Das geschieht in bekannter Weise dadurch, daß man bei der Messung der Störspannung in Reihe zu den Ausgangsklemmen des Wiedergabeverstärkers ein elektrisches Filter schaltet, das eine zu der Ohrkurve für 40 phon Lautstärke inverse Frequenzcharakteristik besitzt und definitionsgemäß den angezeigten Wert bei 1000 Hz ungeändert läßt. Die hierbei ermittelte Dynamik nennt man Geräuschspannungsdynamik, im Unterschied zu der Fremdspannungsdynamik ohne Filter. Man kann aus den Abb. 30 und 31 entnehmen, daß bei der normalen Einkanalaufzeichnung die Geräuschspannungsdynamik etwa 6,8 Neper oder 60 db beträgt, bei der Zweikanalaufzeichnung dagegen für jeden Kanal nur etwa 4,9 Neper oder 42 db. Die Einbuße an Dynamikumfang für die Zweikanalaufzeichnung wird hervorgerufen durch eine Einengung an der oberen und unteren Aussteuerungsgrenze. Der Dynamikverlust an der oberen Grenze hängt unmittelbar zusammen mit der Ausnutzung nur eines Teiles der Breite des Magnetophonbandes und der damit verbundenen Einbuße an Aussteuerungsmöglichkeit. Entsprechende Messungen haben ergeben, daß die größte noch

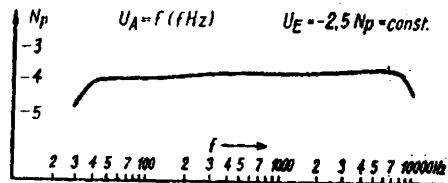


Abb. 28. Frequenzkurve der Einkanal-Magnetophonanlage. Rechts Abb. 29. Frequenzkurven der Zweikanal-Magnetophonanlage. a) Frequenzkurve der oberen Bandhälfte, b) Frequenzkurve der unteren Bandhälfte

aufzuzeichnende Amplitude etwa proportional der ausgenutzten Bandbreite ist. Daraus folgt, daß für die obere Aussteuerungsgrenze bei einer Verminderung der ausgenutzten Bandbreite von 6,5 mm auf 2,8 mm ein Dynamikverlust von 8 db zu erwarten ist. Das entspricht etwa den gemessenen Werten.

Der Dynamikverlust an der unteren Grenze hängt mit den Eigenschaften des Zwillings-Kopfträgers und mit den aufgenommenen Störungen zusammen. Der verwendete Zwillingskopf hat eine größere Anfälligkeit bei der Aufnahme von Störfeldern als ein normaler Hörkopf.

Von besonderem Interesse ist bei der Zweikanalaufzeichnung die gegenseitige Beeinflussung der beiden Kanäle. Das Übersprechen von einem Kanal auf den anderen wurde gemessen, und die Ergebnisse sind in der Abb. 32 dargestellt.

Es wurde bei einer konstanten Frequenz (1000 Hz) über der Eingangsspannung für den einen Kanal die Ausgangsspannung des anderen Kanals und gestrichelt auch die desgleichen Kanals aufgetragen. Im Bereich des Störpegels wurde die Bewertung der Frequenzabhängigkeit der Ohrempfindlichkeit, wie oben erläutert, berücksichtigt. Der Abstand der gestrichelten Kurve von der ungestrichelten Kurve ergibt die Übersprechdämpfung von einem Kanal auf den anderen. Sie beträgt etwa 3,3 Neper oder 29 db.

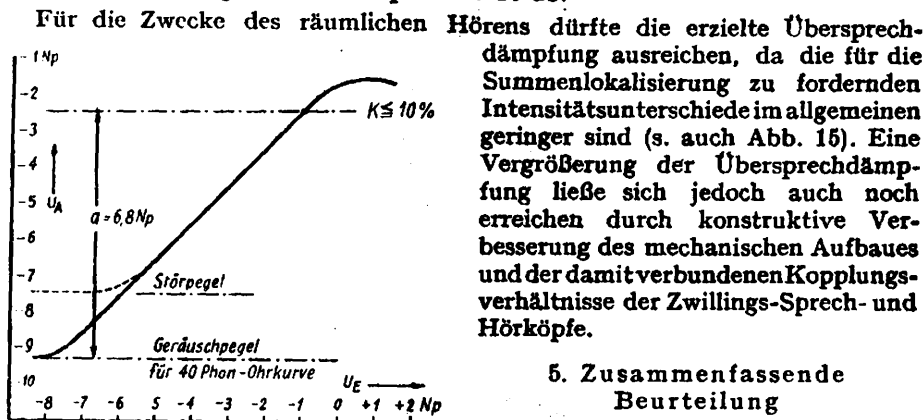
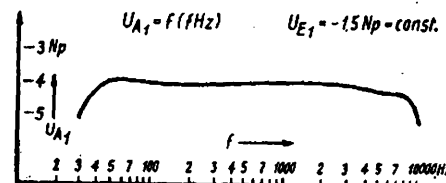
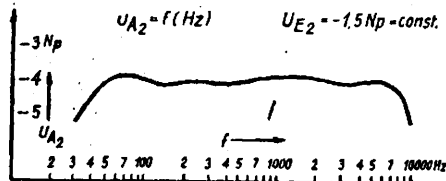


Abb. 30. Aussteuerungskurve der Einkanal-Magnetophonanlage



a) Frequenzkurve der oberen Bandhälfte



b) Frequenzkurve der unteren Bandhälfte

Für die Zwecke des räumlichen Hörens dürfte die erzielte Übersprechdämpfung ausreichen, da die für die Summenlokalisierung zu fordernden Intensitätsunterschiede im allgemeinen geringer sind (s. auch Abb. 15). Eine Vergrößerung der Übersprechdämpfung ließe sich jedoch auch noch erreichen durch konstruktive Verbesserung des mechanischen Aufbaues und der damit verbundenen Kopplungsverhältnisse der Zwillings-Sprech- und Hörköpfe.

5. Zusammenfassende Beurteilung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde eine Hochfrequenz-Magneto-

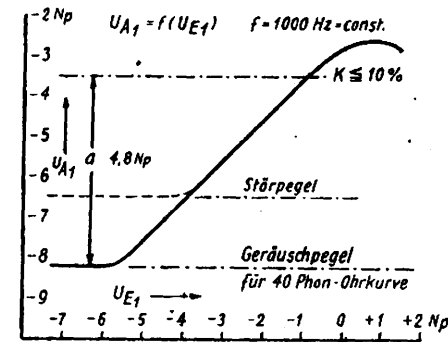
phonapparatur beschrieben, die für die Aufzeichnung zweier Tonspuren auf einem einzigen Band geeignet ist. Es wurde die Änderung gegenüber einer normalen Magnetophonapparatur erläutert. Die Übertragungseigenschaften der aufgebauten Apparatur wurden gemessen und für die Zwecke einer stereophonischen Zweikanal-Übertragung geprüft. Es stellte sich heraus, daß die ausnutzbare Dynamik geringer ist als die der normalen Magnetophonaufzeichnung. Der Frequenzumfang für jeden Übertragungskanal und die Übersprechdämpfung von einem Kanal auf den anderen sind ausreichend. Verbesserungsmöglichkeiten der Eigenschaften der aufgebauten Apparatur bestehen und wurden erläutert.

Die beschriebene Zweikanal-Magnetophonapparatur läßt sich auch mit den vorliegenden technischen Eigenschaften gut für eine systematische Untersuchung stereophonischer Übertragungen verwenden.

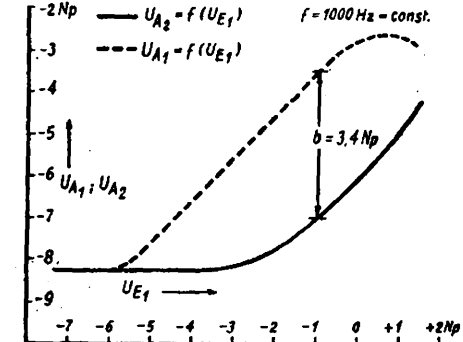
D. Aufnahme- und Wiedergaberversuche mit der Zweikanal-Magnetophonanlage

1. Allgemeine Betrachtungen zur Aufnahme- und Wiedergabetechnik

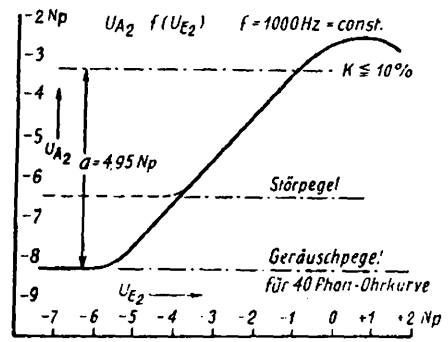
Bei der Übertragungstechnik des Rundfunks spielt die Aufnahmetechnik eine große Rolle. Vor allen Dingen bei den großen künstlerischen Erlebnissen, die der Rundfunk einer großen Zahl von Zuhörern übermittelt, ist es besonders



a) Aussteuerungskurve der oberen Bandhälfte

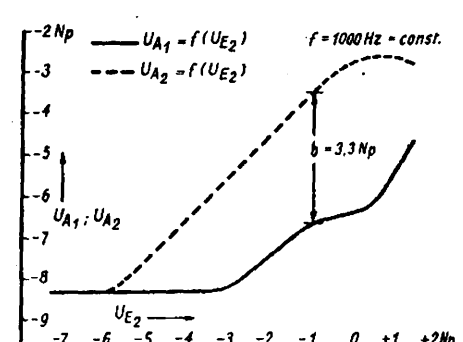


a) Übersprechen von der oberen auf die untere Bandhälfte



b) Aussteuerungskurve der unteren Bandhälfte

Abb. 31. Aussteuerungskurve der Zweikanal-Magnetophonanlage. Rechts Abb. 32. Übersprechdämpfung



b) Übersprechen von der unteren auf die obere Bandhälfte

wichtig, daß alle zur Verfügung stehenden technischen Hilfsmittel eingesetzt werden, um durch eine möglichst gute Aufnahme den Erfolg und die Wirkung eines Kunstwerkes sicherzustellen. Bei der großen Mühe, die man von seiten der Künstler aufbringt, um ein in den Äther hinausgesandtes Kunstwerk so gut wie nur irgend möglich darzubieten, ist es selbstverständlich, daß auch die Technik nicht ruhen darf, bis nicht die letzte Möglichkeit der Verbesserung der Aufnahmetechnik ausgenutzt wird.

Die beim Rundfunk angewandte Aufnahmetechnik ist z. B. bei der Übertragung großer Konzerte recht schwierig. Trotz der großen Erfahrungen, die hierüber vorliegen, ist z. B. die Verwendung, Aufstellung und Anzahl der Mikrofone, die Größe und Dämpfung des Aufnahmeortes usw. sehr umstritten. Man kennt eine ganze Reihe ungünstiger Aufnahmebedingungen, aber man ist nicht in der Lage, das Optimum anzugeben.

Das liegt einmal daran, daß die Beurteilung eines musikalischen Kunstwerkes oder eines Hörspiels von dem persönlichen Geschmack und von der kritischen Einstellung des Urteilenden abhängt. Jeder hat eine etwas andere Vorstellung von der vollendeten Form eines Kunstwerkes, so daß es kein absolutes Urteil gibt, sondern nur eines in bezug auf den Urteilenden. Erfahrungsgemäß ist eine Verständigung zwischen Künstlern und Technikern über technische Einzelheiten, wie sie beispielsweise bei der Übertragungstechnik des Rundfunks oftmals nötig sind, recht schwierig. Das Zusammenwirken sehr vieler Faktoren erschwert es dem Techniker selbst, die Zusammenhänge klar zu erkennen und einfach darzustellen.

Bei einer Unterhaltung mit erfahrenen Toningenieurern des Rundfunks wird man daher oft feststellen können, daß die Bemühungen, optimale technische Bedingungen z. B. für die Aufnahmetechnik zu schaffen, selbst bei einer engen Zusammenarbeit mit Künstlern keineswegs in gerader Linie einer Endlösung zustreben, sondern sich oftmals in einem *circulus vitiosus* bewegen. Was bei einer Änderung zuerst als Verbesserung und Fortschritt gepriesen wird, wird unter Umständen nach einiger Zeit wieder abgelehnt. Nachteilige Auswirkungen einer Änderung werden eben zu Anfang sehr leicht übersehen oder unterschätzt, wenn ein bestimmter erwünschter Effekt erzielt wird. Wenn ein Techniker sich Enttäuschungen ersparen will, dann sollte er zwar möglichst viel experimentieren und sich dabei bemühen, große Zusammenhänge zu erkennen, sich aber davor hüten, ein vorschnelles Urteil abzugeben. Die meisten technischen Verbesserungen, die die optimale Aufnahme und Wiedergabe eines Kunstwerkes zum Ziele haben, müssen erst nach längerer Bewährungszeit zu einem wirklichen Fortschritt heranreifen.

Diese für die Übertragungstechnik ganz allgemein gültigen Gesichtspunkte gelten natürlich auch für die Einführung des räumlichen Hörens. Die Auswirkungen der Stereophonie auf die Aufnahmetechnik sind ziemlich groß und müssen deshalb auch eingehend studiert werden.

2. Die Aufnahmetechnik bei der Einkanalübertragung

Stellt man dem Techniker die Aufgabe, das Klangbild eines großen Orchesterkonzertes möglichst gut aufzunehmen und aufzuzeichnen, dann ergeben sich eine ganze Reihe von Problemen, die gelöst werden müssen. Setzt man voraus, daß die Aufnahmeapparatur (also Mikrofon, Verstärker und Aufzeichnungsgerät) den notwendigen Bedingungen über nichtlineare und lineare Verzerrungen und Dynamikumfang genügt, dann muß z. B. die Akustik des Aufnahme-

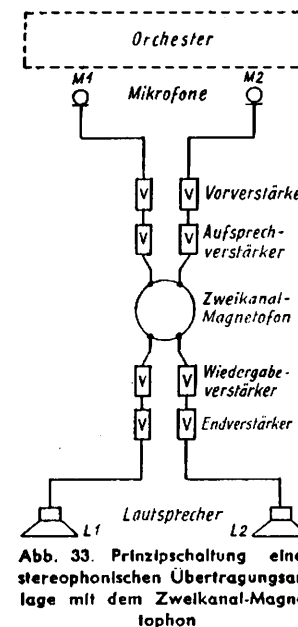


Abb. 33. Prinzipschaltung einer stereophonen Übertragungsanlage mit dem Zweikanal-Magnetophon

raumes, die Aufstellung des Orchesters und des Mikrofons, oder bei mehreren Mikrofonen die Verteilung der Mikrofone, außerdem die Auswahl der Mikrofone nach Art der Richtcharakteristik richtig gewählt werden.

Es ist dabei verhältnismäßig selten die Aufgabe gestellt, ein vorgegebenes Klangbild durch die technischen Mittel der Aufnahmetechnik in gewollter Weise zu verändern, die wichtigste Aufgabe ist in der Regel die, die Aufnahmebedingungen so einzurichten, daß die Natürlichkeit des gegebenen Klangbildes möglichst vollkommen erhalten bleibt.

Es ist hier nicht der Ort, über diese Fragen und die mit der Einkanalübertragung versuchten Lösungswege ausführliche Betrachtungen anzustellen, obwohl das Ausbleiben einer restlos befriedigenden Lösung, wie zu Anfang auch angedeutet wurde, gerade zur Stereophonie geführt hat. Einige wichtige Gesichtspunkte und Forderungen bei der Aufnahmetechnik der Einkanalübertragung müssen jedoch kurz erwähnt werden, da sie auch bei der stereophonen Übertragung gültig sind und zum Vergleich herangezogen werden müssen.

Stellt man ein einziges Mikrofon vor einem großen Orchester auf und hört sich hinter einer hochwertigen Einkanalübertragungsanlage den aufgenommenen Klang an, dann wird man sehr bald bei einer kritischen Einstellung wesentliche Unterschiede zwischen dem übertragenen und dem Originalklang feststellen.

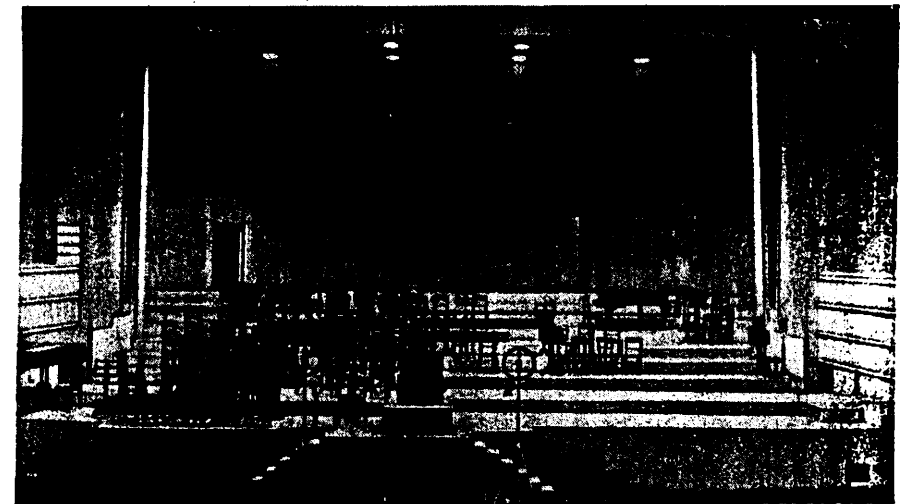


Abb. 34. Aufstellung der Mikrofone bei Versuchen im großen Sendesaal des Berliner Funkhauses bei Ein- und Zweikanalübertragung

- | | | | |
|------------|-------------------------------------|---------------|------------------------------------|
| 1. Linkes | } Mikrofon für Zweikanalübertragung | 3. Haupt- | } Mikrofon für Einkanalübertragung |
| 2. Rechtes | | 4. Streicher- | |
| | | 5. Bratschen- | |

Die Klangbilder der einzelnen Orchestergruppen erscheinen z. B. verändert: die Streicher meistens zu dünn und spitz ohne tragendes Volumen, die Bläser und die Bässe zu dick und massig ohne den charakteristischen Klangansatz. Durch Änderung der Akustik des Aufnahmerraumes lassen sich diese Verhältnisse nur bis zu einem gewissen Grade beeinflussen und verbessern, da die Forderungen für die einzelnen Klanggruppen sich z. T. widersprechen. Man wird also zunächst den Aufstellungsort des Mikrofons verändern und sich schließlich auch zur Verwendung mehrerer Mikrofone entschließen. Die Benutzung mehrerer Mikrofone ist eine sehr umstrittene Maßnahme. Einerseits gelingt es, durch Zuordnung und geeignetes Aufstellen eines besonderen Mikrofons für einige wichtige Orchestergruppen das Klangbild dieser Gruppe zu verbessern, andererseits wirkt aber der Klang einer Gruppe nicht nur auf das zugeordnete, sondern auch auf die übrigen Mikrofone ein. Durch die verschiedenen Laufzeiten zu den verschiedenen Mikrofonen ergibt sich beim Zusammenschalten bei der Einkanalübertragung ein Frequenzgang. Es wird deshalb die Frequenzkurve der Übertragung für die einzelnen Instrumente abhängig vom Ort der Aufstellung zu den Mikrofonen. Wenn diese Verhältnisse auch etwas durch den indirekten Schall, der durch den Nachhall des Aufnahmerraumes gegeben ist, verwischt werden, so sind sie doch im allgemeinen bei einem Tutti des Orchesters in störender Weise wirksam.

Man stellt oft fest, daß sich bei einem Zusammenklang und besonders bei einer Fortissimostelle die einzelnen Klangfiguren des Orchesters in einer unnatürlichen Weise vermischen, und daß das ganze Klangbild, wie man sagt, undurchsichtig wird. Versuche haben gezeigt, daß die „Durchsichtigkeit“ bei der Aufnahme verbessert werden kann, wenn man das Orchester in einer unnormalen, nämlich kreisförmigen, Aufstellung spielen läßt mit einem in der Mitte darüber schwebenden Mikrofon.

Bei normaler Aufstellung des Orchesters werden etwa folgende technische Hilfsmittel zur Erzielung einer guten Aufnahme eines großen Konzertes benutzt: ein ausreichend großer Aufnahmerraum, den man so bedämpft, daß sich eine günstige Nachhallzeit (in der Regel 1,5 bis 2 Sekunden) ergibt. Vor dem Orchester oder etwa über dem Dirigenten schwebend befindet sich das Hauptmikrofon (s. auch Abb. 34 (3)). Weitere Nebenmikrofone verteilen sich wie folgt: eins unmittelbar vor oder über den Streichern (4), ein weiteres über den Bratschen (5) und manchmal noch eins in größerer Entfernung über dem Orchester, meist unmittelbar unter der Decke des Aufnahmerraumes. (Mikrofon (1) und (2) sind für die Zweikanalübertragung.)

Gelegentlich wird noch von den Aufnahmemikrofonen über eine besondere Verstärkeranlage ein Lautsprecher betrieben, der z. B. von der Decke den Aufnahmerraum beschallt und durch akustische Rückkopplung das Gesamtvolumen des aufgenommenen Klanges vergrößert. Die Rückkopplung ist von der Lautstärke des Gesamtklanges und von der Verstärkung abhängig und muß vom Toningenieur sehr stark geregelt werden, um vor allen Dingen jeden Schwingeneinsatz zu vermeiden. Die Lautsprecheranlage mit der akustischen Rückkopplung wird selten und meist nur benutzt, um die Trockenheit des übertragenen Streicherklanges durch eine gewisse Fülle auszugleichen.

Diese technischen Hilfsmittel und in besonderen Fällen auch noch weitere technische Einrichtungen, wie z. B. Nachhallraumkombinationen zur Beeinflussung der wirksamen Nachhallzeit des Aufnahmerraumes u. dgl. mehr stehen dem Toningenieur bei der Einkanalübertragung zur Verfügung, und es hängt von seinem Geschick und von seiner Gewissenhaftigkeit ab, wie er z. B. durch

den Abgleich der verschiedenen Mikrofone an den verschiedenen Stellen eines Konzertes eine möglichst gute Wirkung erzielt.

Diese kurzen Betrachtungen über den Stand der Aufnahmetechnik bei der Einkanalübertragung mögen hier genügen. Es erhebt sich die Frage, welche Folgerungen können hieraus für die Aufnahmetechnik der stereophonischen Übertragung abgeleitet werden.

3. Programm für eine Untersuchung der stereophonischen Aufnahmebedingungen

Die Untersuchung der stereophonischen Aufnahmebedingungen wird man nach zwei Richtungen durchführen. Erstens wird man versuchen, die Bedingungen bei der Aufnahme so einzurichten, daß man miteinander vergleichbare Bedingungen für Einkanal- und Zweikanalübertragungen erhält. Das ist notwendig, um auf Grund einwandfreier experimenteller Unterlagen, den bei der Stereophonie zu erwartenden Gewinn an Übertragungsgüte abschätzen zu können. Und zweitens wird man besondere technische Hilfsmittel und Einrichtungen entwickeln müssen, um die besonderen Anforderungen der Stereophonie möglichst gut erfüllen zu können.

Aus den Betrachtungen über den Stand der Aufnahmetechnik bei der Einkanalübertragung kann man ersehen, daß es nicht ohne weiteres möglich ist, die als besonders günstig ausprobierten Einkanalaufnahmemassnahmen bei der Zweikanalübertragung anzuwenden. Bei der Einkanalaufnahme ist man grundsätzlich in dem Dilemma, daß man die beiden etwas verschiedenen Klangbilder der beiden Ohren eines Zuhörers nicht wiedergeben kann. Bei der Verwendung mehrerer Aufnahmemikrofone werden zwar auch verschiedene an verschiedenen Orten aufgenommene Klangbilder benutzt, aber nach dem Mischen und Zusammenschalten wird von allen Klangbildern ein Mittelwert gebildet. Es wird also schließlich doch nur ein Klangbild, nämlich dieser Mittelwert bei der Einkanalübertragung übertragen. Die Verwendung mehrerer Mikrofone hat also bei der Einkanalübertragung nur den einen Zweck, diesen Mittelwert so zu beeinflussen, daß ein möglichst günstiges Gesamtklangbild zustande kommt.

Bei der stereophonischen Zweikanalübertragung werden zwei verschiedene Klangbilder benötigt. Am übersichtlichsten sind die Bedingungen für die kopfbezügliche Stereophonie. Hierbei werden bei der Aufnahme lediglich die Klangbilder an den beiden Ohren eines Ersatzkopfes aufgenommen. Es würde an und für sich den Bedingungen des kopfbezüglichen Raumhörens nicht entsprechen, wenn man bei der Aufnahme eines großen Konzertes z. B. an Stelle der verschiedenen einfachen Mikrofone, wie sie bei der Einkanalübertragung verwendet werden, Doppelmikrofone verschiedener Ersatzköpfe verwenden würde. Es wäre trotzdem interessant, experimentell festzustellen, welche Wirkung zustande kommt, wenn man die von den linken bzw. rechten Mikrofonen der einzelnen Ersatzköpfe aufgenommenen Klangbilder in genau entsprechender Weise wie bei der Einkanalaufnahme mischt und mittelt und die beiden Mittelwerte für die kopfbezügliche stereophonische Übertragung verwendet. Es ist fraglich, ob in diesem Falle die stereophonische Aufnahme überhaupt eine Verbesserung bringen würde. Eine richtige Richtungsauflösung, z. B. eine Unterscheidung von rechts und links, ist in diesem Falle für bestimmte Aufstellungen zwischen den Mikrofonen gar nicht möglich. Bei der Einkanalübertragung kann man die Verwendung mehrerer Mikrofone in gewisser Weise so deuten, als ob man eine räumliche Umgruppierung und Konzentrierung ganzer Teile des Orchesters vornimmt zugunsten einer besseren Hörsamkeit. Bei der beschriebenen Ver-

wendung der Doppelmikrofone wird man sich durch die kopfbezügliche Stereophonie dieser Veränderung vielleicht bewußt werden und sie als unnatürlich empfinden, während sie bei einer Einkanalaufnahme ohne Bedeutung ist, da überhaupt keine Möglichkeit einer räumlichen Wahrnehmung des Ortes der Schallquelle möglich ist. Man erkennt hieraus, daß man sehr kritisch sein muß bei der Schaffung sogenannter Vergleichsmessungen zwischen Einkanal- und Zweikanalübertragung.

Das ist in noch größerem Maße notwendig bei den raumbezüglichen stereophonischen Aufnahmebedingungen. Vergleicht man nämlich Einkanalaufnahmen mit mehreren Mikrofonen und Zweikanalaufnahmen mit mehreren Mikrofonen, so darf man nicht außer acht lassen, daß bei der Einkanalaufnahme die verschiedenen Mikrofone, wie erläutert, lediglich zu einer Mittelwertbildung beitragen, daß bei der Zweikanalaufnahme aber die Mikrofone so aufgestellt und zusammengeschaltet sein müssen, daß die für das Richtungshören erforderliche Intensitätsverteilung für beide Kanäle geliefert wird. Man hat also bei der Stereophonie weniger Freiheiten in der Verwendung und Aufstellung der Mikrofone. Darauf muß man Rücksicht nehmen, wenn man Vergleiche anstellen will. Die günstigsten Aufstellungen der Mikrofone für Einkanal- und für Zweikanalübertragung sehen wahrscheinlich ganz verschieden aus.

Bei der Festsetzung eines Programms zur experimentellen Untersuchung der Aufnahmebedingungen für raumbezügliche Zweikanalstereophonie muß man bei den entsprechenden Fragestellungen, die experimentell beantwortet werden sollen, darauf Rücksicht nehmen. Es erscheint nicht ohne weiteres zulässig, bei einfachen vergleichenden Experimenten zu fordern, daß die raumbezügliche Zweikanalstereophonie alle klanglichen Einzelheiten der Einkanalübertragung und noch zusätzlich den räumlich plastischen Eindruck enthält. Das kann nur das Ziel einer intensiven Forschung über Stereophonie sein. Am Anfang wird man nicht vergessen dürfen, daß es vieler Erfahrungen bedurfte, ehe man gute Bedingungen für die Einkanalaufnahme kannte.

Ausgangsexperimente haben gezeigt, daß es grundsätzlich möglich ist, mit der stereophonischen Zweikanalübertragung den räumlich plastischen Eindruck eines Klangbildes zu übertragen und damit etwas grundsätzlich Neues, über die Möglichkeiten der Einkanalübertragung Hinausgehendes, von großer Auswirkung für ein Hörerlebnis zu schaffen. Es ist eine wichtige Aufgabe, von den Erfahrungen der Einkanalübertragung und den theoretischen Erkenntnissen über Stereophonie ausgehend, systematische Experimente durchzuführen, um die Bedingungen für die Zweikanalaufnahme schrittweise zu verbessern und nachzuweisen, daß die günstigen theoretischen Vorhersagen verwirklicht werden können.

Als Ausgangspunkt müssen die Bedingungen für die Zweikanalaufnahmetechnik mit nur zwei Mikrofonen sehr genau experimentell erforscht werden. Dann muß geklärt werden, in welcher Weise man die Grenzen bei der Aufnahme mit zwei Mikrofonen erweitern kann, ob bei der Verwendung von mehr als zwei Mikrofonen die linken und die rechten Mikrofone zu je einer Gruppe zusammengefaßt werden können, oder ob man Zusammenschaltungen nach dem Schema der Abb. 22 vornehmen muß. Der Einsatz von Richtmikrofonen, wie sie in der Theorie der Stereophonie eine große Rolle spielen, muß besonders geklärt werden.

Bisher sind die für die Rundfunktechnik besonders wichtigen Probleme der Aufnahmetechnik behandelt worden. Ein Experimentieren mit raumbezoglicher Stereophonie erfordert aber auch die Schaffung definierter Wiedergabeverhältnisse.

4. Probleme der stereophonischen Wiedergabe

Bei der raumbezüglichen stereophonischen Wiedergabe sind mindestens zwei Lautsprecher erforderlich. Es ist eine bekannte Erfahrungstatsache, daß auch bei der Einkanalübertragung ein gewisser Unterschied in der Klangwirkung erzielt wird, je nachdem ob man nur einen oder zwei Lautsprecher verwendet. Dieser Effekt, der wahrscheinlich davon herrührt, daß der Zuhörer von den beiden Lautsprechern in der Laufzeit etwas unterschiedliche Klänge empfängt, ergibt eine Art pseudo-stereophonische Wirkung und erhöht etwas die Lebendigkeit des Klangeindrucks. Es ist deshalb und auch aus sonstigen prinzipiellen Gründen ratsam, bei Vergleichsmessungen zwischen Einkanal- und Zweikanalübertragung die gleichen Lautsprecher zu benutzen.

Man kann im Wiedergaberaum einen ziemlich wirksamen Unterschied zwischen Einkanal- und Zweikanalübertragung beobachten. Bei symmetrischer Aufstellung eines Zuhörers zu den beiden Lautsprechern und Mitteneindruck für den Ort der scheinbaren Schallquelle wird bei einer geringen seitlichen Verschiebung des Zuhörers im Falle einer Einkanalübertragung der Ort der scheinbaren Schallquelle sprunghaft von der Mitte zu dem einen Lautsprecher sich ändern. Im Falle der Zweikanalübertragung sind viel größere Verschiebungen nötig, um eine entsprechende Wirkung zu erzielen.

Die meisten für die Stereophonie zu fordernden Eigenschaften des Wiedergaberaumes sind bei der Besprechung der physikalischen Grundlagen der Stereophonie schon erwähnt worden. Der Wiedergaberaum muß groß genug sein, um die Lautsprecher in einem angemessenen Abstand voneinander aufstellen zu können, und um dem Hörer eine Aufstellung in einer Entfernung von etwa dem zwei- oder dreifachen des Lautsprecherabstandes zu ermöglichen. Der Nachhall des Wiedergaberaumes soll gerade so groß sein, als für die Natürlichkeit des Eindruckes unbedingt notwendig ist. Ein zu großer Nachhall verwischt den stereophonischen Eindruck. Der Frequenzumfang und der Dynamikumfang der Lautsprecheranlage muß möglichst groß sein, und die tiefen Frequenzen etwa unter 300 Hz werden am besten von einem gemeinsamen Mittellautsprecher für beide Kanäle abgestrahlt.

Es muß noch systematisch untersucht werden, in welchem Maße eine Abweichung von diesen zu fordernden Eigenschaften des Wiedergaberaumes sich als eine Verschlechterung auf den stereophonischen Eindruck auswirkt. Man wird bei einer Untersuchung der stereophonischen Übertragungsbedingungen jedoch im allgemeinen die Aufnahme- und Wiedergabebedingungen nicht gleichzeitig ändern, sondern sich am besten einen für stereophonische Wiedergabe besonders eingerichteten Wiedergaberaum schaffen.

5. Experimentelle Ergebnisse bei Zweikanalaufnahmen von Musik und Sprache

Im folgenden soll über einige stereophonische Aufnahmen berichtet werden, die unter Benutzung der beschriebenen Zweikanal-Magnetophonanlage durchgeführt wurde. Diese Messungen können lediglich als erfolgreiche Vorversuche angesehen werden im Zusammenhang mit dem im vorletzten Kapitel aufgestellten Programm über notwendige Untersuchungen zur Klärung der technischen Aufnahmebedingungen für Zweikanalstereophonie.

Abb. 33 zeigt die Prinzipschaltung einer stereophonischen Übertragungsanlage mit dem Zweikanalmagnetophon, wie sie auch bei den Messungen verwendet wurde. Es wurden von Symphoniekonzerten eines großen Orchesters

im großen Sendesaal des Berliner Rundfunkhauses Aufnahmen gemacht⁴⁾. Dabei wurden für die stereophonischen Aufnahmen zwei Neumann-Kondensator-Mikrofone (mit kardioidförmiger Richtcharakteristik) in 4 m Abstand voneinander und in mittlerer Aufstellung vor dem Orchester verwendet (1 und 2 in Abb. 34).

Gleichzeitig mit den Zweikanalaufnahmen wurden auch Einkanalaufnahmen in der vorher geschilderten, als günstig ausprobierten Aufstellung der Mikrofone (s. auch Abb. 34) gemacht und auf Magnetophonband aufgezeichnet. Beim abwechselnden Abspielen von Einkanal- und Zweikanalaufzeichnung lassen sich deutlich Qualitätsunterschiede feststellen. Es waren zwar die Wiedergabebedingungen für die Beurteilung der stereophonischen Wirkung nicht die günstigsten, da ein besonderer stereophonischer Ablörraum für die Versuche nicht zur Verfügung stand. Als Ersatz mußte ein zu kleiner und zu wenig gedämpfter Laborraum verwendet werden. Aber trotzdem kann man erkennen, daß einmal durch die Lokalisierungsmöglichkeit der einzelnen Orchestergruppen der Gesamtklang an Lebendigkeit gewinnt und daß zweitens bei den Tuttistellen des Konzertes die Zweikanalaufnahme viel angenehmer und durchsichtiger klingt. Wenn sich dieses Ergebnis einwandfrei sicherstellen läßt, dann wäre damit bewiesen, daß man auch mit einfachen stereophonischen Aufnahmemitteln schon eine Lösung schaffen kann für das schwierige Problem der durchsichtigen Wiedergabe eines Tuttiklanges. Damit würde sich ein hoffnungsvoller Ausgangspunkt für eine praktische Anwendung der Stereophonie bei großer Orchestermusik ergeben. Eine genauere experimentelle Untersuchung hierüber, wobei die vorliegenden Wiedergabebedingungen noch verbessert werden müssen, ist notwendig.

Es wurden auch stereophonische Aufnahmen von einem Sprecher, der sich vor dem Mikrofon bewegt, gemacht. Diese stereophonischen Sprachaufnahmen haben bei der Anwendung im Rundfunk besondere Bedeutung für die Hörspiel-sendungen. Deshalb wurden diese Sprachaufnahmen auch in einem stärker gedämpften Aufnahme-raum, wie er für Hörspielzwecke verwendet wird, durchgeführt. Hierbei war der Mikrofonabstand (2 Neumann-Kondensator-Mikrofone mit kardioidförmiger Charakteristik) etwa 2,5 m und der Sprecher bewegte sich in etwa 2 m Abstand vor der Mikrofonbasis. Bei der Wiedergabe ließ sich eine gute Lokalisierung des Sprechers vornehmen.

Es wurde bei diesen Sprachaufnahmen festgestellt, welche Auswirkungen man auf den Höreindruck erhält, wenn man die beiden verwendeten Zweikanal-Mikrofone parallel schaltet und auf diese Weise von einer Zweikanalübertragung mit zwei Mikrofonen zu einer Einkanalübertragung mit zwei Mikrofonen übergeht, wobei natürlich beachtet werden muß, daß die Frequenzkurven der Apparatur beim Umschalten nicht geändert werden. Im Falle der Einkanalübertragung läßt sich eine deutliche Verschlechterung des Klangbildes feststellen. Die Dämpfung des Aufnahme-raumes war bei diesen Versuchen, wie gesagt, ziemlich groß, so daß die Auswirkungen der Laufzeitunterschiede zu den beiden Mikrofonen im Falle der Einkanalübertragung deutlich hervortreten und eine vom Ort des Sprechers abhängige Gesamtfrequenzkurve der Einkanalübertragung ergeben. Man erhält z. B. Unterschiede im Klangbild, wenn der Sprecher bei etwa symmetrischer Aufstellung zu den Mikrofonen spricht und wenn abwechselnd von Zweikanal- auf Einkanalaufnahme umgeschaltet wird. Die bisher durchgeführten und beschriebenen Versuche über Stereophonie ließen erkennen, daß sich das Magnetophon für stereophonische Aufzeichnungen gut eignet.

⁴⁾ 1. Schubert: Symphonie D-dur. 2. Mendelssohn-Bartholdy: Violinkonzert (Solist: Franz v. Szpanowski). 3. Schostakowitsch: 6. Symphonie.

E. Anwendungsmöglichkeiten für stereophonische Übertragung mit dem Zweikanal-Magnetophon

Bei der Entwicklung, die das Magnetophon in den letzten Jahren erfahren hat, werden sich auch die Anwendungsmöglichkeiten ständig erweitern. Wenn es der erforderliche zusätzliche Aufwand zuläßt, wird man beim Einsatz des Magnetophons für hochwertige Übertragungen selbstverständlich statt eines Einkanal-Magnetophons in Zukunft auch eine Zweikanal-Magnetophonanlage verwenden. Wenn sich z. B. die technischen Einrichtungen der Stereophonie, wie zu erwarten ist, weiter verbessern lassen, wird die Wiedergabegüte stereophonischer Konzerte bei Verwendung eines guten stereophonischen Wiedergabe-raumes gegenüber der Einkanalwiedergabe sehr vergrößert werden. In diesem Falle ließ sich beispielsweise das Zweikanal-Magnetophon für hochwertige Wiedergabe von Konzerten, ähnlich wie beim Tonfilm, in besonderen Konzerts-theatern verwenden.

Da die Anwendung des Raumhörens bisher für den Tonfilm am meisten gefördert wurde, ist es wichtig, daran zu denken, daß das Magnetophon, wenn gewisse Synchronisierungsschwierigkeiten überwunden sind, auch bei der Tonfilm-Aufnahme- und Wiedergabetechnik gute Verwendung finden könnte. Diese mögliche Anwendung des Magnetophons beim Tonfilm [18] würde bei der Umstellung auf Stereophonie natürlich auch das Zweikanal-Magnetophon betreffen.

Da das Magnetophon bei der Anwendung auf die Technik der Rundfunkübertragung eine große Bedeutung gewonnen hat, sind mit der Schaffung einer technisch einwandfreien Zweikanal-Magnetophonapparatur auch gewisse Voraussetzungen für eine Einführung der Stereophonie beim Rundfunk gegeben. Eine Einführung der Stereophonie beim Rundfunk wird selbstverständlich erst erfolgen, wenn gute Lösungen für die Probleme der stereophonischen Aufnahmetechnik und größere experimentelle Erfahrungen über die Verbesserungsmöglichkeiten, die mit der Stereophonie geschaffen werden, vorliegen. Bei großen Orchesterkonzerten und bei den Hörspielen erscheint eine Einführung der Stereophonie am wichtigsten. Ob es zweckmäßig ist, alle Sendungen auf raumbezügliche Stereophonie oder einen Teil auch auf kopfbezügliche Stereophonie einzustellen, wird erst die Praxis lehren müssen.

Für eine Einführung des Raumhörens bei den normalen Rundfunksendungen wird es zunächst schwierig sein, in dem Bereich der mittleren oder langen Wellenlängen für die Stereophonie zusätzliche Trägerfrequenzen zur Verfügung zu stellen. Man muß also entweder die Zweikanal-Stereophonie mit zwei Trägern im Bereich der kürzeren Wellenlängen oder eine Ausnutzung der beiden Seitenbänder für je einen Kanal und Empfang mit Spezialempfängern versuchen. Durch die Entwicklung der Frequenzmodulation bieten sich weitere Möglichkeiten für eine Lösung des Trägerfrequenzproblems bei einer Einführung in die Rundfunkübertragungstechnik.

Die Anwendung der Stereophonie wird nur bei hochwertiger Wiedergabe lohnen. Es wird deshalb der fading-regulierte stereophonische Fernempfang nicht so wichtig sein wie guter plastischer Ortsempfang. Als erster Schritt für eine Einführung der Stereophonie wird es vielleicht ratsam sein, eine Großstadt mit stereophonischen Sendungen zunächst über den Drahtfunk zu versorgen.

F. Zusammenfassung

In einem zusammenfassenden Bericht über stereophonische Zweikanal-Übertragung mit dem Magnetophon werden zu Anfang die allgemeinen physikalischen Grundlagen der Stereophonie zusammengestellt und erörtert. Dabei werden die

wichtigsten experimentellen und theoretischen Ergebnisse der Literatur berücksichtigt. Der Aufbau einer Zweikanal-Magnetophonapparatur zur Schallaufzeichnung bei stereophonischen Übertragungen und die technischen Eigenschaften der Apparatur werden an Hand von Messungen beschrieben. Es ergibt sich, daß die aufgebaute Zweikanal-Magnetophonapparatur in einigen wichtigen Eigenschaften noch verbessert werden kann. Als Ergebnis läßt sich aber feststellen, daß das Magnetophon für eine Zweikanalaufzeichnung und eine Anwendung für die Stereophonie gut geeignet ist.

Ausgehend von dem Stand der Aufnahmetechnik bei normaler Einkanalübertragung wird ein Programm für systematische experimentelle Untersuchungen der stereophonischen Zweikanalaufnahmebedingungen aufgestellt. Einige ausgeführte Messungen und Aufnahmen von stereophonischen Konzerten und von Sprache werden beschrieben und im Zusammenhang diskutiert. Bei der Stereophonie wird die Lebendigkeit des Klangeindruckes durch die Lokalisierungsmöglichkeit erhöht, und es scheint eine wesentlich größere Durchsichtigkeit des Tuttiklanges vorhanden zu sein.

Einige Anwendungsmöglichkeiten für das Zweikanal-Magnetophon werden im allgemeinen und für die Zwecke des Rundfunks im besonderen erwähnt.

G. Schrifttum

- [1] H. Fletcher, Symposium on Wire Transmission of Symphonic Music and its Reproduction in Auditory Perspective-Basic Requirements. *Electr. Eng.* **53** (1934) S. 9 und *Bell Syst. Techn. J.* **13** (1934) S. 259;
- [2] J. S. Steinberg und W. B. Snow, Auditory Perspective-Physical Factors. *Electr. Eng.* **53** (1934) S. 12;
- [3] F. B. Jewett, Perfect Quality and Auditory Perspective in the Transmission and Reproduction of Music. *Science* **77** (1933) S. 435;
- [4] H. Warncke, Bemerkungen zur Anwendung des Rauntoneffektes im Tonfilm. *Kinotechnik* **20** (1938) S. 125;
- [5] H. Warncke, Der technische Stand der Stereophonie. *Kinotechnik* **20** (1938) S. 313;
- [6] F. L. Hunt, Sound Pictures in Auditory Perspective. *J. Soc. Mot. Pict. Eng.* **30** (1938) S. 351;
- [7] J. P. Maxfield, Demonstration of Stereophonic Recording with Motion Pictures. *J. Soc. Mot. Pict. Eng.* **30** (1938) S. 131; referiert in *Kinotechnik* **20** (1938) S. 106;
- [8] C. Becker, Das Problem des plastischen Tones im Film. *Kinotechnik* **20** (1938) S. 120;
- [9] H. Fletcher, Stereophonic Reproduction from film. *J. Soc. Mot. Pict. Eng.* **34** (1940) S. 606;
- [10] E. Thienhaus, Stereophonische Schallübertragung. *Telefunken-Hausmitt.* Band **86/87** (1941);
- [11] E. Thienhaus, Konzertmäßige Zweikanal-Schall-Übertragung für das Cembalo. *Akust. Zeitschr.* **6** (1941) S. 34;
- [12] K. de Boer, Eine Anlage für einen Schwerhörigen. *Philips Techn. Rundschau* **4** (1939) S. 329;
- [13] H. Warncke, Die Grundlagen der raumbezüglichen stereophonischen Übertragung im Tonfilm. *Akust. Zeitschr.* **6** (1941) S. 174;
- [14] K. de Boer, Plastische Klangwiedergabe. *Philips Techn. Rundschau* **5** (1940) S. 108;
- [15] G. v. Bekesy, Über die Entstehung der Entfernungsempfindung beim Hören. *Akust. Zeitschr.* **3** (1938) S. 21;
- [16] L. Schwarz, Zur Theorie der Beugung einer ebenen Schallwelle an der Kugel. *Akust. Zeitschrift* **8** (1943) S. 91;
- [17] L. J. Sivian und S. D. White, Minimum Audible Sound Fields. *J. Acoust. Soc. Am.* April (1933);
- [18] W. Lippert, Der Stand der modernen Hochfrequenz-Magnetophontechnik und die kintech-nischen Einsatzmöglichkeiten d. Magnetophons. *FOTO-KINO-TECHNIK* **1** (1947) H. 2 S. 19, H. 3 u. 4.

Folgende Abb. sind entnommen aus: [1] 11; [2] 6; [13] 7, 9, 10, 12 ... 16, 22; [14] 1, 2, 8, 17 ... 20; [16] 3; [17] 5.