

GRAVESANER

BLÄTTER

HERAUSGEBER HERMANN SCHERCHEN

ENGLISCH-DEUTSCH

ARS VIVA VERLAG
(HERMANN SCHERCHEN)
GMBH · MAINZ

MUSIKALISCHE, ELEKTROAKUSTISCHE UND
SCHALLWISSENSCHAFTLICHE GRENZPROBLEME
1961

JAHRGANG VI HEFT

22

**ELEKTROAKUSTISCHES EXPERIMENTALSTUDIO
HERMANN SCHERCHEN GRAVESANO**

PROTEKTORAT:

SCHWEIZER RUNDSPRUCH · IMC-UNESCO · REGIERUNG TESSIN

UNDER THE AUSPICES OF

RADIO SWITZERLAND · IMC-UNESCO · GOVERNMENT OF TESSIN

9. — 10. August 1961

HEILKUNDE UND MUSIK

I

Klangmaterielle-Physiologische
Möglichkeiten
Vibration / Resonanz / Eigentöne

II

Künstlerische-Psychologische
Einwirkungen
Backgroundklänge / Rhythmik / Kompo-
sitionen

11. — 13. August 1961

MUSIK UND MATHEMATIK

I

Kompositionen aus Rechenmaschinen
(Die Bedeutung des „Programms“)

II

Random-Tonfolgen und Stilerkenntnis
(Von Bach bis Nono)

III

Stochastische Musik
(Mathematische und musikalische „Pat-
terns“)
„Die neue Wirklichkeit“ und ihre
Musiker???
Das Zeitalter Newton's:
„Schoenberg ist tot“
„Schillinger / Messiaen / Boulez“
Das Zeitalter Einsteins . . .

August 9—10, 1961

MEDICINE AND MUSIC

I

Physiological Possibilities of the Sound
Vibration and Resonance

II

Psychological Effects of the Art
Background Sounds / Rhythmics / Com-
positions

August 11—13, 1961

MUSIC AND MATHEMATICS

I

Music from Computers
(The Meaning of the “Programme”)

II

Random Sound Sequences and Musical
Style (From Bach to Nono)

III

Stochastic Music
(Mathematical and Musical “Patterns”)
“The New Reality” and its Musicians???
The Age of Newton
“Schoenberg is Dead”
Schillinger / Messiaen / Boulez
The Age of Einstein . . .

G R A V E S A N E R B L Ä T T E R

Nr. XXII

VI. Jahrgang

1961

INHALT

Seite

Perspektiven für eine raumbezogene Rundfunkübertragung	L. Keibs	2
Einführung in die Grundlagen der Schallmeßtechnik (II)	W. Bürck	61
Ein integriertes System hoher Wiedergabequalität	F. A. Loescher	83
Meßapparaturen und Kunst	Hermann Scherchen	94
Akustik und Musikinstrumente	E. Leipp	111
Grundlagen einer stochastischen Musik (IV)	Iannis Xenakis	131

Redaktion: Gravesano (Tessin) Schweiz

Herausgeber: Hermann Scherchen

Nachdruck verboten!

G R A V E S A N O R E V I E W

No. XXII

Vol. VI

1961

CONTENTS

Page

The Outlook of Three-Dimensional Broadcasting	L. Keibs	41
An Introduction to the Fundamentals of Acoustic Measurement (II)	W. Bürck	73
An Integral High Fidelity Unit	F. A. Loescher	90
Measuring Devices and Art	Hermann Scherchen	105
Acoustics and Musical Instruments	E. Leipp	122
Elements of Stochastic Music (IV)	Iannis Xenakis	144

Published by Experimental Studio Gravesano

Editor: Hermann Scherchen

Extracts may not be published without permission

Perspektiven für eine raumbezogene Rundfunkübertragung

von

L. KEIBS

(Betriebslaboratorium für Rundfunk und Fernsehen der DDR)

Die objektiven und subjektiven Parameter der Übertragungstechnik

Die klassischen physikalischen Qualitätsmerkmale einer elektroakustischen Übertragungsanlage sind Frequenzumfang, lineare und nichtlineare Verzerrungen, Ausgleichsvorgänge, Richtwirkung der Lautsprecher, Störungen durch Brummen oder Rauschen. Sie sind notwendige, aber nicht in allen Fällen ausreichende Bedingungen, um das Schallereignis vom Ort des Geschehens auf den des Miterlebens optimal zu transponieren. Es müssen auch psychologisch-ästhetische Qualitätsmerkmale hervortreten wie z. B. Durchsichtigkeit, Verständlichkeit, Deutlichkeit, Klangfülle, plastischer bzw. räumlicher Klangeindruck¹. In dem umrandeten Feld der Fig. 1, beziffert mit I—V, sind die subjektiven Parameter zusammengestellt⁴, mit arabischen Ziffern sind die objektiven Parameter angegeben, von denen die subjektiven Parameter möglicherweise abhängen können.

In den Bemühungen, die Illusion für den Hörer zu verbessern, wurden Überlegungen angestellt, um

1. dem Hörer die räumliche Ausdehnung der komplexen Schallquellen zu vermitteln,
2. die Raumbeziehungen der Teiloriginalschallquellen untereinander zu vermitteln,
3. den Hörer in den Raum des Geschehens so mit einzubeziehen, daß er das Gefühl hat, in einem entsprechenden Abstand vom Schallereignis im Raum mit anwesend zu sein.

Zwecks Bewertung dieser Eindrücke erscheint es zweckmäßig, die Aufstellung der subjektiven Parameter durch einen Begriff zu erweitern, der nach *Fletcher* als „Hörperspektive“ bezeichnet sei^{5,6,7}. Dieser Begriff „Hörperspektive“ läßt sich in folgende drei Teilparameter aufgliedern, und zwar

- a. den Hörwinkel — das ist derjenige Öffnungswinkel, unter dem das komplexe Schallereignis dem Hörer erscheint —
- b. den stereofonischen Effekt bzw. die stereofonische Auflösung — in seiner Wirkung dadurch gekennzeichnet, dem Hörer die Illusion zu ver-

mitteln, die Teilschallquellen innerhalb des von der gesamten Schallquelle eingenommenen Raumes relativ zueinander lokalisiert empfinden zu können —

- c. die akustische Atmosphäre — gekennzeichnet durch die Wirkung, die den Hörer in den Raum des Geschehens mit einbezieht.

Zur Verdeutlichung dieser subjektiven Teilparameter seien zwei Beispiele aus dem natürlichen Miterleben genannt:

Ein Redner im Freien vermittelt an einem weiter entfernt liegenden Beobachtungsort einen schmalen Hörwinkel, keinen stereofonischen Effekt wegen der kleinen Ausdehnung der einzigen Schallquelle und als akustische Atmosphäre die Einbeziehung des Hörers in einen Raum, der keine praktischen Begrenzungen hat. Diese äußert sich in einer Abstandsempfindung, die auf einer Abschätzung von Lautstärke und Klangfarbe gegenüber einer im Gedächtnis haftenden gleichartigen oder ähnlichen Schallvorstellung bekannter Entfernung beruht.

Ein Orgelkonzert in einer halligen Kirche vermittelt an einem Platz in der Raummitte einen großen Hörwinkel; infolge des großen Nachhalls einen nur geringen stereofonischen Effekt, jedoch eine starke Einbeziehung des Hörers durch den räumliche Informationen enthaltenden reflektierten Schall.

Die Grenzfälle der Aufgaben einer Rundfunkübertragung

Die Aufgabe, eine möglichst vollkommene Illusion zu erzeugen, ist von *Kösters*⁸ darin gesehen worden, den Hörer entweder an den Ort des Geschehens, also in das Studio, oder das Schallereignis in den Wohnraum zu versetzen. Entsprechend liegt der erste Fall z. B. vor, wenn ein Konzert übertragen werden soll, der zweite, wenn Nachrichten, Kommentare oder Vorträge übermittelt werden sollen. Sicherlich ist es so, daß in diesem zweiten Fall der Hörer sich in seinem Wohnraum unmittelbar aus einer mehr oder weniger begrenzten Richtung angesprochen fühlen möchte. Aus diesem Grunde ist ein Lautsprecher mit kugelförmiger Charakteristik, wie er in der Bundesrepublik teilweise im Studiobetrieb angewendet wird, der einen weitgehend ungerichteten Klangeindruck erzeugt, für diesen Fall weniger gut geeignet, da er einen Sprecher unnatürlich und anonym erscheinen läßt. Im ersten Falle der Übertragung aus einem Saal hat der Hörer den Wunsch, sich in die klangliche Umwelt des Ursprungsortes unmittelbar mit einbezogen zu fühlen. Hierfür wäre ein einzelner Lautsprecher wiederum ungeeignet, da er bestenfalls vermitteln würde, daß das von einem räumlich ausgedehnten Klangkörper produzierte Schallereignis durch ein Frequenzgemisch dargestellt wird, das aus einem „Loch“ zu kommen scheint.

Das natürliche Ortungsvermögen des Menschen

Das menschliche Gehör hat die Fähigkeit, die Lage einer Schallquelle relativ zum Beobachter festzustellen. Dabei kann es bei einer freien ungestörten Schallausbreitung folgende Teileindrücke wahrnehmen: Rechts — links, vorn — hinten, oben — unten und nah — fern. Während für den Seiteneindruck rechts — links Laufzeitdifferenzen bzw. Intensitätsunterschiede zwischen beiden Ohren maßgeblich sind, sind — nach Untersuchungen von Kietz⁹ — für die Unterscheidung vorn oder hinten und oben oder unten Form und Stellung der Ohrmuscheln wesentlichlicher als die Tatsache des Vorhandenseins zweier Ohren. Die Nah-Fernunterscheidung beruht teils auf Lautstärkeunterschieden aus der Erfahrung, teils nach Békésy^{10, 11} auf charakteristischen Klangfarbenänderungen, die bei Ausgleichvorgängen dadurch bedingt sind, daß in nicht ebenen Schallwellen Druck und Schnelle in der Nähe der Schallquelle nicht in Phase sind und erst mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle in die für ebene Schallwellen geltenden konphasen Beziehungen übergehen. Da bei tiefen Frequenzen das Ohr kein reiner Druckempfänger, sondern in geringem Maße auch ein Druckgradientenempfänger ist, rufen die tieffrequenten unperiodischen Vorgänge je nach ihrer Entfernung verschiedene Eindrücke hervor, die auch bei einohrigem Hören erhalten bleiben.

Wenn der direkte Schall eines stationären Schallereignisses das Kopfmodell (Fig. 2), in dem an der Stelle der Ohren Mikrofone eingebaut sind, beaufschlagt und man den Kurvenverlauf der beiden Mikrofonspannungen im Zweistrahloszillografen betrachtet, so erhält man zwei deckungsgleiche Schwingungsverläufe, wenn der künstliche Kopf genau der Schallquelle zugerichtet ist. Dreht man den Kopf um 90°, so verändern sich die beiden Kurven, und zwar ergibt sich zwischen den beiden neuen Verläufen^{12, 13}

1. ein reiner Amplitudenunterschied (größere Intensität am näherliegenden Ohr),
daraus ergibt sich
2. ein Klangfarbenunterschied bei zusammengesetzten Schallvorgängen (Benachteiligung des entfernter liegenden Ohres für hohe Frequenzen);
3. ein Phasenunterschied (Wegstreckenunterschied zwischen beiden Ohren).

Auf Grund genauer Untersuchungen findet man, daß die Wirksamkeit dieser Merkmale in Abhängigkeit von der Frequenz unterschiedlich ist.

Unterhalb 300 Hz gibt es keine Ortungsmöglichkeit. Für Frequenzen von 300 bis 800 Hz überwiegt die Wirksamkeit der Laufzeitdifferenzen, das heißt, in diesem Frequenzgebiet hat das Gehör die Fähigkeit, Laufzeitdifferenzen in Seitenwinkel umzudeuten, oberhalb 1000 Hz überwiegt die Wirksamkeit der Intensitätsdifferenzen.

Fig. 3 zeigt das Zustandekommen der Wegdifferenz l am Kopfmodell¹⁴. Nach geometrischen Beziehungen ergibt sich zu

$$l = \frac{D}{2}(\varphi + \sin \varphi), \quad (1)$$

woraus sich dann der Laufzeitunterschied als $\tau = \frac{l}{c}$ errechnet.

Die subjektiv beobachtete Laufzeitdifferenz-Winkelzuordnung kann nach Kietz⁹ angenähert werden durch die Gleichung

$$l = D^* \left(1 + \frac{\sin \varphi}{4}\right) \sin \varphi, \quad (2)$$

wobei $D^* = 16,8$ cm zu setzen ist.

In Fig. 4 ist der Laufzeitunterschied als Funktion des empfundenen Seitenwinkels dargestellt^{15, 9}.

Es muß betont werden, daß die Ortungsmöglichkeit nur für reine Dauertöne auf den Frequenzbereich über 300 Hz beschränkt ist. Dagegen ist die Richtungsortung von nicht periodischen Vorgängen, wie zum Beispiel von Einschwingvorgängen in jedem Umfange auf der Basis von Laufzeitunterschieden möglich.

Die Ortungsgenauigkeit ist am größten in der Richtung der Kopfsymmetrieachse. Die gerade wahrnehmbare Mittenabweichung für Schallimpulse oder getastete Töne entspricht einer Laufzeitdifferenz von 0,03 ms (= 1 cm Entfernungsunterschied). Der zugehörige Winkel beträgt 3°. Für einen Winkel von 90° ergibt sich ein Laufzeitunterschied von 0,63 ms in Übereinstimmung mit subjektiven Untersuchungen⁹.

Die Intensitätsunterschiede werden dadurch verursacht, daß bei schrägem Schalleinfall das entfernter liegende Ohr durch den Kopf abgeschattet wird; zur wirksamen Abschattung muß die Wellenlänge eine mit den Kopfabmessungen vergleichbare Größe haben. Die Erfahrung zeigt, daß unterhalb 800 Hz Intensitätsunterschiede praktisch keine Richtungsempfindung auslösen.

Fig. 5 zeigt den Intensitätsunterschied als Funktion des empfundenen Seitenwinkels, wie er aus subjektiven Untersuchungen als angenäherter Verlauf gefunden wurde¹⁶. Die Kreise stellen über den Frequenzbereich von 500 bis 6000 Hz gemittelte Intensitätsunterschiede dar. Erzeugt man über Kopfhörer für Sinustöne unter 5000 Hz zwischen beiden Ohren Intensitätsunterschiede, wie sie in der Natur auftreten, auf künstlichem Wege, so empfindet man den Ort der Schallquelle stets weniger seitlich, als dem natürlichen Ort entsprechen würde. Diese Abweichung ist umso größer, je tiefer die Frequenz und je größer der Winkel ist¹⁶. Für Sinustöne über 5000 Hz ergibt eine künstliche Nachbildung der natürlichen Intensitätsunterschiede den Eindruck einer zu großen Seitenverschiebung. Intensitätsunterschiede können nur qualitative, aber keine winkeltreuen Seitlichkeitsunterschiede vermitteln.

Beim zweiohrigen Richtungshören von Frequenzgemischen oder nicht periodischen Vorgängen, wie sie in der Natur überwiegend vorkommen, liegen die Verhältnisse günstiger. Intensitätsunterschiede bewirken, daß die Klangfarbe des einfallenden Schalles am zugewandten Ohr heller als am abgewandten empfunden wird.

Die Fähigkeit des menschlichen Gehörs,
räumlich zu empfinden

Wie die Erfahrung zeigt, spielt die Lokalisierung der Schallquellen an und für sich eine geringe Rolle¹⁷. Meistens dient sie als Reiz, der eine Drehung des Kopfes in die Richtung der Schallquelle auslöst. Viel wichtiger als das bewußte ist das unbewußte Richtungshören, ein spezifischer Bestandteil des intelligenten Hörens, das die Konzentration auf ein Schallbild und das Abschirmen gegen Störschall ermöglicht. Das intelligente Hören¹⁸ übernimmt die Verarbeitung des räumlichen Schallgeschehens zu einer subjektiven Wertung. Indem es dem Ablauf des Schallereignisses folgt, hebt es aus ihm das heraus, was ihm bedeutungsvoll erscheint, z. B. beim Anhören von zwei gleichzeitig sprechenden Menschen, wobei das Vorhandensein von Richtungsinformationen eine wesentliche Rolle spielt. Zum anderen sorgt es für eine angenehme und angemessene Größe des subjektiv wahrgenommenen Nachhalls, indem es das Zuviel an Reflexionen, die im Gegensatz zum direkten Schall aus verschiedensten Richtungen kommen, unter die Bewußtseinsschwelle sinken läßt. Es ist auch in der Lage, ein Zuviel der aus dem Klangkörper herkommenden Richtungsinformationen zu unterdrücken, um das Schallbild zu einem Ganzen zusammenschmelzen zu lassen. Das intelligente Hören kann die subjektive Wirkung einer schlechten Akustik verbessern, wie es überhaupt von Mängeln absehen kann, andererseits kann es sich z. B. zur Beurteilung von Aufführungen oder akustischen Verhältnissen gerade auf Mängel konzentrieren.

Möglichkeiten zur Verbesserung der Illusion
mit Hilfe der Stereophonie

Entsprechend der von NN. Haynes¹⁹ vorgeschlagenen Terminologie wird die Stereophonie als diejenige Wissenschaft bzw. diejenige Technik bezeichnet, die sich mit der Aufzeichnung, Verstärkung und Wiedergabe von Schallereignissen befaßt, derart, daß für den Hörer der Eindruck einer dreidimensionalen Verteilung der Originalschallquellen erzielt wird.

Pseudostereophonie

Selbst ein vollkommener Lautsprecher kann in physikalischer Hinsicht nicht mehr tun, als in seiner abgestrahlten Information die Schwingungen zu imitieren, die am Ort des Mikrofones vor sich gehen, d. h. dieser ideale

Lautsprecher leistet dasselbe wie ein Loch in der Mauer des Aufnahme- raumes. Obwohl der von einer solchen Öffnung durchgelassene Schall absolut frei von elektrischen und mechanischen Entstellungen ist und daher mit „Ultra-High-Fidelity“ bezeichnet werden könnte, wird dennoch der zu spät gekommene Besucher, der den Anfang des Konzertes durch den Türspalt hören mußte, aufatmen, wenn er den Konzertsaal betritt.

In der Absicht, den sogenannten „Keyhole-Effekt“²⁰, der bei der Verwendung eines einzelnen Lautsprechers empfunden wird, zu vermeiden, sind verschiedenartige Wege auf dem Gebiet der Lautsprecherkonstruktionen und -anordnungen beschritten worden. Die erzielten Erfolge bestanden darin, das Loch in der Mauer des Konzertsaaes durch Aufstellung von zwei oder mehreren gleichphasig betriebenen Lautsprechern, durch Flächen- und Linienlautsprecher^{21, 22} zu einem großen Fenster zu erweitern. Durch Verwendung von Kugellautsprechern^{23, 24, 25} läßt sich die Verbreiterung des Schallbildes bzw. Vergrößerung des Hörwinkels soweit treiben, daß man — infolge der wirksamen allseitigen Spiegelschallquellen — den Eindruck hat, das Orchester befindet sich nicht auf einer begrenzten Fläche, sondern der ganze Raumteil, in dem der Kugellautsprecher steht, wirkt als Schallquelle²⁵. In vereinfachter Form wurde vom Prinzip des Kugellautsprechers bei den Rundfunkempfangsgeräten Gebrauch gemacht, indem man in sie mehrere nach verschiedenen Richtungen abstrahlende Lautsprecher einbaute („3-D-Klang“), wobei die Seitenlautsprecher bevorzugt mittlere und hohe Frequenzen abstrahlen. Eingehende Untersuchungen über die zweckmäßige Aufstellung von Kugellautsprechern und den zweckmäßigen Abstand der Beobachter von diesen sowie über die Eignung einiger Typen von 3-D-Empfängern wurden von Kuhl und Zosel²⁶ durchgeführt. Diese Art von Pseudostereophonie ist unter dem Namen „Raumklangtechnik“ bekannt. Die Fachleute sind sich darüber klar, daß die dabei angewandte räumliche Schallabstrahlung (nach verschiedenen Richtungen) nicht identisch mit einer echten dreidimensionalen Klangwirkung ist. Da bei einer vollkommenen Raumklangwirkung der beschriebenen Art der Ton im Raum schwebt und sich nicht lokalisieren läßt, kann die Verbreiterung des Schallbildes bei der Wiedergabe punktförmiger Schallquellen, z. B. der menschlichen Stimme, recht störend wirken. Insbesondere in der Verbindung zu einem Fernsehbild entstehen hierbei Diskrepanzen zwischen der optischen und akustischen Perspektive²⁷.

In das angeschnittene Gebiet gehören auch die Versuche, zur Erzeugung eines pseudostereophonischen Effektes zwei gegenphasig nach vorn strahlende Lautsprecher zu verwenden²⁸ (Fig. 6). Während bei gleichphasigem Betrieb der in der Schallkeule des direkten Schalles sitzende Beobachter an beiden Ohren einen gleichphasigen Schalldruck erhält und den Schall von vorn kommend empfindet, hat er bei gegenphasigem Betrieb, entsprechend der Erfahrung, daß nicht konphase Schalldruckverhältnisse an den Ohren seit-

lich einfallenden Schallwellen entsprechen, das Gefühl, als ob der Schall von links oder rechts käme.

Physikalisch betrachtet spaltet sich die Richtungskeule in zwei gegenphasige Halbkeulen auf. Bewegt sich der Hörer nach links, so gerät er in den Bereich der linken Strahlungskeule. Er gewinnt den subjektiven Eindruck, daß der Schall schräg von vorn kommt. Genau in der Mitte einer seitlichen Strahlungskeule ortet er die Schallquelle wieder auf der Lautsprecherwand. Da die Strahlungskeulen sich mit zunehmender Frequenz verschiedenartig aufzupfeln, befindet sich der Beobachter für eine Frequenz im Maximum, für eine andere in einem Minimum. „Nord-Mende“ hat solche Anordnungen in einigen Geräten unter der Bezeichnung „Hi-Fi-Expander“ verwendet.

*Lauridsen*²⁹ verwendet eine Lautsprecher-Kombination, bei der ein Lautsprecher direkt auf den Zuhörer strahlt, und bei der ein zweiter Gradientenlautsprecher, der um 90° gedreht ist, mit Vorder- und Rückseite seiner Membran seitlich auf die Seitenwände des Abhörraumes strahlt. Bei diesen seitlichen Wandreflexionen in Abhörräumen erfährt der reflektierte Schall in bezug auf den direkten Schall zeitlich relativ kleine Verzögerungen.

Demgegenüber gibt es zahlreiche Verfahren, das Primärsignal noch einmal mit einer künstlich erzeugten längeren Verzögerungszeit auf den Hörer wirken zu lassen. Hierzu gehören zunächst die Versuche von *Lauridsen*²⁹, die später von *Schodder*³⁰ wiederholt wurden, dem Beobachter über Kopfhörer zunächst ein für beide Ohren konphasiges Signal darzubieten und anschließend dasselbe Signal noch einmal um 50 bis 100 ms verzögert, jedoch verschiedenphasig, am besten mit einer Phasendifferenz von 180° auf die Ohren wirken zu lassen, wodurch das akustische Gefühl erzeugt wurde, sich inmitten des Musikgeschehens zu befinden. Dieses „Einbezogensein“ in den Raum rührt daher, daß der für die verzögerte Wiedergabe eingestellte konstante Phasenunterschied eine für jede Frequenz andere Zeitdifferenz und damit subjektiv eine andere Richtung bedeutet.

Verwendet man Lautsprecher, so ist Bedingung, daß die verzögerte Information über ein zweites „raumakustisches“ Strahlersystem, getrennt vom normalen Übertragungskanal, wiedergegeben wird. Dies kann z. B. durch Anbringung diffus in den Raum strahlender Zusatzlautsprecher geschehen. Für kleine Räume hat es sich als wirkungsvoll erwiesen, eine quergestellte Säule unmittelbar hinter dem normalen nach vorn gerichteten Lautsprecher zu verwenden³¹.

Ein weiteres Beispiel dafür, aus dem primären Signal ein um etwa 50 ms verzögertes sekundäres Signal abzuleiten und dieses über einen zweiten Lautsprecher in den Raum zu strahlen, ist das in USA entwickelte „Xophonic“-Gerät^{32, 33}. Hier wird eine etwa 16 m lange akustische Verzögerungsleitung verwendet, durch die alle impulshaften Vorgänge in der Modulation frequenzunabhängig gleichartig verzögert werden und am Rohrende

ein sekundäres Signal erzeugen, das je nach Frequenzinhalt gegenüber dem primären Signal mit verschiedenartigen Phasenzuständen abgestrahlt wird. Je nach dem Durchmesser des verwendeten Rohres und der damit verbundenen Rohrdämpfung können auch mehrmalige Rückwürfe von Bedeutung sein. Der dann entstehende Pseudonachhall ist jedoch eindimensional und enthält nur die singulären Eigenfrequenzen des Rohres und nicht die Vielzahl von Eigenfrequenzen, wie sie einem Raum eigentümlich ist. Enthält die Primärinformation quasistationäre Vorgänge, müßte sich die Aufschaukelung der Energie in den singulären Eigenfrequenzen bemerkbar machen. In Anbetracht des mit einer solchen akustischen Hilfsinformation erzeugbaren nachhallähnlichen Charakters wurde der mit der Anordnung erzielte Effekt mit „concert hall effect“ bezeichnet. Es ist interessant zu erfahren, daß bei entsprechenden Vergleichsversuchen mit einer stereofonischen Zweikanal-Wiedergabe 65% der Versuchspersonen den Pseudoraumklang des Xophonic-Gerätes der echten Stereophonie vorgezogen haben sollen. In neuerer Zeit benutzt auch die Firma Blaupunkt bei ihrer Truhe New York eine ähnliche geeignet dimensionierte Anordnung (Fig. 7 und 8) wie das amerikanische Gerät unter dem Namen „Concerthallregister“³⁴.

Das bekannteste Verfahren zur Erzeugung eines verzögerten Signals ist das mittels einer magnetoelektrischen Schallaufzeichnung, bei der mit einem gegenüber dem normalen Wiedergabekopf versetzten zweiten Wiedergabekopf eine in bezug auf das Primärsignal zeitlich verschobene Abtastung erfolgt, wie es z. B. mit dem „Verzögerungsgrad“^{35, 36} geschehen kann. Mit einer Anlage, die mit zwei mechanisch gekuppelten Magnettonmaschinen arbeitet, wurden in neuerer Zeit im Experimentalstudio Gravesano eingehende Untersuchungen³⁷ durchgeführt, bei denen monaurale Aufnahmen mittels Laufzeitverschiebungen zwischen zwei Kanälen pseudostereofonisch wiedergegeben wurden. Hierbei konnte ein „Raumton“ erzeugt werden, der diesem Begriff weit mehr entsprach als dies bei sonst unter ähnlichem Namen publizierten Methoden der Fall ist.

Bei früheren ähnlichen Versuchen³⁸ hatte es sich gezeigt, daß häufig Klarheit bzw. Deutlichkeit und Raumeindruck bei der Verwendung von verzögertem Nachhall einander entgegenstehen. Hierbei wurden Verzögerungszeiten von 25, 35 und 50 ms angesetzt und vornehmlich ein Pegelverhältnis des Nachhalls zum direkten Schall von -10 dB verwendet. Mit einer Sicherheit von 10 zu 1 wurden die Aufnahmen mit verzögertem Nachhall einsatz dem Eindruck eines größeren Raumes zugeordnet, während mit einem Stimmenverhältnis von 3,5 zu 1 der direkte Anschluß des Nachhalls an den direkten Schall wegen der besseren Deutlichkeit vorgezogen wurde. Demgegenüber vermittelte die Hinzufügung von einzelnen Reflexionen (Wiederholung des Primärsignals) zwischen dem direkten Schall und dem statistischen Nachhall eine bessere Synthese zwischen Deutlichkeit und Raumeindruck.

Alle unter der Bezeichnung „pseudostereofonische Wiedergabe“ bekannten Verfahren laufen letzten Endes darauf hinaus, entweder dem abzu-strahlenden Schallbild oder dem im Wiedergaberaum entstehenden Schallfeld künstlich zusätzliche räumliche Informationen beizugeben. Die wohl interessantesten Ergebnisse in dieser Richtung sind im Experimentalstudio Gravesano zu verzeichnen, wo durch die Arbeiten von *Scherchen* und seinen Mitarbeitern ein Gerät unter dem Namen „Stereophoner“, oder auch „Spektrophon“ genannt, entstand, das in ästhetisch befriedigender Weise gestattet, monaurale Aufnahmen von Orchesterwerken räumlich aufzulösen, so daß für den Hörer die Illusion eines Klangkörpers mit Querverteilung und Tiefenstaffelung entsteht³⁹. Unter bewußtem Verzicht, die physikalischen Vorgänge des binauralen Hörens möglichst getreu nachzubilden, hat sich *Scherchen* zum Ziel gesetzt, ein räumliches Klangbild, unter Mithilfe physiologisch-psychologischer Eigenschaften unseres Gehörsinns, zu erzeugen. Wenn man von der Abbildung des Ping-Pong-Spiels und vorbeifahrender Eisenbahnzüge absieht, soll der Stereophoner in Anbetracht der mit größter Klarheit und Präsenz wiedergegebenen Sprache auch zur Verbesserung der Illusion bei Hörspielen geeignet sein.

Kopfbezügliche Stereophonie

Die erste Anlage dieser Art war bereits 1881 von *Ader* und *Hospitalier* anlässlich der Internationalen Elektrizitätsausstellung in Paris gezeigt worden. Auf der Bühne der Großen Oper waren zwei getrennte Mikrofone aufgestellt. Trotz der in Anbetracht der seinerzeit verwendeten primitiven Apparatur recht schlechten Übertragung konnten die Ausstellungsbesucher in einem entfernten Raum die Stimmen der Sänger und die Instrumente der Richtung nach unterscheiden.

Heutzutage verwendet man einen künstlichen Ersatzkopf mit eingebauten Mikrofonen. Da der Ersatzkopf im Raum feststeht, erscheint dem Hörer der scheinbare Ort der Schallquelle immer unter dem gleichen Gesichtswinkel und im gleichen Abstand. Bewegt der Hörer seinen Kopf in verschiedene Richtungen, so wandert das Schallbild um die gleiche Richtungsänderung mit: es dreht sich gewissermaßen die akustische Umwelt mit. Abgesehen von diesem Nachteil ist die kopfbezogene Stereophonie vielleicht doch die übersichtlichste und in technischer Hinsicht einfachste Form der Stereophonie überhaupt. Sie vermittelt einen ähnlichen Hörwinkel, eine ähnliche stereofone Auflösung und Einbeziehung in den Raum, insgesamt also eine ähnliche Hörperspektive, wie sie der Hörer empfinden würde, wenn er sich an der Stelle des Ersatzkopfes befände.

Raumbezügliche Stereophonie

Es war das Bedürfnis, stereofonische Anlagen mit Lautsprechern zu schaffen, bei denen im Gegensatz zum kopfbezüglichen Verfahren die Beziehungen der fiktiven Schallquelle zum Raum, auch wenn der Hörer sich relativ

frei im Raum bewegt, erhalten bleiben. Die allgemeine Form einer solchen Anordnung ist in Fig. 9 dargestellt⁴⁰. Die Lautsprecher $S_1' S_2' S_3' S_4'$ usw. vertreten hierbei die im Aufnahme-raum vorhandenen Schallquellen S_1 bis S_4 usw. Der Zuhörer lokalisiert mittels seiner beiden Ohren den Ort der Schallquellen im Wiedergaberaum an den Stellen $S_1' - S_4'$, wo sich die tatsächlichen Schallquellen in der gleichen räumlichen Anordnung zueinander zu befinden scheinen. Theoretisch müßten für einwandfreie Wiedergabe mit diesem System die Lautsprecher dieselben Richtwirkungen wie die entsprechenden Instrumente haben. Eine raumbezügliche Übertragung nach dieser Art würde sich praktisch nur bei festen Schallquellen verwirklichen lassen. Um beliebige in einem Aufnahme-raum sich ergebende Schallvorgänge zu übertragen, hat *Fletcher*⁴¹ seinerzeit die Betrachtung zweier durchlässiger Hilfsebenen vorgeschlagen (Fig. 10), die zwischen Schallquelle und Zuhörer liegen. Registriert man alle Schallvorgänge in der Ebene 1 nach Frequenz, Intensität und Einfallrichtung und sorgt man dafür, daß nach der Übertragung in den entsprechenden Punkten der Ebene 2 die gleichen Schallvorgänge erscheinen, und entspricht der Wiedergaberaum in seinen geometrischen und akustischen Eigenschaften weitgehend dem Aufnahme-raum, so würde der Zuhörer im Raum 2 tatsächlich eine richtige Lokalisierung durchführen können. Dies wäre jedoch nur gewährleistet, wenn die Ebene 1 mit einer unendlichen Zahl von kleinen Schallempfängern und die Ebene 2 mit einer ebenfalls unendlich großen Zahl von kleinen Schallsendern ausgerüstet wäre. Gegenüber der ersten Anordnung sind die Schallwandler nicht mehr räumlich, sondern bereits auf Ebenen verteilt. Der nächste Schritt der Vereinfachung war, daß man sich bei der Verteilung der Schallempfänger auf eine Aufstellung längs einer Geraden in der waagerechten Richtung beschränkte, da sich die zu übertragenden Schallquellen im allgemeinen in einer waagerechten Ebene befinden.

Dieser Schritt führt zu der von *Warncke*⁴⁰ vorgeschlagenen Lösung (Fig. 11), eine endliche Zahl von n Mikrofonen zu verwenden, die mit einer entsprechenden Anzahl Lautsprecher verbunden sind. Die Mikrofone haben eine stark ausgeprägte Richtwirkung, so daß die Aufnahmebühne in n Zonen aufgeteilt wird. Wandert ein Schallereignis quer über die Bühne, so springt theoretisch das Schallereignis von Lautsprecher zu Lautsprecher. Durch geeignete Überlappung der Richtwirkungen der Mikrofone kann praktisch dieses Springen vermieden werden. Die Größe der Zahl n würde das „Auflösungsvermögen“ einer solchen Anlage kennzeichnen. Alle diese beschriebenen Anordnungen beziehen sich, wie schon oben gesagt, auf die Voraussetzung, daß Aufnahme-raum und Wiedergaberaum geometrisch und akustisch gleichartig sind.

Die Entwicklung lief nun dahin, den am meisten interessierenden Fall, nämlich dem Hörer im Wohnraum eine stereofonische Darbietung zu vermitteln, zu untersuchen. Hierbei ergab sich die Tatsache, daß bei der Redu-

zierung der Kanäle und der Projektion der akustischen Verhältnisse in einem volumenmäßig und akustisch ganz anderen Raum der scheinbare Ort der Schallquelle im Wiedergaberaum abhängig wird von dem Standort des Hörers im Wiedergaberaum und der hier angewandten Lautsprecherertechnik. Von dem gegenseitigen Abstand der stereofonisch wirksamen, oberhalb ≈ 300 Hz abstrahlenden Lautsprecher (ein Tieftonlautsprecher wird für beide Kanäle als gemeinsam vorausgesetzt) hängt die wirksame Basis der stereofonischen Wiedergabe ab. Am besten wird der stereofonische Eindruck in der Mittelachse zwischen den beiden Lautsprechern sein. Bewegt man sich aus der Mittelachse heraus, so springt sehr bald das Schallgeschehen aus der Mitte heraus in die Seitenlautsprecher. Verbindet man die Punkte dieses Höreindrucks, wie sie sich für verschiedene Abstände des Hörers von der Abstrahlbasis ergeben, miteinander, so erhält man zwei Hyperbeln (Fig. 12). Der Abstand der Hyperbelzweige öffnet sich von 25 cm zwischen den beiden Lautsprechern auf 50 cm bei einem Hörabstand von fünf Metern. Wenn man den Aufbau in natürlichen Räumen mit reflektierenden Wänden durchführt, so wird diese Fläche durch die Reflexionen verbreitert⁴². Für größere Räume schlagen *Kuhl* und *Zosel*⁴³ (Fig. 13) die Verwendung mehrerer Lautsprecher je Kanal vor.

Auf Grund neuerer Untersuchungen empfiehlt *Kuhl*⁴⁴, für Regieräume die linke und rechte Lautsprecheranordnung für den gesamten Frequenzbereich auszulegen und etwa in der Richtung der Raumdiagonalen strahlen zu lassen, während in der Mitte der Abstrahlbasis nur die Mittel-Hochton-Anordnungen beider Kanäle, jede etwa im Winkel von 90° zu den Abstrahlrichtungen der zugehörigen Hauptlautsprecher arbeiten sollen (Fig. 14). Die Breite der Zone richtiger Lokalisierung kann durch Einstellen des Pegels der mittleren Systeme, z. B. mittels eines Potentiometers erreicht werden.

Die stereofonischen Aufnahmeverfahren unter Berücksichtigung ihrer Kompatibilität

Unter Kompatibilität versteht man die Verträglichkeit der neuen stereofonen Systeme mit den alten monauralen Übertragungssystemen. Für den Rundfunkhörer bedeutet es, daß er eine stereofonische Sendung auch mit einem Empfänger üblicher Bauart monophon hören kann, ohne daß eine Qualitätsverschlechterung gegenüber der einkanaligen Übertragungstechnik eintritt.

Die bekanntesten Methoden der stereofonischen Aufnahmetechnik sind die Verwendung des „Kunstkopfes“ oder der „distanzierten Mikrophone“ (A-B-Verfahren). Bei der ersten Methode sind Laufzeit- und Intensitätsunterschiede wirksam, bei der zweiten Methode können je nach Abstand und Richteigenschaften der Mikrofone ebenfalls Laufzeit- und Intensitätsunterschiede wirksam werden. Beide Verfahren wurden insbesondere beim

holländischen Rundfunk, wo seit 1946 stereofonische Sendungen⁴⁵ vorwiegend über den Drahtfunk stattfinden, angewendet. Sie gewährleisten keine Kompatibilität, da jeder Kanal für sich, als auch beide Kanäle additiv zu einem Kanal zusammengefaßt, ein unbefriedigendes monaurales Bild ergeben.

Wenngleich man für stereofonische Wiedergabe von Solisten mit dem „Kunstkopf“ gute Erfolge erzielen kann, verschwinden bei Anwendung desselben vor einem breit auseinandergezogenen Klangkörper jedoch die linke und rechte Seite zu stark gegenüber den Eindrücken aus der Mitte.

Das Verfahren, mit auseinandergezogenen Mikrofonen in einer gegenüber dem Ohrabstand großen Entfernung zu arbeiten, birgt die Gefahr in sich, daß der Eindruck der Mehrräumigkeit entsteht. Weiterhin besteht die Möglichkeit, daß der Schallvorgang bei nur geringen Verschiebungen der Schallquelle zwischen den Lautsprechern hin- und herzuspringen scheint, so daß für den Hörer ein akustisches Loch in der Mitte der Abstrahlbasis entsteht. Durch Verwendung eines dritten Mikrofons, das in der räumlichen Mitte aufgestellt ist, kann man diesen Mangel verringern, indem man dieses Mikrofon in beide Kanäle in bestimmtem Verhältnis zu den Informationen der seitlichen Mikrofone einspeist.

Berücksichtigt man, daß man qualitative Richtungsempfindungen durch Intensitätsunterschiede allein erzeugen kann, so bieten sich kompatible Verfahren durch die Verwendung von Richtmikrofonen an, die sich dicht nebeneinander oder übereinander am gleichen Raumpunkt befinden. Eine Möglichkeit ist z. B. die Methode der gekreuzten Achter-Mikrofone, wobei jedes Mikrofon einer Hälfte des Klangkörpers zugewendet ist. Für eine kompatible Betriebsweise dieser sogenannten „X-Y-Stereophonie“ ist es zweckmäßig, vor der Übertragung zunächst über einen Differentialübertrager eine elektrische Addition bzw. Subtraktion durchzuführen. Dadurch erhält man in den beiden Kanälen die Informationen $X + Y$ und $X - Y$. Addiert man bzw. subtrahiert man beim Hörer durch geeignete Einrichtungen die Informationen $X + Y$ und $X - Y$ noch einmal, so erhält man die gewünschten stereofonen Informationen ($2X$ und $2Y$). In ähnlicher Weise lassen sich Nierenmikrofone verwenden, deren Hauptachsen in einem beliebigen Winkel zueinander stehen.

Anstatt die Summe $X + Y$ und Differenz $X - Y$ elektrisch zu bilden, ist es möglich, diese Größen durch bestimmte Mikrofonanordnungen direkt zu gewinnen. Dieses Verfahren wurde von *Lauridsen* unter dem Namen „M-S-System“ ($M = X + Y$, $S = X - Y$) vorgeschlagen^{31, 46}. Hierbei wird z. B. die Kombination einer Niere mit einer Acht verwendet, wobei die Mikrofone so angeordnet sind, daß die Hauptempfangsrichtung der Niere auf das Schallgeschehen zu gerichtet ist, während die Hauptempfangsrichtung der Acht senkrecht dazu liegt. Die Modulation des M-Kanals stellt eine vollwertige Einkanalmodulation dar. Der S-Kanal für sich allein ist

nicht verwendbar. Durch Summen- und Differenzbildung der Spannungen $M + S$ und $M - S$ erhält man die stereofonischen Modulationen $2X$ und $2Y$. Mittels dieser Maßnahmen entstehen Richtwirkungen, die annähernd den Informationen aus zwei gekreuzten Nieren entsprechen und vollkommen spiegelbildlich zueinander sind (Fig. 15)⁴⁷. Nach dem Lauridsen-Verfahren kann man die Addition und Subtraktion auf der Aufnahme- und Übertragungsseite einsparen. In ähnlicher Weise lassen sich dafür auch die Kombinationen einer Kugel und einer waagerechten Acht oder aus zwei senkrecht gekreuzten Achten verwenden. Die einander äquivalenten Kombinationen der M-S- und X-Y-Technik sind in Fig. 16 dargestellt. Man erkennt, daß die beiden Gattungen bei idealen für alle Frequenzen geltenden Charakteristiken physikalisch gleichwertig sind.

Aufbauend auf der MS-Technik nach Lauridsen hat Bertram⁴⁸ ein Verfahren ausgearbeitet, bei dem der für eine kontinuierliche stereofonische Abbildung ausnutzbare „Aufnahmewinkel“ (Fig. 17) durch Regelung der Verstärkung des S-Signals relativ zum M-Signal mit Hilfe des Basisreglers B beliebig gedehnt und eingeengt werden kann. Außerdem kann ein aus dem M-Signal abgeleitetes, über einen Richtungsregler R regelbares Richtungssignal in den S-Kanal eingespeist werden und dadurch der scheinbare Ort des Klangbildes auf einem Halbkreis verschoben werden. Der Richtungsregler hat einen der Charakteristik eines Achtermikrofons nachgebildeten Regelverlauf und gestattet, die Bewegung einer Schallquelle vor dem Mikrofon zu imitieren. Es handelt sich hierbei um eine pseudostereofonische Maßnahme, die etwa der „Knüppelstereofonie“ entspricht.

Durch die Arbeiten von Bertram wurde die Grundkonzeption für ein Stereomischpult auf der Grundlage des MS-Verfahrens gegeben.

Die Situation auf der Rundfunkstudioseite

Im Gegensatz zur Schallplatte, wo von vornherein erwartet werden darf, daß der Interessent für eine stereofone Aufzeichnung diese auch mit einem stereofonischen Gerät abspielen wird, muß der Rundfunk die Interessen der in der Majorität befindlichen monauralen Empfänger berücksichtigen. Die bei der Schallplatte sich anbahnende Arbeitsweise⁴⁹, aus drei aufgetrennten Teilmodulationen durch zwei zeitlich getrennte Nachbearbeitungsvorgänge zu einer einkanaligen und einer zweikanaligen Fassung zu gelangen, ist im Rundfunk unmöglich, da sie erstens nicht für Live-Sendungen anwendbar ist, und zweitens, weil die hochfrequent zu übertragenden Informationen, sei es das M- und S-Signal oder das X- und Y-Signal wegen der Forderung $M = X + Y$ und $S = X - Y$ nicht voneinander unabhängig sein können.

Für ein kompatibles System ergeben sich einige weitere wesentliche Fragen, die geklärt werden müssen.

1. Ist im Rahmen des MS-Systems mit einem Nierenmikrofon für den M-Kanal überhaupt eine optimale monophone Qualität möglich? Man beachte, daß gerade zur Vervollkommenung der monauralen Technik in hervorragendem Maße hochwertigste Kugelmikrofone Verwendung finden, andererseits aber ein Nierenmikrofon als M-Mikrofon zur Erzielung geeigneter Aufnahmewinkel zwischen der X- und Y-Information besser geeignet ist.
2. Ist nicht für stereofone Wirkungen überhaupt eine grundsätzlich andere Mikrofonaufstellung zum Klangkörper erforderlich, so daß aus diesem Grunde die Qualität des monauralen Kanals wesentlich schlechter sein würde als beim echten monauralen Verfahren?
3. Müßten mit Rücksicht auf stereofone Wirkungen die verwendeten Rundfunkproduktionssäle in akustischer Hinsicht nicht anders ausgelegt werden? Es ist bekannt, daß sie zur Zeit mit Rücksicht auf optimale monophone Wirkungen auf größere Nachhallzeiten und auf gute Diffusität und, mit Rücksicht auf einen „pseudostereofonischen Effekt“, auf einen spezifischen Nachhallzeitverlauf ausgelegt sind⁵⁰. Andererseits ist bekannt, daß stereofone Wirkungen sich besonders gut aus gedämpfteren Räumen übertragen lassen. Denn Nachhall im Raum und Reflexionen in der Umgebung des Klangkörpers vermindern auch bei natürlichem Hören den stereofonen Effekt; das heißt, ist der Raum für stereofone Effekte optimal ausgelegt, dann wird er es nicht ohne weiteres für die monaurale Technik sein oder umgekehrt.
4. Ist eine stereofone Effektaufnahme, wenn sie monaural wiedergegeben wird, überhaupt tragbar?

Die Situation auf der Sendeseite

Um zu einer kompatiblen Rundfunkübertragung zu kommen, wird man sich zweckmäßigerweise der M-S-Technik bedienen. Rundfunkteilnehmer ohne Stereofonieeinrichtungen können dann den Sender, der das M-Signal ausstrahlt, empfangen. Stereofoniehörer benötigen zwei Empfangsteile und einen Differentialübertrager, um aus den M-S-Signalen die X-Y-Signale zu bilden. Aus den M-S-Signalen lassen sich jedoch nur dann die X-Y-Signale einwandfrei zurückgewinnen, wenn die Phasengänge der beiden Sender und Empfänger einander gleich sind⁵¹.

Versuchsweise sind sämtliche denkbaren Kombinationen von zwei getrennten Sendern irgendwo und irgendwann schon einmal angewandt worden⁵², z. B.

AM/AM: Mittelwelle/Mittelwelle
 AM/FM: Mittelwelle/UKW
 FM/FM: UKW/UKW
 FM/FM: UKW/Fernsehtonsender
 FM/AM: Fernsehtonsender/Mittelwelle.

**Wichtige erste Veröffentlichungen der
Westminster Recordings Ltd.**

MOZART Requiem
BACH h-moll Messe
HÄNDEL Messias

S T E R E O

Staatsorchester Wien
Akademiechor Wien
Erste Solisten
Dirigent: Hermann Scherchen

**Important first releases of the
Westminster Recordings Inc.**

MOZART Requiem
BACH Mass in B minor
HÄNDEL Messiah

S T E R E O

Vienna State Orchestra
Vienna Academy Choir
Top Soloists
Conducted by Hermann Scherchen

Gegen eine solche Methode spricht jedoch der doppelte Bedarf an Frequenzraum.

Im Brennpunkt des Interesses stehen indessen die seit mehreren Jahren bekannten Multiplexverfahren für einen einzigen Sender, die keine zusätzlichen Sendekanäle benötigen. Bei AM-Übertragungen besteht beispielsweise die Möglichkeit, das untere Seitenband zur Übertragung des X -Signals und das obere für das Y -Signal heranzuziehen. Der normale Empfänger bildet sich das M -Signal durch Summation beider Seitenbänder^{51, 53}. Weiterhin ist für AM-Übertragungen eine kombinierte Amplituden-Phasenmodulation möglich, bei der beispielsweise das M -Signal den Sender amplitudenmoduliert und das S -Signal eine Phasenmodulation bewirkt, die im normalen Empfänger unhörbar bleibt⁵¹. Der naheliegende Weg, eine gemischte FM-AM-Modulation zu verwenden, wurde mathematisch-physikalisch von *Jubisch* und *Seidel*⁵⁴ eingehend untersucht. Sie schlagen ein Verfahren vor, bei dem im zweiten HF-Kanal die volle zweite NF-Information (also Y im Gegensatz zu $S = X - Y$) übertragen wird. Dieses Verfahren ist nicht ohne weiteres kompatibel, da der normale Empfänger nur das über AM laufende Signal verarbeiten könnte. Dagegen scheint es für die Ausstrahlung von zwei getrennten unabhängigen Programmen gute Voraussetzungen zu bieten.

Da in Deutschland die Qualitätsrundfunkversorgung auch in der Perspektive auf Ultrakurzwellen stattfinden wird, bieten sich für eine echte Stereovertragung insbesondere zwei Verfahren⁵⁵ an:

1. Das Armstrongverfahren^{55, 56} (auch FM-Multiplexverfahren genannt) mit den daraus ableitbaren Abarten (Griese- und Crosby-Verfahren)^{51, 52, 57, 58},
2. das Puls-Amplituden-Modulations / Frequenz-Modulations-Verfahren (auch PAM/FM-Verfahren genannt)⁵⁹.

Armstrong betrieb bereits im Jahre 1934 einen Sender im 40-MHz-Bereich mit vier Sendefolgen (Rundfunkprogramm, Bildtelegrafie, Synchronisierzeichen dafür, Telegrafie). An eine Übertragung von Stereophonie hat er damals kaum gedacht, denn aus seinen Arbeitsberichten geht hervor, daß er der Übersprechdämpfung zwischen den Kanälen die größte Aufmerksamkeit schenkte, wobei er eine Dämpfung der Kreuzmodulation auf -50 dB erreichte. Demgegenüber ist bei Stereophonie eine Übersprechdämpfung von 20 dB ausreichend.

Beim FM-Multiplex für Stereophonie wird ein Hilfsträger, der z. B. eine Frequenz von 50 kHz hat, mit dem S -Signal frequenzmoduliert. Der Hauptträger wird mit dem M -Signal und dem Hilfsträger moduliert. Der letztere ist beim normalen einkanaligen Empfang nicht wahrnehmbar. Rich-

tet man im UKW-Empfänger einen zweiten Weg ein, der den Hilfsträger herausfiltert und demoduliert, so erhält man das für die stereofone Wiedergabe erforderliche S-Signal.

Beim PAM/FM-Verfahren werden zwei Pulsfolgen mit dem X- bzw. Y-Signal moduliert, wobei die Pulsfolgefrequenz etwa 30 kHz beträgt. Durch zeitliche Ineinanderschachtelung der Pulse wird abwechselnd die X- und die Y-Information übertragen. Der monaurale Empfänger verarbeitet ein Signal vom Charakter $M = X + Y$. Beim Stereoempfänger werden mittels einer durch den 30 kHz-Träger gesteuerten Schalteinrichtung die Pulse synchron mit der Senderseite jeweils dem einen oder anderen Kanal zugeleitet, so daß die Informationen X und Y getrennt erhalten werden. Bemerkenswert ist bei diesem Verfahren, daß die beiden Übertragungskanäle in jeder Beziehung einander gleichwertig sind. Übertragungsstörungen durch Geräusch, Schwund und dergleichen betreffen beide Signale in gleicher Weise.

Ergänzend zu diesen beiden zuletzt beschriebenen echten Stereo-Übertragungsverfahren sei noch ein Verfahren erwähnt, das mit unschwelligen Pilotfrequenzen⁵² ohne echte Doppelmodulation arbeitet. Es handelt sich um einen von Adams, Enkel und Meyer-Eppler ausgearbeiteten Vorschlag, der darin besteht, über den Hauptkanal das monaurale Klangbild und über einen oder mehrere schmalbandige Steuerkanäle, die an der oberen Grenze des NF-Übertragungsbereichs untergebracht sind, die Richtungsinformation zu übertragen. Über einen Ringtransformator werden zwei Pilotfrequenzen von etwa 14,5 und 14,7 kHz mit den Hüllkurveninformationen, die durch Gleichrichtung der Mikrofonspannungen gewonnen werden, amplitudengesteuert. Auf der Empfängerseite werden durch die Pilotfrequenzen Regelverstärker beeinflusst, so daß die Stereolautsprecher in ihrer Lautstärke entsprechend gesteuert werden. Die Pegel der sinusförmigen Pilotfrequenzen sind so bemessen, daß sie innerhalb des Störsignals der Übertragungskette liegen und daher im monauralen Nutzsignal nicht hörbar sind. Durch Einschalten von Bandfiltern von 100 Hz Breite läßt sich der Störpegel um 20 dB herabsetzen, so daß die Pilotfrequenzen nunmehr den Störpegel etwa um das Zehnfache überragen. Dadurch können sie am Ende der Übertragungskette einwandfrei getrennt, verstärkt und als Träger der Richtungsinformationen benutzt werden. Es hat den Anschein, daß dieses Verfahren nur für reine Intensitäts-Stereophonie (X-Y) und nicht für Laufzeit-Stereophonie (A-B) brauchbar ist. Außerdem können nur zeitlich nacheinander ablaufende Schallereignisse eindeutig lokalisiert werden. Bei gleichzeitigen Schallereignissen ist es daher notwendig, den beiden Mikrofonspannungen von vornherein passende Laufzeitunterschiede zu geben, so daß immer ein „Nacheinander“ herrscht. Es wird hierfür eine variable Zeitverschiebung von 0 bis 30 ms zwischen beiden Aufnahmekanälen vorgeschlagen.

Außer dem Gesichtspunkt, wonach die beiden Stereoinformationen gemeinsam über einen Rundfunkkanal ausgestrahlt werden sollten, und außer

der wichtigen Frage der Kompatibilität und Rekompatibilität, nämlich, daß der stereofone Empfänger auch monophone Sendungen empfangen kann, sind an ein geeignetes Stereo-Rundfunk-System noch weitere Forderungen zu stellen, wie sie den von den Rundfunkgesellschaften der DBR^{53, 59} aufgestellten entsprechen:

1. Der festgelegte Abstand der UKW-Sender von 300 kHz darf nicht beeinträchtigt werden.
2. Die Umstellung von Rundfunksendern auf Stereobetrieb soll bei monophonem wie bei stereophonem Empfang keine Beeinträchtigung der Versorgungsgebiete zur Folge haben.
3. Der Stereobetrieb darf keine Störungen anderer Rundfunksender verursachen.
4. Der zusätzliche Aufwand bei Stereofonieempfängern soll klein sein.

Vergleich zwischen echter und wiedergegebener Musik

Um objektiv zu beurteilen, inwieweit es mit stereofonischen Anlagen möglich ist, ein Originalorchester zu imitieren, wurden vom Philips-Laboratorium Vergleiche zwischen stereophonisch aufgenommenen Musikstücken und den gleichen vom Orchester original gespielten Stücken durchgeführt⁶⁰. Der Einfluß einer unterschiedlichen Raumakustik war dadurch ausgeschaltet, daß echte und wiedergegebene Musik in demselben Saal dargeboten wurde. Ein kurzes Musikstück (15 bis 30 s) wurde abwechselnd, aber in willkürlicher Reihenfolge hinter einem dünnen, undurchsichtigen Vorhang einmal in stereofonischer Wiedergabe und das andere Mal direkt von den Musikern zu Gehör gebracht. Aus den mit 300 Personen durchgeführten Vergleichen ergab sich, daß die Wahrscheinlichkeit für eine beliebig ausgewählte Versuchsperson, den Unterschied zwischen der wiedergegebenen und der echten Musik festzustellen, gleich 0,5 war und damit ebenso groß die Wahrscheinlichkeit, keinen Unterschied zu hören.

In der gleichen Arbeit wird über Demonstrationen mit echter und wiedergegebener Musik in einem Saal in Amsterdam und einem Saal in Eindhoven berichtet, bei denen zur Wiedergabe der aufgenommenen Musik keine stereofonische Anlage verwendet wurde. Es waren lediglich zwei Lautsprecherkombinationen mit einem Frequenzbereich von 30 bis 20 000 Hz in Betrieb, die durch bestimmte Anordnung einen räumlichen Eindruck vermittelten. Bei bestimmten Stücken wurden direkte Musik und Reproduktionen gemischt, wie zum Beispiel beim vierhändigen Spiel, bei dem eine Partie vorher aufgenommen worden war und die andere während der Wiedergabe mitgespielt wurde. In gleicher Weise wurde ein Abschiedsstück demonstriert, das so aufgenommen war, daß die Musiker das Podium nacheinander verlassen konnten, während die Musik ungestört durch die Reproduktion weiterging. Dies geschah nicht unmittelbar, nachdem die entspre-

chende Partie von der Wiedergabe übernommen worden war, sondern erst einige Takte später, während der die Musiker Scheinbewegungen ausführten. Es war für das Publikum fast unmöglich, den Augenblick der Übernahme zu bestimmen. Da nicht stereofonisch wiedergegeben wurde, gaben die verschiedenen Richtungen, aus denen die Klänge der Musikinstrumente bzw. der Lautsprecher das Publikum erreichten, einen gewissen Hinweis. Dieser Umstand war vor allem in der vorderen Hälfte des Saales nicht zu vernachlässigen. Beim Kontrabaß war die Anzahl der Fehler am größten, nämlich 150. Nur 18 haben die Reproduktion als solche erkannt. Dieses Resultat war nicht zu erwarten, da durch die Einschwingvorgänge Richtungsunterschiede zwischen dem Original und den Lautsprecherreproduktionen hätten empfunden werden müssen. Beim Becken und beim Jazzbesen wurden 44 Fehler gemacht, obwohl der Richtungseffekt der Originalinstrumente sehr deutlich war. Nur 3 der 130 Personen gaben einen völlig fehlerlosen Fragebogen ab. Bemerkenswert ist, daß zwischen den Urteilen von Technikern und Nichttechnikern kein nennenswerter Unterschied festgestellt werden konnte.

Aus diesen Versuchen kann man ableiten, daß nicht unbedingt eine stereofonische Wiedergabe erforderlich ist, um eine subjektive Empfindungsähnlichkeit zwischen Original und Reproduktion zu erzielen. Es müssen noch andere Ursachen vorhanden sein, die für die Ähnlichkeit zwischen Original und Reproduktion entscheidend sind. Berücksichtigt man, daß bei diesen Demonstrationen der Raum für Original und Reproduktion der gleiche war, so kommt man zu dem Schluß, daß dieser ähnliche Schallfeldzustand eine Hauptvoraussetzung für eine ähnliche subjektive Empfindung zwischen Original und Wiedergabe ist. Dieser Schluß steht in Übereinstimmung mit der Erfahrungstatsache, daß mit zunehmender Entfernung vom Orchester der stereofonische Effekt abnimmt. Während er in den ersten Reihen beachtlich ist, ist er im hinteren Teil des Saales kaum merklich. Vor dem Orchester sind aber in akustisch-ästhetischer Hinsicht die schlechtesten, im hinteren Saalteil die besseren Plätze. Das führt zu der Auffassung, daß die Stereophonie im Sinne einer Links-Rechts-Ortung zumindest bei einem Konzert kaum der entscheidende Faktor für ein optimales Miterleben ist.

Der Schallfeldzustand in Räumen

Die Verteilung der energiereichen Schallrückwürfe in Sälen

Unter diesem Thema gibt eine Arbeit von Schodder⁵⁸ Auskunft. Es ist bekannt, daß die subjektive Wirkung spezieller Rückwurf Folgen von Einfluß auf die Hörsamkeit ist. Aus diesem Grunde können zwei Räume gleicher Nachhallzeit sich in ihrer Hörsamkeit weitgehend unterscheiden. Ebenso kann an zwei verschiedenen Plätzen des gleichen Raumes, an denen

die Nachhallzeit im allgemeinen gleich ist, die Hörsamkeit verschieden sein.

Für einige Konzertsäle, Theater und Rundfunkstudios wurde die Folge der Schallrückwürfe an vielen Plätzen oszillografisch aufgezeichnet. Die Oszillogramme wurden nach Anzahl, Laufzeitdifferenzen und Intensitäten der Rückwürfe in drei Intensitätsbereichen in bezug auf den Primärschall ausgewertet, wobei die Intensitätsbereiche ≥ -10 dB, ≥ -6 dB und ≥ -3 dB gegenüber dem Primärschall zugrundegelegt wurden. Fig. 18 zeigt ein solches Oszillogramm. Wie die Untersuchungen von Schodder bestätigten, war die mittlere Zahl der energiereicheren Rückwürfe je Platz für verschiedene Säle und Saalteile unterschiedlich. In den Rängen ist sie größer als im Parkett; in der Nähe der Schallquelle ist sie klein. Sie wächst nach den Wänden zu, besonders nach hinten. Im übrigen kann sie durch reflektierende Flächen in der Nähe des Orchesters und durch Schallspiegel für die verschiedenen Plätze beeinflusst werden. Da die unbeliebte Hörsamkeit in den ersten Reihen von Konzertsälen zu einem wesentlichen Teil auf die geringen dort einfallenden Rückwürfe, die Bevorzugung der Rangplätze auf eine große durchschnittliche Anzahl der Rückwürfe je Platz und auf die größeren mittleren Intensitäten der Rückwürfe zurückzuführen ist, erscheint es gerechtfertigt, sich aus dem Untersuchungsmaterial der genannten Arbeit die für Ränge bzw. Balkone gefundenen Werte anzusehen.

Von vier Konzertsälen wurden als Mittelwert für den 10 dB-Bereich 20 Rückwürfe ermittelt. Davon entfielen 13 auf den 6 dB- und davon 7 auf den 3 dB-Bereich. Nach den Laufzeitermittlungen folgen die 20 Reflexionen des 10 dB-Bereiches innerhalb von 70 ms, die 13 Reflexionen des 6 dB-Bereiches innerhalb von 40 bis 45 ms und die 7 Reflexionen des 3 dB-Bereiches innerhalb von 30 ms dem Primärschall, so daß sich für den Fall eines optimalen Platzes die in Fig. 19 dargestellten Verhältnisse ergeben.

Im Rahmen der genannten Arbeit wurden beiläufig üblicherweise benützte Mikrofonorte untersucht. Am Mikrofon traf im 3 dB-Bereich höchstens ein Rückwurf ein, in sechs von elf untersuchten Fällen jedoch überhaupt keiner. Die maximale Laufzeit in den fünf Fällen, wo innerhalb des 3 dB-Bereichs ein Rückwurf registriert wurde, betrug 4 ms. Entsprechend waren die Maximalzahlen für Rückwürfe des 6 dB-Bereichs zwei und für die des 10 dB-Bereichs sechs. Aus diesen Versuchen ging klar hervor, daß die Tonmeister die Mikrofone so aufstellten, daß der Primärschall für impulsartige Vorgänge stark überwiegt. Die intensitätsreichen Rückwürfe im 3 dB-Bereich folgten verhältnismäßig schnell dem direkten Schall.

Das D/R-Verhältnis in Räumen

Das D/R-Verhältnis ist das Energieverhältnis von direktem zu reflektiertem Schall an einem bestimmten Raumpunkt und kann als Maß für die Einbeziehung des Hörers in den Raum in einem entsprechenden Abstand zur Schallquelle gewertet werden. Dieser Energiequotient nimmt für statio-

näre Vorgänge mit kugelförmiger Wellenausbreitung nach der statistischen Nachhalltheorie angenähert den Wert $\frac{10^{-2} V}{\pi r^2 T}$ an, wo r den Abstand des

Beobachters von der Schallquelle, V das Volumen und T die Nachhallzeit des Raumes bedeuten. Für einen günstigen Rangplatz in einem Saal von 8000 m^3 mit einer Nachhallzeit von 2 sec errechnet sich dafür in einem Abstand $r = 25 \text{ m}$ z. B. ein Verhältnis von -17 dB . Für hohe Frequenzen wird dieser Wert infolge der gerichteten Strahlung bestimmter Instrumente weit größer sein. Nimmt man bei der gerichteten Abstrahlung von Blechinstrumenten z. B. bei einer Trompete eine mittlere Abstrahlfläche entsprechend einem Durchmesser von 20 cm an, so würde sich dafür ein D/R -Verhältnis von -3 dB errechnen, wenn man sich im Richtkegel des Instrumentes befindet und hierfür ebenfalls noch die Gültigkeit der statistischen Nachhalltheorie voraussetzt. Für impulsartige Vorgänge gerichteter und ungerichteter Art wird das D/R -Verhältnis ebenfalls ein anderes sein, und zwar ergibt eine Berechnung für den ersten Fall $+3 \text{ dB}$ und für den zweiten Fall -11 dB , wenn man die Integration der reflektierten Schallenergie z. B. über den Zeitraum von 50 ms durchführt.

Man erkennt daraus, welch komplexer Natur das Wechselspiel zwischen stationären ungerichteten und gerichteten Vorgängen einerseits und impulsartigen Vorgängen andererseits am Ort des Beobachters ist. Aufgabe der Übertragung wird es sein müssen, dieses gleitende D/R -Verhältnis in der richtigen Relation in den Abhörraum hineinzubringen. Bildet man diese Verhältnisse in einem Wiedergaberaum von z. B. 150 m^3 , $T = 0,5 \text{ s}$ für einen Abstand des Beobachters von der Schallquelle $r = 2 \text{ m}$ ab, so erhält man je nach Art des verwendeten Lautsprechers verschiedenartige Werte, wie sie in Tabelle 1 dargestellt sind. Hierbei wurde eine Mikrofoninformation an einem üblichen Aufstellungsort zugrunde gelegt, bei dem im wesentlichen keine gerichtete Strahlung eintrifft und keine gegenüber dem Primärsignal beachtenswert verzögerten energiereichen Rückwürfe vorliegen. Die Integration der reflektierten Schallenergie bei Impulsen wurde hierbei über den Zeitraum von 20 ms durchgeführt, in dem für einen kleinen Raum die größte reflektierte Energie enthalten ist²⁶ und in dem der beim Abklingvorgang erreichte Pegelwert etwa dem bei 50 ms in einem größeren Raum entspricht. Vergleicht man die D/R -Verhältnisse im Originalraum mit denen der Wiedergabe, so findet man, daß diese für die verschiedenartigen Vorgänge im relativen Gang zueinander durch den Konuslautsprecher besser dargestellt werden als durch den Kugellautsprecher, daß sie aber im Absolutwert gegenüber dem Originalraum um 9 bis 11 dB größer sind, oder anders ausgedrückt, daß der sich im Wiedergaberaum ausbildende Pegel R des reflektierten Schalles im vorliegenden Fall im Mittel etwa 10 dB zu gering gegenüber dem Pegel D des direkten Schalles ist.

Tabelle 1
 D/R -Verhältnisse (dB) in einem Originalraum
 $V = 8000 \text{ m}^3$, $T = 2 \text{ sec}$, $r = 25 \text{ m}$

Quasistationäre Vorgänge		Impulsartige Vorgänge	
Ungerichtete Schallabstrahlung (tiefe Frequenzen)	Gerichtete Schallabstrahlung*	Ungerichtete Abstrahlung	Gerichtete Abstrahlung
- 17	- 3	- 11	+ 3

Abbildung der D/R -Verhältnisse des Originalraumes in einem Wiedergaberaum
 $V = 150 \text{ m}^3$, $T = 0,5 \text{ s}$, $r = 2 \text{ m}$

idealer Kugellautsprecher	- 6	- 6	- 2	- 2
Konuslautsprecher $\varnothing = 20 \text{ cm}$	- 6	+ 8	- 2	+ 12

* Trompete bei 3000 Hz mit einer Abstrahlfläche entsprechend einem $\varnothing = 20 \text{ cm}$

Vorschläge für ein Verfahren, den Hörer in den Ursprungsraum mit einzubeziehen (raumbezogenes Verfahren)

Die Arbeit von Schodder⁵⁸ zeigt, welchen Verlauf die Hüllfunktion des reflektierten Schalls innerhalb des für den Ganzheitseindruck wichtigen Zeitabschnittes, der sogenannten „Verwischungsschwelle“ des menschlichen Ohres hat. Nach den Darlegungen des Verfassers der Arbeit sollte diese als Grundlage für subjektive Untersuchungen über die optimale Hörsamkeit von Räumen dienen. Abweichend von der ursprünglichen Zielsetzung können aus dem umfangreichen Material Schodders folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Ungeachtet dessen, daß die Beziehungen zwischen den energiereichen Rückwurffolgen und der optimalen Hörsamkeit von Räumen noch genauer ermittelt werden müssen, ist sicher, daß alle gefundenen Rückwurffolgen physikalische Merkmale für einen natürlichen Raum sind.
2. Wenn es gelingt, getrennt voneinander primäre Schallinformationen und zusätzlich geeignete Rückwurffolgen im richtigen Verhältnis zueinander in den Wohnraum des Hörers zu projizieren, muß der Hörer die Illusion erhalten, sich in den Raum des Geschehens versetzt zu fühlen.

Für die Lösung dieser Aufgabe bietet sich folgendes Verfahren an (Fig. 20). Da das Mikrofon im wesentlichen primäre direkte Schallinformationen erhält, muß es möglich sein, die Mikrofonspannungen zur Auslösung bestimmter Rückwurf Folgen zu benutzen. Diese könnten durch ein besonderes Verzögerungsgerät* erzeugt werden. Die Mikrofoninformation wird in der üblichen Einkanaltechnik übertragen und einem Hauptlautsprecher zugeführt. Die von der Mikrofonspannung gesteuerte verzögerte Rückwurf Folge wird mittels eines oder mehrerer Hilfslautsprecher diffus in den Wiedergaberaum eingestrahlt. Durch Regelung des Pegelverhältnisses zwischen dem Hauptlautsprecher und dem Hilfslautsprecher kann der Raumbezug für den Hörer variiert werden. Hierfür ist es zweckmäßig, als Hauptlautsprecher eine Anordnung zu verwenden, die ein gewisses Maß von Richtwirkung hat, damit das von diesem Lautsprecher im Wohnraum sich ausbildende Feld in erster Linie ein direktes Feld ist. Ein Kugellautsprecher wäre dafür weniger geeignet, da das von ihm erzeugte Feld ein indirektes ist, das insbesondere mit den Eigentümlichkeiten der Reflexionen des Wiedergaberaumes behaftet ist. Die akustischen Eigenschaften des Wohnraumes sollen aber gerade nicht betont hervortreten, vielmehr sollen die eigentümlichen Reflexionen des Ursprungsraumes mittels diffuser Einstrahlung durch die Hilfslautsprecher den Hörer umfließen. Die Grenzen der Regelung des Raumbezuges würden darin bestehen, daß man einmal ohne Verwendung der Hilfsinformationen den Sprecher in den Wohnraum, das andere Mal mittels Verwendung der Hilfsinformationen den Hörer in einen großen Saal versetzen kann. Zwischen diesen Grenzen liegen alle möglichen Übergänge für die Einstellung einer den Hörer befriedigenden Raumillusion. Das geschilderte Verfahren ist im Prinzip kompatibel, da die Übertragungstechnik lediglich einen monauralen Weg zu gewährleisten hat. Besitzt der Hörer das Zusatzgerät, dann kann er raumbezogen hören.

Der Vorschlag, aus der Hauptinformation ein verzögertes Signal abzuleiten, ist nicht neu. Es sei an das im Kapitel „Pseudostereofonie“ erwähnte „Xophonic“-Gerät³² und an die Blaupunkt-Truhe „New York“³⁴ erinnert. Diese Verfahren haben jedoch mit dem beschriebenen raumbezogenen Verfahren wenig zu tun, da es sich bei ihnen nur um die Erzeugung eines einzelnen Rückwurfs, während es sich beim letzteren um die Nachbildung der Hüllfunktion des reflektierten Schalles handelt.

Die bekanntesten Versuche zur Erzeugung einer Hüllfunktion und damit für ein raumbezogenes Verfahren sind die Versuche von Philips mit einer Anlage, wie sie z. B. auch auf der 3. Tonmeistertagung 1954 in Detmold⁶⁰ von Kleis vorgeführt wurde (Fig. 21). Mittels einer Magnetofonanlage mit sechs Köpfen wurden die primären Informationen, die auf die

* Konzeptionen für eine einfache Einrichtung, wie sie beim Hörer als Zusatzgerät angewendet werden könnte, liegen beim BRF vor.

Hauptlautsprecher gingen, verschiedenartig verzögert und danach auf sechs Gruppen von Lautsprechern gegeben, die diffus im Raum verteilt waren, wo jeder Gruppe eine verschiedene Verzögerungszeit zugeordnet war. Zur Vergrößerung des Halls wurde außerdem eine Rückkopplung des letzten Wiedergabekopfes auf den Aufnahmekopf vorgenommen. Die Variierung des Verhältnisses der Intensitäten von Haupt- und Nebenlautsprechern ergab spezielle Effekte in bezug auf die Hörperspektive. Man hatte den Eindruck, die Schallquelle verschiebe sich in Richtung des Hörers. Bei abgeschalteten Hauptlautsprechern war die Wiedergabe richtungslos. Schon eine geringe Intensität der Hauptlautsprecher genügte, um das Schallgeschehen nach vorn, aber in weiter Entfernung zu lokalisieren. Bei Steigerung des direkten Schalls rückte das Geschehen an den Hörer heran. Das geschilderte von Vermeulen ausgearbeitete Verfahren ist unter dem Namen „Stereonachhall“^{61, 62} oder „Ambiophonie“⁶³ bekannt. Es ist in einigen Fällen zur Verbesserung der Hörsamkeit größerer Räume verwendet worden (z. B. Philips-Theater in Eindhoven, Mailänder Scala).

Beachtenswert ist weiterhin ein von Buttenberg^{64, 65} bereits 1953 angegebenes Verfahren, das in Fig. 22 dargestellt ist. Es ist ebenfalls ein raumbezogenes Verfahren und verwendet für die Übermittlung von Rauminformationen ein zweites Mikrofon in einer größtzulässigen Entfernung von 11,5 m. Das Verfahren benutzt Laufzeitdifferenzen von 5 bis 35 ms. Buttenberg hebt auf Grund eigener Versuche, die er mit rundfunkmäßigen Orchesteraufstellungen durchgeführt hat, insbesondere die große Durchsichtigkeit des Klangbildes bis zum größten Fortissimo hervor. Er hat das von ihm angegebene Verfahren als unsymmetrisches Zwei-Kanal-Verfahren bezeichnet.

Auch Lauridsen und Schlegel³¹ berichten über Versuche, mit einem möglichst wenig direkten Schall empfangenden besonderen „Raummikrofon“ auf ein System von Lautsprechern im Wiedergaberaum direkt oder mit zusätzlichen Verzögerungen zu arbeiten. Die hierbei erzielte vorzügliche ästhetische Raumwirkung führen die Verfasser ebenfalls darauf zurück, daß die Abstands- und Richtungswahrnehmung in Räumen in großem Maße von den ersten Reflexionen der Einsätze und Stoßlaute abhängig ist; diese Informationen befinden sich aber in der Hüllkurve des Raumschalles. Wollte man die Informationen eines besonderen Raummikrofons über den Rundfunk übertragen, so wäre hierfür ein kompatibles Doppelmodulationsverfahren anwendbar. Auch Lauridsen und Schlegel legten bereits nahe, statt ein zweikanaliges System anzuwenden, „künstlichen Raumklang“ aus der gewöhnlichen Einkanalübertragung herzustellen. Diese Versuche wurden von den Verfassern teils mittels Magnetverzögerer, teils mittels Klangplattenverzögerer durchgeführt. Die Resultate waren insbesondere mit der reichen Diffusion der Klangplatte so überraschend gut, daß sie diesem System für Wiedergabe in kleinen Räumen eine zukünftige Anwendung

prophezeien, da nach ihrer Auffassung die Klangplatte zu einem billigen Gerät entwickelt werden kann.

Illusionsverbesserung durch Stereophonie oder diffuse Einbeziehung des Hörers in den Ursprungsraum?

Lauridsen und Schlegel³¹ erklären hierzu: „Für Rundfunkübertragungen spielt die genaue Lokalisierung keine Rolle, da man Orchester und Personen nicht sieht. Dagegen kommen andere Verhältnisse zur Geltung:

1. die Übertragung bzw. Erzeugung eines ‚Raumklanges‘ im Wiedergaberaum, der trotz seiner kleinen Abmessungen den großen Senderraum vortäuschen soll,
2. die Möglichkeit der Breitenregelung des Lautbildes zu einem in der Geometrie des Wiedergaberaumes tragbaren Kompromiß und
3. das Problem, ob der Raumklang so bedeutend zu werden vermag gegenüber dem Richtungseffekt, und ob mittels eines Zeiteffektes Richtungswirkungen so vorgetäuscht werden können, daß die eigentliche stereofonische Richtungsübertragung vielleicht in den Hintergrund tritt.“

Unsere Auffassung zu diesem Fragenkomplex ist: Allein mit der Stereophonie ist es möglich, den Eindruck wie in den ersten Reihen eines Konzertsaales zu erzielen³⁶, sowohl was die Auflösung in der Breite wie auch die Staffelung in der Tiefe des Klangkörpers anbetrifft. Mit dem raumbezogenen Verfahren ermöglicht man die Einbeziehung des Beobachters in die akustische Atmosphäre des Aufnahmeortes in einen entsprechenden Abstand zum Schallereignis, verbunden mit Vorstellungen über die Art und Größe des Saales entsprechend dem Verlauf der Hüllfunktion des indirekten Schalles.

Je nach Inhalt und Form des zu übertragenden Schallereignisses wird mal die Komponente der stereofonen Auflösung, mal die Komponente der Raumeinbeziehung von größerer Bedeutung sein. Z. B. wird für die Übertragung einer Gruppe von Sprechern aus einem kleinen Raum in einen kleinen Raum nur die stereofonische Komponente wichtig sein, für den Fall des guten Sitzplatzes in einem Konzertsaal wird die Einbeziehung in den Raum wichtiger sein als der stereofone Effekt, beim Hörspiel wiederum wird mit Rücksicht auf die zu übertragenden Bewegungen die stereofone Komponente von größerer Bedeutung sein.

Schlußfolgerungen

Bei der üblichen monauralen Übertragungstechnik kann der Hörwinkel und damit die Vorstellung von der räumlichen Ausdehnung der komplexen Schallquelle durch die Abstrahlweise und die Aufstellung der Lautsprecher (sogenannte „Raumklangtechnik“) beeinflusst werden. Zur Übermittlung einer richtungstreuen stereofonischen Auflösung und einer raumtreuen aku-

stischen Atmosphäre ist die Übertragung echter Schallfeldinformationen erforderlich (Stereoinformationen im wesentlichen aus dem direkten Schallfeld und Rauminformationen aus der Hüllkurve des indirekten Schalles). Die Regelung dieser beiden Komponenten würde zugleich die Übermittlung des richtigen Hörwinkels mit beinhalten.

Da einerseits z. Zt. noch keine auf ausreichenden Erfahrungen basierende Empfehlungen für eine einführungsreife Studioaufnahmetechnik vorliegen, andererseits an eine Regelung für ein einheitliches HF-Verfahren in der allernächsten Zeit noch nicht zu denken ist, sollte man die dazwischenliegende Zeit dazu benutzen, die Mittel der Pseudostereophonie, z. B. nach der Methode des Stereophoners, als auch das Mittel der künstlichen Raumeinbeziehung, beides abgeleitet aus dem monaural übertragenen Signal, beim Hörer zur Anwendung zu bringen. Die dafür in Frage kommenden Verfahren würden in bestimmten Fällen, z. B. bei der Übermittlung von Konzertübertragungen mit konventionellen Orchesteraufstellungen durchaus beachtliche Verbesserungen der Illusion^{26,39} ermöglichen. Andererseits könnte man mit der Erprobung solcher Verfahren Aufschluß darüber bekommen, wie der Hörer überhaupt zu der Anwendung einer illusionsfördernden Technik steht, die zum gegebenen Zeitpunkt auf der Rundfunkstudioseite ihre exakte Berücksichtigung finden könnte, wenn die dafür erforderlichen hochfrequenten Übertragungsmittel zur Verfügung stehen. Derartige Erfahrungen wären sicherlich wertvoll, um den realen Nutzen, der die Wünsche und Auffassungen des Hörers berücksichtigt, abschätzen zu können, denn neben der Stereowürdigkeit von Rundfunkprogrammen, die sich auf die sinfonische, Opern-, Kammer- und Chormusik, auf die Operetten- und Unterhaltungsmusik und auf das Hörspiel beschränken und im Tagesdurchschnitt etwa 15% betragen dürfte, spielt die Bereitschaft des Hörers eine wichtige Rolle, solche Rundfunkprogramme in stereofoner Auflösung oder mit verbesserter raumakustischer Atmosphäre hören zu wollen. Diese Bereitschaft ist eine wesentliche Voraussetzung für die Notwendigkeit zur Einführung einer neuen Rundfunktechnik.

Schrifttum/References

- ¹ F. K. Schröder: Die stereofone Schallübertragung
Funkschau, (1957) H. 9, S. 221
- ² R. Thiele: Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schall-Rückwürfe in Räumen
Acustica, Vol. 3 (1953), S. 291
- ³ W. Reichardt: Grundlagen der Elektroakustik
Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, S. 323
- ⁴ G. Steinke: Subjektive Bewertung der Übertragungsqualität
Technische Mitteilungen des BRF 2 (1958) H. 2, S. 25
- ⁵ H. Fletcher: Basic Requirements of the Auditory Perspective
Journal of the SMPTE, 1953, Vol. 61, P. 415
- ⁶ J. C. Steinberg and W. B. Snow: Physical Factors in Auditory Perspective
Journal of the SMPTE 1953, Vol. 61, P. 420
- ⁷ F. C. Wentz and A. L. Thuras: Loudspeakers and Microphones for Auditory Perspective
Journal of the SMPTE 1953, Vol. 61, P. 431
- ⁸ H. Kösters: Qualitätsfragen der Rundfunkübertragung
Technische Hausmitteilungen des NWDR 4 (1952) H. 7/8, S. 127
- ⁹ H. Kietz: Das räumliche Hören
Acustica, Vol. 3 (1953), S. 73—86
- ¹⁰ G. v. Békésy: Über die Entstehung der Entfernungsempfindung beim Hören
Akustische Zeitschrift 3 (1958) S. 21—31
- ¹¹ E. Skudrzyk: Die Grundlagen der Akustik, Wien 1954, Kap. XXV, S. 606
- ¹² W. Schlechtweg: Vortrag anlässlich des Pressegesprächs am 1. 5. 1958,
Telefunken, Technischer Pressedienst TPD 1622
- ¹³ W. Schlechtweg: Stereofone Schallaufnahmen
ETZ, Ausgabe B, (1958) H. 6, S. 240
- ¹⁴ W. Katzfey und F. K. Schroeder: Die Grundlagen des stereofonen Hörens
radio mentor, (1958), H. 6, S. 377
- ¹⁵ K. de Boer: Plastische Klangwiedergabe
Philips Techn. Rundschau 5 (1940) H. 4, S. 108—115
- ¹⁶ Feddersen, Sandel, Teas and Jeffres: Localisation of High-Frequency Tones,
The Journal of the Acoustical Society of America,
V. 29 (1957), P. 988—991
- ¹⁷ D. Kleis: Experimente zur Verbesserung der Raumwirkung von Schall
Elektronische Rundschau (1955) H. 2, S. 64
- ¹⁸ S. Mitlacher: Technische, musikalische und ästhetische Fragen der Musikübertragung
Vorlesungen an der Deutschen Hochschule f. Musik, Berlin
- ¹⁹ N. N. Haynes: Stereophonic Nomenclature,
Audio Engineering 38 (1954), No. 1, P. 19
- ²⁰ D. Kleis: Experimente zur Verbesserung der Raumwirkung
Bericht über 3. Tonleistertagung in Detmold, 1954, S. 37
- ²¹ V. Aschoff: Probleme der elektroakustischen Einkanalübertragung
Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (1953),
H. 33, S. 7
- ²² G. Kaufmann: Beitrag zur subjektiven Beurteilung von Musikwiedergaben
mittels Lautsprecherkombinationen,
Techn. Hausmitteilungen des NWDR 8 (1956) H. 5/6, S. 93
- ²³ F. Enkel: Neue hochwertige Abhöranlage für Regieräume
Elektronische Rundschau (1957) H. 2, S. 51
- ²⁴ L. Keidel: Eine neue Hochtonkugel
Funkschau (1956) H. 22, S. 935
- ²⁵ E. Meyer: Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Elektroakustik
ETZ-A 77 (1956) H. 21, S. 782
- ²⁶ W. Kuhl und J. M. Zosel: Untersuchungen zur Pseudostereophonie und Stereo-
phonie mit Kugellautsprechern und „Raumklang“-Geräten,
Acustica, Vol. 6 (1956), S. 474
- ²⁷ D. B. Sasse: Raumklangtechnik im Fernsehen
Film-Technikum 6 (1955) H. 4, S. 106
- ²⁸ P. Braun: Stereophonieanlagen für das Heim
ETZ 10 (1958) H. 10, S. 393—397
- ²⁹ H. Lauridsen: Nogle forsog med forskellige former for rumakustik gengivelse
Ingeniøren 47 (1954) S. 906
- ³⁰ G. R. Schodder: Vortäuschungen eines akustischen Raumeindrucks,
Akustische Beihefte (1956) H. 2, S. 425
- ³¹ H. Lauridsen und F. Schlegel: Stereophonie und richtungsdiffuse Klangwieder-
gabe
Gravesaner Blätter 2 (1956) H. 5, S. 28
- ³² The "Xophonic" — A Reverberation Unit for Hi-Fi Reproduction
Radio and TV News, June 1957, P. 56
- ³³ FT-Zeitschriftendienst, Pseudostereophonische Wiedergabe durch künstlichen
Nachhall
Funk-Technik 16 (1957), S. 586
- ³⁴ Stereophonie und Konzerthall
Blaupunkt Programm 1958/59 S. 2
- ³⁵ R. Vermeulen: Stereonachhall
Philips Techn. Rundschau 17 (1956) H. 7, S. 229
- ³⁶ H. Schießer: Einrichtungen zur Erzeugung künstlichen Nachhalls
Funk und Ton (1954) H. 7, S. 361
- ³⁷ H. Raug: Laufzeitstereophonie — ein pseudostereophonisches Verfahren als
Gegenstück zur Intensitätsstereophonie
Gravesaner Blätter 4 (1959) H. 13, S. 71
Time Delay Stereophony — the Counterpart of Intensity Stereophony
Gravesano Review 4 (1959) Vol. 13, P. 77
- ³⁸ L. Cremer und W. Kuhl: Zusammenfassung der Ergebnisse des Colloquiums
„Künstlicher Nachhall und erster Rückwurf“
Gravesaner Blätter 2 (1956) H. 5, S. 17
- ³⁹ R. Kolben: Zur Entwicklungsgeschichte des Stereophoners
Gravesaner Blätter 4 (1959) H. 13, S. 55
The Stereophoner
Gravesano Review 4 (1959) Vol. 13, P. 63

- 40 *H. Warncke*: Die Grundlagen der raumbezüglichen stereophonischen Übertragung im Film
Akustische Zeitschrift 6 (1941) H. 3, S. 1
- 41 *H. Fletcher*: Symposium on Wire Transmission of Symphonic Music and its Reproduction in Auditory Perspective — Basic Requirements,
Electr. Eng. 53 (1934), P. 9 and Bell Syst. Techn. Vol. 13 (1934) P. 259
- 42 *W. Schlechtweg*: Stereophonische Wiedergabe-Technik
Funkschau 30 (1958) H. 11, S. 275
- 43 *W. Kuhl* und *J. Zosel*: Wiedergabeeinrichtungen für Zweikanal-Stereophonie mit richtiger Mittenlokalisierung
Bericht über die 4. Tonmeistertagung in Detmold 1957, S. 46
- 44 *W. Kuhl*: Über eine Lautsprecheranordnung zur Wiedergabe stereophoner Schallaufnahmen
Rundfunktechn. Mitteilungen 3 (1959) H. 4 S. 170—171
- 45 *J. J. Geluk*: Erfahrungen mit stereophonischen Rundfunkübertragungen
Bericht über die 3. Tonmeistertagung in Detmold 1954, S. 23
- 46 *H. Lauridsen*: Das MS-Stereophonieverfahren und seine Anwendung zur Untersuchung raumakustischer Probleme
Bericht über die 4. Tonmeistertagung in Detmold 1957, S. 31
- 47 *W. Westphal*: Übersicht über einige stereophone und pseudostereophone Übertragungsverfahren
Rundfunktechn. Mitteilungen 3 (1959) H. 4, S. 164—166
- 48 *K. Bertram*: Kompatible Stereophonie
Radio Mentor 24 (1958) H. 9, S. 592—595
- 49 *H. Schießer*: Stereotechnik im Funkhaus
Rundfunktechnische Mitteilung 3 (1959) H. 4, S. 167—170
- 50 *P. Burkowicz*: Beitrag zu einer wissenschaftlichen Grundlage der Einkanal-Schallübertragung
Funk und Ton 6 (1952) H. 11, S. 561—580
- 51 *H. J. Griesse*: Zur stereofonen Rundfunkübertragung
radio mentor 24 (1958) H. 12, S. 830—832
- 52 *K. Tetzner*: Stereophonie über Rundfunksender
Funkschau 31 (1959) H. 1, S. 7—9
- 53 *E. Paulsen*: Hochfrequente Übertragung von Stereoprogrammen
Rundfunktechn. Mitteilungen 3 (1959) H. 4, S. 172—173
- 54 *H. Jubisch* und *H. Seidel*: Eine Methode zur stereophonischen Übertragung von Rundfunksendungen
Elektronische Rundschau 12 (1958) H. 11
- 55 *H. E. Armstrong*: Verfahren zur Mehrfachausnutzung eines Nachrichtenträgers unter Verwendung einer der Nachrichtenzahl entsprechenden Anzahl von Hilfsträgern,
DBPa A 2625 VIII a/21 a⁴
- 56 *H. E. Armstrong* und *J. H. Bose*: Some recent developments in the multiplexed transmission of frequency modulated broadcast signals
Proceedings of the Radio Club of America, Vol. 30, N. 3/1953
- 57 Rundfunk-Stereophonie-Systeme, Rundfunk-Stereophonie im Ausland
Gedanken über die Durchführung der Rundfunk-Stereophonie: Artikelserie aus der Funktechnik 15 (1958) H. 22
- 58 *G. R. Schodder*: Über die Verteilung der energiereicheren Schallrückwürfe in Sälen
Akustische Beihefte (1956) H. 2, S. 445—465
- 59 *H. F. Mayer* und *F. Bath*: Stereofoner Rundfunk mittels Puls-Amplituden-Modulation
Rundfunktechn. Mitteilungen 3 (1959) H. 4, S. 174—179
- 60 *D. Kleis*: Experimente zur Verbesserung der Raumwirkung
Bericht über die 3. Tonmeistertagung 1954, S. 37—40
- 61 *D. B. Sasse*: Bessere Tonwiedergabe durch Stereo-Nachhall
Film-Technikum 7 (1956) H. 9, S. 324—325
- 62 *R. Vermeulen*: Stereo-Nachhall
Philips Techn. Rundschau 17 (1956) H. 7, S. 229—237
- 63 *D. Kleis*: Moderne Beschallungstechnik
Philips Technische Rundschau 20 (1958/59) H. 9, S. 272—291
- 64 *H. Buttenberg*: Wege zum echten Klangerlebnis
Radio und Fernsehen 7 (1958) H. 9, S. 289—292
- 65 *H. Buttenberg*: Stereo — ein Geschäft?
Radio und Fernsehen 7 (1958) H. 24, S. 713—716
- 66 Stereophonie, Zusammenfassung kürzlich erschienener Veröffentlichungen
Telefunken-Zeitung 31 (1958) H. 120, S. 82—83
- 67 *R. Vermeulen*: Vergleich zwischen wiedergegebener und echter Musik
Philips techn. Rundschau 17 (1955) H. 6, S. 191

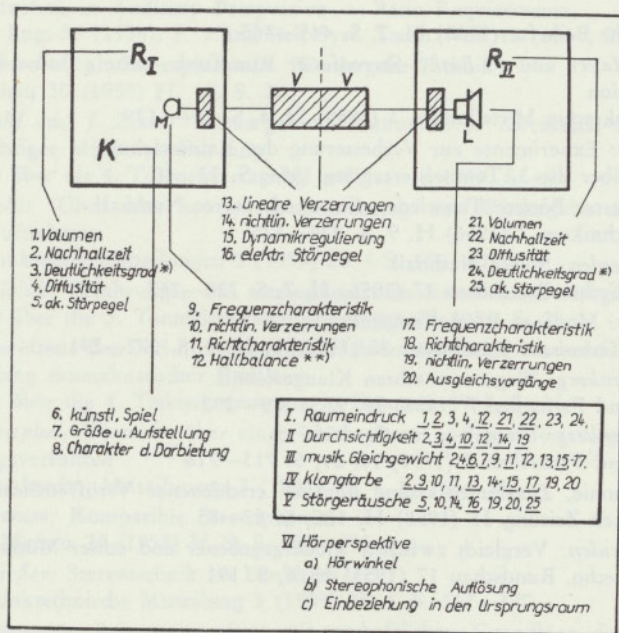


Fig. 1 Schema des Übertragungssystems mit objektiven und subjektiven Parametern

$$* D = \frac{\int_0^{\tau} J(t) dt}{\int_0^{\infty} J(t) dt} \quad (\text{Thiele}^2)$$

$$** = \frac{E_{\text{direkt}}}{E_{\text{reflektiert}}} = \frac{D}{R} \quad \text{Verhältnis; Hallabstand (dB)} \quad H = 10 \lg \frac{E_d}{E_r} \quad (\text{Reichardt}^3)$$

Fig. 1 Transmission schematic showing the objective and subjective parameters

- | | | |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1. Volume | 13. Linear and | 21. Volume |
| 2. Reverberation time | 14. Non-linear distortions | 22. Reverberation time |
| 3. Clarity* | 15. Volume control | 23. Diffusity |
| 4. Diffusity | 16. Electrical noise level | 24. Clarity* |
| 5. Acoustic noise level | 9. Frequency response | 25. Acoustic noise level |
| 6. Artistry | 10. Non-linear distortions | 17. Frequency response |
| 7. Size and distribution | 11. Directional response | 18. Directional response |
| 8. Type of programme | 12. Reverberation balance** | 19. Non-linear distortions |
| | | 20. Transients |

- I. Impression of space: 1, 2, 3, 4, 12, 21, 22, 23, 24
 II. Transparency: 2, 3, 4, 10, 12, 14, 19
 III. Musical balance: 2, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 15, 17
 IV. Tone: 2, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 19, 20
 V. Random noise: 5, 10, 14, 16, 19, 20, 25

- VI. Auditory perspective:
 a) Listening angle
 b) Stereophonic separation
 c) Illusion of "being there"

$$* D = \frac{\int_0^{\tau} J(t) dt}{\int_0^{\infty} J(t) dt}$$

$$** = \frac{E_{\text{direct}}}{E_{\text{reflected}}} = \frac{D}{R} \quad \text{ratio; reverberation level (dB)} = 10 \lg \frac{E_d}{E_r}$$

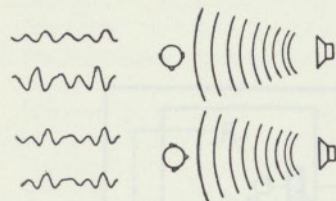


Fig. 2 Oszillogramme der Schallkurven am künstlichen Kopf bei Aufnahmen von vorn und bei um 90° gedrehten Kopf
Oscillograms taken off the dummy head facing, and at right angles to, the sound

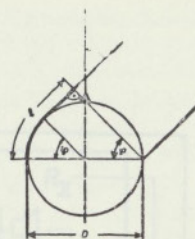


Fig. 3 Kugel vom Durchmesser D als Modell des menschlichen Kopfes. ψ ist der Schalleinfallswinkel gegen die Symmetrieebene der Kopfnachbildung
Plan view of dummy head, represented as a sphere of diameter D . ψ is the angle between the head's centre-line and the sound direction, and l the difference in distance traversed by the sound in reaching the two ears.

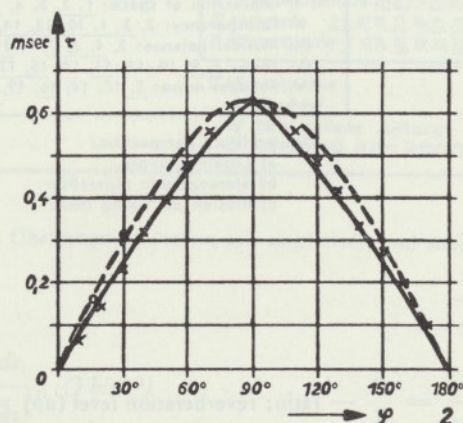


Fig. 4 Laufzeitunterschied τ als Funktion des Einfallswinkels ψ .
Ausgezogene Kurve: berechnet nach Gl. (1)¹⁵
Gestrichelte Kurve: berechnet nach Gl. (2)⁹
++++ aus objektiven Messungen bestimmt.¹⁶
ooo aus subjektiven Untersuchungen bestimmt.⁹
Time lag between the ears τ relative to sound direction ψ .
— as calculated by eq. (1)¹⁵
--- as calculated by eq. (2)⁹
++++ as determined by objective measurements¹⁶
ooo as determined by subjective tests⁹

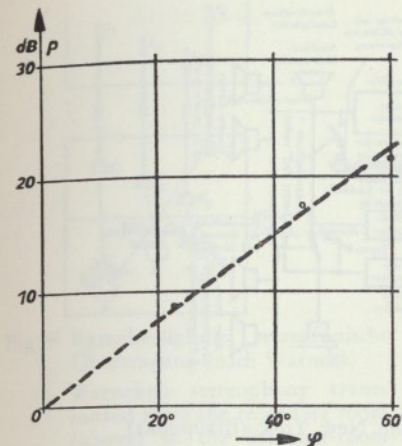


Fig. 5 Intensitätsunterschied als Funktion des subjektiv empfundenen Seitenwinkels, gewonnen aus an mehreren Personen mit Kopfhörern durchgeführten Untersuchungen¹⁶

Intensity difference between the ears p relative to the impression of sound direction ψ by headphone tests on a number of persons¹⁶

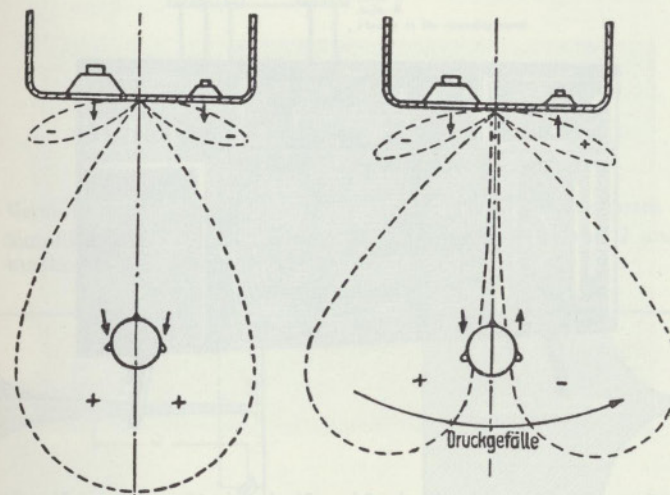


Fig. 6 „Hi-Fi-Expander“-Anordnung (Nord-Mende): die Schallabstrahlung bei einem üblichen Rundfunkgerät und bei gegenphasig geschalteten Lautsprechern wird dargestellt
“Hi-Fi-Expander” by Nord-Mende showing sound radiation by speakers working in phase and counterphase

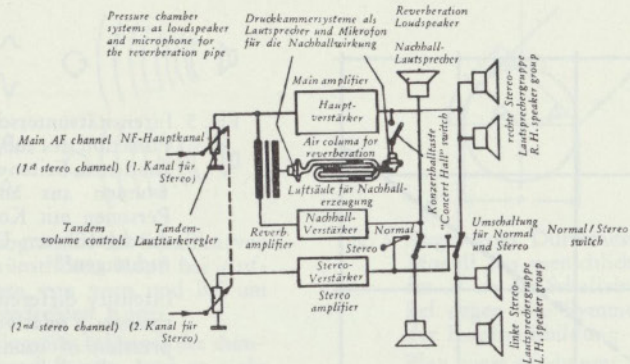


Fig. 7 Prinzipschaltbild der Truhe New York (Blaupunkt)
Block schematic of Blaupunkt's "New York" Console

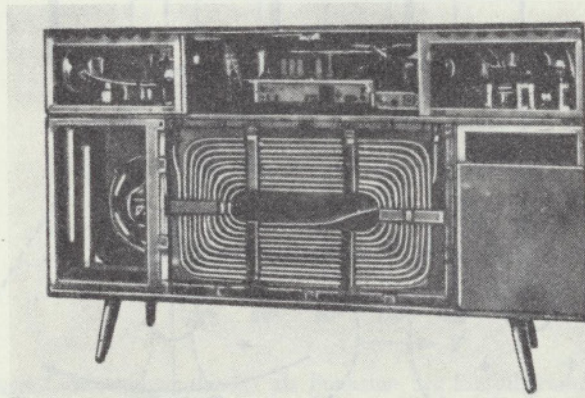


Fig. 8 Geöffnete Rückfront der Truhe New York mit 16 m langen Verzögerungs-
leitung
Rear view of the "New York" Console with the cover removed showing the
50 ft. long time lag pipe

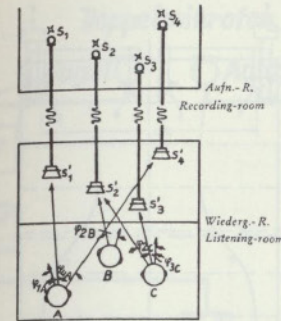


Fig. 9 Raumbezügliche stereophonische
Übertragung (nach Warncke)
Warncke's stereophony trans-
mitted from the recording room
(above) to the listening-room
(below)

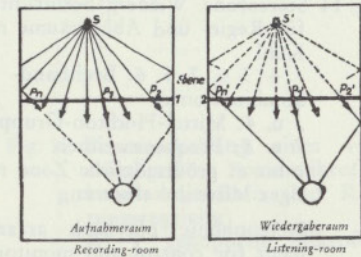


Fig. 10 Raumbezügliche Übertragung
mit zwei Hilfsebenen
(nach Fletcher)
Fletcher's stereophony with
one imaginary plane 1 in the
recording-room at the left,
and another 2 in the listen-
ing-room at the right

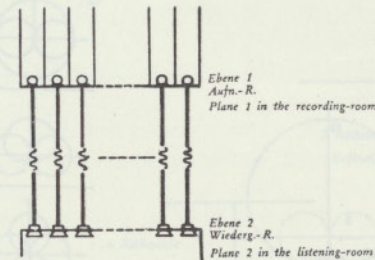


Fig. 11 Vereinfachte raumbezügliche Übertragung mit n Kanälen (nach Warncke)
Simplified stereophony with two imaginary planes 1 and 2 and a finite
number of n channels (Warncke)

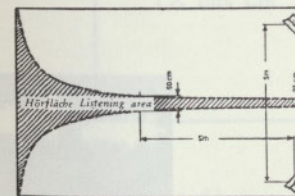


Fig. 12 Fläche bei guter Hörsamkeit
bei zwei in 5 m Abstand an-
geordneten Hochtonlautspre-
chern⁴²
Listening area for two speak-
ers 5 m (17 ft.) apart⁴²

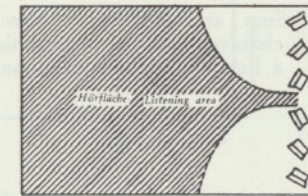


Fig. 14 Stereofone Wiedergabeeinrichtung für Regie- und Abhörräume nach Kuhl

1 + 5 u. 2 + 6: Breitbandkombinationen
3 u. 4: Mittel-Hochton-Gruppen
7 u. 8: Frequenzweichen
c bis c: größtmögliche Zone richtiger Mittenlokalisierung

Stereophonic playback arrangement for control and monitoring rooms (Kuhl)

1 + 5 and 2 + 6: wide range combinations
3 and 4: middle range to treble groups
7 and 8: crossover networks
cc: maximum zone of correct centre location

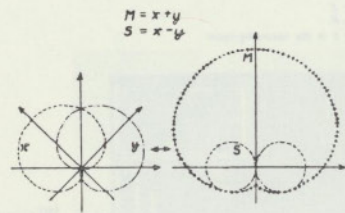
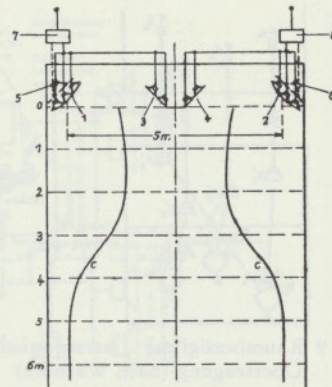


Fig. 15 Summen und Differenzrichtcharakteristik aus einer Niere und einer Acht

Sum and difference directional characteristics of a cardioid and a figure-of-eight microphone

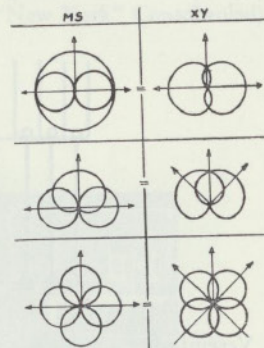


Fig. 16 Äquivalente Anordnungen
Microphone equivalents for MS and XY



Fig. 18 Rückwurffolgen im Grand Tier der Royal Festival Hall (3. Reihe Mitte)

Reflection sequences in the centre of the 3rd row of the Grand Tier of the Royal Festival Hall

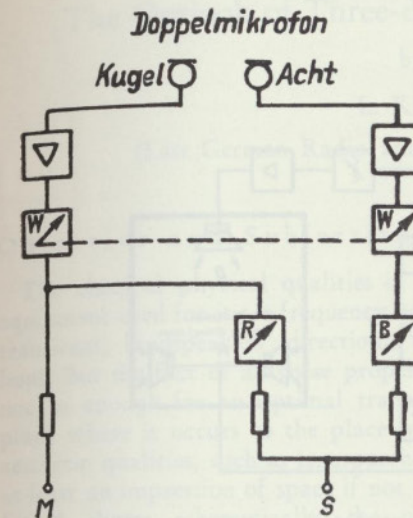


Fig. 17 Prinzipschaltung eines vollständigen Stereomikrofonkanals mit Basis und Richtungsregelung
W = gekoppelte Mikrofonmischregler

Block schematic of a mixer console's complete stereo-microphone channel (omni-directional and figure-of-eight) with base and directional control

W = a mechanically linked pair of microphone mixer-attenuators

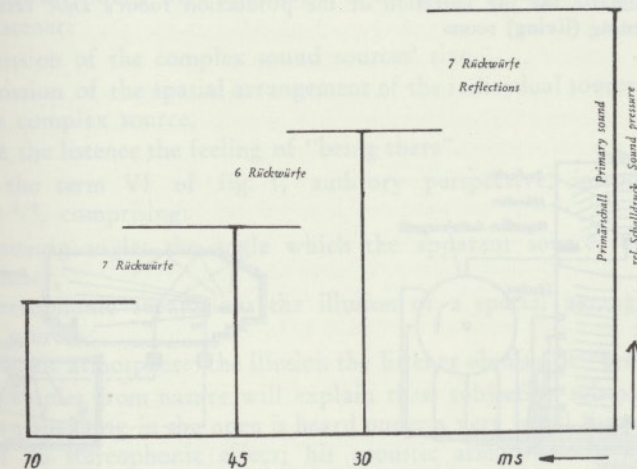


Fig. 19 Mittlere Anzahl der energiereichen Rückwürfe an einem optimalen Platz eines Konzertsalles in den verschiedenen Intensitäts- und Laufzeitbereichen

Mean number of effective sound reflections reaching a good seat in a concert hall: the sound pressure of the primary sound is shown at zero time at the right, followed (reading towards the left) by 7 reflections within 30 ms down to -3 db, 6 more reflections within 45 ms down to -1 db and 7 further reflections within 70 ms down to -10 db.

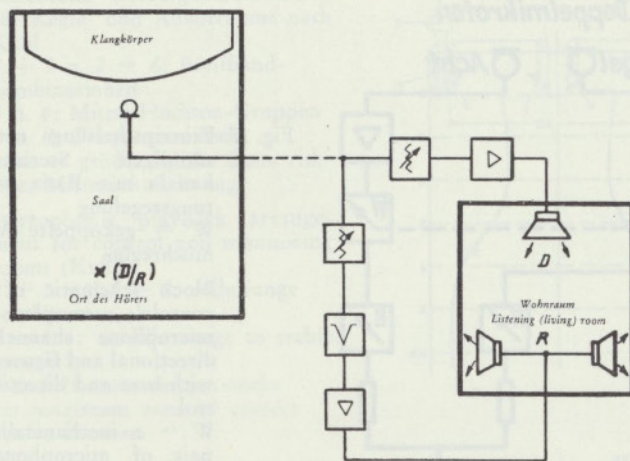


Fig. 20 Schema für die Abbildung des D/R -Verhältnisses des Ursprungsraumes in den Wiedergaberaum

Schematic for the imitation of the production room's D/R ratio in the listening (living) room

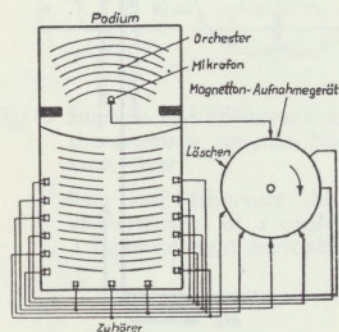


Fig. 21 Stereonachhallanlage von Philips
Philips's Ambiphony

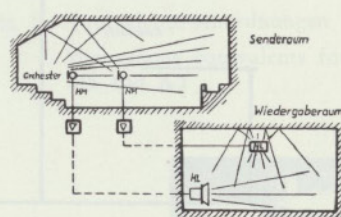


Fig. 22 Zwei Kanal-Übertragung mit einem besonderen Raummikrofon nach Buttenberg

Buttenberg's two-channel transmission using a reverberation microphone

The Outlook of Three-dimensional Broadcasting

by

L. KEIBS

(East German Radio and Television Laboratory)

Objective and Subjective Transmission Parameters

The classical physical qualities of electroacoustic transmission and the equipment used for it are frequency range, linear and non-linear distortions, transients, loudspeakers' directional properties, and background noise or hum. But the fact of all these properties satisfying certain conditions may not be enough for an optimal transmission of the sound event from the place where it occurs to the place where it is enjoyed: psychological and aesthetic qualities, such as transparency, clarity, articulation, sonority, and at least an impression of space if not of a third dimension, must be found¹. Fig. 1 shows schematically the objective (Arabic numerals) and the subjective (Roman numerals I to V) transmission parameters.

The following points were considered in the desire to improve the illusion for the listener:

1. transmission of the complex sound sources' size,
2. transmission of the spatial arrangement of the individual sources making up the complex source,
3. to give the listener the feeling of "being there".

Hence the term VI of fig. 1, auditory perspective, introduced by Fletcher^{5, 6, 7}, comprising:

- a. the listening angle: the angle which the apparent source subtends at the listener,
- b. the stereophonic separation: the illusion of a spatial arrangement of sound sources,
- c. the acoustic atmosphere: the illusion the listener obtains of "being there".

Two examples from nature will explain these subjective sub-parameters.

A person speaking in the open is heard under a very small listening angle and with no stereophonic effect; his acoustic atmosphere is a room of infinite dimensions, which the listener feels by reference to tone and volume of similar events registered by his memory.

An organ recital in a reverberant church is heard under a large listening angle and with no stereophonic effect because of the amount of reverberation; the listener has a strong impression of "being there", he is "captured" by the room because of the spatial information conveyed by the reflected sound with the illusion of sound all around.

The Limits of Broadcasting

The production of the best possible illusion for the listener is seen by Kösters⁸ as a problem either of transplanting the listener to the place where the event occurs, i.e. the studio, or of bringing the event into his living-room. The first of these two cases applies for example to broadcasts of concerts, the second case to news, commentaries or talks, which should give the illusion of the speaker actually present in the listener's home. The loudspeaker used in this case should have a directional characteristic similar to that of the human voice — omnidirectional loudspeakers increase the announcer's apparent dimensions to the point of impersonality. On the other hand, in the case of broadcasts from a hall, the listener wants to have the illusion of himself being present at the concert; a single, directional loudspeaker could, at the most, present the concert as if coming out of a hole in the door of the hall.

Man's Natural Ability to Locate Sound Sources

In locating the source of a sound, the human listener is able to distinguish between left and right, before and behind, above and below, and near and far. While time and intensity differences between the two ears determine the perception of left and right, Kietz⁹ has shown that the shape and position of the outer ear, rather than the fact of the existence of two ears, are responsible for the perception of before and behind, and of above and below. Near and far are distinguished from each other partly by past experience of intensity differences and partly (according to Békésy^{10,11}) by characteristic timbre changes occurring in transients by reason of the fact that pressure and velocity are out of phase near a sound source, approaching the in-phase relationship of plane wave-fronts with increasing distance from the source. In the case of low frequencies, the ear does not act as a pure pressure receiver but to a slight extent also as a pressure gradient receiver, so that non-periodic events of low frequency give distance-dependent impressions which are still present in monaural listening.

Discrimination between left and right can be observed using a binaural (dummy head) microphone and a double beam oscillograph (fig. 2):

1. a frequency-dependent amplitude difference (the "ear" facing the sound registers the greater intensity) results in
2. a timbre difference in the case of complex sounds, as the intensity difference is more pronounced for the higher frequencies;
3. a time or phase difference results from the distance between the ears.

Pure tones below 300 c/s are not affected and cannot be located; above this limit, time differences are of greater importance up to 800 c/s, while intensity differences sway the balance above this.

Fig. 3 illustrates the difference of distance, l , which is calculated by simple geometry as

$$l = \frac{D}{2} (\varphi + \sin \varphi) \quad (1)$$

The time difference is then calculated as $\tau = \frac{l}{c}$.

According to Kietz⁹, the subjective angle dependence of time difference is given by the approximate empirical equation

$$l = D (1 + \frac{1}{4} \sin \varphi) \sin \varphi \quad (2)$$

where $D = 16.8$ cm.

Fig. 4 shows the calculated as well as the subjective curves of τ against φ ^{15,9}.

While the direction of continuous pure tones below 300 c/s cannot be heard, non-periodic events can be located by their time differences over the whole hearing range. The accuracy is greatest near the head's axis of symmetry, where the limit, for pulses or interrupted pure tones, is 0.03 ms, equal to a distance difference of 1 cm or an angle of 3°. The maximum time difference, both calculated and subjective, is 0.63 ms for an angle of 90° (Kösters⁹).

Intensity differences are caused by the head's casting an acoustic shadow over the ear facing away from the sound, provided the wavelength is of the same order of, or less than, the head's diameter, which is not the case below 800 c/s, where the intensity differences are only slight as a result. The intensity difference is shown as a function of the estimated angle in fig. 5, which is a mean curve for frequencies from 500 to 6000 c/s. If the intensity differences occurring in nature are presented to the ears artificially by means of headphones, pure tones below 5000 c/s will be estimated as coming from nearer the front than is natural, the discrepancy growing with falling frequency and increasing angle¹⁶. Above 5000 c/s, the angle will be overestimated. Intensity differences, then, can give a qualitative but not an accurate impression of direction.

Complex or non-periodic sounds are located more easily than pure tones, for the timbre will appear brighter (containing more treble) to the ear facing the sound, while time differences, especially of transients, are an additional criterion.

The Role Played by Architectural Acoustics

Experience shows that the capacity for "placing" sound sources plays only a minor part¹⁷, acting in most cases merely as a stimulus to turning the head in the sound's direction. *Unconscious* directional hearing is of far greater importance, for it enables us to concentrate on a particular sound, masking out background and other unwanted noises. This has been termed "intelligent hearing"¹⁸, and turns also the information resulting

Elektronisches Musikstudio

Electronic Music Studio

OSKAR SALA

Mixtur-Trautonium: Composition — Interpretation

Magnetofon-Studiotechnik	Professional Tape Recording
Nachhallgeräte	Reverberation Units
Perfobandtechnik	Perforated Tape Work
Filmtön- und -bildbearbeitungs- geräte	Film and sound track editing machines
Mischfertige Herstellung von elektronischen Film- und Fernsehmusiken	Film and TV music ready for mixing
Geräuschsynthesen elektronisch und konkret	Electronic and concrete noise syntheses
Überspielungen fertiger Ton- bänder mit elektronischen Klangeffekten	Electronic sound effects dubbed onto finished tapes
Kontinuierlich variable Band- geschwindigkeiten zwischen 4 und 100 cm/s	Tape speed continuously variable from 1 5/8 to 25 i.p.s.

Im Hause

NEUE MARS-FILM

House

Charlottenburger Chaussee 51—55

BERLIN-SPANDAU

from architectural acoustics into a subjective judgment. It can emphasise what it considers to be of importance — for example, in the case of two persons speaking simultaneously, intelligent hearing can concentrate on one of them, using the directional information as a guide; again, it can reduce the conscious level of reverberation to an acceptable value by concentrating on the direct sound from the direction of the source. It can also suppress an excess of directional information originating from the source itself, blending the sound of a complex source into a whole. Intelligent hearing is able to improve the subjective impression of poor acoustics and pass over faults in general, although it can if necessary do the very opposite and concentrate on faults or poor acoustics, when it is desired to assess the quality of performances or halls.

Stereophony for an Improved Illusion

Haynes¹⁹ defines stereophony as the science of recording, amplification and reproduction of sound in such a way as to give the listener the impression of a three-dimensional distribution of the original sources.

Pseudo-stereophony

The most perfect loudspeaker can do no more than reproduce the vibrations existing at the microphone location — it will give the impression of a hole in the wall of the hall. Even though the sound coming through this hole will be marred by no electrical or mechanical distortions, so that it deserves to be called ultra high fidelity, the latecomer to the concert will be relieved to take his place in the hall after having heard the first item through the almost closed door.

This "keyhole effect"²⁰ resulting from the use of a single loudspeaker has been the cause of much problem hunting. Loudspeaker and loudspeaker group designs using several speakers in phase, as well as line and surface speakers^{21, 22}, have managed to widen the hole to a fair-sized window. Omnidirectional or spherical speakers^{23, 24, 25} can enlarge the virtual source or the listening angle to such a degree that the orchestra of limited dimensions no longer appears to come from any particular place, but from all around, because of the multiple reflections from the walls²⁵.

"3-D sound" for broadcast receivers was derived and simplified from the spherical speaker. It uses a number of speakers facing various directions, the middle range and treble being given mainly to the side speakers. The use and applications of spherical speakers as well as some types of 3-D home receivers were examined in detail by Kuhl and Zosel²⁶. No one pretends, of course, that 3-D sound has anything to do with a real three-dimensional placing of sound sources, but it does improve the reproduction in most cases, although point sources, e.g. speaking voices, can be enlarged so as to appear unnatural, which can be especially disturbing in con-

junction with television, on account of the discrepancies then arising²⁷. The side speakers can be switched off on some sets to avoid this, although the optimum solution to this problem seems to be to design the 3-D reproduction in such a way as to limit its "size" to be a working compromise between large and point sources.

The design with two speakers, both facing the front but out of phase with each other²⁸ (fig. 6), also comes under this heading. The listener links sound reaching his ears out of phase with sound coming from the side (fig. 6, right); if he now moves from the centre position, his impression of the direction will gradually move towards the front, reaching the centre of the speaker assembly when the listener is in the centre of one of the two beams. Now as the speakers' peaks can never be identical, especially at higher ranges, the various frequencies will appear to come from various places all around the front half of the room.

A design by *Lauridsen*²⁹ uses one speaker facing the listener and a second speaker housed in such a way as to radiate to one side from the front and to the other from the back of its cone. The two resulting reflections, suitably placed in the room, can considerably widen the base, and the fact of their being out of phase has a similar effect to the one just described above, besides lagging slightly behind the direct sound from the speaker because of the greater distance their sound has to cover.

Other methods reproduce the original signal a second time with an artificial time delay, based on the experiments of *Lauridsen*²⁹, subsequently repeated by *Schodder*³⁰, in which headphones were used to present first the signal, in phase for both ears, followed, after a delay of 50 to 100 ms, by the same signal, out of phase. Best results were obtained when the delayed signal was of exactly opposite phase for the two ears: the constant phase difference results in a time difference depending on the frequency, so that each frequency is heard as coming from different directions, and the listener has the feeling of being surrounded by the music.

Using loudspeakers, the delayed "3-D" signal needs its own speakers which are separate from the direct transmission, e.g. by diffuse radiation. For small rooms, a speaker column facing the side, mounted just behind the direct speakers which face the front, has been found effective for this³¹.

The "Xophonic", developed in the U.S., is a further example of a secondary signal lagging by 50 ms. It uses a 50 ft. length of pipe to delay all pulse components of the modulation by the same length of time independent of the frequency, the secondary signal being produced at the pipe exit by means of a microphone. A suitable choice of pipe diameter in the design can reduce pipe damping so as to cause several reflections of the sound in the pipe; just the same, this pseudo-reverberation can never be more than unidimensional or contain anything except multiples of the single pipe resonances, in contrast to the multiple resonances occurring in

room reverberation. If the original signal contains quasi-stationary events, a gradual increase of energy should become noticeable at the resonant frequencies. Because the result obtained with this device sounds rather like reverberation, it has been designated "concert hall effect". An interesting point is that in a test in which this was compared to two-channel stereophony 65% of the test subjects are alleged to have preferred the Xophonic. A similar device is now also used in Western Germany by the Blaupunkt Company³⁴ in their "New York" console as shown in figs. 7 and 8.

The best known method of producing a delayed signal is by means of a magnetic recording, the delayed signal being picked up by a playback head set a certain distance behind the recording head^{35,36}. In the Gravesano Experimental Studio a twin recorder with an accurately displaceable head was recently used for detailed experiments³⁷ on pseudo-stereophonic reproduction of monaural recordings by time lags between the two channels, resulting in "3-D sound" which justified its name far more than the usually publicised methods do.

Earlier tests along these lines³⁸ had shown that the impression of space produced by delayed reverberation often comes at the cost of clarity. Time lags of 25, 35 and 50 ms had been employed, with the reverberation at 10 db below the straight signal. The recordings with delayed reverberation were ascribed to a larger room with a certainty of 10 to 1, while 3.5 votes to 1 favoured undelayed reverberation because of the improved clarity. A better compromise between clarity and spatial impression was obtained by the addition of single reflections (repetition of the primary signal) between the straight signal and the statistical reverberation.

All methods designated as "pseudo-stereophonic" can ultimately be regarded as adding spatial information either to the signal itself or to the sound field produced during playback. Perhaps the most interesting results were obtained along these lines in the Gravesano Experimental Studio, where *Scherchen* and his staff developed a unit which they called "Stereophoner" (sometimes known also as "Spectrophoner") which can expand orchestral recordings in an aesthetically satisfactory way so as to give the listener the illusion of a spacing of instruments both transversely and in depth³⁹. *Scherchen* consciously avoided any attempt at imitating the physical mechanisms of binaural hearing, relying rather on certain physiological and psychological properties of hearing to produce his three-dimensional sound. Leaving the reproduction of table-tennis matches or passing trains out of account, the Stereophoner is also alleged to improve the illusion in the case of radio plays, reproducing speech with great clarity and presence.

"Head" Stereophony

Head stereophony has existed since 1881 — in that year, the international electrical exhibition was held in Paris, and *Ader* and *Hospitalier* made a stereophonic transmission from two microphones on the stage of the *Opéra* to another room where, in spite of all the faults arising from the primitivity of the equipment then available, visitors to the exhibition were able to distinguish the direction of the singers and instruments.

Nowadays we use a dummy head housing two microphones as "ears", which transmit their respective signals to each of a pair of headphones. When moving his head, the listener takes the whole sound image with him, but apart from this disadvantage, "head" stereophony is no doubt the simplest of all forms of stereophony, giving an auditory perspective which is very similar to what a listener would experience sitting in the dummy head's place.

"Room" Stereophony

The desire made itself felt of creating stereophony using loudspeakers, so that the sound image would stay fixed in the room even relative to a listener who moves about. This is shown in its general form⁴⁰ in fig. 9, where the sound sources $S_1 \dots S_4 \dots$ in the recording studio are played back over the speakers $S'_1 \dots S'_4 \dots$ respectively, placed in the same arrangement as the sources themselves. Theoretically, the loudspeakers should have the same directional characteristics as their respective sources. This method is only possible for fixed sources. Reproduction of any arrangement of sources was suggested by *Fletcher*⁴¹ using an imaginary plane containing microphones in the recording studio and another one containing loudspeakers in the playback studio (fig. 10). This method works provided that the geometric and acoustic properties of both studios are similar, and that an infinite number of transducers is used in both. It can, nevertheless, be regarded as a simplification over the first method in that the transducers are spaced in only two dimensions (on a plane) instead of three. The next simplification reduced this plane to a horizontal straight line, because the arrangement of sound sources normally recorded is in a horizontal plane and because the horizontal plane is also the most important from the point of view of the listener's sense of direction.

This step leads to the first practical solution to be discussed under this heading: fig. 11 shows a finite number of n microphones connected to a similar number of speakers (*Warncke*⁴²). The microphones have a pronounced directional characteristic so as to subdivide the recording stage into n zones. A sound source moving across this stage would theoretically jump from each speaker to the next, but this effect can be easily avoided by a suitable overlapping of the microphones' fields of cover. The magnitude of the number n could be termed the equipment's "resolving power". This

arrangement, like those already discussed, requires geometric and acoustic similarity of the recording and playback studios.

Further simplification, namely down to two channels, leads to the most important of all applications: stereophony in the home. It was discovered that when so few channels are, in addition, played back in a room which is in all respects different from the recording studio, the virtual position of the sound source depends, apart from everything else, also on the listener's own position in the room and the speaker arrangement used by him. The effective stereo base is the spacing of the stereophonically effective* speakers. The best stereo effect will be on the centre-line between the speakers. A listener moving away from the centre will soon hear a central event as if coming from the side nearest to him, the locus of all points where this occurs forming a hyperbola on each side (fig. 12), leaving only about a foot of satisfactory listening space exactly between the speakers, which widens to about 2 feet at a distance of 20 ft. from the speakers, although this area is increased by reflections from the walls of a normal room⁴². For larger rooms, *Kuhl* and *Zosel*⁴³ suggest the use of several speakers per channel, as shown in fig. 13. Recent tests by *Kuhl*⁴⁴ resulted in his suggestion, shown in fig. 14, for stereo control-rooms.

Stereo Recording, with Regard to Compatibility

Stereo recording methods are required to be compatible with monaural playback to enable the listener not possessing stereo equipment to obtain a satisfactory result; this applies both to disk recording and to broadcasting. The best-known stereo recording methods are the dummy head already discussed and the "spaced microphones" (A-B stereophony). Time and intensity differences occur with both methods, which have been in use in the Netherlands since 1946 for stereophonic wire broadcasting⁴⁵. These methods are not compatible as the channels are not satisfactory when heard singly, neither do they give a good picture when combined into one channel.

While the dummy head can give good results with soloists, a sound source of reasonable dimensions tends to lose its sides, as they are at too great a distance from the "head", and as an observer in the "head's" place might also experience if he did not involuntarily turn his head.

A-B stereophony, in which the microphones are spaced much further apart than a pair of ears, runs the danger of relaying two separate left and right messages which are not mutually connected. It follows that slight movement of the source may make the sound jump from one speaker into the other, leaving a hole in the middle. A third microphone placed half-way between the other two and feeding both channels at a certain level

* From about 300 c/s upwards — the use of a combined bass speaker for both channels is assumed.

below that of the side microphones can alleviate this trouble to some extent, albeit at the expense of some of the stereophonic effect, so that this might be described as "stereophony and water", or, in the extreme case, as pseudo-stereophony again.

Considering that time lags between the ears are not necessary for directional perception, for which intensity differences suffice, compatible stereo methods are offered by the use of directional microphones placed very close together or on a vertical axis. One example of this is the crossed figure-of-eight method, each of the two figure-of-eight microphones facing one half of the sound source. The two signals thus obtained, termed X and Y , are generally fed to a differential transformer which delivers two new signals $X + Y$ and $X - Y$, which are the ones transmitted. At the receiver end, these are differentiated once more, resulting in two signals $2X$ and $2Y$, which is the desired stereophonic information. Cardioid microphones give results similar to the one described.

Certain microphone combinations can give the sum and difference signals $X + Y = M$ and $X - Y = S$ immediately, without the need for differentiation, as was suggested by *Lauridsen*^{31, 46} who gave his method the name "M-S stereophony". One possible M-S combination is a cardioid facing the source and delivering the M signal with a figure-of-eight transverse to the source to give the S signal. The M channel gives satisfactory monaural listening, while the S channel contains only the spatial information and cannot be used by itself. Differentiation gives $M + S = 2X$ and $M - S = 2Y$, giving the same pair of stereophonic signals as before, which are in fact extremely similar to the results obtained by crossed cardioids and are perfectly symmetrical (fig. 15)⁴⁷. This method has an advantage over the X-Y method in saving differentiation at the recording side of the proceedings. Other possible combinations, with the M-S and X-Y equivalents, are illustrated in fig. 16⁴⁸.

Starting out from *Lauridsen's* M-S method, *Bertram*⁴⁸ developed a method for altering the virtual base of the reproduction by means of a base control B (fig. 17) which controls the S channel amplification relative to that of the M channel. The other control R (for "Richtung" = direction) feeds a signal derived from the M channel into the S channel, moving the source's virtual direction within a semicircle. The R control has an imitation figure-of-eight microphone response and makes it possible to simulate motion of a sound source before the microphone. The whole procedure is a pseudo-stereophonic addition to stereophony, corresponding perhaps to "joystick stereo", but it also laid the foundations to the design of a stereophonic mixer console for use with M-S combinations.

Stereophonic Broadcasting: Production

While it can be reasonably assumed that a record buyer purchases a

stereo disk because he intends playing it on stereo equipment, broadcasting companies cannot simply impose stereo broadcasts on the general public without considering the monaural listeners who will, at least for some time to come, be in the vast majority. Stereo broadcasts must therefore be compatible. This excludes the working method becoming usual with recording companies⁴⁹ of recording simultaneously three tracks to give, eventually, a monaural and a stereophonic version, for two reasons: first, it would be impossible with live broadcasts, secondly the two messages transmitted by carrier — be it the M and the S signal or the X and the Y signal — cannot be independent of each other because of the requirement $M = X + Y$ and $S = X - Y$. Compatibility brings some further problems with it which have not yet received due regard.

1. With the M-S method, does the M signal really give satisfactory monaural quality? It should be remembered that the microphones occupying the foremost position in purely monaural work are omnidirectional, while on the other hand a cardioid will give a better result used as the M microphone in the M-S method.
2. Does not stereophony require microphone placings in general which deviate from monaural technique in fundamental respects? If so, it would mean that monaural quality would inevitably suffer, even if the system is technically compatible.
3. Is not there a fundamental discrepancy between monophonic and stereophonic requirements of studio design? The radio studios presently used have been designed for a reasonable reverberation time with good diffusion to give good monaural results as well as for a certain reverberation response to give a certain pseudo-stereophonic effect⁵⁰. Now reverberation and sound reflection in general detract from the stereophonic effect even in natural listening, and it is no secret that stereo technicians can achieve better results in well damped studios.
4. Stereophony can give rise to special effects which can be cultivated for their own sake; in the case of compatible broadcasting, will the stereo trick production have any monaural value at all?

Stereophonic Broadcasting: Transmission

M-S is the most practical means of broadcasting stereophony compatibly: monaural listeners can receive the M signal, whereas stereo listeners will require two receivers coupled by a differential transformer to derive the X-Y signals out of the M-S signals, although both transmitters and both receivers must have similar phase response for this⁵¹. Every possible combination of a pair of transmitters chosen from the existing types of AM, FM and TV sound has been employed experimentally at some time or place⁵²; what speaks against this method is that it takes up double room in the limited frequency band.

This focusses all our interest on the no longer new multiplex methods, enabling a transmitter operating on a single frequency band to broadcast more than one programme. One possibility, in AM, is to use the upper side band for the X and the lower for the Y signal: a normal receiver will automatically receive $M = X + Y$ ^{51, 53}. Another possibility is amplitude and phase modulation combined: a normal receiver will receive only the amplitude modulated M signal without being in any way affected by the phase modulated S signal⁵¹. Combined AM/FM modulation was examined in detail by *Jubisch* and *Seidel*⁵⁴, who suggested transmitting the complete second AF information (i. e. Y , as opposed to $S = X - Y$) over the second HF channel. This method is not strictly compatible, as a normal receiver could convert only the signal being transmitted by AM, but it seems to hold promise for the broadcasting of two independent programmes.

Two methods of stereophonic broadcasting lend themselves particularly to use with UHF FM broadcasting⁵⁸:

1. the Armstrong method^{55, 56} (also known as FM multiplex) and the derived Griese and Crosby methods^{51, 52, 57, 58},
2. the pulse amplitude modulation/frequency modulation (PAM/FM) method⁵⁹.

Already in 1934, Armstrong operated a transmitter with four simultaneous programmes — broadcast, picture telegraphy, synchronising signals for the latter, and telegraphy. It seems unlikely that stereophonic broadcasts occurred to him, for his records show that he paid great attention to crosstalk among the channels, reaching values of -50 db , although -20 db is quite sufficient for stereophony.

In FM multiplex for stereophony, an auxiliary carrier of, say, 50 Kc is frequency modulated by the S signal, and the main carrier is then frequency modulated by the M signal and the modulated auxiliary carrier. The latter is not audible in a monaural receiver until means are provided for filtering out and demodulating the auxiliary carrier to give the stereophonic S signal.

In PAM/FM, two pulse sequences of a frequency of about 30 Kc are modulated alternately by the X and the Y signal. When this is received by a monaural set, the result is a signal $M = X + Y$, while a stereo set contains a switching circuit synchronised by the signal's 30 Kc pulses which are fed alternately to one channel and the other, so that the X and Y signals are separated. One feature of this method is that the two channels receive exactly the same treatment, so that reception faults, static etc. affect both signals in the same way.

A suggestion of another sort was made by *Adams*, *Enkel* and *Meyer-Eppler*⁵², to transmit the stereophonic information by below-threshold pilot frequencies near the upper audio limit. A ring transformer is used to amplitude-modulate two pilot frequencies of, say, 14.5 and 14.7 Kc

with the AF envelopes obtained by rectifying the AF signal. The receiver contains a control amplifier for each pilot frequency, these amplifiers controlling the two channels' speaker levels. The pilot frequencies are of an amplitude below reception noise level and therefore remain inaudible; they are filtered out by band pass filters of 100 c/s band-width which reduce the overall noise level by 20 db, leaving the pilot frequencies now with about 10 times the noise amplitude, which is ample for them to be used as directional information. This method seems to be suitable only for pure intensity (X-Y) but not for time delay (A-B) stereophony, and simultaneous events cannot be separated. In the latter case it seems advisable to delay one of the AF signals from the very beginning by a suitable amount (variable from 0 to 30 ms).

Apart from the conditions already discussed, of transmitting both stereo informations over a single band, and of compatibility and recompatibility (i. e. that the stereo receiver must also be able to receive monaural programmes), the following requirements for stereophonic broadcasting have been set up by the combined West German broadcasting companies:

1. the standard FM UHF bandwidth of 300 Kc must not be reduced,
2. the switchover to stereo must take place without leaving any areas unserved,
3. stereophonic operation must cause no disturbance to other stations,
4. the additional cost of stereophonic receivers must be kept to a minimum.

Comparison between Live and Reproduced Music

In objective comparisons between live and reproduced music in the Philips Laboratory⁶⁰, the influence of room acoustics was eliminated by having the live and reproduced versions played in the same hall, the live version of a short piece of 15 to 30 seconds' duration being played behind a curtain, in random alternation with the stereophonic reproduction. The probability of any one of 300 persons present being able to tell the difference was 0.5, indicating that the difference could not be heard.

The same paper reports on similar tests in which the reproduction was not stereophonic, however; two loudspeaker combinations ranging from 30 to 20 000 c/s were used, arranged so as to give a certain spatial impression; also, there was no curtain, but the musicians simulated play during reproduction, which began at a random place during the piece. It was almost impossible for the audience to define the place where reproduction began. It must be borne in mind that the absence of stereophony would tend to give an indication by the mere fact of the reproduced sound not necessarily coming from the direction of the instrument, especially as heard from the front rows. 107 out of 130 persons present handed in forms containing 2 questions per instrument. The double bass gave rise to the greatest number of errors, namely 150 (out of 214

possible errors) — only 18 persons recognised the reproduction as such. This was an unexpected result considering that the difference of direction between the original and the loudspeakers should have been made audible by the transients. The least number of errors, 44, was caused by the cymbals with a marked directional effect. Only 3 persons handed in an error-free questionnaire; the difference between the mistakes made by technicians and laymen was negligible.

It follows that it is not necessarily stereophony which sways the balance between a reproduction which is experienced as similar to the original and one which is not — there must be other criteria. It must be kept in mind that in these demonstrations the original and the reproduction were heard in the same room, giving a similar sound-field for both; is it, then, not likely that this similarity of sound-field or of acoustic environment is a prime consideration in the question of similar live and reproduced versions? This conclusion would tally with the well known fact that, on the one hand, the stereophonic effect of a live concert is very marked only in the front rows of the hall, while, on the other, these very first rows are, acoustically and aesthetically, the very worst places, leading us to the conclusion that left-right stereophony is by no means the decisive factor in obtaining a truly faithful reproduction.

The Sound Field in Rooms

The Distribution of Effective Sound Reflections in Halls

Schodder⁵⁸ discusses this subject in detail. It is known that the subjective evaluation of certain reflection sequences affects the acoustics. That is the reason why the acoustics of two halls of similar reverberation time or of two seats in the same hall can be very different.

In a number of concert halls, theatres and broadcasting studios, oscillograms of reflections were recorded from several seats and evaluated in three intensity ranges, namely ≥ -10 db, ≥ -6 db and ≥ -3 db with respect to the direct sound. One such oscillogram is shown in fig. 18. In confirmation of Schodder's results, it was found that the number of effective (i.e. more powerful) reflections was least in the vicinity of the source, increasing towards the walls, especially towards the rear; it was greater on the balconies than in the body of the halls, and can be influenced by reflecting surfaces near the orchestra or near some seats. This corresponds to the fact that the front rows of most halls are classed as poor, while preference goes to the balconies. This may justify our concentrating on Schodder's material only as concerns the balconies, for the present.

The mean number of reflections greater or equal to 10 db below the direct sound out of 4 halls examined, was 20. 13 of these were greater or equal to -6 db, and 7 of these again greater or equal to -3 db. The 20 reflections above -10 db occurred within 70 ms, the 13 reflections

above -6 db within 40 to 45 ms, and the 7 reflections above -3 db within 30 ms after the direct sound, giving the diagram of fig. 19 for the case of a good seat.

Schodder also examined the reflections at the usual microphone locations, where no reflections at all above -3 db occurred in 6 cases out of 11, and only 1 reflection above -3 db in the rest, with a maximum delay of 4 ms after the direct sound. The maximum number of reflection above -6 db was 2, and above -10 db, 6. This clearly indicates that microphone technicians place their microphones in locations where the direct sound far exceeds the reflected sound, and so that the more effective reflections (above -3 db) occur almost immediately after the direct sound.

The D/R Ratio in Halls

D/R is the ratio of direct to reflected sound energy arriving at a given point in a room and can be an indication of a listener's impression of "being there" in the room at a certain distance from the source. For stationary events with spherical wave radiation, the statistical reverberation theory gives an approximate value for $\frac{D}{R} = \frac{10^{-3}V}{\pi r^2 T}$, where r = observer's distance from the source, V = volume and T = reverberation time. E.g. in a hall of 8000 m³ with a reverberation time of 2 sec, $\frac{D}{R}$ at 25 m from the source is -17 db. At higher frequencies, this value will be much greater because of the markedly directional radiation of some instruments. Assuming in the case of, say, a trumpet a mean radiation surface corresponding to a 20 cm diameter, D/R comes to -3 db for positions within the instrument's beam, provided the statistical reverberation theory can be taken as valid for such a case. For directed or omnidirectional pulse events, D/R will be different again, namely $+3$ and -11 db respectively, integrating the reflected sound energy over, say, 50 ms.

This clearly shows the complex nature of the alternation of directed and omnidirectional stationary and pulse-type sounds as heard by an observer — the transmission must be such as to reproduce this complex nature of an ever varying D/R ratio in the listening-room. As an example, let us calculate these four values of D/R for each of two types of loudspeakers operating in an average living-room of 150 m³ volume and 0.5 sec reverberation time at a distance of 2 m from the speakers, as set out in Table 1, where the microphone was assumed to have a normal location in the studio, receiving negligible amounts of strongly directed sound or of reflections compared to direct sound; in this table, pulses in the small room were integrated over 20 ms, during which the greatest amount of reflected energy occurs in this type of room²⁶, reaching values comparable to those

Table 1

D/R ratios, in db , in a broadcast studio
for $V = 8000 \text{ m}^3$, $T = 2 \text{ sec}$, $r = 25 \text{ m}$

Quasi-stationary events		Pulse-type events	
Omnidirectional radiation	Unidirectional radiation*	Omnidirectional radiation	Unidirectional radiation*
— 17	— 3	— 11	+ 3

The original D/R ratios as reproduced in a living-room:
 $V = 150 \text{ m}^3$, $T = 0.5 \text{ sec}$, $r = 2 \text{ m}$

Ideal spherical speaker	— 6	— 6	— 2	— 2
8" cone speaker	— 6	+ 8	— 2	+ 12

* Trumpet at 3 Kc with a radiating area corresponding to a 20 cm (8 in.) diameter.

reached in the larger hall in 50 ms. Table 1 shows that the cone speaker is much better than the spherical speaker in reproducing the D/R ratio of the various events *relative* to each other, but that the *absolute* D/R values as reproduced exceed the original values by 9 to 11 db , in other words, the level of reflected sound R in the listening-room is on the average 10 db below that of the direct sound D .

Suggestions on Giving the Listener the Illusion of "Being There"

Schodder (l.c.) shows the envelopes of reflected sounds within the brief space of time — the so-called "blurring threshold" of the ear — which is so important to the perception of impressions in their entirety. In Schodder's opinion, these envelopes might serve as a basis for subjective tests on architectural acoustics. However, his material may be useful for another purpose altogether, if the following conclusions are drawn:

1. Notwithstanding the fact that a more exact relationship must still be established between sequences of effective reflections and subjective acoustics, there is no doubt that any such sequences found can be regarded as physical properties of a room.
2. If the attempt is successful of projecting into a living-room primary sound information segregated from the right amount of suitable reflection sequences, the listener must get the illusion of "being there".

Fig. 20 shows a method by which this aim may be achieved. As the sound received by the microphone is mainly direct, it should be possible to derive certain reflection sequences from the microphone modulation. These could be produced by a special delay unit (design suggestions for a simple device of this nature, which the listener might use as an accessory, are on file at the East German Radio and Television Laboratory), and be heard over one or more diffusely radiating secondary speakers, while the direct microphone modulation, obtained by the usual single-channel means, is fed to the main speakers, which should, for this purpose, have a certain degree of directional effect, for the listener to be in its direct field; the indirect sound-field produced by a spherical speaker would be less suitable for this purpose, as it is influenced by the peculiarities of the listening room, which are exactly what it is desired to suppress and replace by the reflections peculiar to the room from which the sound originates. The listener should be able to regulate the balance between the D and R levels between the extremes of having the announcer appear as if speaking in the living-room (no reflected sound R being used) and of obtaining the illusion of being present in a large hall (maximum R), with all possible variations in between. This method is, obviously, compatible.

The suggestion of deriving a delayed signal from the original one is not new — the "Xophonic", for example, has already been referred to³². However, this has little in common with the above-described method, producing only a single reflection instead of a sufficient number to imitate a hall's characteristic envelope.

Envelopes have also been imitated already. Fig. 21 shows the working principle of "Ambiophony" by Philips⁶⁰⁻⁶³: the direct microphone modulation goes to a front speaker and is, in addition, delayed by a magnetic disc recorder with 6 playback heads, which are connected in random order to a large number of speakers mounted at the sides and rear of the hall; the "reverberation" is further increased by a certain amount of feedback from the last playback head to the recording head. With the front speakers switched off, reproduction is of indeterminate direction; very little intensity on the front speakers suffices to throw the event to the front, albeit afar off, and increased level of the front speakers causes the event to move towards the audience. Through Ambiophony, the acoustics of some large halls — the Philips Theatre in Eindhoven, the Scala in Milan, and others — have been improved. The high cost, especially of the magnetic delay unit, precludes its use in the home, however.

A method proposed already in 1953 by Buttenberg^{64, 65} deserves mention in this regard. Illustrated in fig. 22, it uses a second microphone and transmission channel for the acoustical information; this second microphone stands up to 38 ft. away from the source, giving time lags of 5 to 35 ms. Buttenberg especially mentions the transparency obtained by this method

even in fortissimo passages, as he was able to observe in some tests with the usual orchestral seating used in broadcasts. "Asymmetrical two-channel system" is his own description of his method.

Lauridsen and *Schlegel*³¹ report on what appears to have been similar tests with a distant "room microphone" and draw similar conclusions to those inferred here on the importance of the first effective reflections of transients and pulse sounds, which, of course, give the room's envelope of reverberation. But apart from this suggestion, entailing as it does a two-channel transmission system (preferably compatible), they proposed deriving the acoustic information artificially from the direct signal, describing tests they carried out with magnetic delay units and also with reverberation plates. These latter gave such surprisingly good results as to make them predict a great future for this reproduction method for small rooms, as they were of the opinion that it should be possible to develop the reverberation plate to a cheap unit.

Illusion Improvement: Stereophony or "Being There"?

Lauridsen and *Schlegel*³¹: "In a broadcast, exact localisation is unimportant, as the orchestra or announcers cannot be seen. Other points of view must be considered:

- "1. if a small living-room is to represent a large studio, additional acoustic information, or '3-D sound', will have to be transmitted into it or produced in it;
- "2. the stereophonic base will have to be adjustable to give a reasonable compromise between the orchestral sound and the configuration of a living-room;
- "3. perhaps acoustic information or 3-D sound will be seen to be at least as important as directional effect, which can perhaps be simulated by time-lags so simply as to make stereophonic transmission take a back place."

My own opinion is that both 3-D sound and stereophony have their particular jobs to do: stereophony can give the same impression as can be had from the front rows at a concert⁶⁶ in regard to both transverse and longitudinal orchestral seating; a good 3-D system can transport the listener, in his imagination, to a seat at a reasonable distance away from the stage, giving him the illusion of a large hall in accordance to the envelope being used. In each particular case it will have to be decided which of the two possibilities is more applicable: stereophony for plays, 3-D for orchestral music, and so forth.

Conclusions

In the usual monaural transmission, the listening angle, and hence the imaginary size of the complex sound source, can be influenced by

the properties and positions of the loudspeakers used (3-D sound). If directionally accurate stereophony or the actual acoustics of the production room are to be transmitted, this will mean the additional transmission of directional or acoustic (reflection envelope) information, respectively, over a second channel. The correct listening angle would necessarily follow out of the control of these two components.

To-date, however, there is neither sufficient information on stereophonic studio technique, nor is there any international agreement on compatible two-channel transmission in sight. In the meantime, therefore, pseudo-stereophony (e.g. the Stereophoner) and artificial acoustic information, both of which can be derived from the monaural signal, should be brought to listeners' attention, as they would not only go a long way towards improving the illusion^{26, 39}, but provide valuable information on listeners' reaction to such systems, from which conclusions could be drawn on two-channel systems, once they become available; for there is an important criterion apart from the stereo suitability of programmes, which will no doubt be restricted to orchestral, choral, chamber and light music, jazz, opera, plays and features, comprising about 15% of total broadcast time: it is the listeners' readiness to listen to such programmes stereophonically or in improved acoustic surroundings.

L'ENCYCLOPEDIE DE LA MUSIQUE FASQUELLE

publiée par

François MICHEL, sous le patronage d'Igor STRAWINSKY, comprend:

Guide pratique de l'amateur de musique et livre d'or

220 pages

Enseignement musical, concerts, festivals, bibliothèques musicales, éditeurs et marchands de musique, radio-télévision, discothèque, institutions; Jeunesses musicales, Unesco etc. . .

Dictionnaire de musique

2464 pages

22.000 articles: compositeurs, musicologues, interprètes, avec 'biographies, œuvres, bibliographie etc. . . , les formes musicales, l'évolution de la musique, les instruments, les techniques etc. rédigés par 268 spécialistes français et étrangers. 1620 reproductions en noir et en couleurs (exemples musicaux, tableau de chronologie comparée, arbres généalogiques etc. . .)

Trois forts volumes format 19/26 reliés pleine toile sous jaquette illustrée.

Tome I A — E

Tome II F — K

Tome III L — Z

FASQUELLE EDETEURS

61 rue des Saints-Pères, PARIS 6e

DAS FASQUELLE - MUSIK - LEXIKON

herausgegeben

von François MICHEL unter dem Patronat von Igor STRAWINSKY, umfaßt:

Leitfaden für den Musikliebhaber und Goldenes Buch

220 Seiten

Unterricht, Konzerte, Festspiele, Musikbibliotheken, Verleger, Musikalienhandel, Rundfunk u. Fernsehen, Schallplatten, Vereine, Musikalische Jugend, Unesco, u. v. a.

Wörterbuch der Musik

2464 Seiten

22 000 Eintragungen über Komponisten, Musikwissenschaftler, Interpreten (mit Lebenslauf, Werken, Schrifttum etc.), die musikalischen Formen, Musikgeschichte, Instrumente u. v. a., geschrieben von 268 französischen und ausländ. Fachleuten. 1620 Abbildungen in Farben und schwarz-weiß (Notenbeispiele, vergleichende Chronologie in Tabellenform, Stammbäume, etc.)

Drei große Bände im Format 19 × 26 cm, in Ganzleinen gebunden und in farbigem Umschlag.

Band I: A — E

Band II: F — K

Band III: L — Z

THE FASQUELLE ENCYCLOPAEDIA OF MUSIC

edited by

François MICHEL under the auspices of Igor STRAWINSKY, comprises:

Amateur's Practical Guide and Golden Book

220 pages

Musical education, concerts, festivals, music libraries, publishers, the musical trade, radio and television, records, institutions, Musical Youth, Unesco etc.

Dictionary of Music

2464 pages

22,000 articles on composers, musicologists, interpreters (with biography, list of works, bibliography, etc.), the musical forms, evolution of music, instruments, techniques, etc. written by 268 French and other specialists. 1620 illustrations in colours and black-white (musical examples, comparative chronological table, family trees, etc.)

Three large volumes 7 1/2 × 10 inches bound in cloth boards with illustrated jacket.

Vol. I: A — E

Vol. II: F — K

Vol. III: L — Z

FASQUELLE EDEITEURS

61 rue des Saints-Pères, PARIS 6e

Einführung in die Grundlagen der Schallmeßtechnik

von

W. BÜRCK

II

Schallmeßeinrichtungen als physikalische Meßgeräte und als künstliche „Normalohren“

Wie man aus den bisherigen Betrachtungen entnehmen kann, dienen die Schallmeßgeräte einem doppelten Zweck: einmal sollen sie diejenigen physikalischen Größen, die zu einer Erregung des Ohres führen, objektiv erfassen, zum zweiten sollen sie gewisse Maßangaben darüber gewinnen lassen, wie das normale menschliche Ohr die Schalleinwirkung verarbeitet.

Für die Erfüllung dieser Aufgaben werden Schallmeßgeräte für die Praxis heute ausschließlich auf elektronischer Basis aufgebaut, d. h. mit Umwandlung des Schalls in die elektrische Energieform; sie müssen daher ein Organ besitzen, das auf die für das Ohr maßgebende Größe, den Schalldruck, anspricht, also ein speziell geeignetes Mikrofon. Die hierbei zu stellenden Forderungen sind außerordentlich hoch, weil für Meßzwecke die Eigenfehler der Anordnung einschließlich Mikrofon nicht größer sein sollten als die Unterschiedsschwellen des Ohres im direkten Hörvergleich, sowohl was die Empfindlichkeitsunterschiede bei verschiedenen Tonhöhen als auch die zeitliche Konstanz des Meßwertes insgesamt betrifft. Bei den üblichen Anforderungen wird für Schallmeßgeräte im mittleren Frequenzgebiet eine Absolutgenauigkeit von mindestens ± 2 dB gefordert, die in Einzelfällen aber noch unterschritten werden muß. Das bedeutet, daß für das Mikrofon als kleinem Teil des Gesamtgerätes höchstens Schwankungen von etwa $\pm 0,5$ bis 1 dB bezüglich Absolutkonstanz und Frequenzgang, d. h. unterschiedlicher Bewertung verschieden hoher Frequenzen, zugelassen werden dürfen. Eine derartige Gleichmäßigkeit der Frequenzkurve läßt sich technisch aber nur bei Präzisions-Kondensatormikrofonen, etwa in Rundfunkstudioqualität, einhalten und verursacht hohe Fertigungskosten. Die für Meßzwecke weniger gut brauchbaren dynamischen Mikrofone sind praktisch kaum unter Eigenschwankungen von ± 3 dB zu bringen, Kristallmikrofone haben noch wesentlich größere Fehler, fallen also für Meßaufgaben von vorneherein aus. Wenn trotzdem diese wesentlich billigeren, aber ungeeigneten Mikrofone in manchen Schallmeßgeräten Verwendung finden, so erklären sich allein dadurch schon zahlreiche Mißerfolge und Unstimmigkeiten auf dem Gebiet der Schallmessungen. Leider hat der Benutzer von Meßgeräten fast niemals die Möglichkeit, die Richtigkeit seiner Meßwerte nachzukontrollieren und muß sich in gutem Glauben auf sie verlassen.

Benötigen wir in gewissen Fällen zur Messung der Vibrationen fester Körper im Hörfrequenzbereich Aufnahmeorgane, so werden sogenannte Körperschall-Mikrofone verwendet, die zur Abtastung der Schwingungen speziell gebaut und auf die besonderen Anregungsbedingungen abgestimmt sein müssen.

Unser Ohr selbst ist nur dann „körperschallempfindlich“, wenn eine direkte Ankopplung eines vibrierenden Körpers, z. B. einer schwingenden Stimmgabel, durch Berührung mit den festen Bestandteilen des Kopfes (Zähnen) vorliegt und die Tatsache der „Knochenleitung“ des Schalles ausgenutzt wird*), also ein in der Praxis kaum eintretender Fall. Dagegen sind die Körpervibrationen in sehr vielen Fällen die Grundursache für das Entstehen von hörbarem Luftschall. Das Kreischen einer Kreissäge z. B. entsteht ursprünglich aus Körperschwingungen des Sägeblattes durch stoßweise Anregung der Zähne beim Aufschlagen auf das Sägegut; über eine geeignete „Abstrahlfläche“, etwa die Oberfläche des Sägeblattes, wird erst sekundär die umgebende Luft zu Schwingungen veranlaßt, die sich nun als Luftschall fortpflanzen. Es kommen natürlich auch Fälle von mehrfacher Umwandlung zwischen Körper- und Luftschall vor, z. B. beim Auftreffen von Luftgeräusch auf Heizungskühlflächen, die zu Körperschallschwingungen angeregt werden und diese über die Leitungsröhren an weit entfernte Stellen leiten, wo sie bei günstigen Abstrahlbedingungen über genügend große Flächen mit „Membranwirkung“ wieder in Luftschall zurückverwandelt werden.

Zur Abtastung solcher als Primärschallquelle oder Zwischenträger fungierenden schwingenden Körper verwendet man analog zum hochabgestimmten (d. h. im Hörfrequenzbereich ohne Resonanzerscheinungen arbeitenden) Kondensatormikrofon ebenfalls bevorzugt hochabgestimmte kapazitive Abnehmer, während für andere Zwecke (z. B. Unwucht-Messungen) elektrodynamische Schwingungsabtaster nur in einem relativ schmalen Frequenzbereich für Messungen brauchbar sind.

Die für die Luft- und Körperschallmikrofone geforderte Resonanzfreiheit im ganzen Hör- und Meßbereich ist deshalb so wesentlich, weil jede Resonanzüberhöhung oder -absenkung gegenüber dem mittleren Arbeitsniveau in voller Größe als Meßfehler des Gesamtergebnisses auftreten kann.

Die Luft selbst als homogenes Übertragungsmedium ist an sich im Hörfrequenzgebiet als resonanzfrei anzusehen, verliert aber diese Eigenschaft, wenn sie in Form eines abgegrenzten Volumens zwischen festen Wänden auftritt. Dies muß bei Schallmessungen in geschlossenen Räumen beachtet werden.

*) Die Anregung des Innenohres durch Luftschall auf dem Umweg über die Knochenleitung des Kopfes liegt größenordnungsmäßig um 60 dB niedriger als die Anregung auf dem normalen Wege, liegt also in der Regel weit unter der Verdeckungsgrenze durch den Luftschall.

Feste Körper als Körperschallübertrager sind fast nie resonanzfrei und heben diejenigen Frequenzen, die mit ihren „Eigentönen“ übereinstimmen, gegenüber anderen stark heraus. Die Ermittlung und Dämpfung solcher Eigentöne ist ein Hauptarbeitsgebiet der Störschallbekämpfung.

Während die zur Messung verwendeten Luftschallmikrofone den Schall aus allen Richtungen auffangen, nur ähnlich wie unser Ohr für ganz hohe Tonanteile eine gewisse nicht sehr ausgeprägte Richtwirkung („Bündelung“) besitzen, sind die Körperschallabtaster absichtlich so gebaut, daß sie eine bevorzugte Schwingungsaufnahmerichtung besitzen und in der Ebene senkrecht zu dieser möglichst unempfindlich sind. Hierdurch gelingt es, bei der Messung die verschiedenen möglichen Schwingungsformen in Festkörpern, z. B. Longitudinal-, Transversalschwingungen, Biegewellen, elliptisch polarisierte Schwingungen usw. voneinander zu unterscheiden.

Dies ist um so wichtiger, als in vielen praktischen Fällen, z. B. in Maschinenkonstruktionen, Bauwerken, Rohrleitungssystemen usw., die größere räumliche Ausdehnung besitzen und ihre Hauptausdehnungsrichtung wechseln, etwa an Ecken und Krümmungen, meist eine Umformung der Wellenarten in andere stattfindet. Während die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Longitudinal- oder Druckwellen, wie sie in Luft allein vorkommen, frequenzunabhängig ist, ist sie bei Biegewellen mit der Wurzel aus der Frequenz steigend, so daß Frequenzgemische zeitlich allmählich auseinanderlaufen (dispergieren). Allein richtungsselektive Körperschallmikrofone sind also imstande, die verschiedenen Wellenarten getrennt zu erfassen.

Zur Kontrolle der Eigenschaften ganzer Schallmeßgeräte, speziell aber auch der Mikrofone jeder Art, dienen Normalschallquellen und Eichvorrichtungen. Für Luftschallmikrofone werden entweder mechanisch arbeitende Eichschallquellen, z. B. Kugelfalleichquellen nach Art einer Sand-Eieruhr, oder elektronische Einrichtungen verwendet, z. B. stabilisierte Röhrensummer mit Speziallautsprechern, die gealterte Magnete und konstantgeregelten Arbeitsstrom besitzen. Körperschallmikrofone können auf elektrodynamischen oder elektrostatisch arbeitenden Schwingtischen auf bestimmte Beschleunigungs- oder Schwinggeschwindigkeitswerte eingeeicht werden.

Ein wichtiger Bestandteil aller Schallmeßgeräte sind Röhrenverstärker, neuerdings auch Transistorverstärker zur Vergrößerung der von den Mikrofonen und Abtastern gelieferten sehr kleinen elektrischen Energiebeträge bzw. Spannungen.

In allen Fällen muß für Meßzwecke der Verstärkungsgrad geeicht und konstant bzw. eichbar sein. Für die Messung der physikalischen Schalldruckgrößen ist eine im Hörfrequenzbereich frequenzunabhängige Größe der Verstärkung erwünscht; allerdings muß u. U. im Verstärker ein systematischer Frequenzgangfehler ausgeglichen werden, der z. B. an einem an sich geradlinigen Meßmikrofon durch den „Druckstau“ bei hohen Frequenzen am Mikrofonkörper entsteht, wenn dieser mechanisch nicht genügend klein zur Schallwellenlänge in Luft ausgeführt werden kann.

Bei der Messung von Schallwirkungen auf das Ohr, also der Lautstärke, soll das Meßgerät dem statistischen Mittelwert aller normalen menschlichen Ohren in seinen Eigenschaften entsprechen. Hierzu gehört vor allem die schon erläuterte Frequenzabhängigkeit der Bewertung verschieden hoher Töne, die als „Kurven gleicher Lautstärke“ oder „Ohrempfindlichkeitskurven“ durch elektrische Schaltmittel in Form von frequenzabhängigen Filtern nachgebildet und an geeigneter Stelle in den Verstärkerzug eingeschaltet werden.

Unser Ohr besitzt bis zu einem gewissen Grad die Fähigkeit, durch bewußte Konzentration aus einem Tongemisch einzelne Komponenten willkürlich herauszublenken und zu verfolgen. Dies kommt dem auch technisch begründeten Wunsch entgegen, eine Analyse eines Tongemisches oder Geräusches durchzuführen und den einzelnen Komponenten bestimmte Quellen und Entstehungsursachen nachzuweisen. In manchen Fällen genügt hierzu ein „Durchsieben“ des Geräusches durch Bandfilter, die in den Verstärkerzug eines Schallmeßgerätes eingefügt werden, etwa in Form von Oktavbandfiltern oder Terzfiltern.

In kritischen Fällen ist man aber gezwungen, noch feiner aufzulösen und regelrechte sogenannte Suchtonanalysatoren zu verwenden, die auch noch dicht benachbarte Frequenzanteile trennen und einzeln bewerten können. Das Leistungsvermögen dieser Geräte geht in manchen Punkten über die Fähigkeiten des Ohres hinaus.

Der in einem Schallmeßgerät gewonnene Anzeigewert wird üblicherweise einem Zeigerinstrument zugeführt, das eine direkte Ablesung auf einer geeichten Skala gestattet. Nur bei einem zeitlich sehr konstanten Schallvorgang ergibt sich ein ruhigstehender Anzeigewert. Im Normalfall zeigen sich Schwankungen der Anzeige, hervorgerufen durch wechselnde Stärke der Meßgrößen. Bei kurzzeitigen Vorgängen arbeitet die Anzeige ballistisch, d. h. der höchste vom Zeiger erreichte Wert ist kein Maß für den tatsächlich vorhanden gewesen Spitzenbetrag des Vorgangs, sondern für einen mittleren Summenwert während des Ablaufs, der als solcher kurz gegen die Zeitdauer ist, die bis zum Erreichen des Endwertes der Anzeige bei dauernder schneller Wiederholung des Vorgangs oder bei Vorhandensein eines Dauervorganges mit gleichhohem Spitzenwert verstreicht.

Diese mechanisch bedingte Anzeigeträgheit eines Instrumentes sollte der mittleren Ohrträgheit in ihrem Empfindungsverlauf entsprechen, wenn für Kurzvorgänge brauchbare Meßwerte erhalten werden sollen. Das gleiche gilt für eine laufende Aufzeichnung von Schallvorgängen mit Schreibgeräten und ihre Trägheit bei der Registrierung. Es ist notwendig, bei der Verwendung eines Schreibers oder Registrierzusatzes an einem Schallmeßgerät dessen dynamische-Einstelleigenschaften genau zu kennen.

Ein Beispiel für ein Meßgerät, das Schallpegelwerte in dB und Lautstärken in DIN-phon bzw. nach den neuerdings international vorgeschla-

genen und mehr in Verwendung kommenden bewerteten dB direkt ablesbar angibt, ist in Abb. 5 gezeigt. Während früher allgemein Röhrenverstärker mit ihrem relativ hohen Energieverbrauch üblich waren, wird besonders bei transportablen Geräten heute die Transistorisierung angestrebt. Dies stößt im Schallmeßgebiet auf große Schwierigkeiten, wenn die engen vorgeschriebenen Toleranzen wirklich eingehalten werden sollen. Wegen der starken Temperaturabhängigkeit müssen Transistorverstärker, die in einem weiten Temperaturbereich arbeiten sollen, stark strom- und spannungsgegekoppelt werden. Da für Meßzwecke nur ein Kondensatormikrofon in Frage kommt, ist für dieses als stabilisierte Vorspannung und für die Anodenspannungsversorgung der unvermeidlichen Anfangsstufenverstärkerröhre die Anordnung einer ebenfalls transistorisierten Spannungswandlereinheit nötig, die aus der Batteriespannung von wenigen Volt die benötigte wesentlich höhere Polarisations- und Betriebsgleichspannung herstellt. Das gezeigte weitgehend transistorierte Pegel- und Lautstärkemeßgerät besitzt einen Meßbereich von 30 bis 120 dB, unterteilt in 8 Einzelbereiche. Insgesamt können 3 Frequenzbewertungskurven nach Wahl eingestellt werden, im Normalfall etwa für dB-Messung (gerader Frequenzgang von 30 bis 12 500 Hz), für Frequenzbewertung nach Kurve 1 (bzw. B) und nach Kurve 2 (bzw. A). Stattdessen kann aber auch an Stelle einer dieser Kurven z. B. eine Geräuschbewertungskurve mit 3 dB Anstieg je Oktave, eine Grenzkurve zur Maschinenbewertung u. ä. eingebaut werden. Für die Meßkontrolle ist eine Rückkopplungs-Eicheinrichtung eingebaut.

Reicht die „Integralmessung“ eines Geräusches mit Gewinnung eines einzigen Meßwertes nicht aus, soll also z. B. eine Frequenzanalyse durchgeführt oder noch sehr schwache Schallenergie nachgewiesen werden, so muß zu empfindlicheren und aufwendigeren Schallmeßeinrichtungen gegriffen werden. Diese können dann auch nicht mehr aus eingebauten Batterien betrieben werden, sondern besitzen infolge des höheren Stromverbrauches Netzanschluß.

Hier bedarf die Frage nach der sinnvoll noch zu messenden kleinsten Lautstärke bzw. dem kleinsten Schalldruck näherer Betrachtung. 0 Phon bzw. 0 dB stellt zwar den absoluten mittleren Hör-Schwellwert dar; dieser hat aber keinerlei praktische Bedeutung außerhalb rein physikalischer oder medizinischer Untersuchungen, weil schon das normale Atemgeräusch eines Menschen in geringem Meßabstand bei 20 bis 30 Phon liegt. Selbst bei allerschärfsten Anforderungen an Ruhe, etwa in einem Rundfunkstudio, ist eine Störlautstärke von 20 bis 25 Phon zulässig (und allerdings auch nur schwer zu erreichen).

Das elektrische Eigenrauschen von Mikrofonen und den zugehörigen elektronischen Schaltanordnungen liegt normalerweise im Gebiet von 12 bis 18 Phon, als sogenannte „Ersatzlautstärke“ aus dem Elektrischen ins Akustische umgerechnet. Es gibt besondere, sehr kostspielige Anordnungen

(Hochfrequenz-Kondensator-Schaltungen mit Kompensationseinrichtungen), bei denen das Mikrofongeräusch weitgehend unterdrückt wird, so daß man noch direkte Messungen in der Nähe der Hörschwelle durchführen kann. Für die Praxis hat dies jedoch keinerlei Bedeutung; es genügt allemal, wenn die Meßeinrichtungen bei 20 bis 25 Phon beginnen. Bezüglich der oberen Meßgrenze sind Werte oberhalb 130 Phon bzw. 130 dB als eindeutig in der Schmerzzone des Ohres liegend sicher ausreichend, wenn auch gelegentlich bei Raketen, Düsenbrennern, Explosionen usw. noch höhere Wechselldrücke auftreten können. Bei 134 dB beträgt der effektive Schallwechseldruck schon 1 mbar, also 1 ‰ des normalen Atmosphärendruckes, während bei einem effektiven Schalldruck von 191 dB der Spitzenwert eines sinusförmig verlaufenden Wechselldruckes zwischen dem doppelten Gleich-Luftdruck und dem absoluten Vakuum pendeln müßte, was bereits physikalisch nicht mehr möglich ist. Oberhalb eines Schallpegels von etwa 175 dB gelten die üblicherweise angewendeten Schallausbreitungsgesetze nicht mehr. Extrem hohe Druckstöße, etwa bei Explosionen, breiten sich mit Überschallgeschwindigkeit aus und verändern dabei ihren zeitlichen Druckverlauf und ihr Frequenzspektrum. Sie verlaufen außerdem nicht mehr symmetrisch zum Ruhe-Atmosphärendruck, sondern in den Saugphasen abgeflacht (nichtlinear).

Besteht die Notwendigkeit, Messungen bei hohen Lautstärken über 130 Phon durchzuführen, so ist es bei Verwendung üblicher Meßgeräte oft noch möglich, nur die kleineren Teilenergien in schmalen Frequenzbändern zu messen, wobei alle Ober- und Differenzöne 1. Ordnung auch bei Übersteuerung ausgesiebt werden.

Bei Gesamtmessungen auf breiten Frequenzbändern und bei sehr hohen Schalldrücken im allgemeinen besteht die Möglichkeit, statt der normalerweise verwendeten Meßmikrofone Hochdruck-Sonderausführungen an die Meßgeräte, die dann natürlich besonders geeicht werden müssen, anzuschalten.

Interessiert die spektrale Verteilung der Schallenergie in einem Schallvorgang und genügt die Frequenzauflösung einer Grobanalyse in Oktav- bzw. Halboktavstufen oder in Terzstufen noch nicht, so kann jederzeit an den wechselladungsführenden Ausgang eines Pegelmessers ein Feinanalysator — z. B. nach dem Suchtonprinzip — oder ein Frequenzspektrometer angeschlossen werden. Für die Dauerregistrierungen von Geräuschpegeln kann eine Verbindung vom Ausgang eines Pegel- oder Lautstärkemessers zu einem schreibenden Registriergerät mit festgelegten dynamischen Eigenschaften hergestellt werden (Abb. 6).

Bei einer Filteranalyse geht durch die Umschaltung der Filterbereiche, die ja nacheinander erfolgen muß, und durch die Zeit zur Ablesung der Einzelergebnisse Zeit verloren, gegen die die Einschwingzeit der Filter selbst nur unbedeutend ist. Insgesamt werden mindestens 30 bis 60 Sekunden bei

einer Oktavsiebanalyse benötigt. Bei Suchtonanalysen richtet sich die benötigte Meßzeit nach der Feinheit der gewünschten Frequenzauflösung. Bei hoher Auflösung ist ein schmales Durchlaßfilter nötig, das eine umgekehrt proportional mit der Durchlaß-Bandbreite steigende Einschwingzeit aufweist. Unter Einschwingzeit versteht man die Dauer, die bis zum Anwachsen der Spannungsamplitude auf den Endwert verstreicht und die um so größer ist, je schmaler das Frequenzspektrum des Vorgangs wird; ein schnelles Wachsen der Amplitude setzt nämlich ein breites Frequenzspektrum voraus, das auch durch die Übertragungseinrichtung und die im Übertragungsweg befindlichen Filter durchgelassen werden muß.

Als Anhaltspunkt für die Zusammenhänge zwischen dem relativen Anzeigergebnis A (A ist definiert als Verhältnis des Anzeigewertes beim Durchlauf der Frequenz im Suchtonanalysator zum Anzeigewert bei ruhend eingestellter Suchfrequenz), des insgesamt durchlaufenen Frequenzgebietes bei der Analyse, genannt Frequenzbreite F in Hz, der Dauer T in Sekunden des Durchlaufvorganges innerhalb der gesamten Frequenzbreite und der Bandbreite B in Hz des verwendeten Analysierfilters kann die Formel

$$A = \frac{1}{\sqrt[4]{1 + 0,195 \left(\frac{F}{TB^2} \right)^2}}$$

diene; läßt man ca. 4 ‰ Minusfehler bei der Anzeige im laufenden Suchtonanalysator zu, so vereinfacht sich die Beziehung zu

$$T \text{ (in sek)} = \frac{F \text{ (in Hz)}}{(B \text{ (in Hz)})^2}$$

Will man also zum Beispiel im Frequenzgebiet von 0 bis 20 000 Hz analysieren und verwendet dazu ein Filter mit 10 Hz Bandbreite, so benötigt man aus rein physikalischen Gründen bezüglich der elektrischen Einschwingungsvorgänge eine Analysierdauer von $T = 20\,000 / 10^2 = 200$ sek oder mehr als 3 Minuten bei rund 4 ‰ Anzeigefehler. Wenn wie üblich bei der Registrierung die mechanische Bewegung des Schreibstiftes ebenfalls träge erfolgt, muß zusätzlich hierauf Rücksicht genommen werden, was die Analysierdauer in der Regel auf ein mehrfaches vergrößert. Man muß also unter üblichen Verhältnissen bei Feinanalysen mit einem genau arbeitenden Suchtonanalysator mit Zeitdauern von 10 bis 15 Minuten pro Analyse rechnen, wenn man das ganze Frequenzgebiet überstreichen und ein auf einige Prozent genaues Meßergebnis erhalten will.

Sind die zur Untersuchung gelangenden Vorgänge kurzzeitig, so bleibt nur übrig, sie durch ständige Wiederholung zu Dauervorgängen zu machen, wobei die Wiederholungsperiode unterhalb der den Hörfrequenzen zugeordneten Periodendauern liegen soll. Dies kann dadurch bewerkstelligt



Neu!

Schallpegelmesser

TYPE EZLT BN 4513

30 ... 120 dB bzw. DIN-PHON

Aufgaben und Anwendung

Der Schallpegelmesser Type EZLT besitzt bei erfreunlicher Kleinheit und geringstem Gewicht alle Eigenschaften eines zuverlässigen Meßgerätes. Hohe Empfindlichkeit, drei Frequenzbewertungskurven und die Einhaltung der Bestimmungen nach DIN 5045 garantieren eine umfassende Verwendbarkeit zu normgerechten Lautstärkemessungen. Die gerade Kurve dient für Schalldruckmessungen besonders bei tiefen Frequenzen, Kurve 1 für Lautstärken gleich oder größer 60 DIN-phon und Kurve 2 für Lautstärken unter 60 DIN-phon. Handlich und zweckmäßig in der Form, ermöglicht das Gerät EZLT schnelle Messungen aus der Hand ohne Verzerrungen des Schallfeldes durch den Messenden. Der Meßumfang reicht von der Ausnahme leiser Geräusche, wie sie besonders bei bauakustischen Untersuchungen vorkommen, bis zur Kontrolle lautesten Verkehrslärms. Zwei Tonfrequenzgänge dienen bei speziellen Meßaufgaben dem Anschluß weiterer Geräte (z. B. Frequenzzeiger, Filter, Tonbandgerät, Tonfrequenz-Analysator).

Frequenzbereich

entspricht den deutschen und internationalen Normvorschriften

Frequenzbewertung

unabhängig vom Meßpegel auf drei Bewertungskurven umschaltbar

Schalldruck-Meßbereich

30 ... 120 dB (über $p_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ bar auch für Messungen nach ISO-Kurve C

Lautstärke-Meßbereich

30 ... 120 DIN-PHON auch für Messungen nach ISO-Kurven A und B

Schnelle und gedämpfte Anzeige

Batterien eingebaut

Ladegerät wird mitgeliefert



werden, daß die Vorgänge z. B. auf einem Magnettonband gespeichert werden; der jeweils zur frequenzspektralen Untersuchung bestimmte Teil wird herausgeschnitten und zu einer Schleife geklebt, die man nun beliebig lange abspielen lassen und dabei in aller Ruhe analytisch untersuchen kann. Am Wechselspannungsausgang eines Schallpegelmessers kann also ein vorher geeichtes Magnetton-Speichergerät angeschlossen werden, wobei bei der Aufnahme (in dB-Ablesestellung) der Maximal-Meßwert beobachtet und mit aufgesprochen werden muß, damit bei der späteren Auswertung der richtige Absolutpegel bekannt ist und wieder eingeregelt werden kann. Nicht entzerrte Abweichungen in der Frequenzkurve der Speichereinrichtung, von den Eingangsklemmen bei der Aufnahme bis zu den Ausgangsklemmen bei der Wiedergabe gerechnet, müssen im Meßergebnis berücksichtigt werden. Bei der Auswertung über einen elektrischen Eingang, der an Stelle des Mikrofoneinganges vorgesehen und benutzt werden muß, ist die für das Aufnahmefrequenz berechnete Druckstauentzerrung im Schallpegelmesser (genau wie auch bei Körperschallmessungen) abzuschalten.

Die für Feinanalysen benötigte relativ lange Meßzeit zwingt also oft zur Verwendung von Magnetbandspeichergeräten, die bei geeigneter Ausführung weiterhin noch zur Frequenzumsetzung von ungünstig liegenden Meßfrequenzen in ein der Messung besser zugängliches Frequenzgebiet dienen können. Langsame, in der Nähe der unteren Hörfrequenzgrenze oder darunter liegende Maschinenschwingungen z. B. ebenso wie Ultraschallvorgänge, die über ein geeignetes Mikrofon oder einen Schwingungsumformer in elektrische Spannungsschwankungen verwandelt worden sind, können direkt auf Magnetband aufgenommen und schneller oder langsamer als bei der Aufnahme abgespielt und den Meßgeräten zugeführt werden. Eine 50-fache Abspielgeschwindigkeit etwa verwandelt Frequenzen zwischen 1 und 200 Hz in solche von 50 bis 10 000 Hz; diese können sodann gut mit einem im normalen Hörfrequenzgebiet arbeitenden Suchtonanalysator analysiert werden. Wird dabei eine Bandbreite von 10 Hz angewandt, so entspricht diese, auf den Originalvorgang bezogen, einer Bandbreite von 10/50 oder 0,2 Hz, also einer unerhört schmalen Selektion. Umgekehrt wie die Frequenztransformation verändert sich die Spieldauer; eine Minute Aufnahmedauer verkürzt sich bei 50facher Frequenzvervielfachung in 1,2 sek Abspieldauer. Die Aufnahmedauer muß also so lang gewählt werden, daß beim Abspielen mindestens die Bildung einer genügend langen Bandschleife zur periodischen Wiederholung des Vorganges möglich wird.

Ein Problem besonderer Art ist die Vermeidung von Störungen bzw. Verfälschungen der Frequenzanalysen durch die Klebestelle bei Verwendung von Bandschleifen. Die Stoßstelle, die im allgemeinen den aufgezeichneten Nutzvorgang plötzlich unterbricht und in zufälliger Weise mit dem Anfang der Schleife verbindet, ergibt ein Störspektrum, das im Nutzspektrum nicht vorhandene Frequenzkomponenten ergibt und Nutzkomponenten verdecken

kann. Ein langsamer Übergang an der Stoßstelle (Schrägschnitt des Bandes ebenso wie die Verwendung rotierender Mehrspalt-Abnehmeköpfe) bringt keine grundsätzliche Abhilfe, da zwar das Störspektrum eingeeignet wird, dafür aber um so längere Zeit relativ zur Zeit der Nutzanalyse (Schleifenlänge) einwirkt. Eine Möglichkeit zur Vermeidung oder weitgehenden Unschädlichmachung des Störspektrums besteht in der Einfügung eines elektronischen Schalters (Bandstoßdämpfer) zwischen Analysator und Registrierschreiber, der bei geeigneter Justierung die Ausblendung der Störstelle und Überbrückung der Fehlzeit in der Registrierung durch Aufrechterhaltung der vorher vorhandenen mittleren Aufzeichnungsamplitude bewirkt.

Eine zusätzliche Möglichkeit für die Ausnützung der recht kostspieligen Suchtonanalysatoren besteht in der Zuschaltung eines sogenannten Mitlaufgenerators, der aus der Ausgangsgröße des Analysators durch Rückmischung mittels eines eingebauten Oszillators genau jeweils die Frequenz an seinem Ausgang bildet, für die der Eingang des Analysators beim Ablauf gerade aufnahmefähig ist. So entsteht eine selektive Pegelschreibanlage mit synchronisiertem Ablauf des Tonfrequenzgenerators und des Registrierempfängers, wie man sie vorteilhafterweise für die Messung von Frequenzkurven (und Richtcharakteristiken) von Mikrofonen, Lautsprechern und Verstärkern verwendet.

Für besondere Meßaufgaben, etwa die laufende Messung von Klang- oder Geräuschspektren mit automatischer Anzeige der Teiltonamplituden bei veränderlicher Grundtonfrequenz, wie dies bei drehzahlveränderlichen Maschinen oder Getrieben vorkommt, sind weitere spezielle Meßgeräte entwickelt worden, die das Ohr eines Prüfers für die Ausscheidung fehlerhafter Stücke unterstützen oder ersetzen sollen; diese gestatten es etwa in der laufenden Serienproduktion die akustischen und schwingungstechnischen Eigenschaften der Einzelstücke zu kontrollieren, mit einem zulässigen Sollwert zu vergleichen und oberhalb einer festgelegten Grenze auszuscheiden. Solche Meßeinrichtungen bestehen aus Kombinationen von Schallpegel- oder Vibrationsmeßgeräten und Suchtonanalysatoren, deren Suchfrequenzen drehzahlabhängig vom Testobjekt gesteuert werden. Zur Anzeige gelangen dann z. B. die wichtigsten Teiltöne des Vorgangs und der Gesamtwert; bei der Überschreitung voreingeeichter Grenzwerte oder deren Kombinationen sprechen automatische Signaleinrichtungen an.

Mit Schallmeßgeräten, wie sie hier anhand einiger weniger Beispiele gezeigt wurden, lassen sich für viele technische Zwecke die menschlichen Ohren mit Vorteil ersetzen, weil die individuelle Verschiedenheit akustischer Empfindungen wegfällt und subjektive Störeinflüsse vermieden werden. Es versteht sich jedoch von selbst, daß nur in verhältnismäßig primitiven Fällen ein wirklicher „Ersatz“ erreicht werden kann, denn gerade das Zusammenwirken vieler, vielleicht auch objektiv exakt meßbarer Einzelgrößen zu einer geschlossenen Gesamtbewertung dürfte allein schon aus Gründen des meßtechnischen Aufwandes unerreichbar sein.

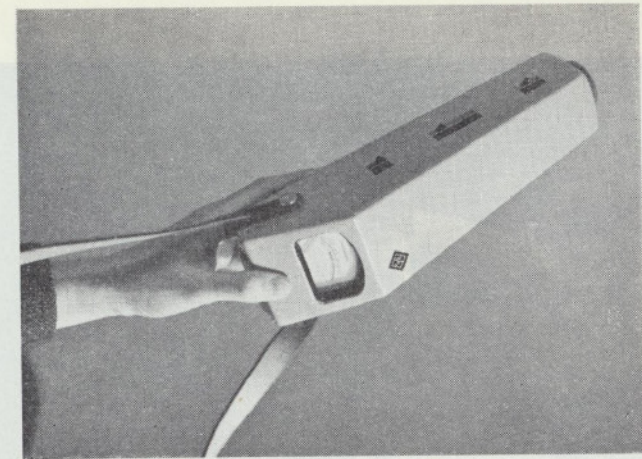


Abb. 5 Transistorierter Schallpegel- und Lautstärkemesser hoher Genauigkeit mit frei wählbaren Bewertungskurven, Meßbereich 30 bis 120 dB.

Fig. 5 Sound level and loudness meter.

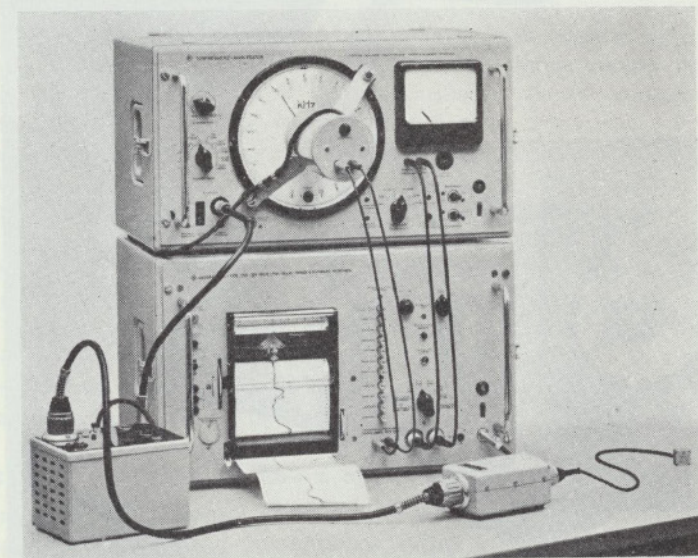


Abb. 6 Tonfrequenzanalysator mit Synchronantrieb für den Anschluß an Schallpegelmesser, hier mit Körperschallmeßvorsatz in Zusammenschaltung mit einem Gleichspannungsschreiber synchronisiert. (Werkbild ROHDE & SCHWARZ).

Fig. 6 Frequency analyser with synchronised drive shown connected to a recording level meter, with a vibration pickup at the input.

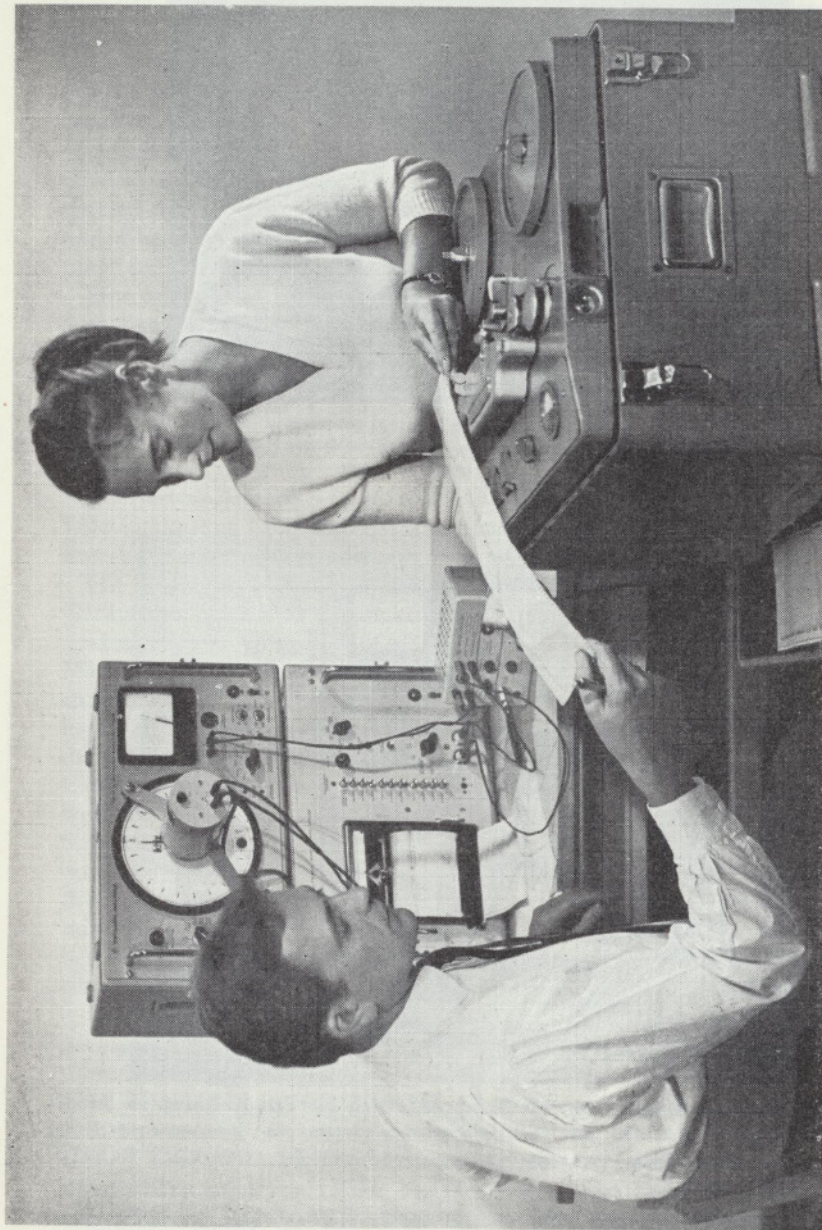


Abb. 7 Suchtonalysator mit Schreiber in Zusammenschaltung mit einem Meßmagnetophon für Frequenzanalysen von Bandschleifen; zur Eliminierung der Störspektren der Bandklettstelle wird ein automatisch arbeitendes Schaltgerät (Bandstoßdämpfer) zwischengeschaltet.

Fig. 7 Search tone analyser and level recorder connected to a precision tape recorder for the analysis of tape loops. An automatic electronic switch (tape shock absorber) eliminates spectrum errors due to the splice.

An Introduction to the Fundamentals of Acoustic Measurement

by

W. BÜRCK

II

Sound Measuring Devices as Physical Instruments and as Artificial "Standard Ears"

We have seen that acoustic measuring instruments serve a twofold purpose: they give an objective indication of the physical quantities which stimulate the ears, and they supply information on how human hearing responds to this stimulus. To fulfil their purpose, the instruments in practical use today are exclusively electronic, i. e. they transform, or *transduce*, the sound energy received into electrical energy, so that they need an organ which responds to the quantity which also stimulates the ear — the sound pressure — in other words, a specially suitable microphone. The standard of quality must be extremely high because the error inherent to a measuring device including the microphone should be no larger than the ear's threshold of discrimination by direct comparison; this concerns the differences of sensitivity at various frequencies as well as the fact that the measured value must be constant in time. Normally, these instruments are required to be accurate within ± 0.5 to 1 dB for the microphone, as part of the whole unit, which is possible only with a precision condenser microphone of broadcast quality and is very expensive to manufacture. Dynamic microphones, which do not lend themselves so well to measuring purposes anyway, cannot be made better than about ± 3 dB, while crystal microphones are still less accurate. It is nevertheless a fact that these very much cheaper microphones are used in certain acoustic measuring instruments, which can explain some of the numerous failures and discrepancies in the field of acoustic measurement. The user is rarely in the fortunate position of being able to check the accuracy of his results and must therefore show a certain amount of faith.

Sometimes we must measure vibrations in solid bodies; for this purpose we use specially constructed microphones, called *vibration pickups*. Our ears are also sensitive to solid vibrations, but these vibrations must be in direct contact with the solid part of the skull (e. g. with the teeth) to be heard, and this is rarely the case. Air vibrations also force vibrations of the skull, but this sound is transmitted to the ear with a loss of about 60 dB compared to the direct air stimulus, so that it is masked by the latter. On the other hand, the vibration of solid bodies is in most cases the

cause of airborne sound. This is so in many musical instruments, also for example the scream of a circular saw is the result of vibration of its blade when intermittently hitting the timber with its teeth; the blade of the saw is a very good *radiating surface*, which transmits the sound to the surrounding air. There are also many cases of multiple conversion of sound between its airborne form and vibrations in solid bodies: a good example is provided by a central heating installation, whose radiators are very good for radiating not only heat but sound which has been picked up by other radiators in a distant part of the building and transmitted by the piping.

Just as condenser microphones are preferable for measurement of airborne sound, condenser vibration pickups are best for measuring sound radiated or transmitted by solid bodies, although narrow-band dynamic microphones are useful for certain applications (e.g. engine balance measurements). These microphones and vibration pickups must be free of resonances in the voice frequency range, for a resonance would incorrectly exaggerate a certain frequency. The air itself, regarded as a homogeneous transmitting medium, can be regarded as being resonance free, but it loses this property as soon as a certain volume of it is enclosed within solid walls; this affects all acoustic measurements in closed rooms. Solid bodies, on the other hand, nearly always have very marked resonances, a fact which can be observed by striking the object in question, when it will often ring with a marked tone. The measurement and damping of these resonances forms an important part of noise control.

While the microphones used for airborne sound measurements receive sound from all directions, with a very slight directional effect — much less than that of our ears — in the upper range only, vibration pickups are usually designed so as to have a very marked directional effect: they must be as dead as possible to sound coming at right angles to the preferred direction. With a pickup of this sort it is possible to differentiate among the various modes of vibrations possible in solid bodies, e.g. longitudinal or transverse vibrations, vibrations due to bending, elliptically polarised waves, etc. This is very important because the mode of vibration usually changes at those places in large engines, buildings, pipe systems etc., where the direction of the longest dimension changes, i.e. at bends, corners, etc. Now the velocity of propagation of longitudinal or pressure waves (the only type occurring in air) is independent of the frequency, but the velocity of vibrations due to bending increases with the square root of the frequency, so that in this mode of vibration frequency mixtures disperse in time. This can be analysed only with a directional vibration pickup.

Complete measuring units as well as all kinds of microphones can be tested by means of standard sound sources and calibrating instruments. The standard sound sources used for air microphones are either mechanical,

in which for example a large number of ball bearings fall through an aperture as in an hour-glass, or electronic, e.g. stabilised oscillators with special loudspeakers with aged magnets and regulated current. Vibration pickups can be calibrated to a certain acceleration or vibration velocity on electrodynamically or electrostatically vibrating tables.

Valve or transistor amplifiers are a very important part of all acoustic measuring instruments. They serve for the amplification of the very small quantities of electrical energy or voltage delivered by the microphones or pickups. It is essential for the amplification to be calibrated and constant or it must allow of calibration. For purposes of sound pressure measurement, the amplification should be independent of the frequency within the audio range, although in some cases the amplifier will be required to correct a systematic error in the response, e.g. in the case of a microphone body which could not be manufactured sufficiently small relative to the sound wavelength in air "accumulating" pressure at high frequencies.

In measuring the effect of sound on the ear, i.e. the loudness, the instrument should correspond in its properties to the statistical mean of all human ears. This entails the ear's varying response to different frequencies — the curves of constant loudness or the ear's sensitivity curves already mentioned, which are duplicated by electrical circuits inserted at a suitable point in the amplifier circuit.

By concentrated listening, we can up to a point analyse a sound mixture and focus our attention on certain components of the mixture. This is a help in industrial noise analysis, where it is often sufficient to insert a set of octave or thirds filters in the amplifier circuit of a sound measuring instrument in order to be able to find the location or cause of a noise. However, there are more critical cases indicating the use of so-called search tone analysers which are capable of separating the individual frequencies of very dense mixtures and surpass human hearing in some respects.

The value measured by a sound measuring instrument is normally fed to a scale-and-pointer meter with a calibrated scale. Only if the sound is very constant indeed, the pointer will stay still, more often it will flutter in time with the changing loudness. Very short sounds are given a ballistic reading, i.e. the peak reading does not indicate the actual peak value of the sound but a mean value over its duration, which was short compared to the time taken for the meter to reach its maximum value for continued fast repetition of the sound or for a continuous sound. This mechanical inertia of a meter should correspond to the mean inertia of the normal ear in order to give realistic readings of short sounds. The same can be said for recording meters, which write their readings on a paper strip: when using such instruments, it is essential for the user to have a full knowledge of all their various settings and their dynamic properties.

Fig. 5 shows an instrument which indicates sound level in dB and loudness in phons or weighted dB by direct reading. While valve amplifiers, using much current, were usual in the past, transistors are being employed as much as possible nowadays, especially for portable instruments. This creates many problems for the designer striving for the close tolerances provided for by the standards. Transistors are very sensitive to temperature, so that instruments required to be used within a wide range of atmospheric conditions must have transistor amplifiers with considerable feedback. The condenser microphone needs a stabilised bias voltage and, as a valve for the first amplifier stage cannot be avoided, a transistorised power supply to step up the low battery voltage to the required polarisation and high tension values. The transistor level and loudness meter illustrated has 8 ranges from 30 to 120 dB and a choice of 3 weighting curves: flat response from 30 to 12 500 c/s and curves A (or 2) and B (or 1) are standard, but any of these can be replaced by any desired special specification, e.g. a noise measuring response rising by 3 dB per octave, a limit curve for engine measurements, etc. Calibration is by a built-in feedback arrangement.

More complicated instruments containing filters, analysers etc. or those for measuring very low levels cannot in general be run from batteries because they use too much current. In this regard it is useful to consider what the lowest level for practical measurements actually is. While the mean hearing threshold is at 0 dB or 0 phons, this level is of no practical importance apart from measurements in pure physics or medicine, for the normal sound of a person breathing already gives readings of 20 to 30 phons at a slight distance. Even under the most stringent conditions for silence (e.g. in a broadcast studio) 20 to 25 phons of stray noise are permitted — and it is most difficult to reach this low value. The acoustic equivalent of the stray electrical noise of microphones and their accessories has a level of 12 to 18 phons, although extremely costly high frequency condenser microphones with compensating circuits are in existence which suppress the microphone noise to a large extent, thus permitting direct measurements near threshold. For practical purposes, however, it is enough if the instrument starts at 20 or 25 phons.

As concerns the upper measuring limit, values above 130 dB or 130 phons are definitely in the zone of pain, even though higher alternating pressures can occur in the case of rockets, jet engines or explosions. At 134 dB, the effective value of sound pressure is already 1 mbar or 1 ‰ of normal atmospheric pressure, and if a sinusoidal sound pressure should rise to an effective value of 191 dB, its peak values would reach the extremes of double atmospheric pressure and vacuum, which is no longer physically possible. The normal laws of sound propagation do not apply above about 175 dB: excess pressure peaks, such as from explosions, spread faster than

with the speed of normal sound, change their pressure rate curve and their frequency spectrum in time, and their wave forms are asymmetrical with respect to constant pressure, their negative peaks being flattened (non-linear distortion). Standard instruments will often cope with levels above 130 phons if not all the sound energy is measured at once but in narrow bands, so that all overtones and difference tones of the 1st order are filtered out even if the instrument is overloaded. For overall measurements of high levels over wide bands, the standard instrument can be fitted with a special high pressure microphone.

If the frequency band is to be analysed, the necessary filter or search tone analyser can be connected to the level and loudness meter's output. Recording instruments are connected the same way (see fig. 6). Filter analysis requires time: an octave analysis takes 30 to 60 seconds on the average. When filtering in narrow bands, it is not so much the human element which determines the time taken for each reading, as the fact that a narrow band pass filter has a slow transient, thus needing time to give a steady reading, this time being inversely proportional to the bandwidth, as shown by the equation

$$A = \frac{1}{\sqrt[4]{1 + 0.195 \left(\frac{F}{TB^2} \right)^2}}$$

where A = the value reached by the analyser in the time available during which the search tone runs through the bandwidth *relative* to the steady reading with the search tone at rest,

B = bandwidth in c/s,

F = the frequency range analysed, in c/s,

T = the time in sec. taken to analyse the range F .

Allowing for an error of — 4%, so that A can be given a value of 0.96, the equation simplifies to

$$T = \frac{F}{B^2}$$

As an example, the time taken to analyse the range of from 0 to 20 000 c/s with a filter of 10 c/s bandwidth will be $\frac{20\,000}{10^2} = 200$ sec,



New!

Sound Level Meter

TYPE EZLT

BN 4513

The wonderfully handy little Sound Level Meter EZLT is exceptionally light in weight, yet has all the features of a reliable measuring instrument. Its high sensitivity and the choice of three dB weighting curves within the tolerances of German Standard DIN 5045 as well as ISO specifications give it the widest possible range of applications for standard loudness measurements. Of the three responses, the flat response is especially useful for measurements of low frequencies, while "curve 1" (ISO curve B) is used for measurements above 60 phons level and "curve 2" (ISO curve A) below 60 phons. Measurements are made with the instrument

held in the hand in such a way that the tester's body in no way distorts the sound field. The range of sensitivity is from faint noises (e.g. for sound proofing measurements) to the loudest traffic noise. Two A. F. outputs can be used, in special cases, for connection to other instruments such as frequency indicator, filters, tape recorder, frequency analyser, etc.



Frequency range

in accordance with German and international standards

Weighting curves

Choice of three responses independent of the actual level present

Sound level range

30 to 120 dB (over 2×10^{-4} bar) also for measurements to ISO curve C

Loudness ranges

30 to 120 phons also for measurements to ISO curves A and B

Quick, well damped pointer movement

Built-in batteries

Price includes battery charger

i.e. over 3 minutes, with a minus error of about 4%. These analysers are usually recording instruments whose writing pen or stencil also has a time lag which must equally be allowed for and will as a rule require several times the original time calculated. 10 to 15 minutes are normal for a search tone analysis.

Short-time sounds can be analysed if they keep being repeated during the whole of the analysis, the repetition frequency being below the audio band. One way to achieve this is to record them on tape; the particular section to be analysed is then cut from the rest and spliced into a loop which can be played back continuously. A precision tape recorder can be connected for this purpose to the output of a dB level meter and the maximum level reached can be announced on the tape for calibration during subsequent analysis. Any deviation from linear frequency response between the recording input and playback output must be taken into consideration. When using an electrical input in the place of a microphone, the microphone equalisation must be switched off.

A suitable tape recorder can also be used to bring infrasonic or ultrasonic vibrations into the audio range. The recorder must have a sufficiently wide frequency range and the sounds are recorded by suitable transducers or microphones working in the appropriate range, and for analysis the tape is played back at increased or reduced speed and fed to a normal voice frequency analyser. When for example analysing slow engine vibrations, playback at 50 times the original speed alters vibrations of 1 to 200 c/s into such at 50 to 10 000 c/s which can be easily analysed. In this case, an analysing bandwidth of 10 c/s will be only 0.2 c/s in terms of the original, so that the accuracy is increased by the frequency ratio. However, the playback time changes by the same amount: 1 minute of the original, played back at 50 times the speed, gives only 1.2 sec: the original recording must be at least long enough to enable a loop to be spliced.

At the splice, the sudden transition from the loop end to the beginning, with the conditions which happen to obtain there, can give rise to a spurious spectrum which can mask certain components of the spectrum to be measured. This is a problem which cannot be simply solved by a very oblique cut of the tape or the use of rotating multiple heads to make the transition more gradual, as the narrowing of the spurious spectrum is paid for by giving it an all the greater proportion of the total time. However, an electronic switch, called a tape shock absorber, can be inserted between the analyser and the writing instrument: properly adjusted, it will fade out the splice, replacing it by maintaining a constant level until it fades in again (fig. 7).

A further return can be had from the admittedly expensive search tone analysers by using a synchronised oscillator which, at any point of time,

ROHDE & SCHWARZ · MUNICH 8
MUEHLDOERFSTRASSE 15 · WESTERN GERMANY

gives the frequency which the analyser will then admit. This enables frequency and directional response measurement on microphones, loud-speaker and amplifiers.

Other instruments have been developed for special applications. In the case of variable speed engines or gearboxes, the harmonics of the variable fundamental can be measured by a setup consisting of a sound level or vibration meter and a search tone analyser whose search frequencies are controlled by the speed of the test object. In mass production, the most important harmonics can be measured and the total amplitude indicated, cutting in an automatic signal if a certain value is exceeded.

This very small selection of sound measuring instruments described shows how human ears can often be replaced or supplemented with advantage in technology, for the result shown by such an instrument will be free of individual variation and unaffected by subjective conditions. It must however always be borne in mind that the human ear is, with all its faults, an instrument of such range and versatility that it can be really and truly replaced by an artificial instrument only in the simplest of cases — even if all the component measurements are exact and objective, it will hardly be possible or even practical to try and combine these, to give a total result, in a measuring instrument, without recourse to hearing.

Explanatory notes to the record accompanying Gravesano Review No. 21

Side 1

Ex. 1. Pure tones in the middle voice frequency range.

Ex. 2. Towards the upper limit of hearing (about 15 Kc) the sound heard becomes gradually softer and less defined and finally disappears out of our range of perception altogether.

Ex. 3. At our lower hearing limit of about 30 c/s, the effect is similar.

Ex. 4. The 1000 c/s tone is a convenient middle range standard measuring frequency (see P. 31).

Ex. 5. The first of the two 1000 c/s tones heard alternately in this example has 10 times the sound pressure, or is 20 dB above the level, of the other.

Ex. 6. These two tones of 2000 and 60 c/s have the same physical level of sound pressure, but the lower tone sounds much softer because of the ear's loudness curve, i. e. its varying response to different frequencies (cf. Ex. 2 and 3).

Ex. 7. This tone first diminishes and then increases by steps of 10 phons, which can be accepted as a loudness ratio of about 2 : 1.

Side 2

Ex. 8. However, pure tones, such as were the subject of all the previous examples, are rarely met with in practice.

Ex. 9. They are more often grouped to form musical sounds,

Ex. 10. or they occur so closely spaced and numerous to be classed as noise, which can be constant,

Ex. 11. irregular,

Ex. 12. or discontinuous, as these banging noises.

Ex. 13. The subjective attitude to noise is as important as its physical classification (P. 36). For example, music, normally desirable, can be distressing during concentrated work or convalescence, when coming from next door;

Ex. 14. a mother listens to her baby's cry with interest, for it indicates a need or shows a desire for expression — the neighbours will be less tolerant of it;

Ex. 15. a noisy engine fills the proud owner of the vehicle with a sense of power, but is unpleasant to other road users or surrounding inhabitants.

Ex. 16. Noise of high harmonic content,

Ex. 17. especially if it is loud and contains many components in the upper range, is most distressing under nearly all circumstances;

Ex. 18. on the other hand, constant or rhythmically regular noise is more readily put up with, sometimes also having a soporific effect.

Ex. 19. Sudden and irregular noises, again, produce surprise and shock reactions.

Ex. 20. This example reproduces an artificial standard noise produced by a set of hammers and widely used for noise control tests. In the following examples you hear the frequency analysis of this noise in octave bands (Pp. 34—35):

Ex. 21. the 100 — 200 c/s band,

Ex. 22. 200 — 400 c/s,

Ex. 23. 400 — 800 c/s,

Ex. 24. 800 — 1 600 c/s,

Ex. 25. 1 600 — 3 200 c/s,

Ex. 26. 3 200 — 6 400 c/s,

Ex. 27. 6 400 — 12 800 c/s.

GEORG NEUMANN · LABORATORIUM FÜR ELEKTROAKUSTIK GMBH

BERLIN SW 61 · CHARLOTTENSTRASSE 3 · TELEFON 614892

MITTEILUNG

Betr.: Neue Fabrikations- und Büroräume

Ende Januar 1961 bezogen wir in einem modernen Gebäudekomplex neue Fabrikations-, Laboratoriums- und Büroräume. Wir können dadurch die in den letzten Jahren aus Raummangel vom Hauptbetrieb getrennten und zum Teil weit entfernt liegenden Abteilungen unserer Firma wieder vereinigen.

Nach dem Umzug und einer kurzen Übergangszeit wird die Zusammenfassung aller Abteilungen unserer Firma eine noch bessere Durchführung der uns gestellten Produktions- und Entwicklungsaufgaben ermöglichen. Dies wird der Qualität unserer Erzeugnisse und der noch besseren Anpassung an die Wünsche unserer Kunden zugute kommen.

Bitte, beachten Sie die neue Anschrift im oberen Teil dieser Mitteilung. Die Charlottenstraße liegt in unmittelbarer Nähe der Friedrichstraße und Kochstraße im altbekannten Zeitungsviertel von Berlin. Postamt, Telefonnummer und Telegrammanschrift unserer Firma sind die gleichen wie bisher.

MEMORANDUM

Re: New factory and office premises

At the end of January, 1961, our factories, laboratories and offices moved into new premises, enabling unification of those of our departments which rapid expansion had separated, in some cases at considerable distance, from the main works for lack of space. After the move and a brief period of transition we shall be in a better position to attend to all production and developmental problems entrusted to us than ever before; the quality of our products will benefit and our customers will receive even more individual attention than previously.

Please note our new address at the top — our telegraphic address and telephone number remain unchanged.

GEORG NEUMANN

Laboratorium für Elektroakustik GmbH

Ein integriertes System hoher Wiedergabequalität

von

F. A. LOESCHER

Auch heute noch sind die sekundären elektroakustischen Wandler, d. h. also die Lautsprecher, der eigentliche Engpaß bei den Übertragungen von Schallvorgängen auf elektroakustischem Wege.*

Die bestehenden Schwierigkeiten sind komplexer Natur und können im wesentlichen in folgende vier Gruppen eingeordnet werden:

1. Veränderungen in der amplitudenmäßigen Struktur des Klangbildes (lineare Verzerrungen),
2. Entstehung harmonischer und unharmonischer Schwingungen, die im ursprünglichen Klangbild nicht vorhanden waren (Nichtlineare Verzerrungen und Intermodulation),
3. Verfälschung der Ein- und Ausschwingvorgänge,
4. Verkleinerung des Raumabstrahlungswinkels, besonders für die hohen Frequenzen (Richtcharakteristik).

Bevor die Technik grundlegend neue Wege findet und es gelingt, diese Schwierigkeiten von vorneherein ganz zu vermeiden, schien es bei der heutigen Situation interessant, unter *konsequenter und lückenloser* Ausschöpfung bekannter Prinzipien und vorhandener Erkenntnisse vorerst einmal abzuklären, wie weit von der physikalischen Seite her die Natürlichkeit einer elektroakustischen Übertragung mit den heutigen Mitteln getrieben werden kann. Dabei wurde bewußt darauf verzichtet, den stereophonen Effekt in diesen Versuch miteinzubeziehen, da — dieser die normalerweise angenehme, hier aber die Objektivität verfälschende — Eigenschaft hat, die genannten Mängel bis zu einem gewissen Grade zu verdecken.

Ausgehend von dieser Aufgabenstellung wurde ein Wiedergabesystem geschaffen, in das aus Gründen, die weiter unten ersichtlich werden, auch der die Lautsprecher speisende Verstärker als zugehörige Einheit mit einbezogen wurde, so daß ein integriertes Wiedergabeaggregat entstand. Mit einer einzigen Ausnahme wurde diese Anlage ganz kompromißlos zusammengestellt. Diese Ausnahme bezieht sich auf den Verzicht einer Verwendung von elektrostatischen Lautsprechern für die Höhenwiedergabe. Diese an sich in diesem Übertragungsbereich überlegene Lautsprechertypen besitzt nur einen verhältnismäßig niedrigen Wirkungsgrad, so daß entweder der Gesamtwirkungsgrad der Lautsprecheranordnung an den der elektrostatischen Lautsprecher hätte angeglichen werden müssen, d. h. verhältnismäßig

* Siehe Gravesaner Blätter, Heft 18, Seite 41 ff.

niedrig geworden wäre, oder aber ganz auf die Verwendung dieser Lautsprechertypen verzichtet werden mußte. Der letztere Weg wurde gewählt, da ein dynamisches Hochtonsystem mit gutem Wirkungsgrad ausfindig gemacht werden konnte, das meßtechnisch und bei Vergleichen kaum schlechter abschnitt als die in Betracht gezogenen elektrostatischen Systeme.

Unter Zugrundelegung der weiter oben aufgeführten vier Fehlerkategorien wurden folgende Grundforderungen für die Anlage aufgestellt:

1. Erreichung eines weitgehend linearen Frequenzganges der Einrichtung unter Einbeziehung des Wiedergaberaumes, und zwar in einem Wiedergabebereich zwischen 15 und 15 000 Hz,
2. Herabsetzung der harmonischen und nichtharmonischen Verzerrungen unter die Hörbarkeitsgrenze,
3. Erzielung einer Wiedergabe, bei der die Ein- und Ausschwingvorgänge denen der Originaldarbietung entsprechen oder diesen doch wenigstens sehr nahe kommen,
2. Ausbildung einer möglichst gleichmäßigen Abstrahlcharakteristik der Lautsprecheranordnung mit einem Abstrahlwinkel von wenigstens 100° für 10 000 Hz.

Zur Lösung dieser Aufgabenstellung wurde folgender Weg beschritten und wurden folgende Überlegungen berücksichtigt:

a. Endverstärker und Lautsprecher wurden zu einer zusammengehörigen Einheit zusammengefaßt, die aus vier auf einem Chassis zusammengefaßten Verstärkern und vier Lautsprechergruppen besteht. Jedem Endverstärker ist eine Lautsprechergruppe zugeordnet. Diese Lösung gibt die Möglichkeit, die üblicherweise am Verstärkerausgang abgenommene lineare Spannungsgegenkopplung, durch die der dynamische Innenwiderstand des Verstärkers herabgesetzt wird, aus der Schwingspule oder einer Hilfs-Schwingspule des Lautsprechers zu entnehmen. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der — zumindest teilweisen — Kompensation des durch wilde Schwingungen der Lautsprechermembran infolge von stehenden Wellen gebildeten Verzerrungsanteiles, sowie der besseren Bedämpfung von Ein- und Ausschwingvorgängen der Membran, die hier aktiv erfolgt, während sie im Falle der ausschließlichen Bedämpfung durch einen teilweisen oder vollständigen Kurzschluß der Schwingspule über den dynamischen Innenwiderstand des Verstärkers nur passiver Natur ist. Maßgebend hierfür ist die Tatsache, daß für die in diesem Falle als Generator wirkende Schwingspule der dynamische Innenwiderstand des Verstärkers praktisch einen Kurzschluß darstellt, so daß die von der Schwingspule erzeugten Fremdspannungen nicht als Gegenkopplungsspannungen zur Wirkung kommen können, während im Falle der Gegenkopplung von einer Anzapfung der Schwingspule her, der zwischen dem (in Bezug auf die Gegenkopplung) heißen Pol des Verstärkerausganges und dem Gegenkopplungsabgriff lie-

genden Wicklungsteil der Schwingspule als Vorwiderstand in Bezug auf den dynamischen Innenwiderstand des Verstärkers hin wirkt.

b. Als Verstärkerschaltung wurde ein eisenloses System (Philips) gewählt, wobei durch entsprechende Dimensionierung der Schaltelemente der Frequenzgang der Endstufe auf einen Bereich zwischen 5 Hz und 50 000 Hz ± 3 dB gebracht wurde.

Die Ausgangsleistung jeder der vier Endstufen beträgt 10 Watt bei einem Klirrfaktor von weniger als 1%. Die Stromversorgung der Endstufen erfolgt aus einem gemeinsamen Netzteil.

c. Jede der Lautsprechergruppen wurde aus drei Einzellautsprechern zusammengestellt, von denen einer den unteren, einer den mittleren und einer den oberen Teil des zu übertragenden Frequenzbandes verarbeitet. Als Tieftonlautsprecher wurden elektro-dynamische Systeme eigener Konstruktion verwendet, über die weiter unten noch ausführlicher berichtet wird. Die permanentdynamischen Mittelton-Lautsprecher wurden bei zwei der Lautsprechergruppen gegenüber den anderen beiden Gruppen unterschiedlich gewählt, um in diesem Bereich einen gewissen Ausgleich der durch Phasensprünge bedingten schnellen Schwankungen in der Frequenzkurve zu erreichen. Die verwendeten permanentdynamischen Hochtonsysteme besitzen einen Außendurchmesser von ca. 5 cm und sind mit einer Membran aus Kunststoff ausgerüstet, die bei großer Steifigkeit verhältnismäßig leicht ist. Die vier Hochtonlautsprecher wurden in der Mitte der Schallwand der Lautsprecher-Kombination auf den vier Seiten einer gleichseitigen Pyramide angeordnet, so daß eine Abstrahlung der höchsten Frequenzen in vier um je 90° gegeneinander versetzten und schräg in den Raum verlaufenden Strahlrichtungen erfolgt.

Bei der Verteilung der Frequenzbereiche auf die einzelnen Lautsprecher wurde bewußt auf die Verwendung von Bandpässen verzichtet, um die unerwünschten Phasendrehungen und Einschwingvorgänge solcher Glieder in den Übergangsgebieten so weit wie möglich zu vermeiden. Statt dessen wurden nur kapazitive Anpassungsglieder verwendet, die den jedem Lautsprecher zugeordneten Frequenzbereich nach unten hin begrenzen. Die erwünschte Einengung des Frequenzganges der Tiefton- und der Mittelton-Lautsprecher nach oben hin wurde durch die Wahl eines Membranmaterials hoher innerer Dämpfung und eine weiche Einspannung der Membranen erreicht.

Für die Konstruktion der das schwierigste Glied der Lautsprecher-Kombinationen darstellenden Tiefton-Lautsprecher waren folgende Überlegungen maßgebend: Zur Abstrahlung sehr tiefer Frequenzen bis hinunter zu 15 Hz sind entweder sehr große Membranflächen oder aber sehr große Schwingungsamplituden der Lautsprechermembranen nötig. Große Schwingungsamplituden der Membran (in der Größenordnung von 10 mm und mehr)

führen bei dynamischen Lautsprechern unweigerlich zu Verzerrungen und zu einer erheblichen Verschlechterung der Ein- und Ausschwingvorgänge. Letztere sind bei tiefsten Frequenzen an sich nicht mehr von entscheidender Bedeutung, jedoch beim dynamischen System wegen der stark massebelasteten Membran an sich schon recht ausgeprägt, und jede weitere Erhöhung kann daher nur von Schaden sein. Gegen große Amplituden spricht weiterhin die Möglichkeit des Zustandekommens eines Doppler-Effektes für den oberen, vom Lautsprecher wiedergegebenen Grenzbereich, da die mit großer Amplitude im Rhythmus der tiefsten Frequenzen schwingende Lautsprecher-membran eine bewegte Schallquelle darstellt, die Anlaß zu einer Frequenzmodulation dieses höheren Frequenzbereiches sein kann.

Es wurde daher zur Verwendung von vier großen Tieftonlautsprechern mit einem Membrandurchmesser von ca. 35 cm gegriffen, wodurch eine strahlende Gesamtfläche von beinahe 4000 cm² für die tiefen Frequenzen geschaffen wurde. Dafür konnte die Membranamplitude auf maximal 8 mm beschränkt werden, einen Wert, der aufgrund der gewählten Schwingspulenkonstruktion mit Leichtigkeit und ohne Bildung von Verzerrungen von den Tieftonsystemen bewältigt wird. Zur Erreichung dieses Zieles erhielt der Luftspalt des Magnetsystems eine Höhe von 8 mm, während demgegenüber die Schwingspule mit einer Länge von 16 mm ausgeführt wurde. Die symmetrisch im Luftspalt justierte Schwingspule ist so in der Lage, beiderseits um je 4 mm aus dem homogenen Magnetfeld des Luftspaltes herauszuschwingen, ohne daß sich die im homogenen Feld befindliche Anzahl der Schwingspulenwindungen zahlenmäßig ändert. Eine verzerrungsfreie, maximale Nutzamplitude von insgesamt 8 mm ist damit sichergestellt. Dieser Wert, zusammen mit der schwingenden Fläche von 4000 cm² sowie der bei 8 Hz liegenden Eigenresonanz der Tieftonsysteme garantiert die ungeschwächte Abstrahlung der geforderten unteren Grenzfrequenz von 15 Hz. Die erwähnte niedrige Eigenresonanz der Tieftonsysteme von nur 8 Hz, die also beinahe eine ganze Oktave unterhalb der unteren Grenze des Übertragungsbereiches liegt, stellt einen weiteren wesentlichen Punkt zur Erreichung der geforderten Ziele dar. Durch sie wird jede Amplitudenüberhöhung infolge im Übertragungsbereich liegender Eigenresonanzen des schwingenden Gebildes, bestehend aus Membranmasse und federnder Einspannung, verhindert.

Die niedrige Eigenresonanz der Systeme konnte durch eine extrem große Außenzentrierung der Schwingspule und eine außerordentlich weiche Einspannung der Membran an ihrem äußeren Rande erreicht werden. Als Material für die Randeinspannung der Membranen wurde eine sehr dünne Folie aus Hart-PVC-Schaum verwendet, die — zur Unterdrückung stehender Wellen und als Verschluss für die teilweise offenen Poren — mit einer elastischen Masse imprägniert wurde. Zur Erzeugung des erregenden Magnetfeldes wurde ein Elektromagnet gewählt, da bei einem solchen der

Aufwand für die Erzeugung hoher Feldstärken vergleichsweise geringer ist als bei einem Permanentmagneten, bzw. die Kosten für den Erregerstrom weniger ins Gewicht fallen als die sehr hohen Gesteungskosten des Permanentmagneten. Mit dem verwendeten Magneten war es möglich, eine Feldstärke von ca. 16 000 Gauß zu erreichen, ein Wert, der eine sehr gute Dämpfung aller Ein- und Ausschwingvorgänge garantiert, und der auch einen beträchtlichen Wirkungsgrad des Lautsprechers sicherstellt.

d. Unter Berücksichtigung der entscheidenden Bedeutung, die dem Einbau der Lautsprecher zukommt, wurde auch in dieser Hinsicht ein kompromißloser Weg gewählt. Jeder Gehäuseeinbau verfälscht die Abstrahlungsbedingungen für die tiefen Frequenzen, sei es durch Auftreten einer Kompressionswirkung an der Rückseite der Systeme infolge eines zu kleinen Volumens des verwendeten und hinten geschlossenen Gehäuses, sei es durch die Bildung von Resonanzen in einem teilweise offenen Gehäuse, das als Helmholtz-Resonator wirkt. Da die Abmessungen der Maul-Öffnung eines Exponentialtrichters bei der gegebenen, erheblichen Grundfläche der Lautsprecher-Kombination (80 × 80 cm) und der gewünschten niedrigen unteren Grenzfrequenz praktisch nicht tragbar waren, kam als einzige technisch einwandfreie Einbaumöglichkeit die „unendliche Schallwand“ in Frage. Diese wurde durch das Einsetzen der Lautsprecher-Kombination in die Stirnwand des Studios I in Gravesano verwirklicht. Der Raum hinter der Kombination wurde so groß gewählt (ca. 6 cbm), daß die darin auftretende Kompressionswirkung vernachlässigt werden kann. Eigenresonanzen des Raumes hinter den Lautsprechern wurden weitgehend durch Auskleiden mit Schlackenwolle unterdrückt und Eigenschwingungen der Wände durch Verwendung eines Mauerwerkes mit 25 cm Stärke praktisch unmöglich gemacht.

Zusammenfassung

Unter konsequenter und lückenloser Anwendung bekannter Arbeitsprinzipien und unter Berücksichtigung aller erfaßbaren physikalischen Gegebenheiten wurde der Versuch unternommen, ein elektroakustisches Wiedergabesystem höchster Güte zu schaffen. Der Erfolg rechtfertigte den getriebenen Aufwand, und der Beweis konnte erbracht werden, daß bereits mit den Mitteln der heutigen Technik eine Wiedergabequalität erreicht werden kann, die allen physikalischen Kennzeichen der Originaldarbietung entspricht, selbst wenn auf die ausgleichenden und letzte Natürlichkeit vermittelnden Komponenten des räumlichen Klanges verzichtet wird.

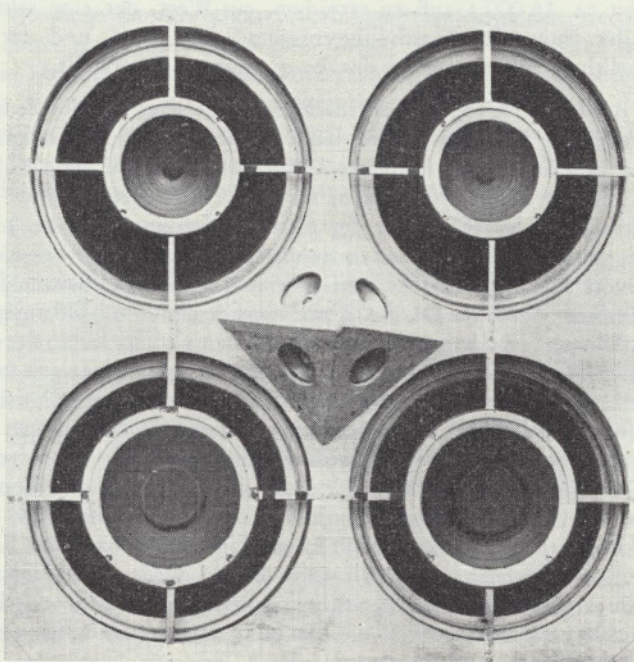


Abb. 1 Lautsprecher-Kombination für höchste Wiedergabetreue, bestehend aus vier Tieftön-, vier Mittelton- und vier Hochton-Lautsprechern.

Fig. 1 Highest fidelity loudspeaker combination consisting of four each bass, middle range and treble speakers.

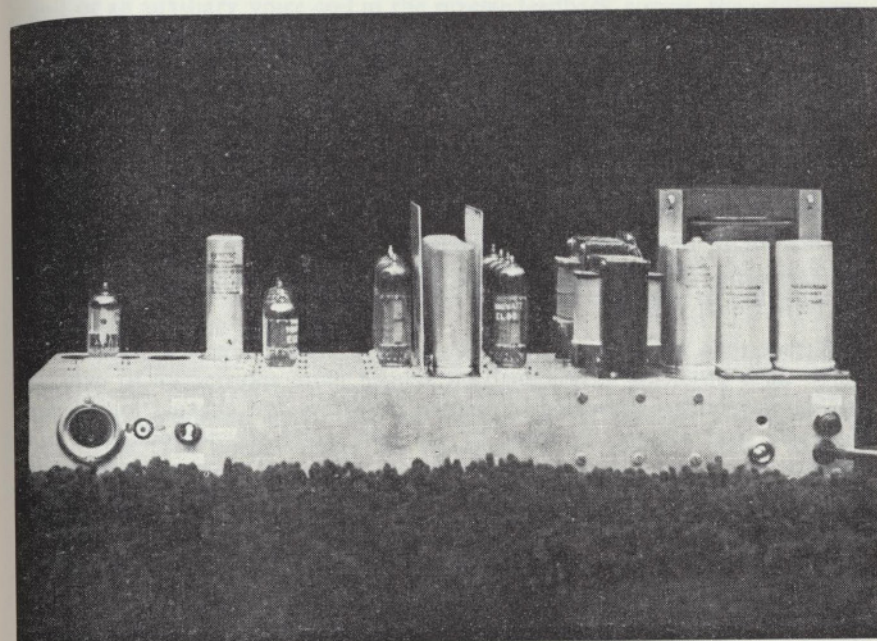


Abb. 2 Vierfach-Endstufe mit einer Leistung von 4×10 Watt, die mit der Lautsprecher-Kombination der Abb. 1 eine integrierte Einheit bildet.

Fig. 2 Quadruple power stage yielding 4×10 W, forming an integral unit with the speaker combination shown in Fig. 1.

An Integral High Fidelity Unit

by

F. A. LOESCHER

In a previous article (Gravesano Review 18, 53) I pointed out that loudspeakers still are the bottleneck in electroacoustic reproduction. The problems are complex, but can be divided into four groups:

1. changes to the wave amplitude (linear distortion),
2. formation of harmonic and non-harmonic wave components originally not present (nonlinear distortion and intermodulation),
3. inaccurate reproduction of transients,
4. narrowing of the radiation angle, especially as regards high frequencies (directional effect).

Rather than wait for engineers to develop completely new methods to solve these problems satisfactorily, it seemed more appropriate to exhaust all the possibilities presented by known principles and existing knowledge *logically and utterly*, in order to see how good the reproduction can become today. Stereophony was purposely left out of account, as it tends to hide the faults mentioned above — a property which is misleading, desirable though it may be under normal circumstances.

This led to a reproduction unit which included the design of the power amplifiers feeding the speakers, for reasons to be explained presently, resulting in an integral unit. No compromises were made in the design, but for a single exception, namely that electrostatic speakers for treble reproduction were dispensed with, for the superiority of this speaker type in this range is outweighed by its poor efficiency so that it would have been necessary to lower the efficiency of the whole set to match that of the electrostatic speakers. However, a dynamic tweeter unit was found which was nearly as good as the electrostatic systems under consideration, both by measurement and by ear.

The following basic design specifications were set up in reference to the four above mentioned types of faults:

1. flat frequency response of the unit and playback room from 15 to 15 000 c/s,
2. harmonic and nonharmonic distortion to be below hearing threshold,
3. faithful reproduction of transients,
4. the radiating angle served by the set to be as evenly covered as possible and to be at least 100° at 10 kc.

The specifications were met in the following way:

a. Line amplifiers and loudspeakers were regarded as a unit which consists of four amplifiers mounted on a single chassis and a speaker group fed by each amplifier. This makes it possible to include the voice coil or an auxiliary voice coil in the reverse feedback circuit, the advantage being that the distortion components produced by standing waves in the speaker cone are at least partly compensated and that transients are actively damped in the cone while damping by the amplifier's internal impedance caused by the usual reverse feedback and partly shorting the voice coil is passive only, because in the former case the amplifier's internal impedance shorts out any stray voltage produced by the voice coil (which acts as a generator in this case) preventing its taking effect as feedback, while in the latter case of feedback from a voice coil tap, the part of the winding between the amplifier's hot output terminal and the feedback tap acts as a resistance between the voice coil and the actual internal impedance of the amplifier.

b. The amplifier circuit chosen was an ironless system (Philips) which was finally designed to a response of from 5 to 50 000 c/s ± 3 dB. Each of the four output stages has an output of 10 W with less than 1% distortion. The output stages are operated by a common power supply.

c. Each speaker group consists of a speaker each for the bass, middle range and treble. The woofers are electrodynamic speakers of my own design to be described in greater detail below. Two different designs of middle range speaker with two speakers of each design were chosen to balance up to a point the many peaks and dips in the response caused by phase jumps. The permanent dynamic tweeters used have plastic cones of about 2" diameter which are very stiff compared to their light weight. The four tweeters were mounted in the middle of the speaker panel on the four faces of an equilateral pyramid with its apex facing the listener so as to radiate in four different oblique directions into the room.

Crossover networks and band pass filters were avoided because of the undesirable phase changes and transients associated with them. Instead, capacitors were used to restrict each speaker's range at the lower end, while the desired upper limit reproduced by the woofer and middle range speaker was obtained by using an inherently damped cone material with soft mounting.

The most problematical part of the unit was the woofers. Satisfactory reproduction of frequencies down to 15 c/s requires either extreme cone amplitudes or extreme cone areas. Large amplitudes, of the order of $\frac{3}{8}$ " and over, inevitably lead to distortions and poor transients in dynamic speakers; although the importance of transients is not so great in the bass range, the necessarily rather heavy cone already has a rather characteristic transient so that any further addition of this nature is to be avoided.

Moreover, large vibrating amplitudes tend to be accompanied by the Doppler effect near the speaker's upper frequency limit, for the cone vibrating at large amplitude at the lower frequency is in reality a sound source in motion which can frequency modulate the upper frequencies. It was therefore decided to use large areas rather than large amplitudes, and the four 14" speakers used have a total area of over 600 in.² so that the amplitude could be limited to $\frac{5}{16}$ ". For distortion-free vibration of this amplitude, the air gap was designed to a width of $\frac{5}{16}$ " and the voice coil to a length of $\frac{5}{8}$ " symmetrical to the gap when at rest; the coil can therefore move $\frac{5}{32}$ " either side out of its rest position without changing the number of turns which cut the homogeneous field, so that distortion-free vibration of $\frac{5}{16}$ " amplitude is assured. This value, together with the 600 in² of radiating area and a speaker resonance of only 8 c/s guarantees full reproduction of frequencies down to the required 15 c/s. The very low resonance of 8 c/s just mentioned, which is nearly an octave below the lowest frequency to be reproduced, is another point essential to the satisfactory solution of the problem, for the frequencies reproduced do not reach the value at which natural resonance of the vibrating system, consisting of the cone as mass and the mounting as spring, reinforces the vibrations to an unnatural degree. This resonance was obtained by an extremely compliant spider and unusually soft mounting of the cone around the circumference using a very thin foil of hard PVC foam impregnated with an elastic substance for the suppression of standing waves and to close the partly open pores.

The field is generated by an electromagnet, considered as more economical than a permanent magnet, for the running costs of the former are more than outweighed by the expense of the latter at the required flux density of about 16 000 gauss, a value which guarantees not only good efficiency but excellent damping of all transients.

d. Considering the decisive importance of the way the loudspeakers are mounted, no compromises were made again as regards this point. A housing of any sort falsifies radiation of low frequencies either because of air compression in too small a closed housing acting on the rear of the cones or because of resonances displayed by a partly open housing which then acts as a Helmholtz resonator. Practical considerations eliminated the exponential horn as a possible solution, as its mouth opening would have reached impossible dimensions for the considerable area of the combination (2' 8" square) if the lowest frequencies were to have satisfactory reproduction. The "infinite wall" remained as the only feasible, technically irreproachable solution: the unit was built into the front wall of Grave-sano's Studio I, the room behind having a volume of about 220 cu. ft. so that compression effects can be neglected. Room resonances were largely

suppressed through facing with slag wool while wall resonances are practically impossible with the 10" brickwork employed.

Summary

Logical and utter exhaustion of all known working methods while making the most of every physical opportunity was the principle governing construction of an electroacoustic reproduction unit of the highest quality. The success has justified the trouble taken, and it could be proved that the science and art is already far enough advanced to make possible a quality of playback which is the equivalent, in all physical respects, of the original sound, even though not resorting to the ultimate naturalness produced by stereophony.

Konzertmäßige Wiedergabe der Totenmesse von Berlioz

(Schallplattenaufnahme der Firma Véga, Paris)

Die Allabstrahler-Kugel

Am 27. April 1961 erfolgte in der Kirche von San Francesco (Locarno, Tessin, Schweiz) die erste konzertmäßige Verwendung der Allabstrahler-Kugel von Hermann Scherchen.

*

Public Concert Reproduction of Berlioz' Requiem Mass

(recorded by Véga, Paris)

The Universally Radiating Sphere

The first public concert using Hermann Scherchen's Universally Radiating Sphere has taken place in the church of San Francesco at Locarno, Tessin, Switzerland, on April 27, 1961.

Meßapparaturen und Kunst

von

HERMANN SCHERCHEN

I

Motto:

Karl der V. im Kloster St. Just

„Wie konnte ich nur so vermessen sein zu versuchen, alle meine früheren Untertanen unter den gleichen Glauben zu bringen, wenn es mir trotz größter Anstrengungen jetzt nicht einmal gelingt, auch nur zweien aller von mir hergestellter Uhren volle Übereinstimmung ihres Ganges zu verleihen.“

ODER

Toleranz ± 10

Am 18. Juni 1817 berichtete die BERLINER ALLGEMEINE MUSIKZEITUNG auf Seite 233 in Nummer 25 zum ersten Mal ausführlich über „Mälzel's Metronom“.

Die Patentschrift gibt zwei Ziele des Apparates an:

1) daß dadurch den Komponisten *aller* Länder ein ebenso einfaches als eindeutiges Mittel an die Hand gegeben wird, *genau* anzugeben, mit welcher Schnelligkeit ihre Werke ausgeführt werden sollen, und

2) daß der heranreifende Musiker dadurch die Fähigkeit gewinnt, ein Tempo genau durchzuhalten.

Die bedeutendsten *englischen, französischen und österreichischen* Komponisten der Zeit verpflichteten sich, von nun an ihre Werke nur noch mit Tempoangaben nach Mälzel's Metronom zu machen (an ihrer Spitze Beethoven, der gerade in einem Briefe über den Unsinn der italienischen Tempo-bezeichnungen geklagt hatte, von denen z. B. „allegro“ das schnelle Tempo bezeichnen sollte, während „allegro“ im Sprachgebrauch nichts als „heiter“ bedeute, man aber „heiter“ (allegro) *ebenso in schnellem als auch im langsamen Tempo sein könne*). Abb. 1 (Metronom). Abb. 2 (Patent).

Mälzel's Metronom — schon 1817 in Londons beiden großen Theatern „Covent-Garden“ und „Drury Lane“ eingeführt, wurde für 150 Jahre zum musikalischen Tempomesser!

Aber schon zweieinhalb Monate vorher, am 2. April 1817, war in der gleichen Zeitung ein Artikel aus Kopenhagen erschienen, der die heute fast allein im praktischen Gebrauch übrig gebliebene Metronom-Taschenuhr zum Gegenstand hatte. Diese war die Erfindung eines dänischen Uhrmachers,

Sparrevogn. Der Artikel brachte nichts wesentlich Neues, außer dem amüsanten Vorschlag, im Theater oder Konzertsaal eine große Uhr dieser Art taktfigurierend für das ganze Orchester sichtbar aufzustellen. Dann wird spaßhafterweise des Weiteren ausgeführt, daß für die Einzelnen, deren Augen und Ohren schon volle Beschäftigung hätten, für Stücke, in denen keine Fermate, kein Ritardando etc. vorkommt, *Fühlbarkeit* an die Stelle des zu hörenden MetronompPENDELS oder der zu sehenden Metronomuhr treten könnte. Und zwar etwa als ein elastischer Fußboden oder eine Vorrichtung auf demselben, der so in eine Taktbewegung durch eine Mechanisierung eingewiegt werde, daß jeder, dem es beliebt sich in Verbindung zu setzen, sie leise fühle, so daß er *ungestört* seine Aufmerksamkeit auf Lesen, Ausdruck etc., wenden könne.

„Wären so erst die Füße in Requisition gesetzt, so könnte mit der Zeit die Reihe auch an die Nase und für Saiten-Instrumentisten gleichfalls an die Zunge kommen“. . . . Abb. 3 (Sparrevogn's Taschenuhr).

September 1817 endlich erschien ein dritter Artikel: dieser nach dem ersten Berliner und dem zweiten Kopenhagener aus — *Mailand*. Er bringt Bedenken vor gegen die Anwendung sowohl von Mälzel's MetronompPENDEL als von Sparrevogn's Metronomuhr, ohne beider Wert ernsthaft anzuzweifeln.

Die Mailänder Einwände besagten:

„In betreff der Taktmesser scheint man gewisse Rücksichten ganz außer Acht gelassen zu haben. Das Zeitmaß in der Musik ist bei den verschiedenen Nationen keineswegs dasselbe. So haben z. B. die Italiener größtenteils ihr eigenes Tempo in den haydn'schen und mozart'schen Symphonien: sie nehmen z. B. das Adagio aus Mozarts Symphonie in Es-dur und das haydn'sche Andante mit dem Paukenschlag weit geschwinder als die Deutschen, sonst machen diese Stücke keinen Effekt. Viele feurige Allegros und Prestos solcher Symphonien werden in Italien mit minderem Feuer gespielt. Man richtet sich überhaupt hier zu Land *nach der Beschaffenheit der Melodie*. Und hat das Thema eines Adagio oder Andante etwas Tändelndes, so nimmt es der Italiener stets geschwinder. Wären Haydn und Mozart zugegen, so würde er es, aus Achtung für diese Männer, in ihrem vorgeschriebenen Tempo nehmen: allein dann wirkte es zuverlässig nicht auf ihn. *Hier leidet also das Tempo eine Modifikation durch die Individualität der italienischen Nation*.

In betreff der Vokalmusik möchte ich den Taktmesser oft sogar für ganz unbrauchbar erklären. Setzen wir den Fall: X. in Wien schreibt eine Oper für das große mailändische Theater, und gibt bei jedem Stück genau das Tempo nach dem Taktmesser an: so kann er doch leicht die meisten Stücke

in anderem Tempo nehmen müssen. Erstens ist es bekannt, daß selbst der Komponist einer Oper, wenn es zu den Theaterproben kommt, vieles in den Tempos bessern Effekts wegen ändert (!), denn etwas Anderes ist's, beim Klavier zu komponieren, oder das selbe Stück sodann auf dem Theater hören. Zweitens ist es ausgemacht, daß sich mehrere Tempos in einer Oper nach Beschaffenheit und Größe des Theaterlokals richten und richten müssen. So wurden hier auf unserm sehr großen Theater alla Scala manche Stücke in den Mozartischen Opern in ganz anderen Tempos, wie in Deutschland, genommen, weil sie sonst gewiß (besonders bei den Italienern) den Effekt verfehlt hätten. Drittens verlangt auch, und nicht mit Unrecht, die Individualität des Sängers Rücksichten in Ansehung der Bestimmung des Tempos.

Wie will nun dies Alles Herr X. in Wien nach seinem Taktmesser angeben?“

Mälzel selbst war sich der Grenzen mechanischer Maßstabsanwendungen bewußt. Am Schluß seiner Patentschrift versichert er ausdrücklich, daß alle Einzelteile seiner Metronome so sorgfältig genau und einander entsprechend ausgeführt seien, daß er „für die ersten drei Minuten“ bei jedem seiner Taktmesser genau gleichen Gang garantieren könne.

In der Patentschrift berichtet Mälzel ferner von dreierlei Einwänden, die ihm gegenüber gegen seinen Taktmesser gemacht worden seien:

- 1) daß die *italienischen Tempobezeichnungen* voll genügten, um jedes Tempo klar auszudrücken,
- 2) daß es überhaupt nicht von solcher Wichtigkeit sei, ob ein Tempo etwas zu langsam oder etwas zu schnell genommen werde,
- 3) daß die Komponisten — ihrer Gemütsstimmung gemäß — ihre Tempi zuweilen schneller oder langsamer nähmen.

Und bemerkt dazu:

- 1) daß die genaue Bedeutung vieler italienischer Tempobezeichnungen kaum aus dem Wörterbuch zu erkennen sei,
- 2) daß weitgehende Meinungsverschiedenheiten beständen über den relativen Schnelligkeitsgrad, der durch italienische Bezeichnungen verlangt werde (Beispiel: welches ist die tempomäßige Aneinanderreihung der vier, hier alphabetisch sich folgenden Ausdrücke ADAGIO, GRAVE, LARGO, LENTO?),
- 3) daß erstarrte Komponisten oft irrigen oder zumindest ungenauen Gebrauch von italienischen Tempobezeichnungen machten. So hätten z. B. unter Haydns eigener Leitung in einem seiner *Adagios* 52 Viertel 1 Minute in Anspruch genommen, in einem anderen dagegen waren es 80 Viertel gewesen.

Dezember 1817 erschienen in der gleichen Zeitung Beethovens berühmte Tempoangaben „nach Mälzel's Metronom“ für die ersten acht Symphonien:

Diese zeigen weitgehendste Unterschiede des Zeitwertes für immer ein und dieselbe italienische Tempobezeichnung:

Adagio	 = 63, 84 und  = 66
„ assai	 = 80
„ molto	 = 88
Poco sostenuto	 = 69
Larghetto	 = 92
Andante poco	 = 108
„ con moto	 = 92, 120 und  = 50
Menuetto	 = 108
ABER: <i>Tempo di Minuetto</i>	 = 126
Allegretto	 = 88,  = 76,  = 60,  = 108
Allegro	 = 84,  = 96,  = 132
„ ma non troppo	 = 66, 80
„ un poco meno	 = 88
„ con brio	 = 100, 108, 112, und  = 60
„ molto	 = 76, 152
„ molto vivace	 = 88,  = 108
„ vivace	 = 80, 84, und  = 69, 100, 116
Vivace	 = 104
Presto	 = 116,  = 112,  = 132
„ meno assai	 = 84

Muß es nicht für Beethoven selbst zum Verzweifeln gewesen sein, als er diesen seinen graulichen Salat italienischer Tempobezeichnungen mit seinen eindeutigen Zeitmesserangaben verglich? Aus *Dankbarkeit* schrieb Beethoven für „Mälzel's großes Orchestrion“ — den Prototyp aller späteren Musikautomaten — „Wellington's Sieg“, oder „Die Schlacht bei Victoria“ (ein zu Unrecht, ebenso wie „Der Glorreiche Augenblick“, von musikalischen

„Highbrows“ verachtetes, weil sogenanntes „Gelegenheits-Werk“), und aus *Begeisterung* dedizierte er indirekt Mälzel den zweiten Satz seiner 8. Symphonie, indem er diesem den Kanon „ta, ta, ta, ta, lieber Mälzel“ unterlegte. (Abb. 6).

*

Wir begegnen beim Menschen und in der Musik dem gleichen Phänomen: Individuen wie Musikstücke haben immanente Grundtempi! Aufgabe der Komponisten ist es, diese eindeutig durch den Zeitmesser zu bestimmen. Ob sie dann etwas schneller oder etwas langsamer ausgeführt werden, spielt keine Rolle, so lange die Grenzen nicht überschritten werden, über die hinaus das immanente Grundtempo verloren geht. Menschen wie Musik existieren am besten, wenn dies zeitgemäß ihres immanenten Grundtempos erfolgt.

Ebenso wichtig ist, durch den Gebrauch des Zeitmessers zu erlernen, ein angeschlagenes Grundtempo verzerrungsfrei durchzuführen. Gelingt dies bei einer Musik, die wesentlich über einem Grundtempo konzipiert ist, so kann man ein fast materielles Wohlergehen des Musikablaufes wahrnehmen.

Aber es gibt auch Musikstücke wie Individuen, die kein klar definiertes Grundtempo besitzen. Solche Menschen scheinen krank und solche Musik ist schlecht.



Containing
Instructions, Exercises & Lessons
for the
Piano Forte
calculated with the aid of the
METRONOME.
to convey to the Pupil a thorough knowledge of
Musical Time.
the whole expressly written & Composed by
JOHN MAELZEL. *Price 7.6.*

BY LETTERS



PATENT

GRANTED BY THE

SOVEREIGNS OF GREAT BRITAIN, FRANCE, AND AUSTRIA.

THE METRONOME, OR MUSICAL TIME-KEEPER,

INVENTED BY

JOHN MAELZEL,

Civil Engineer and Mechanician to His Majesty the Emperor of Austria.

THE object of this invention is twofold:—1st. It affords to the composers of every country the means of indicating, in a simple and decisive manner, the degree of quickness with which their works are to be executed. 2dly. It accustoms the young practitioner to a correct observance of time, which it beats with unerring precision, and according to any velocity required, during the whole performance.

The necessity of such a guide for the pupil, and of such an universal standard measure for musical time, has been felt for ages, and hence the attempts at musical chronometers have been manifold. But whatever ingenuity may have been exerted with this laudable view, the instruments which hitherto appeared have not been received with sufficient approbation to make their way among the musical world; owing, either to imperfection in construction, too high a price, or too complicated a mechanism. It is for the public to judge whether Mr. Maelzel's labour is free from these or other objections.

The Metronome consists of a portable little obelisk or pyramid, scarcely a foot high, the decorated exterior of which renders it an ornamental piece of furniture. Its interior contains a simple mechanical apparatus, with a scale resembling that of a thermometer. According to what number on this scale the index is set to, the audible beats produced will be found to embrace the whole gradation of musical time, from the slowest *Adagio* to the quickest *Presto*.

The metronomic scale is not borrowed from the measures of length peculiar to any one country, but is founded on the division of time into minutes. The minute being thus, as it were, the element of the metronomic scale, its divisions are thereby rendered intelligible and applicable in every country: an universal standard measure for musical time is thus obtained, and its correctness may be proved at all times by comparison with a stop-watch.

Every one of the celebrated Composers and Professors to whom Mr. M. has yet had an opportunity of submitting the Metronome, has expressed his unqualified approbation of the invention, and declared its adequacy to accomplish the two objects above-mentioned. Among the names of the distinguished musical characters that have sanctioned and patronised the invention, are the following:

In LONDON, Messrs. Attwood, Bishop, Braham, Clementi, I. B. Cramer, Dizi, Graeff, Griffin, B. Jacob, Kalkbrenner, G. Krollmark, M. P. King, Klengel, Latour, Mazzinghi, Ries, W. Shield, Viotti, Samuel Webbe, Samuel Wesley, &c.

In PARIS, Messrs. Berton, Boyeldieu, Catel, Cherubini, Kreutzer, Le Sueur, Mehul, Nicolo, Paer, Pleyel, Spontini, &c.

In VIENNA, Messrs. Beethoven, Gelinek, Gyrowetz, Hummel, Moscheles, Salieri, Weigl, &c.

All the above gentlemen have formally pledged themselves to mark their future compositions according to the scale of Mr. Maelzel's Metronome; and some recent publications marked accordingly, are already before the public.

Price FOUR GUINEAS—and those that go by weight, TWO GUINEAS.

Fig. 2

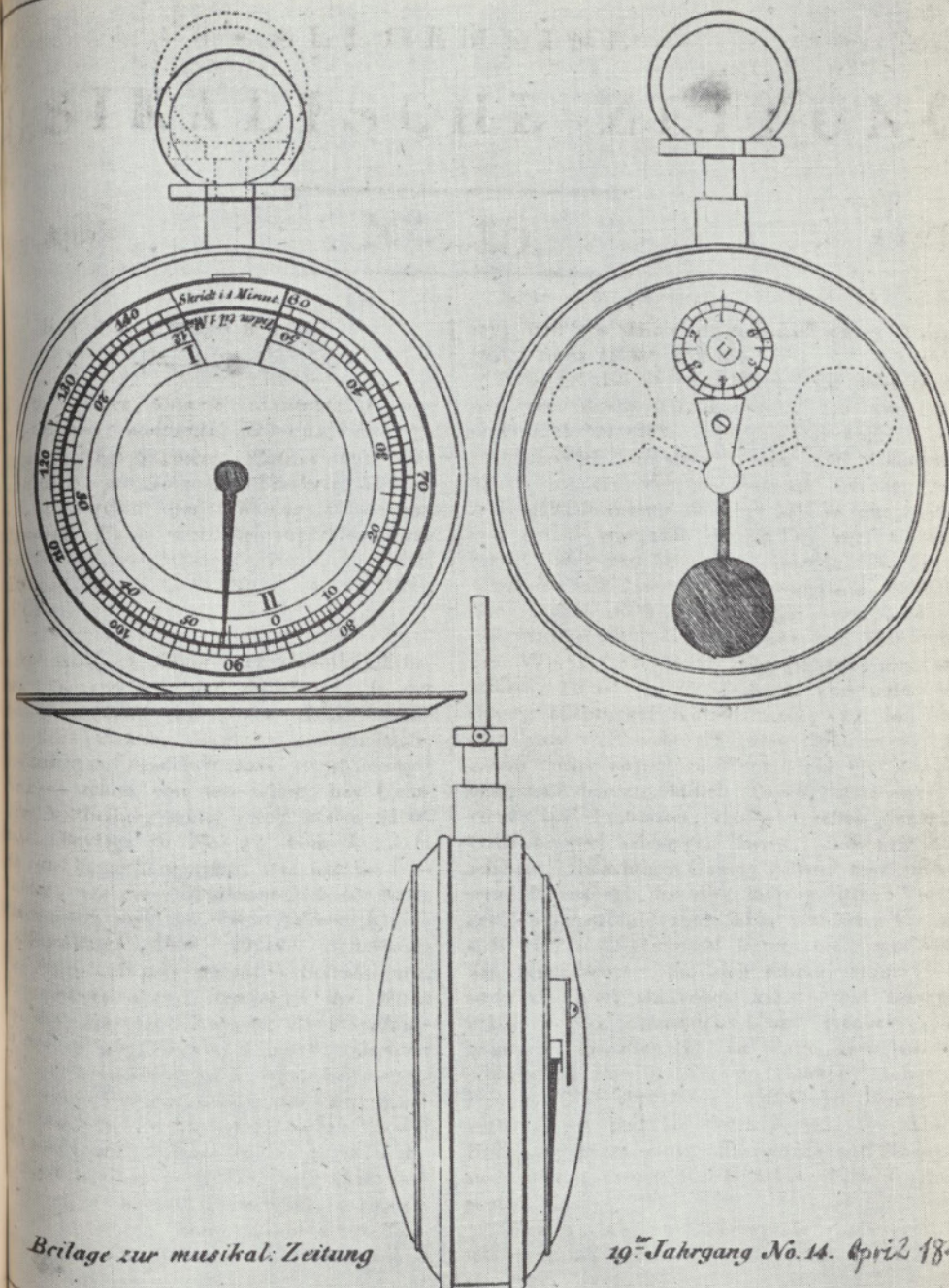


Fig. 3

Beilage zur musikal. Zeitung

19^{ter} Jahrgang No. 14. April 1844

Die Tempo's sämtlicher Sätze aller Symphonien des Hrn L. v. Beethoven,
vom Verf. selbst nach Maetzels Metronom bestimmt.

Symph. I. Op. 24.

Bras. Andante.
108 = ♩

Primo.
116 = ♩

Symph. IV. Op 60
1^{re}

Allagio.
66 = ♩

All. vivace.
80 = ♩

Andante.
84 = ♩

Mouvement.
100 = ♩

Très. Un poco meno Allegro.
88 = ♩

Oboe

Symph VI Op. 68

Allegro, ma non troppo

Pizzicato
66 = ♩

And. con moto
50 = ♩

Allegretto
108 = ♩

A tempo. All.
132 = ♩

Allegro
80 = ♩

Allegretto
60 = ♩

Recess
pp

Variazio

Symph. VII Op. 62

Allegro
84 = 100

All. con brio
100 = 100

Larghetto
92 = 100

Scherzo. All.
100 = 100

Allegro molto
132 = 100

Symph. III Op. 55.

All. con brio
60 = 100

Muova sinchre
Allegro assai
80 = 100

Scherzo. Allegro
rincise
116 = 100

Allabreve
116 = 100

Finale
Allegro molto
76 = 100

Tempo And.
 100 = ♩
*Allgro. au-
 rent. cresc.*
 80 = ♩
 Symp. V. Op. 67.
All' core brío
 108 = ♩
*Andante
 con moto.*
 92 = ♩
Piu moto.
 116 = ♩
Allgro.
 96 = ♩
Allgro.
 84 = ♩
Tempo And.
 96 = ♩
Allgro.
 84 = ♩
Finale
 112 = ♩

Troco sostenuto
 69 = f
Finice.
 104 = f
Alligretto.
 70 = f
Prato.
 132 = p
Prato meno
casi.
 84 = p
Allegro.
 72 = f
 Symp. VII. Op. 93.
Allegro vivace
 60 = p
Allegretto
 85 = f
Tempo di Menuetto
 126 = f
Allegro vivace
 84 = f

Fig. 5

by

HERMANN SCHERCHEN

1

Charles V in the Monastery of St. Just

OR:

Tolerance ± 10 .

Leading *English, French and Austrian* composers of the time, with Beethoven in the van, "formally pledged themselves to mark their future compositions according to the scale of Mr Maelzel's Metronome." Beethoven had just publicly complained about the absurdity of the Italian speed indications, pointing out that for instance "*allegro*" indicates a fast tempo although when an Italian says "*allegro*", all he means is "*cheerful*" — and one can be just as cheerful at a slow speed as at fast one. Maelzel's metronome was adopted in the same year at Covent Garden and Drury Lane and became the musical speed indicator for the next 150 years!

However, 2½ months previously, on the 2nd April, 1817, the same periodical brought an article from Copenhagen about the form of the metronome in most widespread use today: the pocket watch metronome, invented by Sparrevojn, an Danish watch maker. It is shown in fig. 3. There is nothing particularly startling about the article except the amusing suggestion to install a large clock of this kind in theatres or concert halls to beat time in full view of the whole orchestra. The article continues in humorous vein with the suggestion that as the musicians' ears and eyes have already enough to do, the audible or visible beat might be replaced

by one which could be *felt*, for pieces not interrupted by pauses or ritardandos. Use could be made, for example, of an elastic floor or of a device spread out over the floor, swinging in time with the music so that anyone wishing to do so could touch it with his foot in order to feel the beat, not interfering with sight reading or expression. "Once the feet have been conscripted, it would be but a short step to using the nose or, for string players, the tongue, with which to feel the beat..."

The articles from Berlin and Copenhagen were followed in September of the same year by one from *Milan*, expressing concern both about Maelzel's audible metronome and about Sparrevog's visible pocket watch, without however casting any doubts on their value: "With regard to the metronomes, certain considerations seem to have been left out of account altogether. The musical tempo is by no means the same in one country as in another. The Italians have their own speeds for Haydn's and Mozart's Symphonies: they take the Adagio from Mozart's E flat Symphony or Haydn's Andante of the Surprise Symphony, for example, much faster than the Germans, otherwise the pieces do not 'go over' with their audiences; many fiery allegros and prestos, on the other hand, are played with less fire in Italy, where *melodic line* is regarded as the decisive point: if the theme of an adagio or andante has a lilt to it, the Italian musician always takes it a little faster. In Haydn's or Mozart's presence he would, out of respect to them, keep to the speed indicated by them, but then the music would carry no conviction with him. *The individuality of the Italian Nation imposes a change on the musical tempo.*

"As far as vocal music is concerned, I think the metronome is often useless altogether. Supposing X composes in Vienna an opera for the big theatre in Milan, indicating each number exactly by the metronome, it may easily be that he will have to take most numbers at another tempo. Firstly, it is well known that the composer of an opera will himself make many speed changes, once the opera is in rehearsal, for the sake of a better effect (!), for to compose a work at the piano and then to hear it in the theatre are two quite different matters. Secondly, it is generally agreed that many speeds in an opera are and must be affected by the type and size of the theatre. For this reason, parts of Mozart's operas must be taken at quite a different speed in our very large theatre alla Scala than in Germany, otherwise they would lose all their effect, especially with Italian audiences. In the third place, the singer's individuality has a right to be considered. How will Mr. X in Vienna go about indicating all this with his metronome?"

Maelzel was himself fully aware of the limits of mechanical indication. At the end of his patent specification he emphasizes that all parts of his metronomes are made with such accuracy and matched with such care

that he can guarantee the same rate for all meorgnones during the first three minutes. Also in the patents specification he mentions three objections which had been made to his invention:

1. that the Italian speed indications sufficed fully to specify any speed,
2. that it is not so important anyway whether a movement is taken a little too fast or slow,
3. that composers take their own movements a little too fast or slow, depending on their mood.

To all this he remarks:

1. that the exact meaning of many Italian speed indications is hard to guess even with a dictionary,
2. that there is no unanimity among musicians even as regards the *relative* speeds shown by the Italian indications (e. g. in what order of increasing speed should the following four indications, given here in alphabetical order, be arranged: ADAGIO, GRAVE, LARGO, LENTO?),
3. that even the most reputable composers often use the Italian indications wrongly or at least inaccurately. Haydn for example conducted one of his own adagios at the rate of 52 crotchets (quarter notes) per minute, another at the rate of 80 per minute.

In December 1817, the same periodical published Beethoven's famous speed indications of his first eight symphonies, "to Maelzel's metronome" (fig. 4 and 5), showing extreme differences within one and the same Italian indication:

Adagio	 = 63, 84 and  = 66
„ assai	 = 80
„ molto	 = 88
Poco sostenuto	 = 69
Larghetto	 = 92
Andante poco	 = 108
„ con moto	 = 92, 120 and  = 50
Menuetto	 = 108
BUT Tempo di minuetto	 = 126
Allegretto	 = 88,  = 76,  = 60,  = 108

Allegro	$\text{♩} = 84, \text{♩} = 96, \text{♩} = 132$
„ ma non troppo	$\text{♩} = 66, 80$
„ un poco meno	$\text{♩} = 88$
„ con brio	$\text{♩} = 100, 108, 112, \text{♩} = 60$
„ molto	$\text{♩} = 76, 152$
„ molto vivace	$\text{♩} = 88, \text{♩} = 108$
„ vivace	$\text{♩} = 80, 84, \text{♩} = 69, 100, 116$
Vivace	$\text{♩} = 104$
Presto	$\text{♩} = 116, \text{♩} = 112, \text{♩} = 132$
„ meno assai	$\text{♩} = 84$

Beethoven's hair must have stood on end when he compared his ghastly mess of Italian speed indications with the unambiguous metronome markings! In *gratitude*, Beethoven wrote for "Maelzel's Great Orchestrion" — the prototype of all subsequent musical automats — "Wellington's Victory" or the "Battle Symphony" (a work, like "The Glorious Moment" undeservedly deprecated by musical highbrows as a pot-boiler), and in *enthusiasm* he set Maelzel a monument in the second movement of his 8th Symphony, written on the canon "Ta, ta, ta, ta, lieber Maelzel". (fig. 6).

*

Man and music show the same phenomenon: people, like pieces of music, have an inherent basic speed! The composer's job is to indicate it unambiguously by the metronome — if the piece is then played a little faster or slower makes no difference as long as the speed keeps within the bounds beyond which the basic speed is lost. People, like music, exist at their best in accordance with their inherent basic speed.

It is just as important to learn, by means of the metronome, to execute a basic speed without deviation. In a piece of music essentially conceived over a basic speed, this results in the listener becoming aware of a well-nigh physical state of well-being in the music's course.

But there are also musical works, like people, with no well defined basic speed. Such people seem sick, and such music is poor . . .

Hermann Scherchen

MEIN ERSTES LEBEN

1891-1950

Gehörtes - Gesehenes - Erlebtes

Stationen · Menschen · Werke · Ereignisse · Tätigkeiten
Erfahrungen · Planungen · Erkenntnisse · Abschlüsse

Two periods of modern music are connected in the life of Hermann Scherchen. Close knowledge, wide experience and a rich work enable him to give an unique account of contemporary music. His fascinating, lively record will be read with profit and pleasure - not only by experts.

Langen Müller München

NEUERSCHEINUNG:

DIE GEBURT DER SYMPHONIE



6 vorklassische Symphonien von

GOSSEC,

WAGENSEIL,

BECK,

JOH. CHR. BACH,

SAMMARTINI

und GLUCK

STEREO UND MONAURAL

AMADEO ÖSTERREICHISCHE SCHALLPLATTEN AG
WIEN

Akustik und Musikinstrumente

von

E. LEIPP

Einleitung

Musikinstrumente sind Maschinen zur Herstellung von Klängen, die dazu bestimmt sind, entweder den Spieler selbst zu befriedigen oder eine Nachricht von einem Menschen einem anderen mitzuteilen. Ursprünglich wurden sie vom Musiker selbst erdacht und verwirklicht, später von Instrumentenbauern — Handwerkern — in Zusammenarbeit mit den Musikern. Im allgemeinen haben sie sich von primitiven Typen durch allmähliche empirische gehörmäßige Verbesserungen entwickelt, so daß *die statistischen Eigenschaften des Gehörs den traditionellen Instrumenten eingeprägt sind*. Dadurch haben sie nach einer langen Entwicklung einen Grad der Vollkommenheit erreicht, den man heute kaum übertreffen kann. Außerdem kann der Physiologe viel von ihnen lernen.

Obwohl Physiker die Musikinstrumente nicht erfunden haben, haben sie sich oft mit ihnen befaßt, physikalische Gesetze auf sie angewandt und Arbeiten über sie veröffentlicht. An anderer Stelle habe ich schon betont, daß keine rein physikalische Erklärung für die Musikinstrumente ausreichen kann (s. Schrifttum), sind sie doch nur eines unter vielen Gliedern der Übertragungskette des musikalischen Signals. Zuerst also muß dem Instrument sein richtiger Platz in dieser Kette zugeteilt werden.

I. Das Instrument in der Übertragungskette

Fig. 1 stellt den einfachsten Fall (direktes Abhören) dieser Kette dar. Sie hat die folgenden Glieder:

1. *der Komponist* steht unter dem Einfluß der Biologie, der Psychophysiologie des Gehörs sowie der Soziologie (da die Umwelt sein Gehirn umgibt und auf seine Arbeit wirkt).
2. *Der Spieler* wird beeinflusst von der Muskelanatomie und -physiologie sowie der Psychophysiologie des Gehörs (durch welches er sein Spiel kontrolliert). Die Umwelt spielt auch hier eine wichtige Rolle, da sie den Aufführungsstil beeinflusst.
3. *Das Instrument selbst*, als Maschine betrachtet, ist das objektive Glied der Kette, welches quantitative und qualitative Messungen im Bereiche der Physik, der angewandten Mathematik und der Festigkeiten von Stoffen zuläßt.
4. *Die Raumakustik* ist das vierte Glied, während
5. *der Hörer* samt Ohr und Gehirn das Endglied ist, welches unter dem Einfluß der Biologie, Psychophysiologie, Soziologie und Umwelt steht.

Alle diese fünf Glieder reagieren aufeinander. Das Mißverständnis zwischen Musikern (einschließlich Instrumentenbauern) und Physikern heute kommt hauptsächlich daher, daß letztere die Instrumente rein physikalisch erklären wollten, ohne mit der dreifachen Anwesenheit (schon im einfachsten Fall) des menschlichen Gehörs und Gehirns, deren Eigenschaften den Bau der Instrumente *bestimmen*, zu rechnen. Zwei Seiten der Psychophysiologie des Gehörs sind in diesem Zusammenhang besonders wichtig und sollen nun besprochen werden: die Nichtlinearität des Gehörs und die Anwesenheit subjektiver Phänomene.

II. Musikinstrument und Psychophysiologie des Gehörs

1. *Die Nichtlinearität des Gehörs.* Das bekannte *Fechnersche Gesetz* und die Kurven gleicher Lautstärke von *Fletcher* und *Munson* beweisen die Nichtlinearität des Gehörs. Die letzteren zeigen ferner, daß das Gehör eine empfindliche Zone hat (von 1 bis 3 kHz), die auch nach der Informationstheorie die größte Informationsdichte hat (*Moles*¹⁾). Außerdem zeigen diese Empfindlichkeitskurven des Gehörs, daß ein Musikinstrument von einem gewissen Umfang nicht linear sein kann. Von der reinen Physik aus gesehen, sind die Musikinstrumente nichts als eine Ansammlung von Widersprüchen. Will man z. B. ein Klavier oder eine Harfe so bauen, daß ein gleichmäßiger subjektiver Pegelindruck über den ganzen Umfang entsteht, so müssen die Saiten in Bezug auf jede einzelne physikalische Eigenschaft (Länge, Gewicht je Längeneinheit, Elastizität) voneinander abweichen und das Instrument selbst kann keine geometrisch einfache Form haben. Es kann also keine Theorie der Instrumente einzig auf arithmetischen Grundlagen beruhen. Das Ohr ist ein ausdrücklich asymmetrisches und nichtlineares Organ und die Anatomie und Physiologie jedes Instrumentes müssen sich an diejenigen des Ohrs anlehnen.

Das Gehör befindet sich aber noch nicht am Ende der Übertragungskette, sondern das Gehirn, welches während des Autokorrelationsvorgangs subjektive Phänomene hinzufügt, die den Instrumentenbau in beträchtlicher Weise beeinflussen.

2. *Die subjektiven Phänomene.* In der Musik spielen die subjektiven Phänomene eine wichtige Rolle. Sind sie auch lange bekannt, so hat man sie erst in letzter Zeit systematisch studiert (*Licklider, Schouten, Meyer-Eppler, Winkel*) und zwar besonders die subjektiven Residualtöne, die aus der Kombination zweier Töne entstehen. Man hat gefunden, daß ein „Residualspektrum“, d. h. eine Gruppe amplitudenreicher, benachbarter Teiltöne in einem bestimmten Phasenverhältnis, genügt, um die subjektive Wahrnehmung eines nicht ansichseienden Grundtons hervorzurufen. Diese Eigenschaft wird von Orgelbauern seit Jahrhunderten zu sogenannten akustischen Bässen, die riesige Baßpfeifen ersparen, verwertet. Dieser „Residualgrundton“ unterscheidet sich im Klang sehr von einem objektiven

Grundton: dieser ist weich und unaufdringlich, jener hart und beißend, wie man durch Filtrierung von Instrumentaltönen leicht beobachten kann. Macht man ein solches Experiment z. B. mit einem Geigenton, indem man sein Spektrum allmählich von unten hinauf abschneidet, so bleibt die Wahrnehmung des Grundtons immer bestehen, selbst wenn nur ein schmales Band (z. B. 10. bis 15. Teilton eines g von 198 Hz) übrig bleibt. Allein das Timbre ändert sich.

Dies führt zu einem Paradoxon: nach der Grundtheorie hängt die Tonhöhe von der Grundtonfrequenz und das Timbre von den Teiltönen ab, während dieses Experiment zeigt, daß der Eindruck des Grundtons trotz Unterdrückung des Grundtons bestehen bleibt, solange es eine Teiltongruppe (besonders in der empfindlichen Zone) gibt, und daß die Nuancen des Timbre durch die Teiltöne der empfindlichen Zone bestimmt werden. Eine Vielzahl von Sonograph-Analysen (Fig. 2) von Geigenspektren bestätigen diese Tatsache, deren Wichtigkeit für die Instrumentalakustik nicht überschätzt werden kann.

Im Falle der Geige kann man die Sache auch anders ansehen. Von Anfang an verfügt man zur Tonerzeugung über eine ganz bestimmte Kraftmenge aus dem Bogenstrich über die Saite. Abgesehen von Verlusten durch innere Reibung und Kopplungen ist es bekannt, daß bestimmte Instrumente eine Tragweite haben, die anderen fehlt, anders gesagt, sie erzeugen subjektiv einen höheren Pegel, den ein Pegelmesser nicht anzeigt. Dies kann nur dadurch geschehen, daß die verfügbare Kraft in diesem Fall psychophysiologisch besser verwertet wird als im anderen, und man findet tatsächlich drei Typen:

- a. Der Schwerpunkt der Kraft liegt in einem dem Grundton benachbarten Band, der Klang ist weich und süß, aber arm und je weiter sich der objektive Grundton von der empfindlichen Zone entfernt, desto schwächer wird der subjektive Pegel.
- b. Der Schwerpunkt der Kraft ist in der empfindlichen Zone: der Grundton ist, selbst wenn er nicht existiert, immer zu hören, aber die Geige hat den harten, schneidenden Klang des Residualgrundtons und der subjektive Pegel ist sehr hoch, doch das Timbre sehr arm.
- c. Die Kraft ist über den ganzen Hörbereich optimal verteilt, so daß der Klang nicht nur voll und reich, sondern der Pegel auch befriedigend ist.

Das Musikinstrument ist ein Kompromiß zwischen Pegel und Timbre und die Kunst des Instrumentenbauers besteht in der sinnvollen Verteilung der begrenzten verfügbaren Kraft unter gleichzeitiger Beachtung der Empfindlichkeitskurven des Gehörs und der subjektiven Phänomene. Um dies zu erreichen, arbeitet er mit den meßbaren Parametern — Materialeigenschaften und Formen — des Instruments. Tut er dies systematisch und mit wissenschaftlichem Bedacht, so gelangt er zu einer Physik der Musikinstrumente.

III. Physik und Musikinstrument

Als Beispiel nehmen wir wieder die Geige als dasjenige Instrument, welches man als das vollkommenste und in seiner Form unveränderbarste Streichinstrument betrachten kann, hat sie doch einen Stand der Entwicklung erreicht, der allen Verbesserungsversuchen widerstanden hat und wo alles auf die bestmögliche Verwertung der Gehörseigenschaften hinausläuft. Außerdem gibt es als Unterlage eine ziemliche Anzahl von Arbeiten über die Geige, da sie schon lange die Neugierde der Forscher angespornt hat. Dazu kommt noch, daß ich eine langjährige Spielerfahrung mit der Geige habe und auch etwa vierzig Instrumente selber gebaut habe.

Wie jedes andere Instrument kann man auch die Geige als die Summe eines schwingenden Erregers und einer Reihe Resonatoren betrachten, die getrennt zu untersuchen sind.

A. *ERREGUNG*. Im Gegensatz zu den in der Grundtheorie der schwingenden Saiten angedeuteten einfachen Hypothesen schwingt eine angestrichene Saite auf mehrere Weisen; diese Schwingungsformen tragen alle zur Entstehung des Spektrums der alleinschwingenden Saite bei und lassen sich getrennt behandeln.

1. *Die Querschwingung* (Fig. 3a) ist die bekannteste: der Bogen erzeugt in der Saite eine sägezahnförmige Relaxationsschwingung mit der Grundfrequenz (nach Taylor)

$$n = \frac{1}{2} l \sqrt{\frac{T}{m}}$$

n = Frequenz

l = Länge

T = Spannung

m = Gewicht je Längeneinheit.

Diese Formel muß noch durch die Festigkeit berichtigt werden. n läßt sich durch Veränderung der drei anderen Parameter regeln.

2. *Die Längsschwingung* (Fig. 3b). Auf dem Höhepunkt jeder Periode der Querschwingung ist die Saite länger als in der Null- oder Ruhestellung. Diese periodische Dehnung der Saitenlänge führt schließlich zu einer selbständigen Längsschwingung der Saite, d. h. die Saitenteilchen schwingen in der Längsrichtung der Saite. Man kann diese Schwingung durch Reiben mit einem kolophonierten Fell in der Längsrichtung allein erzeugen. Der so erhaltene Ton liegt gewöhnlich mehrere Oktaven über der Quersfrequenz und hat die Frequenz

$$n_l = \frac{1}{2} l \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E = Elastizitätsmodul

ρ = Dichte.

Durch Veränderung dieser zwei Parameter läßt sich n_l regeln.

3. *Die Drehschwingung* (Fig. 3c). Der Bogen bildet eine Tangente zum runden Querschnitt der Saite, der Bogenstrich verdreht die Saite also und erzeugt eine Drehschwingung; es handelt sich wieder um eine Relaxationsschwingung, die man mittels eines aufgeklebten Papierzeigers sichtbar machen kann. Die Frequenz ist

$$n_r = \frac{1}{2} l \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

G = der Festigkeitsmodul der Saite, mittels dessen man diese Frequenz regeln kann.

4. *Die Oktavschwingung* (Fig. 3d). Bei jeder positiven und negativen Spitze der Oszillation übt die Saite einen verstärkten Zug auf beide Saitenbefestigungen aus. Es entsteht eine Schwingung mit der doppelten Frequenz der Querschwingung. Diese Oktave zum Grundton wird hörbar, wenn man ein Ende der Saite an eine Fellmembran befestigt. Da die Saitenbefestigungen bei Streichinstrumenten nie vollkommen starr sein können, ist diese Oktavschwingung höchst wichtig, und der so verstärkte zweite Oberton hat oft eine größere Amplitude als der Grundton selbst.

5. *Die Bogenlage*. Die einfache Theorie besagt, daß alle Teiltöne, die an der Stelle des Bogens einen Knoten hätten, verschwinden. Z. B., berührt der Bogen die Saite an ihrer Fünftteilung, so verschwindet der 5. Oberton. Ich habe festgestellt, daß diese Annahme ungenau ist, da die Erscheinungen nicht ganz so einfach sind, doch genügt sie für den Zweck der vorliegenden Arbeit.

Die Gesamtschwingung der Saite ist die Summe dieser Schwingungsformen (samt aller ihrer Obertöne und verschiedener Wechselwirkungen, die ich hier vernachlässige). Das Spektrum der alleinschwingenden Saite ist also sehr kompliziert und läßt durch Regelung der obengenannten physikalischen Parameter Veränderungen zu.

Fig. 4a zeigt das Spektrum der Querschwingung einer Saite: der Grundton hat die Frequenz n mit einer Fourierschen Reihe von Obertönen, ganze Vielfache von n . In Fig. 4b wurde diesem Spektrum die Hüllkurve hinzugefügt, denn die Physiologie lehrt, daß das Ohr in der Beurteilung des Timbre auf die Hüllkurve reagiert; in dem gezeigten Fall hat die Hüllkurve eine sehr einfache Form, was einen charakterlosen Klang ergeben würde. Fügt man nun die Grundtöne der Längs-, Dreh- und Oktavschwingungen, n_l , n_r , n_o (n_r ist gewöhnlich kleiner als n) hinzu und beachten wir die Bogenlage (B , hier beim 5. Oberton der Querschwingung), so erhalten wir drei positive Formanten entsprechend den andern Schwingungsformen und einen negativen Formanten entsprechend der Bogenlage. Die neue Hüllkurve, Fig. 4c, zeigt die Form des Spektrums der alleinschwingenden Saite. Die (veränderbare) Verteilung der positiven und negativen Formanten bestimmt das Timbre, also die Qualität der Saite.

Natürlich ist dies eine ziemliche Vereinfachung der Wirklichkeit, haben wir doch die Obertöne aller Schwingungsformen außer der Querschwingung sowie manche andere meßbare physikalische Parameter (z. B. Dämpfung) außer Acht gelassen.

B. DAS INSTRUMENT. Das Saitenspektrum wird durch das Instrument verstärkt und modifiziert und es entsteht der Klang, den man schließlich hört. Die Quer- und Drehschwingungen der Saite werden dem Deckel durch den Steg und dem Boden durch den Stimmstock mitgeteilt; die Längs- und Oktavschwingungen gelangen durch die Saitenbefestigungspunkte zu beiden Enden von Deckel und Boden, deren Mitschwingung sowohl von den ihnen mitgeteilten Schwingungen als auch von ihrer Elastizität als Funktion der Form und der Elastizitätsmodule des Holzes abhängt. *Die Verteilung der vom Bogen gelieferten Kraft ist also eine Funktion der meßbaren physikalischen Parameter der Saiten und des Instrumentes (Struktur und Form) und ist daher in der Gewalt des Instrumentenbauers.*

Nun kann man jedes Instrument dieser Art als die Summe einer Reihe von Resonatoren betrachten, hat doch jeder Teil — Saitenhalter, Griffbrett, Deckel, Boden, nicht angestrichene Saiten etc. — eine Eigenfrequenz, die ertönt, wenn man den Teil durch den Bogen, durch Anschlag oder elektrisch in Schwingung versetzt. Fig. 5 zeigt den Frequenzgang des Instruments, in dem alle diese Eigentöne eingetragen sind. Gesamtfrequenzgänge von Geigen sind schon von anderen (z. B. Arns, Backhaus, Lottermoser, Meinel, Pasqualini, Saunders u. a. m.) elektrisch ermittelt worden, aber die Anwesenheit aller Obertöne aller Eigentöne kompliziert diese Kurven sehr und macht es dem Instrumentenbauer nahezu unmöglich, sie zu entziffern. Die Aufgabe des Geigenbauers ist die sinnvolle Verteilung dieser Resonanzen unter Beachtung der Psychophysiologie des Gehörs.

Das Gesamtspektrum des Instrumentes entsteht aus der Addition des Erreger- und des Instrumentenspektrums. Fällt ein positiver Erregerformant auf eine Resonanz des Instrumentenfrequenzgangs, so verstärken sie einander; ein negativer Formant hingegen verringert eine Resonanz des Frequenzgangs. Das Instrument ist also ein *Formwandler*.

Betrachten wir nun eine Violinsaite: ihre verschiedenen Töne entstehen aus der Verkürzung ihrer schwingenden Länge. Da aber *alle* die Schwingungsformen proportional zur Länge sind, und unter der Annahme, daß der Bogen die Saite immer im gleichen Verhältnis teilt (je höher der Ton, desto näher zum Steg wird er also angestrichen), so bleibt die Erregerform immer die gleiche über einer sich wandelnden Grundfrequenz. Dieses wandernde Erregerspektrum wird also für jeden Ton an anderer Stelle des Frequenzgangs addiert, so daß das Gesamtbild ein anderes für jeden Ton ist: *jeder Geigenton hat ein anderes Spektrum*. Eine sehr große Anzahl spektrographischer Analysen, die ich gemacht habe, bestätigen voll-

kommen diese Hypothesen. Es kann also von keinem „Geigenspektrum“ die Rede sein, höchstens von den Spektren der verschiedenen Geigentöne.

Man muß sich also fragen: Wie kommt es also, daß man den Klang einer Geige (oder eines jeden anderen Instrumentes) ohne Schwierigkeit erkennen kann? In anderen Worten: Was sind die Invarianten des Geigenklangs?

Die Ausgleichvorgänge spielen eine sehr wichtige Rolle beim Instrumententimbre, haben doch zahlreiche Experimente bewiesen, daß das Fehlen eines Ausgleichvorgangs das Erkennen des Instruments selbst für geübte Ohren oft unmöglich macht. Insbesondere wird der *Einschwingvorgang* durch die Art der Erregung bestimmt: das Kratzen des Bogens auf der Saite ist ein Geräusch, das im Klangspektrum seinen Platz hat und das den Geigenklang charakterisiert und ihn z. B. von einem gezupften Ton mit seiner jähen Wellenfront völlig unterscheidet. (Außerdem hat der gestrichene Ton Drehschwingungen, die beim gezupften Ton fehlen, nebst anderen Divergenzen.) Kurz, die *Form* und *Steilheit* des Einschwingvorgangs sind typisch für jedes Instrument und ermöglichen das Erkennen der Art der Erregung und daher des Instrumentes selbst. Irgendein mit Violin-saiten bespannter Klangkasten wird vom unvorbereiteten Hörer als „Geige“ erkannt; ein Beispiel dafür ist die trapezförmige Geige des *Savart*. Die Art der Erregung und die daraus entstehenden Ausgleichvorgänge sind also für das Erkennen der Geige hinreichend. Hat man aber eine Weile zugehört, so macht sich das Ästhetische des Klangs — das Timbre —, das mit dem eingeschwingenen Spektrum verbunden ist und seinerseits wieder von den physikalischen Parametern des Instruments abhängt, bemerkbar.

Der Ausgleichvorgang enthält also anscheinend genügend Information, um es dem Ohr zu ermöglichen, die *Art* der Erregung, also des Instrumentes zu erkennen, während das Spektrum über die *Qualität* des Klangs Aufschluß gibt. Die semantische Information ist also anscheinend im Einschwingvorgang (während der ersten 50 ms etwa, der Zeitkonstante des Ohrs entsprechend), die ästhetische Information im eingeschwingenen Spektrum enthalten. Die Frage der Instrumentenqualität dreht sich also um das eingeschwingene Spektrum.

Zweifelloso kann man den Klang eines Instruments auch an anderen Invarianten erkennen. Das in der Form konstante, aber als Ganzes wandernde Erregerspektrum wurde schon erwähnt: man könnte es als eine Art Gitter betrachten, welches sich über das feststehende Instrumentenspektrum hin- und herbewegt. Obwohl also das Gesamtbild sich dauernd verändert, werden die dafür verantwortlichen zwei Invarianten durch das *Gedächtnis* festgehalten, so daß sie durch das wandelnde Gesamtspektrum hindurch das Instrument erkennbar machen.

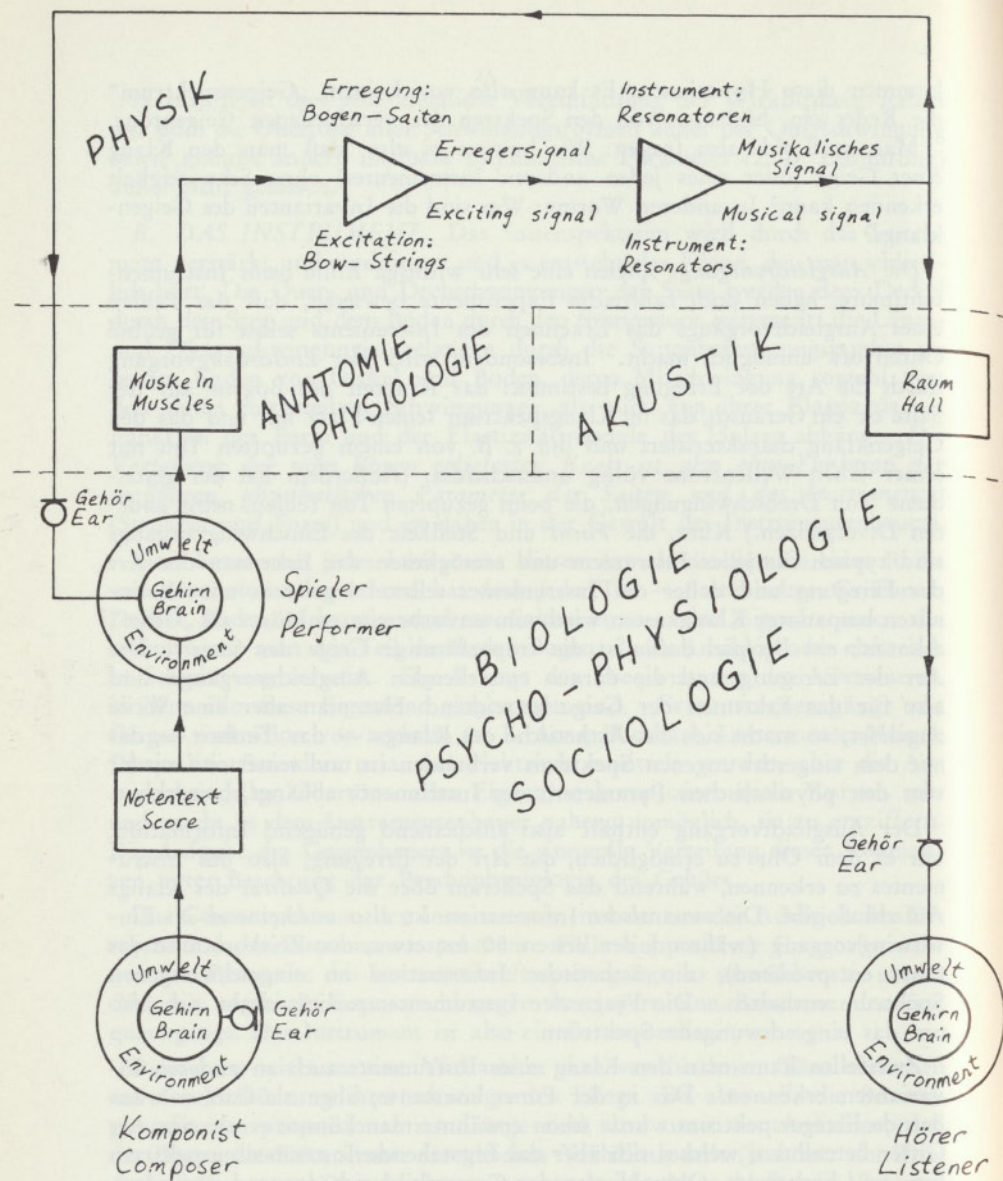


Fig. 1 Das Musikinstrument in der Übertragungskette des musikalischen Signals: schon im einfachsten Fall werden Gehör und Gehirn dreimal miteinbezogen; die Physik allein kann also das Musikinstrument nicht erklären.

The musical instrument in the musical signal's chain of communication: ear and brain come in three times in the simplest case already; the musical instrument cannot be explained by physics alone.

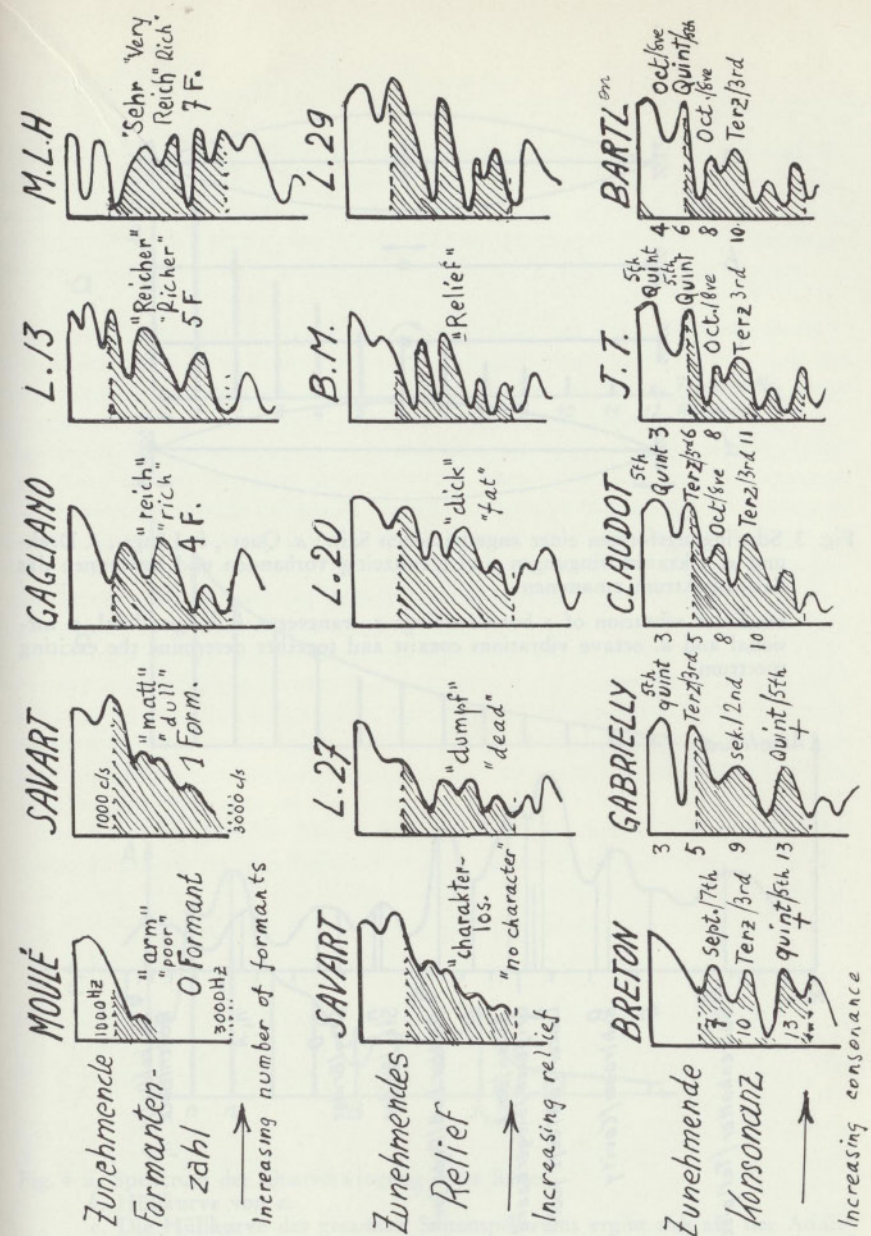


Fig. 2 Drei verschiedene Einteilungen von Instrumenten sind hier vorgenommen:

1. nach der Anzahl der Formanten,
 2. nach der Größe der Formanten,
 3. nach der Konsonanz der wichtigen Teiltöne mit dem Grundton.
- Das schraffierte Band der empfindlichen Gehörszone von 1 bis 3 kHz ist für die Instrumentqualität bestimmend.
- Three classifications of instruments are shown:
1. in order of the number of formants,
 2. in order of the height of the peaks,
 3. in order of consonance of the important harmonics with the fundamental.
- The hatched band from 1 to 3 Kc (the ear's sensitive zone) is decisive for the instrument's quality.

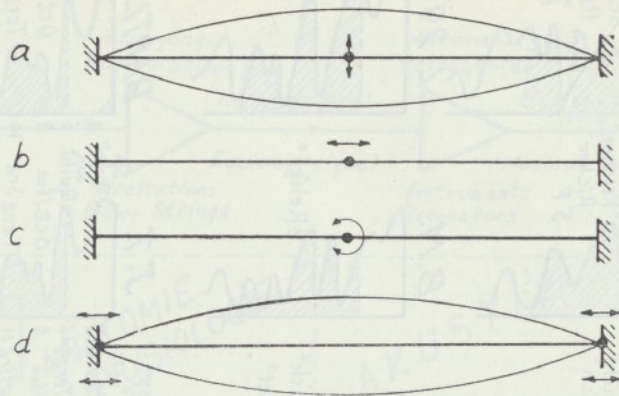


Fig. 3 Schwingungsformen einer angestrichenen Saite: a. Quer-, b. Längs-, c. Dreh- und d. Oktavschwingungen sind gleichzeitig vorhanden und bestimmen das Saitenspektrum zusammen.

Modes of vibration of a bowed string: a. transverse, b. longitudinal, c. torsional and d. octave vibrations coexist and together determine the exciting spectrum.

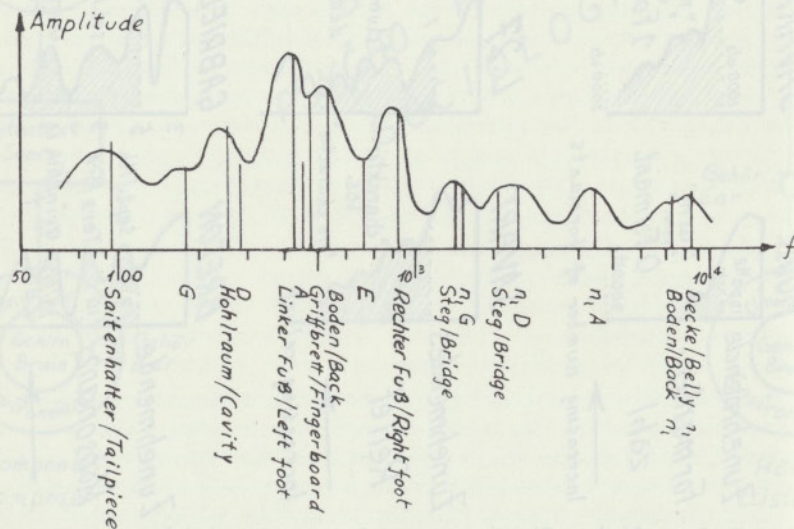


Fig. 5 Vereinfachter Frequenzgang einer Geige nach den Eigenfrequenzen der wichtigsten Mitschwingern. Die Höhe der Resonanzspitzen steht im umgekehrten Verhältnis zur Dämpfung des jeweiligen Teiles.

Schematic response curve of a violin obtained through the resonant frequencies of the principal vibrating parts. The peak amplitude is in inverse proportion to the damping in the relevant part.

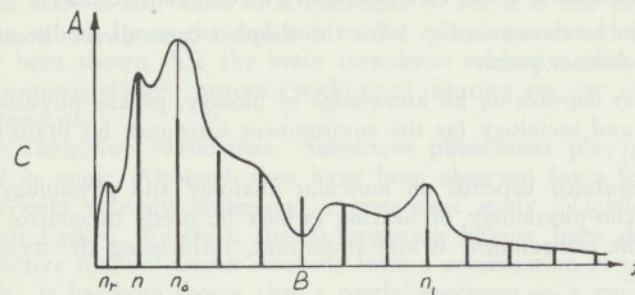
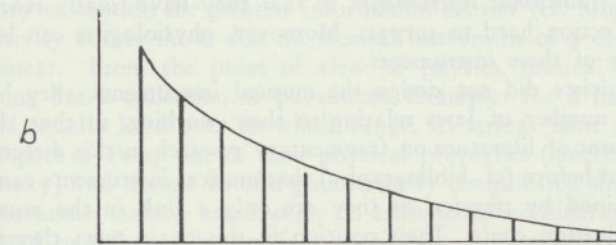
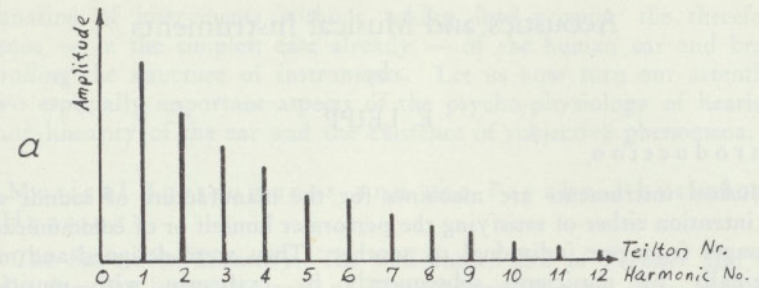


Fig. 4 a. Spektrum der Querschwingung einer Saite

b. Hüllkurve von a.

c. Die Hüllkurve des gesamten Saitenspektrums ergibt sich aus der Addierung der Formanten von Längs-, Dreh- und Oktavschwingungen und des Bogens zu b.

a. Transverse vibratory spectrum of a string

b. Envelope of a.

c. the complete exciting envelope is obtained by adding the formants due to longitudinal, torsional and octave vibration and bow position to b.

Acoustics and Musical Instruments

by

E. LEIPP

Introduction

Musical instruments are machines for the manufacture of sounds with the intention either of satisfying the performer himself or of communicating messages from one individual to another. They were designed and made originally by musicians, subsequently by craftsmen with musicians' collaboration. Usually they evolved from primitive types through empirical corrections "by ear", and hence the *statistical properties of the ear are inscribed in the traditional instruments*, so that they have finally reached a degree of perfection hard to surpass. Moreover, physiologists can learn much by a study of these instruments.

Although physicists did not design the musical instruments, they have often applied a number of laws relating to their working, so that there exists a fair amount of literature on fragmentary research in this direction. I have maintained before (cf. bibliography) that musical instruments cannot simply be explained by physics, as they are only a link in the musical signal's communication chain. Their position in this chain must therefore be determined first of all.

I. The Instrument in the Communication Chain

Let this chain be shown in fig. 1 for the simplest case: direct listening. It has several distinct parts:

1. *The composer* depends on his knowledge of biology, psycho-physiology of hearing, and sociology (as the environment surrounds his brain and acts on him).
2. *The instrumentalist* depends on muscular anatomy and physiology as well as psycho-physiology of hearing (which he needs to control his playing). The environment is also important, influencing the style of performance.
3. *The instrument itself*, regarded as a machine, is the objective element of the chain, permitting quantitative and qualitative measurement in physics, mechanics and material resistance.
4. *Architectural acoustics* is the fourth link in the chain, while
5. *the listener*, with ear and brain, is the final link, depending on biology, psycho-physiology, sociology and environmental factors.

These five links react on each other, and the misunderstanding existing between performers and instrument makers on the one hand and physicists on the other is essentially due to the latter's attempt at a physical

explanation of instruments without taking into account the threefold presence — in the simplest case already — of the human ear and brain *controlling* the structure of instruments. Let us now turn our attention to two especially important aspects of the psycho-physiology of hearing: the non-linearity of the ear and the existence of subjective phenomena.

II. Musical Instruments and the Psycho-Physiology of Hearing

1. *The Ear's Non-Linearity.* The well known law of *Fechner* and the equally familiar isotonal curves of *Fletcher* and *Munson* show that the ear is non-linear. Fletcher and Munson's curves indicate the ear's so-called sensitive zone (from 1 to 3 Kc), which has also been shown by Information Theory to contain the greatest information density (cf. *Moles*¹). The ear's sensitivity curves show that no musical instrument of a certain range can be linear. From the point of view of physics, musical instruments are nothing but a collection of paradoxes. Example: for a harp or piano to sound equally loud over its whole range, its strings must necessarily vary in respect of every one of their physical properties (length, linear density, elasticity) and it must be of a geometrically complicated shape. Any theory of instrument making based solely on arithmetical considerations is therefore doomed to failure. The ear is a specifically asymmetrical and non-linear organ, and the instrument's anatomy and physiology must correspond in some respects to those of the ear.

But there is still more to it than that — for it is not the ear, but the brain, which forms the end-link to the communication chain, and it has now been shown that the brain introduces subjective phenomena during the autocorrelation process, with great bearing on the construction of instruments.

2. *Subjective Phenomena.* Subjective phenomena play a considerable part in music. Although they have been observed for a long time, they have only recently undergone a systematic study (*Licklider, Schouten, Meyer-Eppler, Winckel*), special attention having been devoted to the subjective residual sounds resulting from a combination of two elementary tones. It has been shown that a partial spectrum — a consecutive group of harmonics of sufficient level and of certain phase relationships — can give rise to the subjective sensation of an actually absent fundamental. For centuries, organ-builders have been giving their organs "acoustic basses" on the basis of this phenomenon, saving the inconvenience of pipes of an extreme size. Now while a sinusoidal objective fundamental sounds round and perhaps slightly muffled, the "residual" subjective fundamental has a hard, strident tone, which can be easily observed by filtering the notes of instruments. Such experiments made on violin notes, by gradually cutting off the spectrum starting at the bass, the middle or the treble,

never get rid of the sensation of the fundamental, even if only a narrow band is left (e. g. 10th to 15th harmonics of g 198); only the timbre changes.

This leads us to a paradoxical conclusion: according to elementary theory, the pitch of a note depends on the frequency of its fundamental and its timbre on the harmonics or partials; now experiment shows that the sensation of the fundamental remains on suppressing the fundamental but leaving a group of harmonics (especially those of the sensitive zone) and that the timbre is determined by the harmonics in the sensitive zone. Numerous sonograph analyses of violin spectra (fig. 2) support this fact, whose importance in the acoustics of instruments is considerable.

Let us consider the violin further. A fixed amount of energy, resulting from the traction of the bow across the string, is available from the start; some of this will be lost through internal friction and through coupling, but apart from that it has been proved that some instruments "carry", i. e. they have a higher subjective level, not registered by a level meter, than others. As the physical energy is the same, this can only be explained by a better psycho-physiological utilization of that energy. In fact, three typical cases can be distinguished:

- a. most of the energy is in a band close to the objective fundamental, giving rise to a round, sweet, but rather dull tone and a subjective level which seems the more feeble the further the fundamental is away from the sensitive zone;
- b. most of the energy is in the sensitive zone — the fundamental will always be heard (even if it is nonexistent) and the subjective level will be very high, but the timbre will be harsh (residual fundamental) and unpleasant;
- c. the energy can be evenly distributed throughout the audible range in such a way as to give an optimum level together with a rich and full timbre.

Musical instruments are a compromise between level and timbre. As the available energy is limited, the instrument maker's art is simply a question of judiciously distributing this energy, taking both the sensitivity curves of the ear and subjective phenomena into account. This, in turn, is a question of suitable control of the measurable instrument parameters, shuffling the physical properties of materials and the shapes. The way to do this will now be shown and the elements of musical instrument physics disclosed.

III. Physics and Musical Instrument

Under this heading let us consider the violin, as the most perfect and stereotyped of all bowed instruments — it has reached such a state of perfection as to resist all attempts to improve it, for it is already designed in such a way as to make the most of the idiosyncrasies of hearing. Another reason for choosing the violin here is because it has excited the curiosity of research workers for a long time, so as to result in a fair quantity of information on the violin already. Moreover, I have had some experience with it myself, having played it for many years and having made about forty violins myself.

The violin can be considered like any other instrument as the sum of a pulsating exciter and a series of resonators, which must receive separate consideration.

A. *EXCITATION*. Contrary to the simple hypotheses implied in the elementary theory of vibrating strings, it can be demonstrated that a bowed string vibrates in several modes which can be studied separately and all of which make an important contribution towards the complete spectrum of the single string.

1. *The transverse vibration* (fig. 3a) is the best known of these: the bow produces a saw-tooth relaxation oscillation in the string, the frequency of whose fundamental is determined by Taylor's equation

$$n = \frac{1}{2}l \sqrt{\frac{T}{m}}$$

where n = frequency,

l = length,

T = tension,

m = mass per unit length.

This equation must be corrected by the rigidity. n can be adjusted by altering the other three parameters.

2. *The longitudinal vibration* (fig. 3b). In order to execute its transverse oscillation, the string must periodically change in length, giving rise to a separate longitudinal oscillation which can be heard by itself by bowing the string longitudinally with a rosined skin. A high note is obtained, usually several octaves above the transverse vibration, of a frequency

$$n_l = \frac{1}{2}l \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

where E = modulus of elasticity,

ρ = density.

Variation of these two parameters gives control over n_l .

3. *The torsional vibration* (fig. 3c). The bow strokes the round cross-section of the string tangentially, making the string twist. This results in a torsional relaxation oscillation which can be made visible if a paper pointer is glued to the string. Its frequency is

$$n_r = \frac{1}{2} l \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

where G = the string's modulus of rigidity, which is also the parameter by which this frequency can be controlled.

4. *The octave vibration* (fig. 3d). At each positive and each negative peak of a transverse vibration cycle, the string pulls its supports inwards, resulting in a frequency twice that of the transverse frequency of vibration. This note, an octave above the fundamental, can be heard by fixing one end of the string to a skin diaphragm. As the supporting points in stringed instruments can never be perfectly rigid, this octave vibration is most important, and always influences the 2nd harmonic, which is as a result often of a greater amplitude than the fundamental.

5. *The point of bowing*. Simple theory states that the point where the string is being bowed influences the distribution of harmonics, making all vibrations which would have an antinode at that point disappear; e.g. bowing the string one-fifth of its length from one end will obliterate the 5th harmonic. We have found that this hypothesis is incomplete, the phenomena being much more complicated than that; but we shall accept it for the purposes of this demonstration.

The vibration of the string is the sum of its elementary modes (with their respective harmonics as well as various interactions which we shall neglect here). In brief, the isolated string's spectrum is most complex but allows of modification through changing the physical parameters mentioned.

Fig. 4a shows the spectrum of a string's transverse vibration: it consists of a fundamental of frequency n and a Fourier series of harmonics, all frequencies being multiples of n . In fig. 4b the envelope has been added to the spectrum, for we are told by the physiologists that it is the envelope to which the ear responds in registering timbre; this envelope's shape is very simple and the tone would lack character. If we now add the fundamentals of the longitudinal, torsional and octave vibrations, n_l , n_r , n_o (n_r is usually less than n) and consider the position of the bow (B , at the 5th transverse harmonic in this case), we obtain three positive formants for the other three modes of vibration and a negative formant for the bow position, the new envelope, fig. 4c, giving the *shape* of the isolated string's spectrum. The (adjustable) distribution of the positive and negative formants determines the timbre, or quality, of the string.

It goes without saying that this has been a rather extreme simplification of the case, for the harmonics of all the modes except the transverse, as well as many other physical parameters (such as damping), have been neglected.

B. THE INSTRUMENT. The string's spectrum is amplified and deformed by the instrument, giving rise to the spectrum finally heard. The transverse and torsional vibrations are transmitted through the bridge to the belly, and again through the sound-post to the back; the longitudinal and octave vibrations are transmitted through the string's points of support to both ends of the belly and back. The latter's vibration depends not only on the vibrations transmitted to them but on their own suppleness, which again is a function of their shape and of the wood's moduli of elasticity. Hence, *the distribution of the energy furnished by the bow is a function of measurable physical parameters of the strings and the instrument* (structure and shape) and are therefore under the maker's control.

Now any instrument of this type can be regarded as a series of resonators, for each part of the instrument — tail-piece, fingerboard, belly, back, free strings, etc. — has its own resonant frequency; to find it, the respective part is set into vibration by appropriate means, e.g. by the bow, by percussion, or electrically. Fig. 5 shows the instrument's response curve in which all these resonances have been entered. Response curves have been previously obtained by various authors (e.g. Arns, Backhaus, Lottermoser, Meinel, Pasqualini, Saunders, et al.) by electrical excitation of the whole instrument and wave form analysis, but these curves are very hard for the instrument maker to disentangle because they contain not only all the resonances but all the harmonics of these resonances as well. The violin maker's job is judicious distribution of these resonances, taking the psycho-physiology of hearing into due consideration.

Generation of the final spectrum out of the exciting envelope and the instrument's response curve must still be explained. These two curves are simply superimposed on each other: if for example a positive exciting formant coincides with a resonant peak in the response curve, the two will augment each other, resulting in a still greater resonance; conversely, an antiresonance will in general more than balance out a positive formant, leaving a milder antiresonance. The instrument can thus be regarded as a *spectrum transformer* or form changer (Formwandler).

Consider now any given string of the violin: the various notes that can be played on it are obtained by reducing its vibrating length. Now it has been shown that *all* the modes of vibration are proportional to the length. Assuming that the string segments on either side of the bow are kept in constant proportion to each other (i.e. that the bow is moved towards the bridge as the notes rise) it follows that excitation will maintain a

constant spectrum above a variable fundamental. In other words, the shape of the exciting spectrum will move, unchanged, about the frequency range; but as it is superimposed on the immovable instrument spectrum, the result will be a *different spectrum for each note*. This hypothesis has been completely confirmed by a large number of spectrograms. There is therefore no point in speaking of the "spectrum" of a violin, seeing that each note has its own spectrum.

This raises the question of how it is possible to recognise the sound of the violin (or of any other instrument for that matter) at all. In other words, what are the invariants of violin tone?

An important role in instrumental timbre is played by the *transients*: numerous experiments have shown that cutting the transients makes the instrument difficult if not impossible to recognise, even for trained ears. The attack transient, in particular, is determined by the mode of excitation: the scraping noise made by the bow on the string forms part of the spectrum which is characteristic and completely different from the steep front of a plucked note for example. Besides, the first case introduces torsional vibration which is lacking in the second, apart from other differences. Briefly, the *form* and slope of the transient are typical for each mode of excitation and therefore for each instrument, making it recognisable. If violin strings are strung on some other kind of sound-box, the unprepared listener will hear a "violin"; *Savart's* trapezoidal violin is a good example of this. But when the instrument has been played a little longer, the ear will eventually discern the aesthetic quality of the tone — the timbre, which depends on the steady-state spectrum, which again depends on the physical parameters of the instrument.

It would therefore seem that the transient contains enough information for the ear to recognise the type of excitation and hence the type of instrument, while the steady-state spectrum determines the tonal quality. In short, the semantic information of the instrumental signal seems to be contained in the transient (of a duration of the order of the ear's time constant of 50 ms) while the steady-state spectrum is the vehicle for the aesthetic information. Analysis of the quality of an instrument is therefore a question of analysis of the steady-state spectrum.

The sound of a given instrument is no doubt recognisable by other invariants also. It has already been shown that the exciting spectrum is constant but changes position for each note. It might be regarded as a kind of grid moving across the fixed instrument spectrum. Although the whole picture keeps changing, the two invariants — the fixed instrument spectrum and the moving exciting spectrum — are retained by the *memory*, so that recognition of each instrument is assured.

Short Bibliography / Kurzes Schrifttum

- E. Leipp*: Les paramètres sensibles des instruments à cordes. Thèse de doctorat de l'Université de Paris. Sorbonne, Paris, 1960.
- E. Leipp* et *A. Moles*: L'emploi du Sonagraphe dans la détermination de la qualité des instruments à cordes. *Annales Télécom.* 14, 5—6 (1956) p. 135.
- W. Meyer-Eppler*, *H. Sendhoff*, *R. Rupprath*: Residualton und Formantton / Residual Tone and Formant Tone. *Gravesaner Blätter / Gravesano Review* 14 (1959) S. 70, p. 84.
- A. Moles*: 1. Structure physique du signal musical et phonétique. Thèse, Sorbonne, Paris, 1952.
2. Etude et représentation de la note complexe en acoustique musicale. *Annales Télécom.* 7, 11 (1952) p. 430.
3. Les musiques expérimentales. Ed. Cercle d'Art Contemporain, Paris, 1960.
- J. F. Schouten*: Residuentheorie. *Philips Technische Rundschau* 5 (1940) S. 294.
- F. Winckel*: 1. Klangwelt unter der Lupe. Max Hesse, Berlin, 1952.
2. Influence des facteurs psycho-physiologiques sur la sensation de consonance-dissonance. *Ac. Music. CNRS*, Paris, 1959.
3. Die psycho-akustische Bewertung des Spektrums. *Folia Phoniatrica* 12, 2 (1960) S. 129.

RADIOTECHNISCHES LABORATORIUM

HANS LURF

WIEN 1

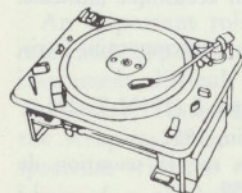
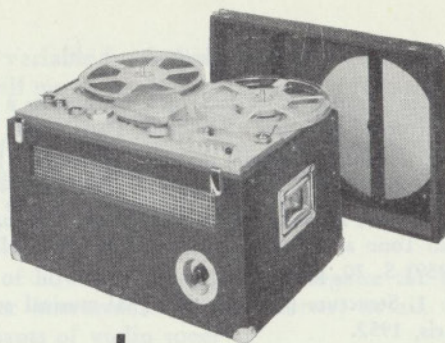
REICHSRATSSTRASSE 17

TELEFON 32 21 69

STUDER 30

Studio Magnetton-Gerät,
Bandgeschwindigkeit 19 u.
38 cm/sek, Gewicht 30 kg.

Magnetic Tape Recorder,
tape speeds 7,5 and 15 i.p.s.
Weight 70 lbs only.



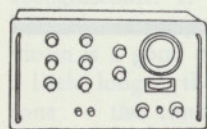
EMT 927 and EMT 930

Studio-Platten-
spieler
Transcription
Turntables.

STELLAVOX

Miniatur-
Magnetton-
Gerät

Miniatur Mag-
netic Tape Recorder.



EMT 414 and EMT 418

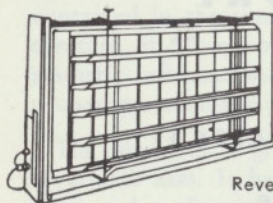
Tonhöhen-
Schwankungs-
Messr.

Wow and Flutter Meters.

SPEZIALKABEL

Doppelt
geschirmt und
HF-dicht.

AF-cables,
double screened.



EMT 140

Nachhall-
Erzeugungs-
Gerät.
Reverberation Set for
artificial echo effects.

EMT 24 and EMT 28

Dynamische- und
Kondensator-
Mikrofone.

Dynamic and
condenser mic-
phones.



ELEKTROMESSTECHNIK WILHELM FRANZ KG
LAHR/SCHWARZWALD · POSTFACH 327 · FERNSPR. 20 53

Grundlagen einer stochastischen Musik

von

IANNIS XENAKIS

IV

Zweiter Teil

ANWENDUNGEN

ANALYSE (Definition des Schemas eines Mechanismus)

Wir werden das Schema eines „analogischen“ Mechanismus mit stochastischem Prozeß analysieren. Es wird zur Herstellung von akustischen Einheiten und deren Umwandlung in der Zeit dienen.

Diese Einheiten besitzen Raster, welche die folgenden, frei gewählten Merkmale aufweisen:

1. — Sie umfassen zwei getrennte Kombinationen von Frequenzbereichen, f_0 und f_1 .

Beispiel:

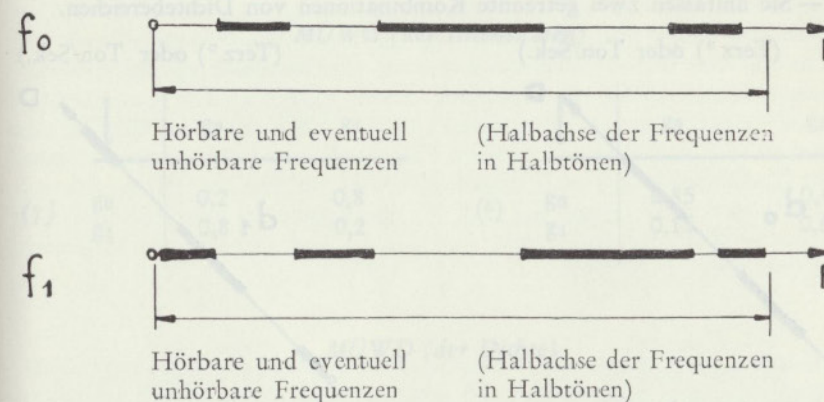


Abb. 28

- 1) Halbachse der Frequenzen in Halbtönen
- 2) Hörbare und eventuell unhörbare Frequenzen

2. — Sie umfassen zwei getrennte Kombinationen von Intensitätsbereichen.

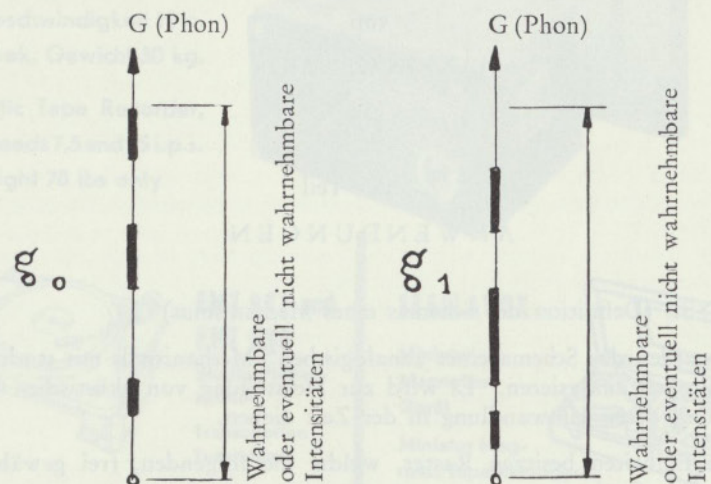


Abb. 29

3. — Sie umfassen zwei getrennte Kombinationen von Dichtebereichen.

(Terz *) oder Ton/Sek.)

(Terz *) oder Ton/Sek.)

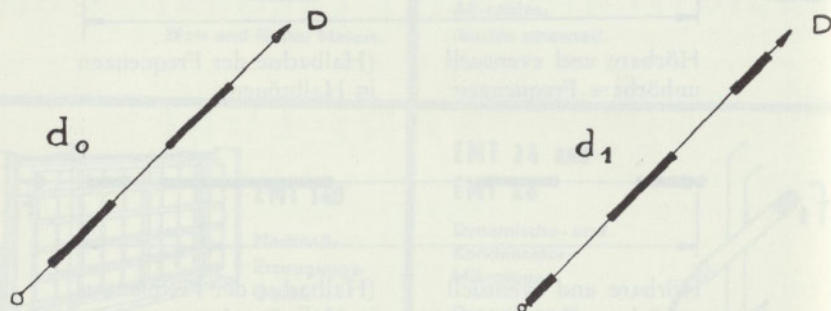


Abb. 30

*) Ternärlogarithmen, siehe Teil I.

4. — Jede dieser drei Veränderlichen gibt ein Protokoll, das durch zwei Matrizen der Übergangswahrscheinlichkeiten (MÜW) zusammengefaßt werden kann.

		X	Y			X	Y
	↓				↓		
(ϱ)	X	0,2	0,8	(σ)	X	0,85	0,4
	Y	0,8	0,2		Y	0,15	0,6

Die Buchstaben (ϱ) und (σ) bilden die Parameter der MÜW.

MÜWF (der Frequenzen)

		f_0	f_1			f_0	f_1
	↓				↓		
(α)	f_0	0,2	0,8	(β)	f_0	0,85	0,4
	f_1	0,8	0,2		f_1	0,15	0,6

MÜWG (der Intensitäten)

		g_0	g_1			g_0	g_1
	↓				↓		
(γ)	g_0	0,2	0,8	(ε)	g_0	0,85	0,4
	g_1	0,8	0,2		g_1	0,15	0,6

MÜWD (der Dichte)

		d_0	d_1			d_0	d_1
(λ)	d_0	0,2	0,8	(μ)	d_0	0,85	0,4
	d_1	0,8	0,2		d_1	0,15	0,6

5. — Die Übergänge der Veränderlichen sind innerhalb jeder MÜW unbestimmt (Monogramm- oder Markoff-Prozeß), aber ihre MÜW sind andererseits verbunden mit Hilfe einer bestimmten Kopplung der Parameter. Die Kopplung wird gegeben durch die folgenden eindeutigen Umwandlungen:

$$(e_0) \quad \begin{array}{cc|cc|cc|cc|cc|cc} \downarrow f_0 & f_1 & \downarrow d_0 & d_1 & \downarrow g_0 & g_1 & \downarrow g_0 & g_1 & \downarrow f_0 & f_1 & \downarrow d_0 & d_1 \\ \downarrow \lambda & \mu & \downarrow \alpha & \beta & \downarrow \lambda & \mu & \downarrow \beta & \alpha & \downarrow \gamma & \varepsilon & \downarrow \gamma & \varepsilon \end{array}$$

Durch diese Definitionen haben wir die Struktur eines Mechanismus beschrieben. Er wird also von 3 Paaren von MÜW (Matrizen der Übergangswahrscheinlichkeiten), MÜWF, MÜWG, MÜWD und der Gruppe (e_0) der sechs Kopplungen dieser MÜW gebildet.

Bedeutung der Kopplung:

Es sei f_0 der Zustand der Frequenzen des Rasters in einem Augenblick t der Schallentwicklung des Mechanismus und während eines Zeitabschnittes Δt . Desgleichen seien g_1 und d_1 die Werte der anderen Veränderlichen des Rasters in einem Zeitpunkt t . Im folgenden Augenblick $t + \Delta t$ muß das Glied f_0 im allgemeinen wechseln, denn es gehorcht einer der beiden MÜWF, (α) oder (β) . Die Wahl von (α) oder (β) ist bedingt durch die Werte g_1 und d_1 des Augenblickes t in Übereinstimmung mit der eindeutigen Umwandlung der Kopplung. Somit schlägt g_1 den Parameter (α) und d_1 gleichzeitig den Parameter (β) vor. Mit anderen Worten, das Glied f_0 muß f_0 bleiben oder seinen Platz nach dem Mechanismus (α) oder dem Mechanismus (β) an f_1 abgeben. Alles verläuft so, als ob sich das Glied f_0 vor zwei Urnen (α) und (β) mit Kugeln in zwei verschiedenen Farben befände, rot für f_0 und blau für f_1 , und zwar in den folgenden Proportionen:

Urne (α)	Urne (β)
0,2 rote Kugeln (f_0)	0,85 rote Kugeln (f_0)
0,8 blaue Kugeln (f_1)	0,15 blaue Kugeln (f_1)

Die Wahl ist frei, und das Glied f_0 kann seinen Nachfolger entweder aus der Urne (α) oder aus der Urne (β) mit einer Wahrscheinlichkeit von $1/2$ (Gesamtwahrscheinlichkeiten) ziehen.

Sobald die Urne einmal gewählt worden ist, ergibt sich für das Ziehen einer blauen Kugel oder einer roten Kugel eine Wahrscheinlichkeit, die gleich dem Verhältnis der Farben in der gewählten Urne ist. Und indem man die Regel der zusammengesetzten Wahrscheinlichkeiten anwendet, beträgt die Wahrscheinlichkeit dafür, daß f_0 des Augenblicks t f_0 im Augenblick $t + \Delta t$ bleibt, $1/2 (0,20 + 0,85) = 0,525$, und die Wahrscheinlichkeit für einen Wechsel nach f_1 beträgt $1/2 (0,80 + 0,15) = 0,475$.

Die fünf Merkmale für die Bildung von Rastern haben einen stochastischen Mechanismus aufgestellt. So folgen, in jedem der Abschnitte Δt der Schallentwicklung des geschaffenen Mechanismus, die drei Veränderlichen f_1 , g_1 , d_1 einem Rundtanz unvorhersehbarer Kombinationen, die fortwährend entsprechend der Willkür der drei MÜW und der eindeutigen, die Glieder und Parameter verbindenden Kopplung wechseln.

Wir haben diesen Mechanismus gegründet, ohne dabei noch irgendeines der Kriterien der Raster zu berücksichtigen. Das heißt, wir haben bei der Wahl der f_0 , f_1 und g_0 , g_1 eine topologische Verteilung der Bereiche der Partikel vorausgesetzt, ohne jedoch zu präzisieren. Dasselbe gilt für die Verteilung der Dichte. Wir geben nachfolgend zwei Beispiele sehr verschiedener Realisation für Orchester und für den elektromagnetischen Schall, wo diese beiden Verteilungen definiert werden. Vor ihrer Darstellung jedoch werden wir die Untersuchung des Kriteriums der Ataxie weiterführen.

Wir werden die Entropien der drei Veränderlichen auf der Stufe der Partikel vernachlässigen, denn woran es uns liegt, das ist der makroskopische Mechanismus auf der Stufe der Raster.

Wir stellen also die fundamentale Frage in Hinsicht auf die Mechanismen: „Wohin geht die durch eine MÜW zusammengefaßte Umwandlung? Welches ist ihr Schicksal?“

Betrachten wir die MÜW:

$\downarrow$	X	Y
X	0,2	0,8
Y	0,8	0,2

und nehmen wir hundert Mechanismen an, die durch das Gesetz dieser einzigen MÜW identifiziert werden. Wir lassen sie alle bei X beginnen und überlassen sie einer freien Entwicklung. Die vorstehende Frage wird: „Gibt es eine allgemeine Tendenz der Zustände der hundert Mechanismen und wenn ja, welche?“ (Siehe Anhang 2).

Nach der ersten Etappe haben sich die 100 X verwandelt in $0,2 \cdot 100 X = 20 X$ und $0,8 \cdot 100 Y = 80 Y$.

Bei der dritten Etappe bleiben 0,2 der X unverändert X, und 0,8 der Y werden zu X. Andererseits werden 0,8 der X zu Y, und 0,2 der Y bleiben Y. Dieser allgemeine Gedankengang gilt für alle Etappen und kann geschrieben werden:

$$\begin{aligned} X' &= 0,2 X + 0,8 Y \\ Y' &= 0,8 X + 0,2 Y \end{aligned}$$

Wenn man ihn auf die 100 Mechanismen X anwenden will, so erhalten wir:

Etappe	Mechanismen X	Mechanismen Y
0	100	0
1	20	80
2	68	32
3	39	61
4	57	43
5	46	54
6	52	48
7	49	51
8	50	50
9	50	50
.	.	.
.	.	.
.	.	.

Wir werden Schwingungen feststellen, die eine allgemeine Tendenz zum „Gleichgewicht“ zeigen und welches in der 8. Etappe erreicht wird. Wir können also daraus schließen, daß von den 100 in X beginnenden Mechanismen in der achten Etappe aller Wahrscheinlichkeit nach 50 in X und 50 in Y sein werden.

Dieselben „Gleichgewichtswerte“ werden in folgender Weise errechnet:

Im Gleichgewichtszustand bleiben die Werte von X und von Y unverändert, und das vorhergehende System wird:

$$\begin{aligned} X &= 0,2 X + 0,8 Y \\ Y &= 0,8 X + 0,2 Y \end{aligned}$$

das ist:

$$\begin{aligned} 0 &= -0,8 X + 0,8 Y \\ 0 &= +0,8 X - 0,8 Y \end{aligned}$$

und da die Zahl der Mechanismen konstant ist, hier 100, kann eine der beiden Gleichungen im Gleichgewichtszustand ersetzt werden durch:

$$100 = X + Y$$

und das System wird:

$$\begin{aligned} 0 &= 0,8 X + 0,8 Y \\ 100 &= X + Y \end{aligned}$$

und die Werte X, Y im Gleichgewicht sind:

$$X = 50 \text{ und } Y = 50$$

oder in Verhältniswerten:

$$X = 0,5, \quad Y = 0,5$$

Dieselbe Methode kann auf die MÜW (σ) angewandt werden, welche uns einen Gleichgewichtszustand mit den folgenden Werten verrät:

$$X = 0,73 \text{ und } Y = 0,27$$

Eine andere Methode, die insbesondere im Falle einer MÜW mit zahlreichen Gliedern, welche uns für die Auffindung der Gleichgewichtswerte zur Lösung eines langen Systems linearer Gleichungen zwingt, interessant ist, ist jene, welche die Matrizenrechnung verwendet.

So kann die erste Etappe als das Ergebnis des Matrizenproduktes der MÜW mit der Einkolonnenmatrize $\begin{pmatrix} 100 \\ 0 \end{pmatrix}$ angesehen werden:

$$\begin{matrix} X: \\ Y: \end{matrix} \begin{vmatrix} 0,2 & 0,8 \\ 0,8 & 0,2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 100 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 20 \\ 80 \end{vmatrix}$$

die zweite Etappe:

$$\begin{vmatrix} 0,2 & 0,8 \\ 0,8 & 0,2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 20 \\ 80 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 4 + 64 \\ 16 + 16 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 68 \\ 32 \end{vmatrix}$$

und die n-te Etappe:

$$\begin{vmatrix} 0,2 & 0,8 \\ 0,8 & 0,2 \end{vmatrix}^n \cdot \begin{vmatrix} 100 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Da wir nunmehr die Gleichgewichtswerte einer Markoff-Kette berechnen können, sind wir leicht in der Lage, ihre Entropie zu kalkulieren.

Die Definition der Entropie eines Systemes ist:

$$H = - \sum p_i \log p_i$$

Die Berechnung der Entropie einer MÜW erfolgt zunächst kolonnenweise ($\sum p_i = 1$); anschließend wird diesem Ergebnis ein Gewicht beigelegt, das den Gleichgewichtswerten entspricht. So erhalten wir für die MÜW (σ):

	X	Y
↓		
X	0,85	0,4
Y	0,15	0,6

Entropie der Zustände von X:

$$- 0,85 \log 0,85 - 0,15 \log 0,15 = 0,611 \text{ Bit}$$

Entropie der Zustände von Y:

$$- 0,4 \log 0,4 - 0,6 \log 0,6 = 0,970 \text{ Bit}$$

Wert für X im Gleichgewicht:

$$0,73$$

Wert für Y im Gleichgewicht:

$$0,27$$

Mittlere Entropie im Gleichgewicht:

$$H_\sigma = 0,611 \cdot 0,73 + 0,970 \cdot 0,27 = 0,707 \text{ Bit}$$

Und die Entropie der MÜW (ρ) im Gleichgewicht:

$$H_\rho = 0,722 \text{ Bit}$$

Die beiden Entropien unterscheiden sich nicht sehr, und dieses war zu erwarten, denn wenn wir die jeweiligen MÜW betrachten, so bemerken wir, daß: die großen Kontraste der Wahrscheinlichkeiten innerhalb der Matrize (ρ) durch eine äußere Gleichheit der Wahrscheinlichkeiten im Gleichgewichtszustand ausgeglichen werden; andererseits aber gelingt es der fast vollständigen inneren Gleichheit von 0,4 und 0,6 in der MÜW (σ), den inneren Kontrast 0,85 und 0,15, sowie den äußeren Kontrast 0,73 und 0,27 zu meistern.

Auf dieser Stufe können wir die MÜW der drei Veränderlichen f_i , g_i , d_i derart verändern, daß wir ein neues Entropiepaar erhalten. Und da dieser Vorgang wiederholbar ist, läßt sich ein Protokoll der Entropiepaare und infolgedessen eine MÜW der Entropiepaare aufstellen. Das sind mögliche Spekulationen und zweifellos interessante Forschungen.

Wir beschränken uns jedoch auf die erste, oben angestellte Berechnung und werden in unseren Untersuchungen auf noch allgemeinerer Ebene fortfahren.

Auf der Seite 134 haben wir den Mechanismus der Umwandlung von f_0 in f_1 oder in f_2 analysiert, wenn die beiden anderen Veränderlichen g_1 und d_1 gegeben sind. Wir können dieselben Gedankengänge für jede der drei Veränderlichen f_i , g_i , d_i anwenden, sobald die beiden anderen gegeben sind.

Beispiel für g_i :

Gegeben sei ein Raster im Zeitpunkt t , dessen Veränderliche die Werte (f_0 , g_1 , d_1) besitzen. Im Augenblick $t + \Delta t$ wird der Wert g_1 sich in g_0 oder in g_2 verwandeln.

Von f_0 kommt der Parameter (γ)

Von d_1 kommt der Parameter (ϵ)

Bei der MÜW (γ) beträgt die Wahrscheinlichkeit dafür, daß g_1 unverändert g_1 bleibt, 0,2. Bei der MÜW (ϵ) beträgt diese selbe Wahrscheinlichkeit 0,6. Durch Anwendung der Regeln der zusammengesetzten und totalen Wahrscheinlichkeiten, wie auf Seite 134, erreichen wir, daß die Wahrscheinlichkeit dafür, daß g_1 im Augenblick $t + \Delta t$ unter der gleichzeitigen Einwirkung von f_0 und d_1 in g_1 bleibt, gleich $(0,2 + 0,6) \cdot \frac{1}{2} = 0,4$ ist.

Dasselbe gilt für die Berechnung der Umwandlung von g_1 in g_0 und der Umwandlungen von d_1 .

Wir werden uns nunmehr bemühen, aus diesem Wald unmöglich zu handhabender Wahrscheinlichkeitskombinationen herauszutreten, und eine allgemeine Sicht suchen, sofern es diese gibt.

Da im allgemeinen jeder Raster von einer Trias der Werte der drei Veränderlichen F, G, D gebildet wird, können wir die sich aus dem Mechanismus, den wir uns gesetzt haben, ergebenden getrennten Raster auszählen.

Hier die möglichen Kombinationen:

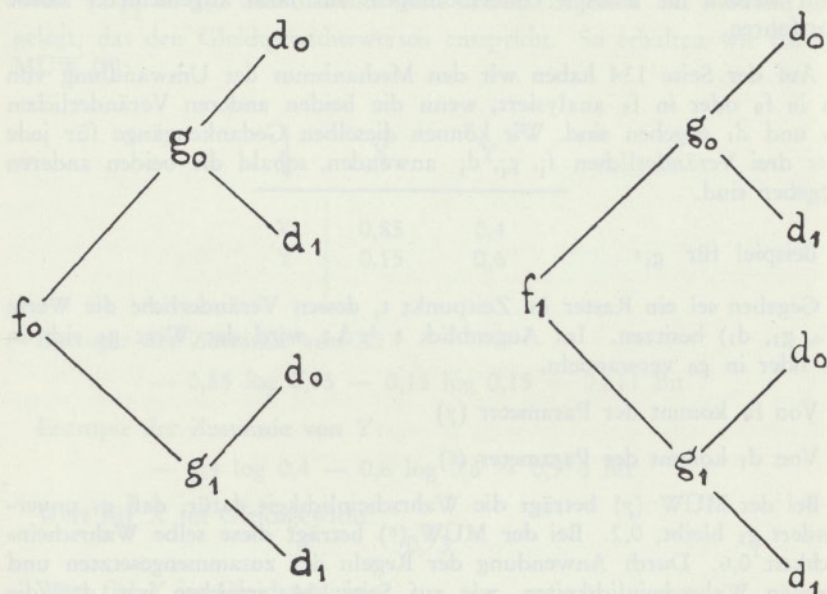


Abb. 31

oder weiter

$(f_0 g_0 d_0), (f_0 g_0 d_1), (f_0 g_1 d_0), (f_0 g_1 d_1), (f_1 g_0 d_0), (f_1 g_0 d_1), (f_1 g_1 d_0), (f_1 g_1 d_1)$

das sind acht getrennte Raster.

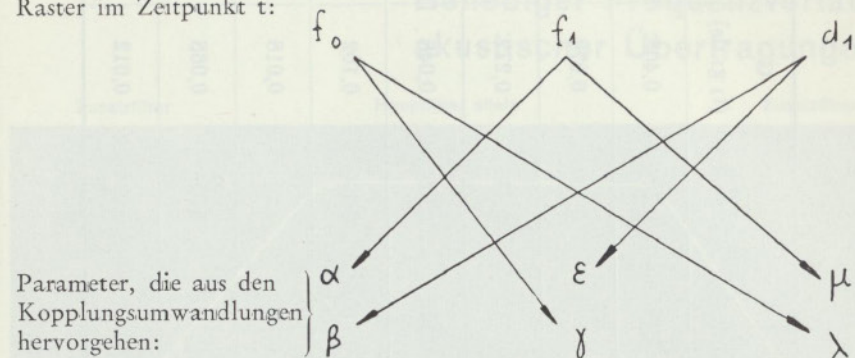
Es sind diese acht Raster, welche, zusammen mit ihren Protokollen, die Schallentwicklung zusammensetzen werden. In jedem Augenblick t der Komposition begegnen wir einem der acht vorstehend genannten Raster und keinen anderen.

Welches sind die Regeln des Überganges von einer Kombination zu einer anderen? Läßt sich eine Matriz der Übergangswahrscheinlichkeiten dieser acht Raster bilden?

Gegeben sei der Raster $(f_0 g_1 d_1)$ des Zeitpunktes t . Kann man die Wahrscheinlichkeit dafür berechnen, daß dieser Raster sich im Augenblick $t + \Delta t$ in $(f_1 g_1 d_0)$ verwandelt?

Die vorhergehenden Operationen haben es uns gestattet, die Wahrscheinlichkeit dafür zu berechnen, daß f_0 sich unter dem Einfluß von g_1 und d_1 in f_1 verwandelt und daß g_1 unter dem Einfluß von f_0 und d_1 in g_1 bleibt. Schematisieren wir die Operationen:

Raster im Zeitpunkt t :



Raster im Zeitpunkt ($t + \Delta t$):	f_1	g_1	d_0
Aus den Kopplungs- parametern entsprechen- den MÜW abgeleitete Wahrscheinlichkeitswerte	$\left\{ \begin{array}{l} 0,80 \\ 0,15 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0,6 \\ 0,2 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0,4 \\ 0,8 \end{array} \right.$
Unabhängige Wahrscheinlichkeiten:	0,475	0,4	0,6

Zusammengesetzte
Wahrscheinlichkeiten: $0,475 \cdot 0,40 \cdot 0,60 = 0,114$

Schlußfolgerung:

Der Raster $(f_0 g_1 d_1)$ verwandelt sich in $(f_1 g_1 d_0)$ mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,114.

Wir können also die Berechnung auf die acht Raster ausdehnen und die Matriz der Übergangswahrscheinlichkeiten aufstellen.

Sie wird quadratisch sein und acht Zeilen und acht Kolonnen aufweisen.

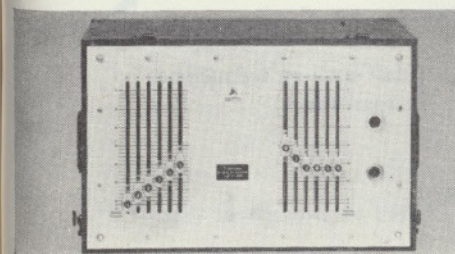
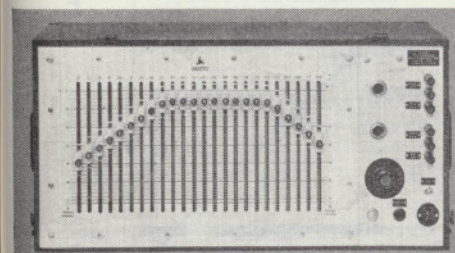
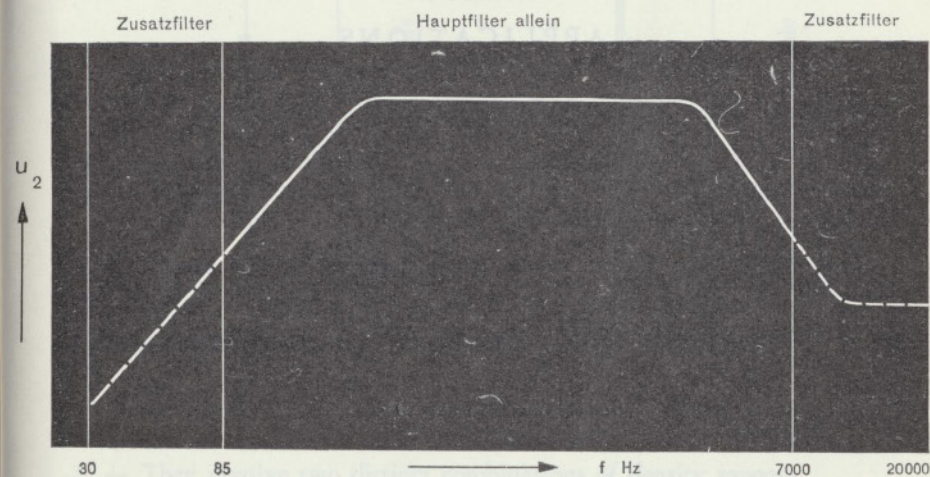
	A	B	C	D	E	F	G	H
	$(f_0 g_0 d_0)$	$(f_0 g_0 d_1)$	$(f_0 g_1 d_0)$	$(f_0 g_1 d_1)$	$(f_1 g_0 d_0)$	$(f_1 g_0 d_1)$	$(f_1 g_1 d_0)$	$(f_1 g_1 d_1)$
A	$(f_0 g_0 d_0)$	0,021	0,357	0,084	0,189	0,165	0,204	0,096
B	$(f_0 g_0 d_1)$	0,084	0,089	0,076	0,126	0,150	0,136	0,144
C	$(f_0 g_1 d_0)$	0,084	0,323	0,021	0,126	0,150	0,036	0,144
D	$(f_0 g_1 d_1)$	0,336	0,081	0,019	0,084	0,135	0,024	0,216
E	$(f_1 g_0 d_0)$	0,019	0,063	0,336	0,171	0,110	0,102	0,064
F	$(f_1 g_0 d_1)$	0,076	0,016	0,304	0,114	0,100	0,018	0,096
G	$(f_1 g_1 d_0)$	0,076	0,057	0,084	0,114	0,100	0,068	0,096
H	$(f_1 g_1 d_1)$	0,304	0,014	0,076	0,076	0,090	0,012	0,144

Besitzt sie eine Stabilitätszone?



ALBISWERK
ZÜRICH A.G.

Beliebiger Frequenzverlauf
akustischer Übertragungen



mit dem variablen ALBIS
Tonfrequenzfilter.

Dieses wird bei vielen Radio- und TV-Studios, in Forschungsabteilungen, Lehranstalten und Betrieben, sowie in Kliniken des In- und Auslandes verwendet.

Oberes Bild: Hauptfilter
Unteres Bild: Zusatzfilter

ALBISWERK ZÜRICH A.G.
ZÜRICH 9/47 SCHWEIZ

Elements of Stochastic Music

by
IANNIS XENAKIS

IV

Second Part APPLICATIONS

ANALYSIS (Definition of the scheme of a mechanism)

We are going to analyse the diagram of an "analogical" mechanism following a stochastic process. It will be useful for the production of acoustic beings and their transformations in the time.

These units have screens which present the following freely chosen features:

1/ — They involve two distinct combinations of frequency ranges, f_0 and f_1 .

Example:

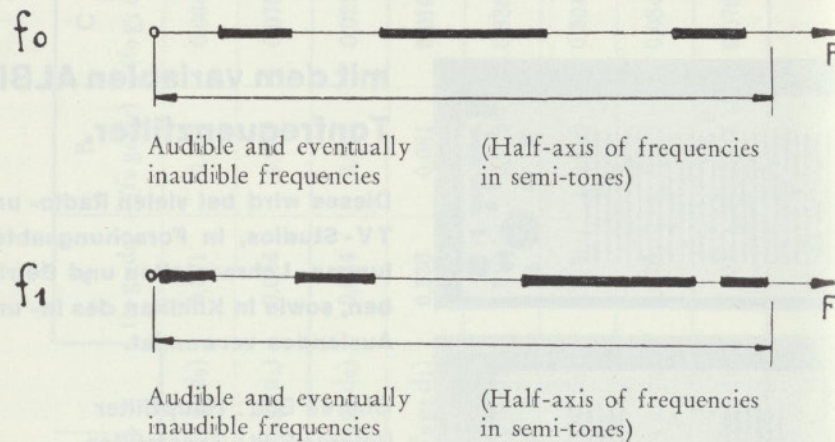


Fig. 28

2/ — They involve two distinct combinations of intensity ranges

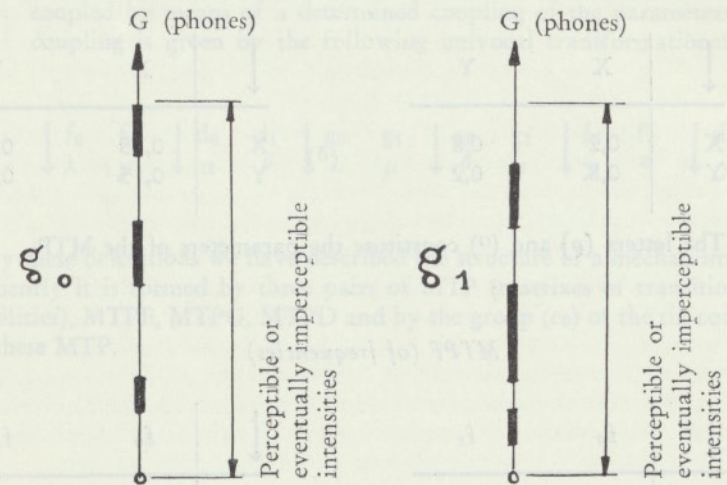


Fig. 29

3/ — They involve two distinct combinations of density ranges.

(Ters*) or tones/sec

(Ters*) or tones/sec

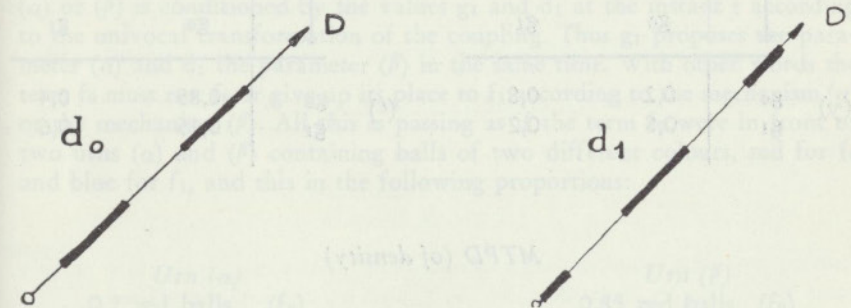


Fig. 30

*) Ternary logarithms, see Part I.

- 4/ — Each of these three variables presents a protocol which can be summed up by two matrixes of transition probabilities (MTP).

	↓	X	Y		↓	X	Y
(p)	X	0,2	0,8	(δ)	X	0,85	0,4
	Y	0,8	0,2		Y	0,15	0,6

The letters (p) and (σ) constitute the parameters of the MTP.

MTPF (of frequencies)

	↓	f ₀	f ₁		↓	f ₀	f ₁
(α)	f ₀	0,2	0,8	(β)	f ₀	0,85	0,4
	f ₁	0,8	0,2		f ₁	0,15	0,6

MTPG (of intensities)

	↓	g ₀	g ₁		↓	g ₀	g ₁
(γ)	g ₀	0,2	0,8	(ε)	g ₀	0,85	0,4
	g ₁	0,8	0,2		g ₁	0,15	0,6

MTPD (of density)

		d ₀	d ₁			d ₀	d ₁
(λ)	d ₀	0,2	0,8	(μ)	d ₀	0,85	0,4
	d ₁	0,8	0,2		d ₁	0,15	0,6

- 5/ — The transitions of the variables within every MTP are indetermined (digram or Markoff process) but on the other hand their MTP are coupled by means of a determined coupling of the parameters. The coupling is given by the following univocal transformations:

$$(e_0) \quad \begin{array}{c} f_0 \quad f_1 \\ \downarrow \lambda \quad \mu \end{array} \quad \begin{array}{c} d_0 \quad d_1 \\ \downarrow \alpha \quad \beta \end{array} \quad \begin{array}{c} g_0 \quad g_1 \\ \downarrow \lambda \quad \mu \end{array} \quad \begin{array}{c} g_0 \quad g_1 \\ \downarrow \beta \quad \alpha \end{array} \quad \begin{array}{c} f_0 \quad f_1 \\ \downarrow \gamma \quad \varepsilon \end{array} \quad \begin{array}{c} d_0 \quad d_1 \\ \downarrow \gamma' \quad \varepsilon \end{array}$$

By these definitions we have described the structure of a mechanism. Consequently it is formed by three pairs of MTP (matrixes of transition probabilities), MTPF, MTPG, MTPD and by the group (e₀) of the six couplings of these MTP.

Signification of the coupling:

We set f₀ as to be the state of the frequencies of the screen at an instant t of the acoustic evolution of the mechanism, the duration of which is Δt. In the same way a₁ and d₁ may be the values of the other variables of the screen at an instant t. In the following moment t + Δt the term f₀ generally must change because it obeys to one of the MTPF (α) or (β). The choice of (α) or (β) is conditioned by the values g₁ and d₁ at the instant t according to the univocal transformation of the coupling. Thus g₁ proposes the parameter (α) and d₁ the parameter (β) in the same time. With other words the term f₀ must rest f₀ or give up its place to f₁ according to the mechanism (α) or the mechanism (β). All this is passing as if the term f₀ were in front of two urns (α) and (β) containing balls of two different colours, red for f₀ and blue for f₁, and this in the following proportions:

Urn (α)			Urn (β)		
0,2 red balls	(f ₀)		0,85 red balls	(f ₀)	
0,8 blue balls	(f ₁)		0,15 blue balls	(f ₁)	

We have a free choice, and the term f₀ can draw its successor either from the urn (α) or from the urn (β) with a probability of 1/2 (total probabilities).

Once the urn has been chosen the drawing of a red ball or a blue one is done with a probability which is equal to the proportions of colours contained in the chosen urn. And by applying the rule of composed probabilities, the probability for f_0 of the instant t to stay f_0 at the instant $t + \Delta t$ is $1/2$ ($0,20 = 0,85$) + $0,525$ and the probability of changing towards f_1 is $1/2$ ($0,80 + 0,15$) = $0,475$.

The five features of the constitution of screens have established a stochastic mechanism. Thus, within each of the durations Δt of the acoustic evolution of the created mechanism, the three variables f_1 , g_1 , d_1 pursue a round of unforeseeable combinations always changing at the will of the three MTP and the univocal coupling which connects terms and parameters.

We have founded this mechanism without considering yet any of the criteria of the screens. That means, that we understood, as to the choice of the f_0 , f_1 and g_0 , g_1 , a topological distribution of the particle ranges without specifying it. This is the same as to the distribution of densities. In the following we'll give two examples of very different realization for orchestra and for the electromagnetic sounds where these two distributions are defined. But before we'll continue the study of the criterion of ataxy.

We'll neglect the entropies of the three variables on the level of particles, for what is important that is the macroscopic mechanism on the level of screens.

Therefore we put the fundamental question concerning the mechanism: "Where is going the transformation summed up by a MTP? What is its destiny?"

We consider the MTP:

	X	Y
X	0,2	0,8
Y	0,8	0,2

and suppose one hundred mechanisms being identified by the law of this only MTP. We let start them all in X and let develop them freely. The preceeding question will become:

"Is there a general tendency of the states of the one hundred mechanisms and if yes, what is it?" (See appendix 2).

After the first stage the 100 mechanisms X have changed into $0,2 \cdot 100 X = 20 X$ and $0,8 \cdot 100 Y = 80 Y$.

At the third stage 0,2 of X remain X without change and 0,8 of Y become X. On the other hand 0,8 of X become Y and 0,2 of Y remain Y. This general reasoning is valid for every stage and can be written:

$$X' = 0,2 X + 0,8 Y$$

$$Y' = 0,8 X + 0,2 Y$$

If we want to apply it to the 100 mechanisms X we get:

Stage	Mechanisms	Mechanisms
0	100	0
1	20	80
2	68	32
3	39	61
4	57	43
5	46	54
6	52	48
7	49	51
8	50	50
9	50	50
.	.	.
.	.	.
.	.	.

We'll observe oscillations which present a general tendency towards the "balance state" which is reached at the 8th stage. Therefore we can conclude that, of the 100 mechanisms starting at X, 50 will be in X and 50 in Y at the 8th stage according to all probabilities.

The same "values of balance" can be calculated in the following way:

At the state of balance the values of X and of Y remain unchanged, and the preceeding system becomes:

$$X = 0,2 X + 0,8 Y$$

$$Y = 0,8 X + 0,2 Y$$

that is:

$$0 = -0,8 X + 0,8 Y$$

$$0 = +0,8 X - 0,8 Y$$

and as the number of mechanisms is constant, here 100, one of these equations can be replaced, at the state of balance, by:

$$100 = X + Y$$

and the system becomes:

$$\begin{aligned} 0 &= 0,8 X + 0,8 Y \\ 100 &= X + Y \end{aligned}$$

and the values X, Y at the state of balance are:

$$X = 50 \text{ and } Y = 50$$

or in proportions:

$$X = 0,5, \quad Y = 0,5$$

The same method can be applied to the MTP (σ) which delivers us a state of balance with the following values:

$$X = 0,73 \text{ and } Y = 0,27$$

Another method, which is especially interesting in the case of a MTP with numerous terms, which oblige us to find out the values of balance, to resolve a long system of linear equations, is that one which utilizes the matrix calculation.

So the first stage can be considered as the result of the matrix product of the MTP with the unicolon matrix $\begin{vmatrix} 100 \\ 0 \end{vmatrix}$:

$$\begin{matrix} X: & \begin{vmatrix} 0,2 & 0,8 \end{vmatrix} \\ Y: & \begin{vmatrix} 0,8 & 0,2 \end{vmatrix} \end{matrix} \cdot \begin{vmatrix} 100 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 20 \\ 80 \end{vmatrix}$$

the second stage:

$$\begin{vmatrix} 0,2 & 0,8 \\ 0,8 & 0,2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 20 \\ 80 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 4 + 64 \\ 16 + 16 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 68 \\ 32 \end{vmatrix}$$

and the nth stage:

$$\begin{vmatrix} 0,2 & 0,8 \\ 0,8 & 0,2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 100 \\ 0 \end{vmatrix} \cdot n$$

Now being able to calculate the balance values of a Markoff chain we also can determine its entropy.

The definition of the entropy of a system is:

$$H = - \sum p_i \log p_i$$

The calculation of the entropy of a MTP is first effectuated by columns ($\sum p_i = 1$)*); then we'll give a weight to this result which corresponds to the values of balance. Thus we get, for the MTP (σ):

	X	Y
X	0,85	0,4
Y	0,15	0,6

Entropy of the states of X:

$$- 0,85 \log 0,85 - 0,15 \log 0,15 = 0,611 \text{ bit}$$

Entropy of the states of Y:

$$- 0,4 \log 0,4 - 0,6 \log 0,6 = 0,970 \text{ bit}$$

And the value for X at its balance state:

$$0,73$$

Value for Y at its balance state:

$$0,27$$

Mean entropy at the balance state:

$$H_\sigma = 0,611 \cdot 0,73 + 0,970 \cdot 0,27 = 0,707 \text{ bit.}$$

And the entropy of the MTP (ϱ) at the balance state:

$$H_\varrho = 0,722 \text{ bit}$$

These two entropies don't differ very much and this result was to be expected, for if considering the respective MTP we can remark that: the great contrasts of probabilities within the matrix (ϱ) are compensated by an external identity of the probabilities at the balance state; on the other hand however the internal quasi identity of 0,4 and 0,6 within the MTP (σ) succeeds in fighting with the interior contrast 0,85 and 0,15 as well as with the exterior contrast 0,73 and 0,27.

At this level we can modify the MTP of the three variables f_1, g_1, d_1 so as to obtain a new entropy couple. And this operation being renewable, we can form a protocol of entropy couples and consequently a MTP of these entropy couples. That are possible speculations and certainly very interesting researches.

*) The p_i represent transition probabilities of the MTP.

However we'll restrain us at the first calculation which has been indicated above and we'll continue our investigation at a much more general level.

In page 147 we analysed the mechanism of the transformation from f_0 to f_1 when the values of the two other variables g_1 and d_1 are given. The same reasonings are applicable to each of the variables f_1 , g_1 , d_1 when the two others are given.

Example for g_1

We set a screen at an instant t the variables of which take the values (f_0, g_1, d_1) . At the instant $t + \Delta t$ the value g_1 will change to g_0 or to g_1 .

From f_0 we get the parameter (γ)

From d_1 we get the parameter (ϵ)

Concerning the MTP (γ) the probability that g_1 remains unchanged g_1 is 0,2. As to the MTP (ϵ) this same probability is 0,6. By applying the rules of composed and total probabilities, as in page 147, we obtain that the probability therefore that g_1 remains in g_1 at the instant $t + \Delta t$ under the simultaneous effects of f_0 and d_1 , is $(0,2 + 0,6)^{1/2} = 0,4$.

It is the same for the calculation of the transformation of g_1 into g_0 and of the transformation of d_1 .

Now we'll try to come out of this forest of probability combinations which are impossible to handle and we'll search for a more general sight, if ever there is one.

Generally, because any screen is constituted by a trias of the values of the three variables F, G, D , it is possible to enumerate the distinct screens resulting from the mechanism which we gave us.

Here the possible combinations:

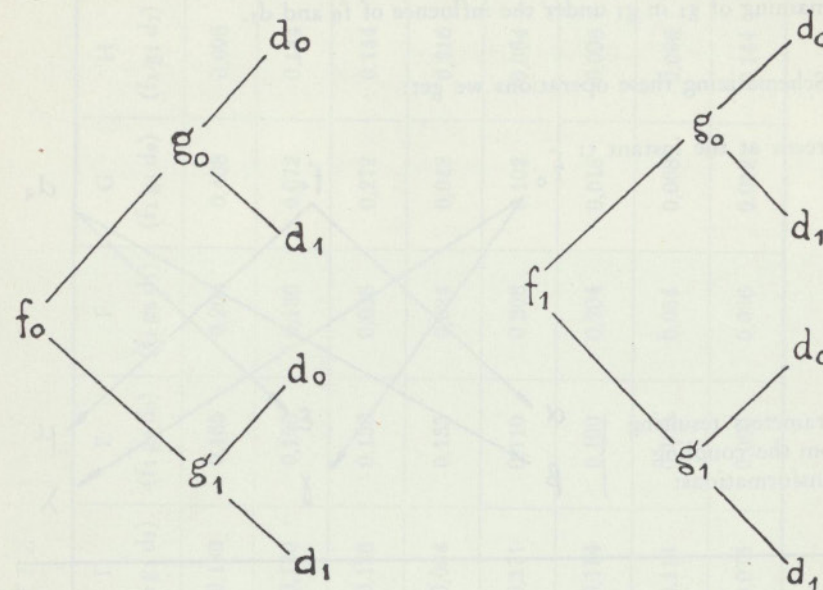


Fig. 31

or furthermore

$(f_0 g_0 d_0), (f_0 g_0 d_1), (f_0 g_1 d_0), (f_0 g_1 d_1), (f_1 g_0 d_0), (f_1 g_0 d_1), (f_1 g_1 d_0), (f_1 g_1 d_1)$

That means eight distinct screens.

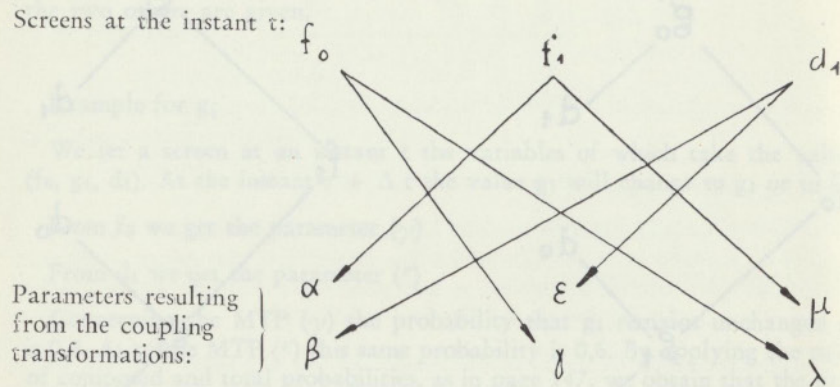
These eight screens will compose, together with their protocols the acoustic evolution. At any instant t of the composition we'll meet only one of these preceeding screens and no others.

What are the rules of transition from one combination to another one? Are we able to construct a matrix of transition probabilities of these eight screens?

We set the screen $(f_0 g_1 d_1)$ at the instant t . Is it possible to calculate the probability for this screen to be transformed into $(f_1 g_1 d_0)$ at the instant $t + \Delta t$?

The preceding operations allowed us to calculate the probabilities of a transformation of f_0 into f_1 under the influence of g_1 and d_1 and of the remaining of g_1 in g_1 under the influence of f_0 and d_1 .

Schematizing these operations we get:



Composed probabilities: $0,475 \cdot 0,40 \cdot 0,60 = 0,114$

Conclusion:

The screen $(f_0 g_1 d_1)$ transforms itself into $(f_1 g_1 d_0)$ with a probability of 0,114.

Consequently we can extend the calculation to the eight screens and establish the matrix of transition probabilities.

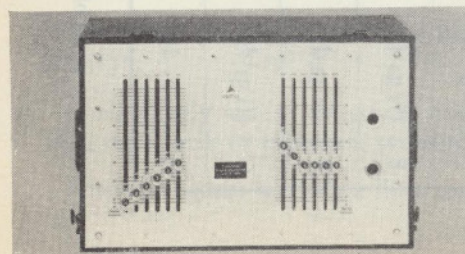
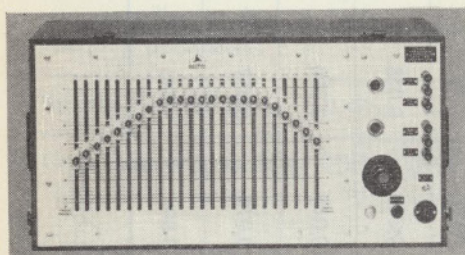
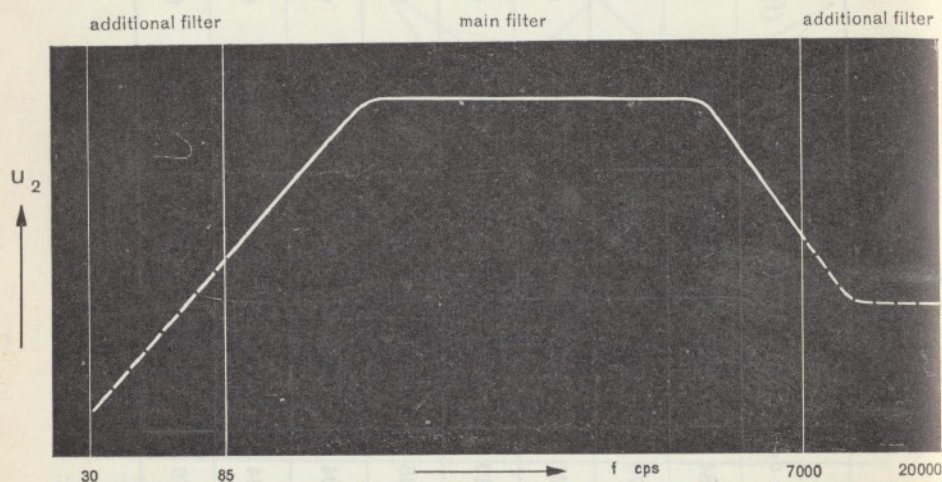
It will be square with eight lines and eight columns.

MTPZ

	A	B	C	D	E	F	G	H
A	$(f_0 g_0 d_0)$	$(f_0 g_0 d_1)$	$(f_0 g_1 d_0)$	$(f_0 g_1 d_1)$	$(f_1 g_0 d_0)$	$(f_1 g_0 d_1)$	$(f_1 g_1 d_0)$	$(f_1 g_1 d_1)$
A	0,021	0,357	0,084	0,189	0,165	0,204	0,408	0,096
B	0,084	0,089	0,076	0,126	0,150	0,136	0,072	0,144
C	0,084	0,323	0,021	0,126	0,150	0,036	0,272	0,144
D	0,336	0,081	0,019	0,084	0,135	0,024	0,048	0,216
E	0,019	0,063	0,336	0,171	0,110	0,306	0,102	0,064
F	0,076	0,016	0,304	0,114	0,100	0,204	0,018	0,096
G	0,076	0,057	0,084	0,114	0,100	0,054	0,068	0,096
H	0,304	0,014	0,076	0,076	0,090	0,036	0,012	0,144

Is there a zone of stability?

You may obtain any desired
frequency characteristic in
acoustical transmission



**with the variable ALBIS
voice-frequency filter.**

The variable ALBIS voice-fre-
quency filter is used in many Radio-
and TV-Studios, in several research
laboratories, institutes and fac-
tories, as well as in clinics in
Switzerland and abroad.

Top: **main filter**
Bottom: **additional filter**

ALBISWERK ZURICH S.A.
ZURICH 9/47 SWITZERLAND

ELEKTROAKUSTISCHES EXPERIMENTALSTUDIO HERMANN SCHERCHEN GRAVESANO

PROTEKTORAT:
SCHWEIZER RUNDSPRUCH · IMC-UNESCO · REGIERUNG TESSIN
UNDER THE AUSPICES OF
RADIO SWITZERLAND · IMC-UNESCO · GOVERNMENT OF TESSIN

6. — 8. August 1961

PROBLEME DER TELEVISION

TECHNIK:

Video-Tape Apparaturen / Reflex-Wand
/ Elektronic-Clam
Farbfernsehen / Auf-Projektion / Fern-
sehgroßbild

DRAMATURGIE:

Die räumlich-zeitlich verschiedenen Wir-
kungsgrade von Wort, Bild, Klang
Raum-, Zeit-, und Sinn-Einheit / Raum-,
Zeit-, und Sinn-Divergenzen

August 6—8, 1961

PROBLEMS OF TELEVISION

TECHNICAL:

Video Tape Equipment / Reflex Wall /
Electronic Clam
Colour TV / Projection TV / Large
Image TV

DRAMATIC:

Speech, Picture, Sound in their varying
effectiveness in Space and Time
Space, Time and Sense Unit / Space,
Time and Sense Divergencies

ELEKTROAKUSTISCHES EXPERIMENTALSTUDIO HERMANN SCHERCHEN GRAVESANO

PROTEKTORAT:

SCHWEIZER RUNDSPRUCH • IMC-UNESCO • REGIERUNG TESSIN

UNDER THE AUSPICES OF

RADIO SWITZERLAND • IMC-UNESCO • GOVERNMENT OF TESSIN

6. — 8. August 1961

PROBLEME DER TELEVISION

I

TECHNIK

II

DRAMATURGIE

9. — 10. August 1961

HEILKUNDE UND MUSIK

I

Klangmateriell-Physiologische
Möglichkeiten

II

Künstlerisch-Psychologische
Einwirkungen

11. — 13. August 1961

MUSIK UND MATHEMATIK

I

Kompositionen aus Rechenmaschinen

II

Random — Tonfolgen

III

Stochastische Musikgestaltung

August 6—8, 1961.

PROBLEMS OF TELEVISION

I

TECHNICAL

II

DRAMATIC PRODUCTION

August 9—10, 1961

MEDICINE AND MUSIC

I

Physiological Possibilities of the Sound

II

Psychological Effects of the Art

August 11—13, 1961

MUSIC AND MATHEMATICS

I

Music from Computers

II

Random Sound Sequences

III

Stochastic Composition