MUSIKALISCHE, ELEKTROAKUSTISCHE UND SCHALLWISSENSCHAFTLICHE GRENZPROBLEME

GRAVESANER BLÄTTER

JAHRGANG II

HERAUSGEBER PROFESSOR HERMANN SCHERCHEN

ARS-VIVA-VERLAG (HERMANN SCHERCHEN) GMBH
MAINZ - APRIL/MAI 1957

HEFT 7-8

NACHDRUCK STRENGSTENS VERBOTEN!

Telefunken

Fernsehkombinationen

Rundfunkgeräte

Magnetophone

Elektroakustische Anlagen

Sender jeder Art

Ordnungsanlagen

Trägerfrequenzgeräte

Relais- und Meßgeräte · Quarze

Das Elektroakustische Experimentalstudio

GRAVESANO

ist ausgerüstet mit

Telefunkenmaterial und

Telefunkenapparaturen

GRAVESANER BLÄTTER

Eine Vierteljahresschrift für musikalische, elektroakustische und schallwissenschaftliche Grenzprobleme

NR. VII/III - APRIL/MAI 1957

INHALT:

		Seite
Friedrich Trautwein (zum Gedächtnis)	Jack Bornoff	3
* * *		
Das Tonmeisterproblem	Ermanno Briner	4
* * *		
Stereophonische Klangwiedergabe	J. G Cordonnier	9
Experimente mit mehreren Mikrophonen	Gravesano, Dez. 1956	29
Optimale Lautsprecher-Anordnungen	Walther Könnecke	32
* * *		
Manipulation und Conception (III) Einheitswissenschaft und Musik	Hermann van San	39
* * *		
Ultraschall und seine Bedeutung für Musik, Physiologie und Psychologie	Clifton Thornton	50
Probleme des Hörens	Friedrich Trautwein	67
Legende zur beiliegenden Schallplatte	André Moles	85
* * *		
Musik und Normen (II) Die Stimmung von Musikinstrumenten (1) „Die innere Stimmung der Flöte“)	Robert W. Young	87
Objektive Qualitätsbestimmungen von Geigen	Ulrich Arns	92
Gestaltung von Musikräumen	Willi Furrer	117

Redaktion: Gravesano — Herausgeber: Hermann Scherchen

Mitarbeiter:

Dr. Alexander, BBC London
Prof. Cremer, Heinr.-Hertz-Inst. Berlin
Dr. Enkel, NWDR Köln
Dr. Meyer-Eppler, Bonn
Dr. Moles, RDF Paris
Dr. Nono, Venedig
Dr. Schlegel, Kopenhagen
P. Souvtchinsky, Paris
Dr. Steinecke, Darmstadt
Ing. Sundblad, Stockholm
Dr. Winkel, Techn. Universität Berlin

Jedes Heft ist begleitet von einer akustisch illustrierenden Schallplatte.

Jahresabonnement mit 4 Schallplatten: 18.00 DM

Steinway-Orchester-Konzertflügel im Sendesaal von Radio Luxembourg

STEINWAY-Konzertflügel werden von der Elite international bedeutender Pianisten und Schallplattenfirmen bevorzugt. Sie sind in den Konzertsälen der ganzen Welt zu finden und werden von mehr als dreihundert Rundfunkgesellschaften für den täglichen Sendedienst benutzt.
Jetzt hat auch das Akustische Experimentalstudio Gravesano Hermann Scherchen einen fabrikneuen Steinway-Orchester Konzertflügel, Modell „D-274", erworben.

Auskünfte erteilen bereitwilligst:

STEINWAY & SONS, Pianofortefabrikanten, Hamburg 36, Colonnaden 29

Druck: Graphische Kunstanstalt Heinrich Schiele, Regensburg
1956 by Ars Viva Verlag (Hermann Scherchen) Mainz.

Nachdruck strengstens verboten!

Zum Gedächtnis Friedrich Trautweins

Lange bevor der Begriff „elektronische Musik" den Musikkreisen vieler Länder vertraut wurde, war Professor Trautwein einer der richtig wachen Geister, die den Komponisten einen Vorgeschmack von den Möglichkeiten der Bereicherung der Klangpalette durch diese neue Mittel gaben. — Auch in seinem Alter - und trotz mangelnder Gesundheit - blieb Friedrich Trautwein nicht nur ein richtig wacher Geist, sondern auch eine aufgeschlossene und hilfreiche Persönlichkeit - kurz ein Mann, ohne den Hermann Scherchens kühnes Gravesaner Experiment nicht vollständig gewesen wäre. — Manche der jungen Musiker und Techniker, die aus verschiedenen Ländern von Hermann Scherchen nach Gravesano eingeladen wurden, sind reichere Persönlichkeiten geworden durch den Kontakt, den sie dort mit Professor Trautwein erlebt haben.

JACK BORNOFF

Generalsekretär des Internationalen Musikrats der UNESCO.

Das Tonmeisterproblem

von

ERMANNO BRINER-AIMO

I

Aufgabenkreis

1. Elektroakustik

1. Kenntnis der akustischen Felder (Verhalten von Nahfeld und Fernfeld usw.)
2. Raumakustik, geometrisch und wellentheoretisch (Hallradius)
3. Raumakustische Maßnahmen bei schlechten Bedingungen (besondere Effekte)
4. Richtcharakteristik der Musikinstrumente (Hauptabstrahlungsrichtung verschiedener Frequenzgebiete)
5. Besondere Eigenschaften der verschiedenen Instrumente (charakteristische Nebengeräusche und ihre Unterdrückung bei Aufnahmen)
6. Physikalische Begründung von Entfernungs- und Richtungseindrücken (Unabhängigkeit des „Tragens" des Tones von der Lautstärke; Grundlagen der Stereophonie, Pseudostereophonie)
7. Eigenschaften der verschiedenen Mikrophontypen (Richtungs- und Frequenzabhängigkeit der Empfindlichkeit; Eignung für Nah- oder Fernfeld; besondere Eignung für bestimmte Klangfarben; Zuverlässigkeit)
8. Beherrschung der elektroakustischen Übertragungskette vom Mikrophon bis zum Magnettongerät, besonders der Schalt- und Fehlermöglichkeiten am Regiepult (Vermeidung von Grundgeräusch und Verzerrungen)
9. Umgang mit Tonbandaufnahmen (Schneiden und Montage; Anweisungen an Tontechniker)
10. Pegelkontrolle (Regelung; bei automatischer Dynamikregelung richtige Einstellung der Apparatur)
11. Einsatz von Echoräumen oder -maschinen (Dosierung und Regelung von Abklingzeit und Frequenzgang des Nachhalls)
12. Eventuelle Verwendung von Frequenzfiltern (Spezialeffekte; Korrektur schlechter Aufnahmebedingungen)*)

*) Nicht erwähnt sind in dieser Aufstellung die verschiedenen Warte- und Kontrollarbeiten, die für das Gelingen einer Aufnahme vorausgesetzt werden müssen und für die normalerweise eigenes Personal verantwortlich ist. Der Tonmeister muß darüber orientiert sein.

2. Physiologie (Eigenschaften des Ohres)

1. Frequenz- und Intensitätsempfindlichkeit
2. Empfindlichkeit für Kurztöne; Ein- und Ausklingzeit des Ohres
3. Verdeckungseffekte
4. Distanz- und Richtungseindruck
5. Physiologische Lautheit- und Tonhöhenskala
6. Grunderregungs- und Nachhallwirkungen
7. Natur und Bedeutung der Einschwingvorgänge
8. Grenzen des Ohmschen Gesetzes (Bedeutung der Schwingungsphasen)

3. Musik

1. Praxis durch Berufschulstudium eines Instrumentes; Kammermusik
2. Musikgeschichte, Stilkenntnis
3. Formenlehre
4. Instrumentation, Instrumentationsgeschichte
5. Partiturkunde; Partiturlesen (womöglich Partiturspiel)
6. Gehörbildung (Rhythmus; Intervalle; Akkorde; Polyphonie)
7. Generalbaß, Harmonielehre, Kontrapunkt

4. Psychologie

1. Musikpsychologische Grundkenntnisse (Aussuchen geeigneter Wiederholungs- und Schnittstellen bei Tonaufnahmen)
2. Musikertypen (Sensibilität von Instrumentalisten, Sängern und Dirigenten); Abhängigkeit vom Instrument (physiologische Einflüsse und psychische Voraussetzungen)
3. Umgang mit dem Musiker am Mikrophon (Künstlerpersönlichkeit; entsprechende Regie der Aufnahme).

* * *

Damit eine Musikaufnahme einwandfrei gelingt, sollten diese zahlreichen Punkte erfüllt werden. Die Vielseitigkeit der Aufgabe verleitet dazu, die Verantwortung auf zwei Personen zu verteilen, je einem musikalisch und einem technisch versierten Fachmann, also einem Toningenieur und einem Musiker (das Wort „Tonmeister" möchte ich vorläufig vermeiden). Beide müßten zusammen vom Regiepult her (jeder gemäß seines Standpunktes) die Aufnahmen leiten.

Ein musikalisch und technisch einwandfreies Resultat kann jedoch nur im Idealfall eines völligen Einvernehmens des Aufnahmeteams erreicht werden. Die Praxis zeigt aber sehr oft zwei ungünstige Grenzfälle mit allen möglichen Zwischenstufen.

I.: Die beiden Aufnahmeleiter kennen sich jeder nur im eigenen Gebiet genügend aus, das heißt, es handelt sich um Nur-Techniker und Nur-Musiker. Wenn das akustische Bild am Regielautsprecher nicht der Vorstellung des Musikers entspricht, wird es ihm schwierig sein, dem Techniker genaue Vorschläge für die verbessernde Umdisposition zu erteilen. Dem Techniker seinerseits fehlt eine genügende Urteilsfähigkeit, um aus eigener Initiative Verbesserungen durchzuführen. Untersteht ihm (wie meistens üblich) auch die Dynamikregelung, so erfolgt diese nicht nach musikalischen und psychologischen Gesichtspunkten. Der Musiker wird dann geneigt sein, den Mißerfolg der „unumgänglichen" Unvollkommenheit der technischen Mittel zuzuschreiben.

II.: Der Techniker besitzt einige musikalische Kenntnisse (mindestens aus längerer Aufnahmepraxis) und der Musiker kennt sich etwas im Technischen aus (gleichfalls aus Erfahrung). In diesem Falle werden sehr leicht Kompetenzstreitigkeiten auftreten, da der Musiker von seinem Standpunkt aus dem Techniker Vorschriften in Bezug auf Mikrophonaufstellung, Dynamikregelung und Mischverhältnisse verschiedener Aufnahmekanäle wird erteilen wollen. Der Techniker läßt sich eine solche Einmischung in seine Berufskenntnisse nicht gefallen und die Auseinandersetzung wird um so schärfer, je mehr der Musiker (vielleicht zu unrecht) überzeugt ist, daß seine Anweisungen mit positivem Resultat ausgeführt werden könnten.

Beide Beispiele sind keine theoretischen Konstruktionen: sie können in Betrieben mit aufgeteilten Aufgabenkreisen immer wieder beobachtet werden. Verschärft wird der Gegensatz dadurch, daß die Kompetenzen beider Mitarbeiter in ihren Pflichtheften genauestens umschrieben (also eingeengt) sind. Nur ein aufrichtig persönliches gegenseitiges Verständnis schafft hier Abhilfe, aber leider hängt dieses von zufälligen Konstellationen ab und kann eigentlich nur bei beidseitiger Überschreitung der eigentlichen Kompetenzen eintreten. Selbst dieser seltene Idealfall umgeht nicht alle Schwierigkeiten. So erhält z. B. der Techniker für die Dynamikregelung die Anweisungen vom Musiker (ein unnötigerweise umständliches und naturgemäß ungenaues Verfahren); der die Partitur verfolgende Musiker aber könnte mit größerem Erfolg die wenigen Handgriffe am Regiepult an den dazu geeigneten Stellen selbst vornehmen (umso mehr als diese sich aus dem Partiturbild und aus musikpsychologischen Erwägungen ergeben, also aus Begriffen, die dem Techniker fremd sind). Aus den angedeuteten Gründen und weil doch in letzter Instanz auch über die Technik das Ohr entscheiden muß, ergibt sich, daß die Aufnahme umso besser gelingen wird, je mehr der Musiker nicht nur als Kontrollorgan funktioniert, sondern aktiv an der Mikrophonaufstellung und an der Arbeit am Regietisch teilnimmt. Ein Weg, der im Endziel dazu führt, beide Funktionen (die des Technikers und die des Musikers) in Personalunion zu verschmelzen. Diese Lösung setzt voraus,

daß der jetzt allein arbeitende Aufnahmeleiter die gesamten Kenntnisse der eingangs erfolgten Aufstellung in sich vereinigt, also ein *„Tonmeister"* im vollen Sinne ist.

Geht man die Gruppierung der Tonmeister-Aufgaben durch, so wird man leicht sehen, daß diese Unterteilung ziemlich willkürlich bleiben muß, da verschiedene Punkte der einen Gruppe in enger Wechselbeziehung mit solchen anderer Gruppen stehen (ein Umstand, der gerade für die Meinungs- und Kompetenzdivergenzen bei der Verteilung auf zwei Personen verantwortlich ist).

Im Gegensatz zum Toningenieur, der sich mit den Problemen und Geräten der Niederfrequenztechnik zu beschäftigen hat, müssen beim Tonmeister zusätzlich noch die Fähigkeiten gefordert werden, mit dem Künstler über Interpretationsfragen sprechen zu können, da er die technische und musikalische Verantwortung dafür zu tragen hat, daß die Absichten des Interpreten realisiert werden. Diese Aufgabe kann nur durch die Überprüfung der raumakustischen Verhältnisse in Bezug auf die zu machende Aufnahme gesehen, durch die damit verbundene Mikrophonwahl und -anordnung, sowie die Regelung des Klanggemisches am Regiepult. Der gesamte Komplex ist zu vielseitig, um, selbst in ein und demselben Saale eine Standardlösung zu ermöglichen.

II

Ausbildung

Wie muß nun der Bildungsgang eines solchen Tonmeisters aussehen? Zu fordern sind vor allem: hohe Allgemeinbildung (Abitur) und musikalisch-technische Doppelbegabung. Dem Ziel entsprechend, muß auch die Ausbildung eine doppelte sein: entweder hat einem abgeschlossenen Musikstudium eine Ausbildung in Niederfrequenztechnik zu folgen, oder ist umgekehrt dem Ingenieurstudium die Musikausbildung anzuschließen. Wie immer, wäre auch hier Halbbildung entschieden negativ zu bewerten, da eine solche nur unpersönlich phantasieloses, den wechselnden Bedingungen nicht genügend anpassungsfähiges Nachmachen erlaubt. Nur eine genügend tiefgreifende Selbstsicherheit und eine persönlichkeitsfördernde akademische Ausbildung in beiden Richtungen bietet die Grundlage für eine erfolgreiche Tonmeistertätigkeit. Dazu ist außerdem Kontinuität der musikalischen Arbeit auch während des technischen Studiums zu fordern.

In den seltensten Fällen wird man geneigt sein, die Zeit für ein derartiges Doppelstudium aufzuwenden. Es ist deswegen empfehlenswerter (wie an der *Nordwestdeutschen Musikakademie in Detmold)* beide Studien *nebeneinander* durchzuführen. Ein Vorteil ist darin zu erblicken, daß in solchem Falle sämtliche Fächer auf die besonderen Bedürfnisse des Ton-

meisters zugeschnitten werden können, und man schon während des Studiums ständig mit den beiden sich gegenseitig ergänzenden Aspekten des Tonmeisterberufes in engster Berührung bleibt. Selbstverständlich sind beide Richtungen auf gleich hohem Niveau zu halten. So muß beispielsweise die musikalisch-theoretische Ausbildung (Gruppe 3 und 4) umfassender sein als für Instrumentalisten. Das technische Studium seinerseits darf aber nicht nur als praktische Anleitung zum Umgang mit irgendwelchen vorhandenen Apparaturen verstanden werden, sondern es muß eine vollkommene, auch die Theorie genügend entwickelnde Ausbildung sichern. Nur auf diesem Weg (der in Detmold befolgt wird) erzielt man ein wirklich selbständiges technisches Arbeiten (wie es in besonderem Maße im Film und bei der Schallplattenherstellung verlangt wird).**)

Da die Tonmeisterprüfung einem akademischen Abschluß entsprechen muß, besteht die Möglichkeit, im Interesse einer Vertiefung und Erweiterung der Leistungsfähigkeit (mit entsprechenden beruflichen Entwicklungsmöglichkeiten) anschließend an einer Universität in Musikwissenschaft oder Elektroakustik zu promovieren.

Das nach diesem Schema durchgeführte Studium führt allerdings die Gefahr einer gewissen Selbstüberheblichkeit mit sich. Dieser Fehler wird dennoch selten ausgeprägter sein, als bei einer musikalisch technischen Halbbildung, welche die wirklichen Schwierigkeiten in Musikpraxis und Technik nicht aufzufinden vermag. Es gehört zur Aufgabe einer Tonmeisterschule, in diesem Sinne ungeeignete Elemente auszuscheiden und nur jene Studenten zum Abschluß zu führen, die trotz genügender Sicherheit über jene hilfsreiche Bescheidenheit verfügen, die eine ausgesprochene Zusammenarbeit mit dem Interpreten ermöglicht. Auch in dieser Sicht zeigt sich die Überlegenheit einer Ausbildungsstätte, die alle Fächer in sich vereinigt und dadurch einen engeren Kontakt unter den Studenten und somit eine einwandfreiere Beurteilung ihrer Anliegen für den Tonmeisterberuf sichert.

**) Die Schwierigkeit der Tonmeisterausbildung entspricht dem seltenen Zusammentreffen der erforderlichen Begabungen und der relativen Beschränktheit der Anstellungsmöglichkeiten.

Stereophonische Klangwiedergabe und filmtechnische Klangaufnahme

von

J. CORDONNIER

I.

Unser Gehörsmechanismus erlaubt es, eine Klangquelle zu „lokalisieren", d. h. ihr eine gewisse Entfernung beizulegen, sie in einer bestimmten Richtung zu suchen und ihr eine gewisse Höhenlage zuzuweisen.

Die Wahrnehmung der klanglichen *Entfernung* beruht zum Teil auf der gegebenen Klangintensität; außerdem auf dem Verhältnis von direktem Klang und reflektierten Tönen. Die *Richtungsempfindung* basiert auf dem binauralen Hören. Die verhältnismäßig sehr undeutliche *Konstatierung* der *Höhenlage* hat nur eingeschränkte Bedeutung und resultiert aus einer Kombination der beiden andern Eindrücke.

Die Wahrnehmung der klanglichen Entfernung, die am deutlichsten ist, entspricht den verschiedenen Eindrücken beider Ohren. Diese konstatieren für jeden nicht auf der Achsenlinie des Kopfes produzierten Ton:

1. Laufzeitdifferenzen,
2. Intensitätsunterschiede,
3. Klangfarbenverschiedenheiten (Figur 1).

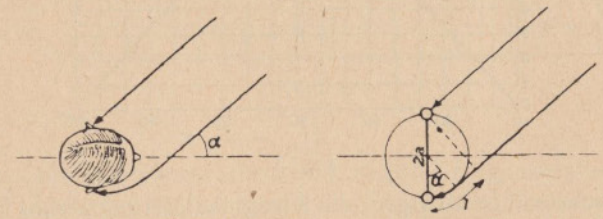


Fig. 1

Man glaubte lange Zeit, daß die Richtungsempfindlichkeit ausschließlich davon herrühre, daß ein Ohr vor dem anderen beeindruckt wird. Neuere Untersuchungen ergaben, daß der Intensitätsunterschied, den beide Ohren wahrnehmen, und vor allem dessen selektive Charakteristik, d. h. der perzipierte Klangfarbenunterschied, ebenfalls eine wesentliche Rolle spielen.

Beim Mechanismus des natürlichen Hörens wirken drei Elemente gleichzeitig in komplementärer Art so, daß jedes von ihnen einen Teil des Frequenzbandes beeinflußt. Die Dimension des Kopfes produziert von einer bestimmten Frequenz an (für die sie vernachläßigbar wird gegenüber der

Kleinheit der Welle) eine Art von Schattenwirkung. Der Klang muß diesen Schatten gewissermaßen umgehen, um beim zweiten Ohr anzukommen. Dieser Schatteneffekt ist umso ausgeprägter, je höher die Frequenz wird, mit anderen Worten, je kleiner die Wellenlänge ist.

Daraus folgt praktisch, daß oberhalb von 400 Hz zwischen beiden Ohren ein Intensitätsunterschied auftritt, welcher von dem Einfallswinkel des Klanges abhängt. Er wächst mit der Frequenz (wie die Kurven von Fig. 2 zeigen).

Der Intensitätsunterschied ist bei den *mittleren Frequenzen* (für die das Ohr ein Maximum an Sensibilität mitbringt) von entscheidender Bedeutung für die Klanglokalisierungsfähigkeit des Ohres. Bei höheren Frequenzen nimmt dessen Sensibilität gegenüber Intensitätsunterschieden ab; dafür wird bei ihnen (und bei noch höheren Frequenzen immer mehr) die Schattenwirkung des Kopfes immer bemerkbarer. Bei Frequenzen unterhalb von 400 Hz dagegen, bedeutet sie kein Hindernis mehr, so daß hier die Intensitätswirkung auf beiden Ohren praktisch gleich ist. Wenn dennoch auch für diese tiefen Frequenzen noch eine eingeschränkte Richtungswahrnehmung besteht, so rührt diese ausschließlich von den Laufzeitunterschieden beim Eintreffen des Klanges an beiden Ohren her. (Figur 3).

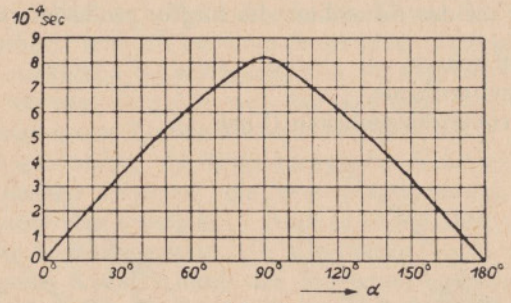


Fig. 2

Zusammenfassend ist zu sagen: die Klanglokalisierung beruht beim natürlichen Hören auf einer Kombination der wahrgenommenen Unterschiede von Laufzeit, Intensität und Klangfarbe. Die Laufzeitdifferenz kommt speziell bei den tiefen Frequenzen zur Wirkung, die der Intensität bei den mittleren und die der Klangfarbe bei den hohen.

Da ausgesendete Klänge immer komplexer Art sind und einen ziemlich ausgedehnten Teil des Frequenzbandes beanspruchen, genügt im allgemeinen eine der drei Differenzen von Zeit, Intensität und Klangfarbe, um eine Klangquelle zu lokalisieren; daraus wird verständlich, daß sehr von einander unterschiedliche Vorgänge, die je eine der drei Differenzen und nur diese allein zur Wirkung bringen, bei der Klangwiedergabe Lokalisierungseffekte hervorzurufen vermögen.

Eine Klangaufnahme, die sich indes nur eines der drei genannten Unterschiede bedient, gibt indeß auch nur eingeschränkte Wirkung: die Lokalisierungswinkel der verschiedenen Klangquellen scheinen beim Abhören gegenüber der Kopfachse geringer zu sein als beim direkten Klangempfang einer Klangaufnahme (Fig. 2).

Indessen ist es möglich, diese Winkeleinengung durch eine künstliche Unterstreichung der Differenzen, die dem speziellen Falle zu Grunde liegen, zu kompensieren. Mit anderen Worten: wenn eine Klangquelle unter einem Winkel α lokalisiert scheint, so ist dieser Eindruck zwar durch ein Zusammenwirken der drei Faktoren Zeit, Intensität und Klangfarbe, hervorgerufen, kann aber bei der Klangwiedergabe auch mittels nur eines dieser drei Unterschiede erzielt werden, wenn dieser so unterstrichen wird, daß das Fehlen der beiden anderen keine Rolle mehr spielt.

Auf diese Weise ist es möglich gewesen, einerseits die Winkelwahrnehmungen zu bestimmen, welche gegebenen Intensitätsdifferenzen allein entsprechen, und andererseits festzustellen, welche Zeitunterschiede fähig sind, um allein die gleichen Eindrücke der Klanglokalisierung zu vermitteln.

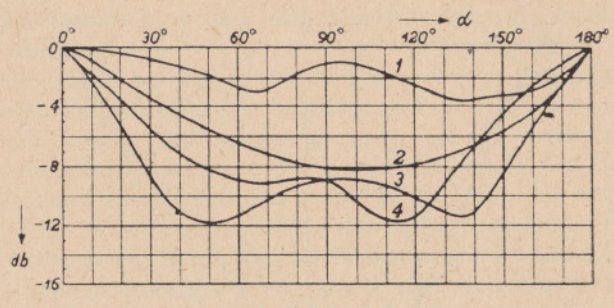


Fig. 3

II.

Die klassische Lichttonaufnahme mit *einem* Klangaussendungskanal reproduziert genau die Frequenz und die Klangfarbe. Sie vermittelt durch die mittels des Mikrofons hervorgerufene Beziehung von „direktem Klang" und „reflektierten Tönen" auch eine gewisse Distanzwahrnehmung von der Klangquelle. Dagegen gibt sie das Niveau nicht getreu wieder. Das Grundgeräusch und der elektro-akustische Kanal machen eine gewisse Begrenzung der auszusendenden Energie notwendig. Ferner wird durch die Reproduktion mittels einer punktartigen Quelle und eines Lautsprechers als einzigem Wiedergabekanals, jegliche Lokalisierungsmöglichkeit der übermittelten Töne verhindert und jene Empfindung eines Klangraumes zerstört, an welche das natürliche Hören uns gewöhnt hat.

Diese großen Fehler konnten durch die Einführung der Magnetband-Tonaufnahme und die Entwicklung der stereophonischen Klangaufnahmemetho-

den ausgeglichen werden, so daß schon seit mehreren Jahren Spezialisten für Klangwiedergabe daran gegangen sind, Gehörsempfindungen hervorzurufen, welche den *natürlichen* Eindrücken entsprechen.

III.

Um die Bedingungen des natürlichen Hörens getreu nachzubilden, verfiel man darauf, den Klang mittels eines künstlichen Kopfes (nach Art des menschlichen), einzufangen mittels zweier Mikrofone anstelle der „Ohren" (welche getrennt zwei Kopfhörer am Kopfe des Zuhörers im Wiedergabesaal beliefern). Der Hörer empfängt auf diese Weise genau die gleichen Eindrücke, als wenn er den Klang natürlich hören würde am Orte seiner Aufnahme durch den künstlichen Kopf. Da ein solcher Kopfhörergebrauch jedoch beschwerlich ist, hat man versucht statt dessen zwei Lautsprecher oder Lautsprechergruppen links und rechts vom Hörer aufzustellen (Figur 4).*) Man erhält so eine „relative Kopfstereophonie", was ausdrücken

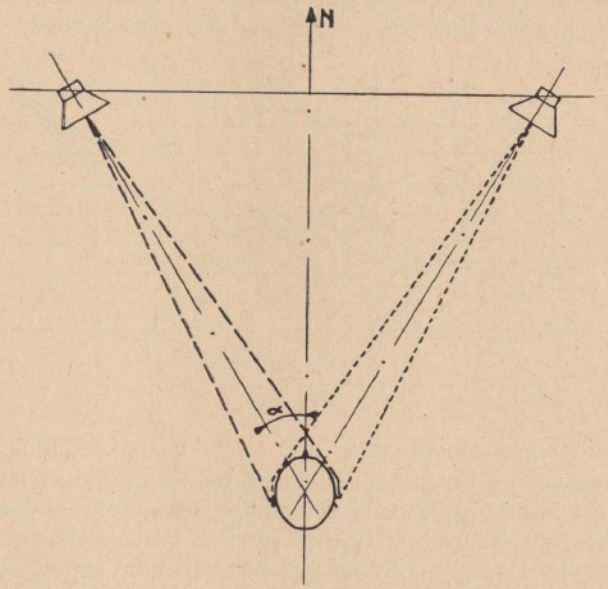


Fig. 4

soll, daß dabei nicht beabsichtigt wurde, den gesamten Zustand der Schallfeldgrößen im Raum, wiederzugeben, sondern nur die Ohrenwahrnehmungen zu übermitteln, welche der Zuhörer am Klangort selbst empfinden würde, und welche durch die Kopfhörer getreu reproduziert werden.

*) Seit 1939 hat K. de Boer eine Reihe interessanter Studien durchgeführt, über welche die „Philips-Revue" eingehende Daten veröffentlicht hat.

Lautsprecher (statt der Kopfhörer) würden diesen Eindruck aber nur annäherungsweise vermitteln, da dieser außerdem auch durch den Platz des Zuhörers und durch die Orientierung seines Kopfes bedingt ist.

In diesem Falle nehmen die Zuhörer wohl rechts den rechten und links den linken Lautsprecher wahr, hören aber zur gleichen Zeit — wenn auch abgeschwächt — den entgegengesetzten Lautsprecher immer mit. Praktisch hört jedes Ohr also den ihm zugedachten Klang zusammen mit einem Teil des für das andere Ohr bestimmten Klanges (wobei dessen Abschwächung von dem Winkel abhängt, in welchem der Lautsprecher den Kopf attackiert; mit anderen Worten: von Ort und Kopfhaltung der Zuhörer selbst).

Endlich sind die Intensitätsunterschiede, welche an den Ohren des Zuhörers auftreten, geringer, als jene welche zwischen den Mikrofonen des künstlichen Kopfes existieren, so daß der Zuhörer dadurch auch schwächere Winkeleindrücke empfängt. Z.B. wirkt eine unter 45° zugeleitete Klangquelle, als wenn sie nur unter 25° ankäme. D. h. daß die Klangperspektive zwar vermittelt wird, aber eingeengt ist. Außerdem vernichtet die Klangwiedergabe durch zwei Lautsprecher vollständig die Laufzeitdifferenzen für beide Zuhörerohren, welche beim Kopfhörergebrauch uneingeschränkt wahrnehmbar bleiben.

Und während die auf den Unterschieden selektiver Intensität beruhenden Lokalisierungseffekte für die mittleren und hohen Tonfrequenzen gut zur Geltung kommen, verschwinden sie völlig bei den tiefen. Dennoch ist die Lokalisierung meistenteils brauchbar, da die Mehrzahl der übermittelten Klänge ein relativ breites Frequenzband beanspruchen. Sie bleibt deshalb sogar noch dann wahrnehmbar, wenn die tiefen Frequenzen dominieren.

Dagegen bedeutet die Einengung der Klangperspektive ein ernsteres Problem, das allerdings dadurch zu korrigieren geht, daß man statt nur eines künstlichen Kopfes zwei verschiedene Mikrofone mit angepaßter Richtungsempfindlichkeit gebraucht, um den Klang aufzunehmen. Wählt man diese Mikrophone sorgfältig aus und plaziert man sie richtig gemäß ihrer Beziehung aufeinander, so ist tatsächlich möglich:

— entweder zwischen den beiden Mikrophonen und für jeden Einfallswinkel Intensitätsunterschiede zu schaffen, welche denen, die der „künstliche Kopf" aufnimmt, entsprechen;

— oder diese Intensitätsunterschiede noch zu verstärken, um schon bei der Klangaufnahme durch den elektrischen Kopf die durch die 2 Lautsprecher bei der Klangwiedergabe eintretende Einengung der Winkelfläche zu korrigieren**).

**) Das französische Patent des Verfassers No. 989 632 vom 19. Februar 1944 beschreibt eine Methode der stereophonischen Klangwiedergabe auf Grund dieses Prinzips. Ein Experiment der direkten stereophonischen Klangaussendung danach wurde dem Publikum durch die RDF und die Société Gaumont im Palais de Chaillot am 15. Februar 1944 vorgeführt.

Figur 5 gibt ein Beispiel einer Klanglokalisierung wie sie durch eine Zuhörergruppe wahrgenommen wurde bei Gebrauch eines aus zwei dynamischen Mikrophonen 618 A, Western, gebildeten elektrischen Kopfes, welcher die Intensitätsunterschiede verschärfte.

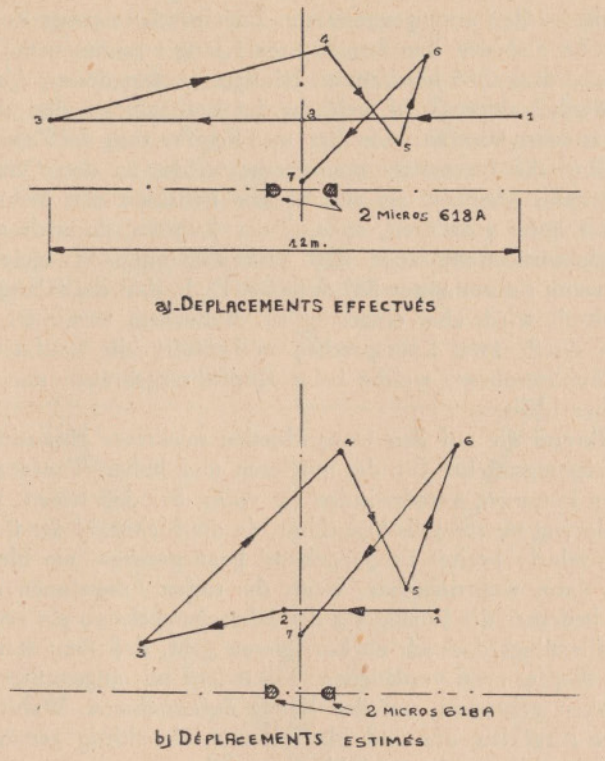


Fig. 5

Die Lokalisierungswahrnehmungen variieren selbstverständlich mit der Stellung des Zuhörers. Die Winkelwirkungen nehmen mit weiterer Entfernung von den Lautsprechern immer mehr ab, während der Einfluß der Gegenlautsprecher gleichzeitig wächst. Doch ist hier zu bemerken, daß eine ähnliche Veränderung auch für die Zuhörer eines Theaterstückes auftritt, bei dem die Winkelwirkungen entsprechend den Plätzen variieren.

Diese Einschränkung der Klangperspektive wird erst dadurch unangenehm, daß sie von einem parasitären Effekt begleitet ist. Während die nahe der Saalachse befindlichen Personen den Klang einzig nach dem Intensitätsverhältnis der beiden Lautsprecher lokalisieren, bemerken die links und rechts von der Achse Sitzenden nicht nur selektive Intensitätsunterschiede,

sondern auch Laufzeitdifferenzen. Sie nehmen zuerst die Klangaussendung des ihnen nahen Lautsprechers wahr und neigen so dazu, den Klang in der entsprechenden Richtung zu lokalisieren.***)

Der parasitäre Lokalisierungseffekt kann zuweilen zu dem aus den Intensitätsunterschieden hervorgehenden hinzutreten, oder sich von ihm ablösen und so die resultierende Klangperspektive verfälschen, gelingt es nicht den bei der Anwendung zweier Lautsprecher entstehenden Laufzeitenunterschied bei den Zuhörern anderweitig zu kompensieren.

Abschließend kann man sagen:

Die binaurale Wiedergabe eines durch einen künstlichen Kopf erfaßten Klanges vermittelt in den Kopfhörern Eindrücke, die denen, welche man beim natürlichen Hören bekommt, weitgehend entsprechen.

Werden die Kopfhörer durch Lautsprecher ersetzt, so verengert sich die Klangperspektive für die Zuhörer auf der Saalachse, während sie auf allen anderen Plätzen deformiert wird. Eine teilweise Aufhebung dieser parasitären Wirkungen kann durch den Gebrauch eines „elektrischen Kopfes" erreicht werden, der offensichtlich bessere Winkel ergibt, und indem man für die Lautsprecher Richtungscharakteristiken gebraucht, welche eine dem aus dem Laufzeitunterschied folgenden parasitären Effekt widersprechende Wirkung ergeben.

Wie dem auch sei: die Reproduktion wird durch jene Raumeindrücke charakterisiert, welche die Klangwiedergabe natürlicher und angenehmer als die der klassischen Klangaussendung — mittels nur eines Kanals — machen. Die wahrgenommenen Eindrücke verlieren jedoch an Qualität, sowie man sich einem der Lautsprecher zu sehr nähert, oder wenn das Saalvolumen zu groß wird, um noch von einer relativen Kopfstereophonie sprechen zu können.

IV.

Da die Winkelwahrnehmungen bei der „relativen Kopfstereophonie" als Funktion des Saalortes des Zuhörers und seiner Kopfstellung mit den eben beschriebenen Fehlern erfolgen, hat man versucht eine völlig andere Lösung zu finden, indem eine „relative Raumstereophonie" geschaffen wurde.

Ein solcher Versuch wurde zuerst von dem Amerikaner Harvey Fletcher durchgeführt, dem wir die wichtigsten Beiträge über Stereophonie verdanken. Im Jahre 1933 demonstrierte Fletcher in Washington seine Theorie mittels einer sehr beachtlichen direkten stereophonischen Übertragung von Philadelphia nach Washington. Fletcher hat seine Arbeiten durch zahlreiche Veröffentlichungen allgemein zugänglich gemacht, die später durch andere

***) Diese Laufzeitunterschiede sind weit größer als jene, welche beim natürlichen Hören zwischen den Ohren auftreten. Doch zeigt die Erfahrung, daß wir dazu neigen, den Klang in der Richtung zu lokalisieren, aus der er primär herzukommen scheint.

Forscher ergänzt worden sind und zwar im besonderen durch J. C. Steinberg und W. B. Snow.

* * *

Es seien die Prinzipien Fletchers und anderer amerikanischer Spezialisten kurz erörtert (wobei betont werden muß, daß ihre Experimente sich hauptsächlich mit dem Sonderfall der direkten Sendung oder der Wiedergabe der Klangaufnahme eines *Symphoniekonzertes* befaßt haben). Fletcher geht von den Hörbedingungen aus, wie sie sich in einem Konzertsaal beim natürlichen Hören ergeben und unternimmt dann, diese mittels eines Systems von Lautsprechern in einem anderen Saal nachzubilden, und zwar geometrisch und akustisch dem Auditorium entsprechend, in welchem das Konzert ausgeführt wurde.

Aus dem Prinzip geht hervor, daß in diesem Auditorium innerhalb des Podiumbereiches ein gewisser akustischer Zustand existiert, den man unter den gleichen Bedingungen im Wiedergabesaal nachschaffen sollte, damit die dort befindlichen Hörer fast dieselben Hörbedingungen erleben, welche im Auditorium selbst wirksam waren.

Wir müssen also nur in den Podiumsbereich des Aufnahmeraumes (Figur 6) eine Unmenge kleiner Mikrophone einführen, welche alle durch be-

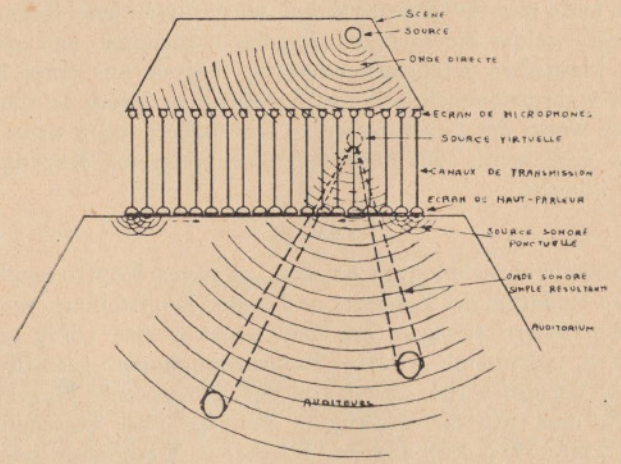


Fig. 6

sondere Übertragungskanäle mit einer Unmenge kleiner Lautsprecher verbunden sind, die sich an Orten auf dem Podium des Wiedergabesaales befinden, welche denen für die Mikrophone auf dem Podium des Aufnahmesaales entsprechen, um im Abhörraum einen den beim Konzert herrschenden analogen akustischen Zustand zu erhalten.

Übrigens bestätigt das Experiment, daß eine mit mehreren unterschiedlichen Wiedergabekanälen durchgeführte Sendung Eindrücke vermittelt, welche weitgehend denen entsprechen, die beim direkten Hören auftreten. Fünf Übertragungskanäle wären ausreichend, um vorzügliche Resultate zu erzielen; doch geben schon drei eine gute Lösung.

Allein — wie das W. B. Snow ingeniös in einem Artikel ausführt — in Wirklichkeit könnte nur eine Übertragung durch eine „Myriade von Kanälen" eine Klangwiedergabe hervorbringen, die vollkommen dem entspräche, was der Zuhörer beim direkten natürlichen Anhören der Klangquelle wahrnimmt.

Wenn wir uns tatsächlich einer sehr großen Anzahl von Lautsprechern bedienen, so wird bei der Wiedergabe die aufgefangene Klangwelle von einer virtuellen Quelle aus integral nachgebildet und wir empfangen in jedem der beiden Ohren einen einzigen Impuls direkten Klanges für jeden von der Klangquelle selbst herrührenden Impuls (Figur 6 gibt das Schema dieser Wiedergabebedingungen).

Wenn dagegen die Zahl der Übertragungskanäle beschränkt ist — z. B. auf nur 3 — so entsteht zwar auch eine Klangperspektive, aber der durch das Gehirn verwendete Gehörsmechanismus wird ein anderer (Figur 7).

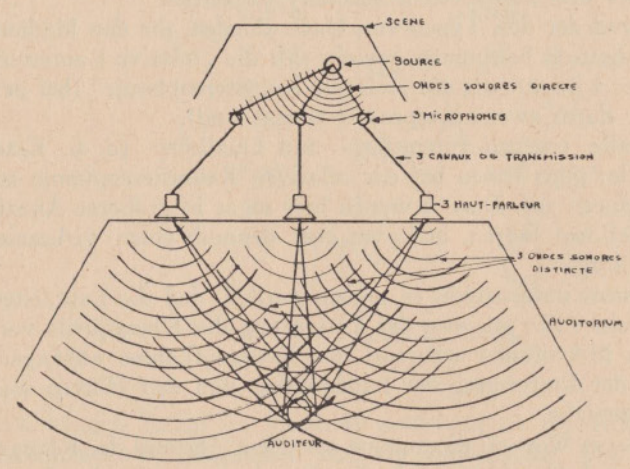


Fig. 7

Denn während der „unendliche Klangschirm" eine fortdauernde Klangquelle hervorrufen würde, haben wir jetzt drei Klangquellen (die Lautsprecher) vor uns, welche 3 Impulse schaffen, die unsere beiden Ohren in schneller Folge erreichen. Das Zeitintervall zwischen den Impulsen ist zu kurz, als daß das Ohr diese auseinanderhalten kann, so daß sie schließlich zu einer einzigen Wahrnehmung zusammenlaufen (was die Illusion einer

virtuellen Klangquelle ergibt, die sich irgendwo zwischen den Außenlautsprechern befindet).

Die Integration durch das Gehirn erlaubt also einen gewissen Wahrheitsanschein; dennoch muß gesagt werden, daß die Unterschiede zwischen den Laufzeiten der verschiedenen Impulse trotz ihrer relativen Geringheit ziemlich groß wirken im Verhältnis zu den Differenzen, welche in den Ohren beim natürlichen Hören auftreten (die nämlich unter 700 Mikrosekunden bleiben).

Die Klanglokalisierungseindrücke oder Richtungswahrnehmungen, welche bei einem solchen System auftreten, entspringen:

— *Intensitäts*unterschieden, welche daher kommen, daß die Klangquelle sich durch die Beziehung zu den Mikrofonen in variablen Distanzen befindet;

— *Klangfarben*unterschieden, welche ein Resultat davon sind, daß die Winkel, unter denen die Klangwelle die drei Mikrofone attackiert, verschieden voneinander sind, so daß die durch jedes von ihnen übertragene Qualität jeweils eine andere ist (natürlich unter der Bedingung, daß die gebrauchten Mikrofone eine mit der Frequenz variable Richtungswirkung besitzen),

— *Laufzeit*unterschieden, die daher kommen, daß die Entfernung der Klangquelle von den Mikrofonen verschieden ist und daß die Klangbeiträge der drei Lautsprecher successiv eintreffen.

Auf Grund der drei Typen von Unterschieden, die den Mechanismus der Klanglokalisation bestimmen, erweist sich die „relative Raumstereophonie" als getreuer wirkend, als die „relative Kopfstereophonie" (bei der die zwei Kopfhörer durch zwei Lautsprecher ersetzt sind).

Beide Fälle ergeben Intensitäts- und Qualitäts- (d. h. Klangfarben)-unterschiede; doch treten bei der relativen Raumstereophonie mehr Laufzeitunterschiede auf. Diese kommen hier sogar in größerer Anzahl vor, als beim natürlichen Hören, bedeuten aber dennoch einen wirksamen Lokalisierungsbeitrag.

W. B. Snow unterstreicht in seinem Artikel, daß die Laufzeiten der drei Klangimpulse nicht nur von der Entfernung der Klangquelle von den verschiedenen Mikrofonen während der Klangaufnahme abhängen, sondern auch von der Entfernung der Lautsprecher von den Hörern während der Klangwiedergabe.

Mit anderen Worten: die Summe aus „dem Abstand der Klangquelle vom Mikrofon und dem Abstand des Lautsprechers vom Zuhörer" bestimmt die Laufzeiten bei der Klangaussendung, d. h. die Folge, in der sie beim Hörer eintreffen.

Es ist deshalb noch zu untersuchen, in welchem Maße die durch ein solches System erhaltenen stereophonischen Eindrücke durch die verschiedenen Hörerorte und -stellungen selbst variiert werden.

Bisher nahmen wir an, daß sich der Hörer im Zentrum des Saales befindet, d. h. auf dessen Achse, in gleicher Entfernung von den Seitenlautsprechern. Wenn sich der Hörer von Platz 1 nach Platz 2 begibt (Figur 8), so bleibt die stereophonische Wirkung (oder besser die räumliche Klangwiedergabe) erhalten. Doch entstehen andere Lokalisierungseffekte: der Hörer verlegt die Schallquellen nicht mehr auf die gleichen virtuellen Stellen.

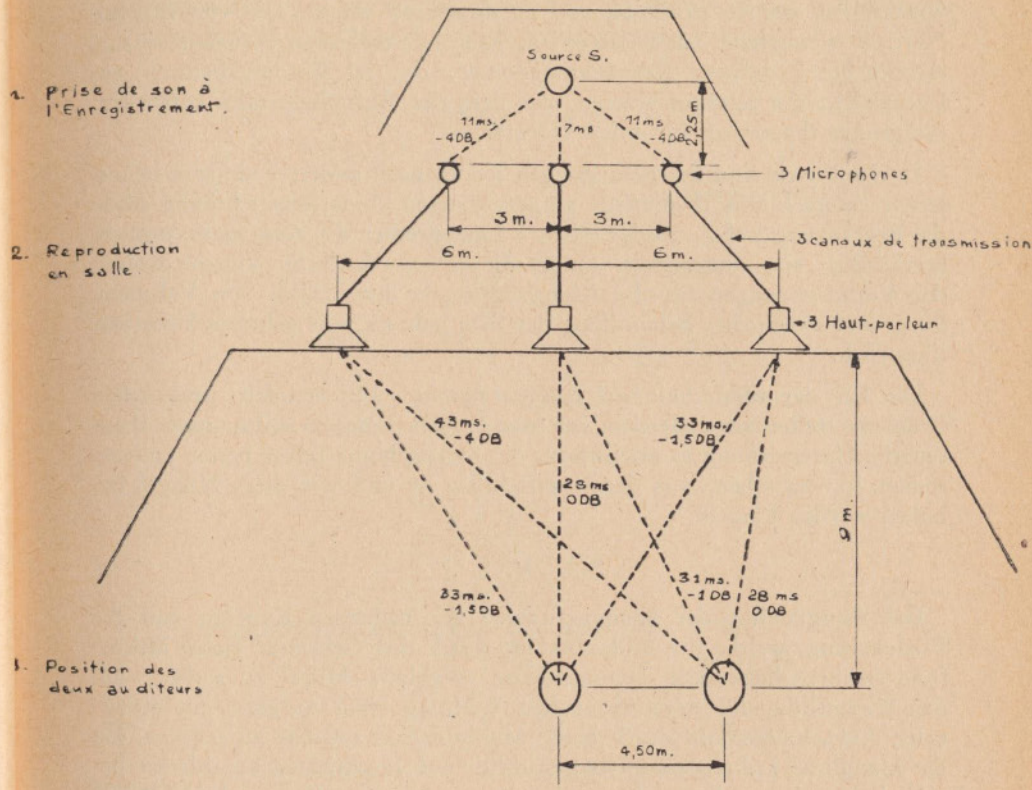


Fig. 8

Tatsächlich hängen Intensität, Qualität und Laufzeit der Klangleistungen der verschiedenen Lautsprecher von der Entfernung vom Hörer ab und von dem Winkel, unter denen dieser sie sieht. Bei Figur 8 hört der Beobachter den rechten Lautsprecher auf Platz 2 eher und stärker als vorher auf Platz 1; er verlegt deshalb die Lokalisation weiter nach rechts.

Übrigens zeigt die Erfahrung, daß Lokalisierungsunterschiede ziemlich beträchtlicher Art schon bei relativ leichten Platzverschiebungen zum Raumzentrum hin, auftreten. Die Intensitätsunterschiede sind dabei gering, so daß es scheint, als ob diese Lokalisierungsabweichungen hauptsächlich Resultate von Laufzeitdifferenzen sind.

Verschiedene Methoden können das Vorherrschen von Lokalisationseindrücken rechts oder links (in Abhängigkeit vom Saalplatz des Hörers) beschränken. Indessen kündigt sich hierin eine gewisse Schwäche der verschiedenen stereophonischen Systeme an, so daß für eine ideale Klangwiedergabe die Saalakustik und die Korrekturmöglichkeit bei der Lautsprecherwiedergabe, neu zu studieren und zu definieren wären. Die von Harvey Fletcher entworfene Raumklangwiedergabe mit mehreren Kanälen ist tatsächlich eine *„relative Raumstereophonie"*, die im Wiedergaberaum ein Gesamtfeld des Klanges erzeugt, das dem des Aufnahmesaales entspricht. Sie genügt theoretisch für jeden Hörort.

In der Praxis sind die Bedingungen jedoch noch andere, als jene in unserem Beispiel rein theoretisch aufgezeichneten. Einerseits schränkt schon die Begrenzung auf 2, 3 oder selbst 5 Lautsprecher die Ausgangshypothese beträchtlich ein; andererseits macht die außerordentliche Verschiedenheit der Voraussetzungen für die Klangwiedergabe hinsichtlich von Volumen, Form und akustischer Behandlung der Säle jede zu weit gehende Sicherheit illusorisch.

Die bei der filmtechnischen Klang*aufnahme* auftretenden praktischen Probleme stellen uns außerdem vor neue Fragen. Indessen sollte unsere theoretische Untersuchung es erleichtern, die Stereophonie selbst besser zu verstehen, um zu sehen, was daran anfechtbar ist und wie diese Mängel behoben werden können.

V.

Die Komplexität der Klangaufnahme mit mehreren Kanälen und die Erschwerung, welche die Bildaufnahme durch den Gebrauch vieler Mikrofone erfährt, haben die Toningenieure veranlaßt Mittel zu suchen, um das Wesentliche der stereophonischen Wirkung ohne Aufgabe der monoralen Aufnahmetechnik durch bloße Manipulation spürbar zu machen. Da die klangliche Lokalisierung hauptsächlich auf Intensitätsunterschieden beruht, haben sie zur Anwendung gebracht, was die Amerikaner „PAN POT" nennen, nämlich eine Potentiometer-Einrichtung, die dazu dient, den monaural aufgenommenen Ton bei der Wiedergabe zu „richten".

Der auf dem *Einspur*band aufgenommene Klang wird bei der 2- oder 3-spurigen Klangwiedergabe entsprechend der Einstellung des Potentiometers (die nach Winkelgraden erfolgt) auf zwei oder drei Spuren verschieden wiedergegeben.

Tatsächlich kann man mit einem Handgriff die drei Potentiometer A_1, A_2, A_3 Figur 10 bedienen, die auf dem einspurigen Ausgang A_0 parallelgeschaltet sind, und die Intensitätsverhältnisse der drei Sendekanäle-Kameras so regeln, daß sie einem gegebenen Lokalisierungswinkel entsprechen.

Eine direkte Klangaufnahme findet mit drei Mikrofonen und einer dreispurigen Aufnahmeapparatur statt (Figur 9); beide Klangquellen S_1 S_2 sollen entsprechend den Winkeleinstellungen α und β zur Kameraachse, wirken. Dann produzieren die entsprechend auf drei Spuren festgehaltenen und durch drei Lautsprecher HP_1, HP_2, HP_3 wiedergegebenen Klangwerte die Intensitäten i_1, i_2, i_3 (für S_1) und i'_1, i'_2, i'_3 (für S_2), deren Beziehungen zueinander durch die Winkel α und β charakterisiert sind.

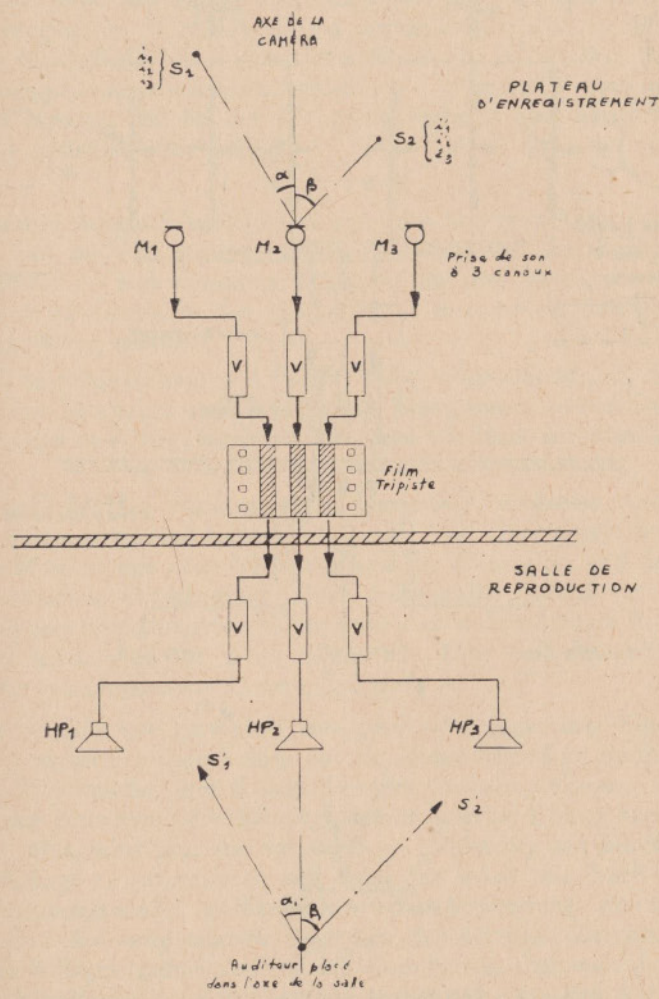


Fig. 9

Wird die Aufnahme von ebenfalls durch die Winkel α und β gekennzeichneten Klangfarben- und Laufzeitunterschieden begleitet, so lokalisiert der Hörer im Wiedergabesaal tatsächlich die virtuellen Quellen S_1 und S_2, den Winkeln α_1 und β_1 gemäß, welche den Winkeln der Klangaufnahme α und β weitgehend entsprechen.

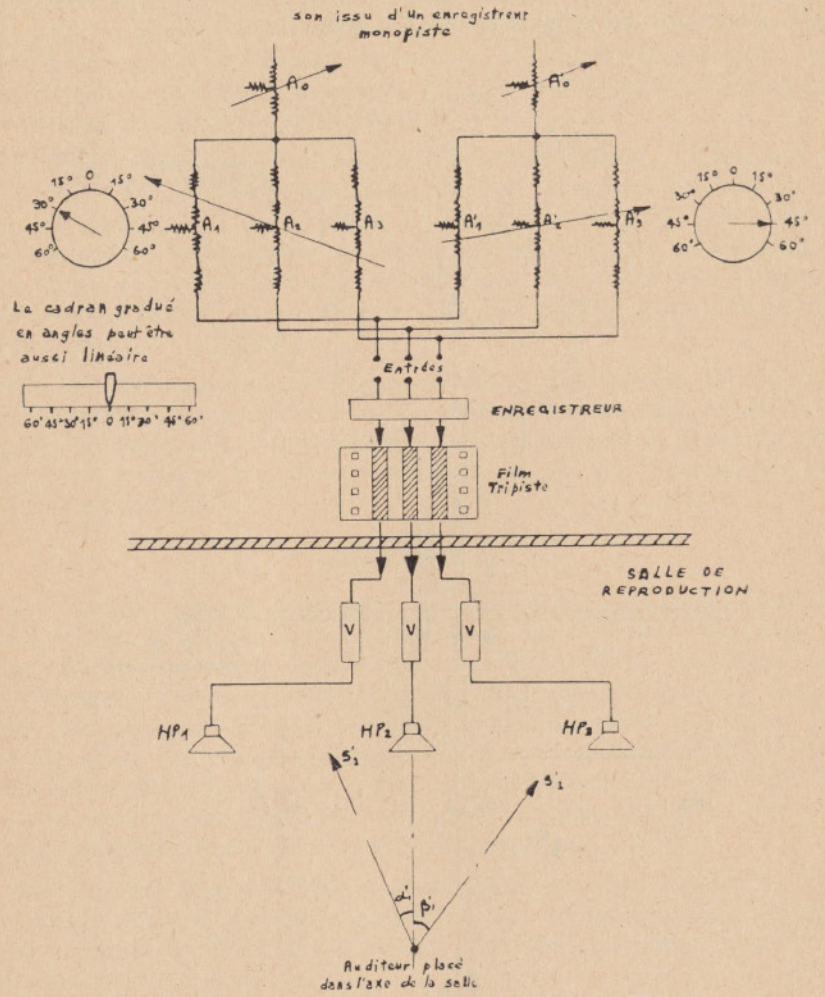


Fig. 10

Es ist nicht schwer das Mischglied der Figur 10 so einzustellen, daß in A_1, A_2 und A_3 die durch ihre Beziehung zu dem Ort S_1 bestimmten Intensitäten

i_1, i_2, i_3 auftreten; doch kann man nicht die Laufzeitunterschiede für ein und denselben Ton auf den drei Kanälen nachbilden.

Es folgt daraus, daß die Wiedergabe einer Klangaufnahme mit durch den Einfallswinkel α charakterisierten Intensitäten bei der Klangwiedergabe den Eindruck eines durch sein Verhältnis α eingeengten Winkels α_1 hervorbringen muß:

$$\alpha_1 < \alpha$$

Um diese durch das Fehlen von Laufzeiten- und Klangfarbenunterschieden hervorgerufene Winkelverengung auszugleichen, müssen die drei Kanäle des Mischgliedes die Intensitätswerte J_1, J_2 J_3 erhalten, welche die Abweichungscharakteristik eines größer als α seienden Winkels α_1 so zum Ausdruck bringen, daß bei der Klangwiedergabe α_1 zum natürlichen Winkel α hin zurückzustreben scheint.

$$\alpha_1 \longrightarrow \alpha$$

Ein solcher Ausgleich ist leicht zu erreichen und man kann den Wiedergabeton fast mühelos steuern, sobald — ungeachtet der Einstellung des „PAN POT" — eine konstante Kraft auf die drei Spuren einwirkt. Andrerseits ist es unmöglich das Mischglied so einzustellen, daß man gleichzeitig die Werte erhält:

J_1, J_2, J_3 (α entsprechend) und J'_1, J'_2, J'_3 (β entsprechend), da diese Wertgruppe, wie überhaupt jede komplexere Wertgruppe, automatisch bei der stereophonischen Klangaufnahme mit drei verschiedenen Kanälen erfaßt wird.

Man wird so den fundamentalen Unterschied zwischen einer authentischen stereophonischen Aufnahme, welche alle Töne erfaßt und im gegebenen Moment mit allen Ursprungswinkeln wiedergibt, und der pseudostereophonischen Umwandlung einer monauralen Aufnahme verstehen, durch die dem reproduzierten Klang zwar eine wahrnehmbare Richtung zugewiesen wird, aber aus dieser allein alle Töne herzukommen scheinen ungeachtet verschiedenster Ursprungsorte.

Es ist möglich ein Mischglied mit zwei oder sogar drei Eingängen zu benutzen, mehrere Einspurklänge auf ein Dreispurband zu mischen und so für die Wiedergabe drei Klangrichtungen hervorzubringen, aus denen die auf den gesteuerten drei Einspurbändern fixierten Klänge herzukommen scheinen. Man wird aber nie vermögen *so* gleichzeitig ein Ensemble komplexer Klänge zu produzieren und dabei für jeden von ihnen den originalen Ursprungswinkel nachzubilden. Die Anwendung dreier Einspurbänder und das entsprechende Einstellen der korrespondierenden Winkel den drei Klängen gemäß sind so delikater Natur, daß man daraus leicht auf die Schwierigkeit und Begrenzung der mittels des „Pan Pot" erzielten *Pseudo*stereophonie schließen kann.

VI.

Die Pariser Ingenieure der Metro Goldwin Mayer haben mit dem „PER SPEKTA-Klang" (welchen man auch „automatischen Pan Pot" nennen könnte) eine geistreiche Verbesserung der Pseudostereophonie ermöglicht, die bei der Klangwiedergabe mit Hilfe von Mischgliedern manuell erzielt wird.

Durch diese Methode werden bei einer monoralen Lichttonaufnahme automatisch die Intensitäten auf drei Kanäle verteilt, wodurch Lokalisierungseffekte entstehen.

Das Frequenzband der monauralen Lichttonaufnahme wurde unterhalb 70 Hz so eingeschränkt, daß dort drei Steuerungssignale von je 30, 35 und 40 Hz fixiert werden konnten, um mittels dieser verschiedenen Intensitäten bei der Klangwiedergabe die Modulierungspegel der drei Lautsprecherkanäle zu kontrollieren. Bei der Klangwiedergabe wird die den drei Lautsprechern zugeteilte, wirken sollende Modulation durch einen Discriminator von den Kontrollsignalen getrennt, welche beständig die Intensitäten dieser drei Lautsprecher entsprechend den für die Klangwiedergabe gewählten Werten regeln. Durch die Intensitätsunterschiede zwischen den drei Kanälen werden Lokalisationsempfindungen hervorgerufen ähnlich denen, welche ein Dreispurband ergibt, dessen Intensitätsunterschiede mit einem Mischglied (nach vorhergegangener Einspuraufnahme) geregelt werden.

Trotzdem der Perspekta-Klang hinsichtlich der stereophonischen Wirkung gleichen Einschränkungen unterliegt wie „Pan Pot", hat er charakteristische Vorzüge vor diesem:

1. kann die Lichttonaufnahme dabei optisch ebenso in einem über nur einen Wiedergabekanal verfügenden Saal abgelesen werden, als über eine Perspekta-Wiedergabeapparatur mit drei Lautsprecherkanälen;

2. ermöglichen die drei die Intensitätsverhältnisse bestimmenden und zugleich für die Pseudostereophonie unentbehrlichen Steuerfrequenzen die Regelung der Gesamtdynamik, d. h. eine gewisse Qualitätsverbesserung der Lichttonwiedergabe.

Indessen führt der Gebrauch der Steuerfrequenzen zu einer Beschneidung des Wiedergabebandes bei 70 Hz, was — als eine bedauernswerte Amputation — im Gegensatz steht zu der angestrebten Verbesserung der Wiedergabequalität. Statt dessen erhält man einen teilweise neuen Eindruck: den der Gesamtregelung der Klangwiedergabe, wenn auch auf Kosten der übertragenen Bandbreite.

VII.

Bei diesen theoretischen Betrachtungen hatten wir auch vom Orchester gesprochen, weil dort der Unterschied zwischen „wahrer Stereophonie" (die einen Klangraum vortäuscht, in dem jedes Instrument in jedem Augenblick den effektiven Platz einnimmt) und „Pseudostereophonie" (wo alles vor

sich geht, als wenn der eine Lautsprecher der einspurigen Klangwiedergabe hinter dem Wandschirm den Vorgängen der Handlung gemäß sich hin und her bewegt) am augenscheinlichsten ist.

Die Wiederherstellung der Klangperspektive ist — wie Cinerama beweist — nicht nur beim Orchester von Bedeutung. Cinerama vermittelt tatsächlich eine integrale Stereophonie, und zwar einmal weil der dem Panoramaschirm entsprechende Klangraum mittels 5 verschiedener Kanäle gebildet wird, wodurch selbstverständlich eine hervorragende Klangperspektive entsteht, dann aber auch weil 2 weitere Kanäle dazu dienen um Effektlautsprecher zu speisen, was den Gesamteindruck aufs glücklichste vervollkommnet.

Man kann heute sagen, daß die Cineramaingenieure mittels einer geschickten Dosierung erreicht haben, die Klänge auf den vom Panoramaschirm eingenommenen Raum nicht nur gleichzeitig zu fixieren und wandern zu lassen, sondern daß sie sie außerdem aus den Schirm hinaus, von hinten nach vorn und umgekehrt bewegen. Die dadurch bewirkte Vergrößerung der Klangperspektive vermittelt die außerordentliche Wirkung, daß damit der Zuschauer sich selbst in die Vorgänge miteinbezogen fühlt.

VIII.

Cinemascope will dasselbe wie Cinerama, indes nur mit 4 Magnetophon-Spuren. Der Bildschirm hat kleinere Dimensionen und der ihm entsprechen sollende Klangraum wird nur durch drei verschiedene Kanäle gebildet. Eine 4. Spur dient für Effekte.

Cinemascope ist durch seine heutigen Normen zu sehr behindert, da diese für die drei Hauptspuren keine entsprechende Breite zur Verfügung stellen, um eine ausreichende Dynamik zu erzielen; dies gilt noch mehr für seine Effektlautsprecherspur, welche fast wirkungslos ist.

Andererseits haben die Fox-Ingenieure (durch die Notwendigkeit schnell eine ausreichende Anzahl von Filmen produzieren zu müssen, trotzdem die eigentlichen Materialien zu ihrer vollen Realisierung noch fehlten) eine Stereophonie von hoher Qualität vorbereitet, so daß mit Recht angenommen werden darf, daß diese unsere Erwartungen erfüllen wird, sobald einige Jahre weiterer Bemühungen den stereophonischen Versuchen die nötige Ausreifung gegeben haben.

IX.

Da die unserem natürlichen Hören entsprechende „binaurale oder Kopf-Stereophonie" und die den Raum repräsentierende „integrale Stereophonie" im Gegensatz zueinander stehen, sind Versuche gemacht worden auf Grund von nur einer dieser Theorien einfachere resp. ökonomischere Systeme der Stereophonie zu entwickeln.

Perspekta-Klang stellt ein Resultat solcher Bemühungen dar; dabei sollte in Betracht gezogen werden: 1. daß die praktischen Bedingungen der Klangwiedergabe niemals jenen gleichen können, welche *Fletcher* aufgestellt hat, um seine Theorie zu erhärten; 2. daß mit Genauigkeit nur kurze Töne lokalisierbar sind (welche Ausgleichvorgänge hervorrufen), während ausgehaltene Klänge danach streben, sich durch den Saalhall im Raum zu fixieren, was wiederum schwierig macht, sie in ihm zu lokalisieren.

Man schloß daraus, daß die gleichzeitige Lokalisierung vieler Töne unter verschiedenen Winkeln keinen so kritischen Charakter habe, als man ursprünglich gedacht hatte und daß es deshalb genügen würde, eine angenäherte *Gesamt*lokalisation anzustreben. Das gab die Grundlage ab, um mittels eines vereinfachten Vorgehens zumindest ein brauchbares Einspursystem mit leicht verbesserter Dynamik zu entwickeln.

Dann wieder wurde es als unmöglich empfunden, mehr als zwei Klangspuren auf einen Film aufzusprechen, so daß man versuchte, ein Maximum aus der Zweispuraufnahme zu gewinnen.

1941 schlug der Deutsche Warncke eine Zwischenlösung vor, die darin bestand, die Wiedergabekanäle selbst auf 2 zu beschränken, den Klangraum jedoch mittels *vieler* Mikrofone einzufangen (und zwar analog zu der von Fletcher gebrauchten Anordnung, aber auf je einen rechten und linken Wiedergabekanal *parallel* geschaltet (Figur 11).

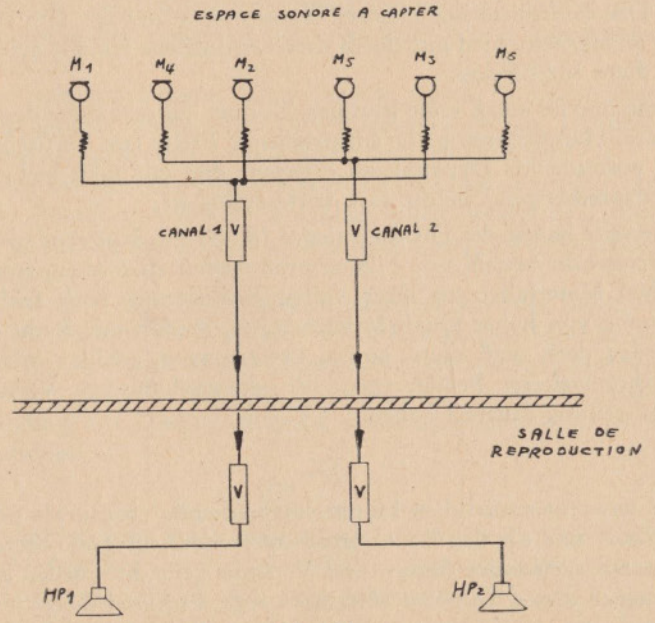


Fig. 11

In der USA wurde ein ähnlicher Versuch mittels 2½ Kanälen unternommen (das will sagen, zwar nur mit einem 2-Kanalsystem, aber mit drei Wiedergabelautsprechern, wobei der zentrale Lautsprecher als funktionierend in Brücke geschaltet von den anderen beiden gespeist wird).

In Frankreich haben J. W. Garret und José Bernhart bei der RDF interessante Stereophonieversuche mit 2 Wiedergabe-Kanälen durchgeführt.

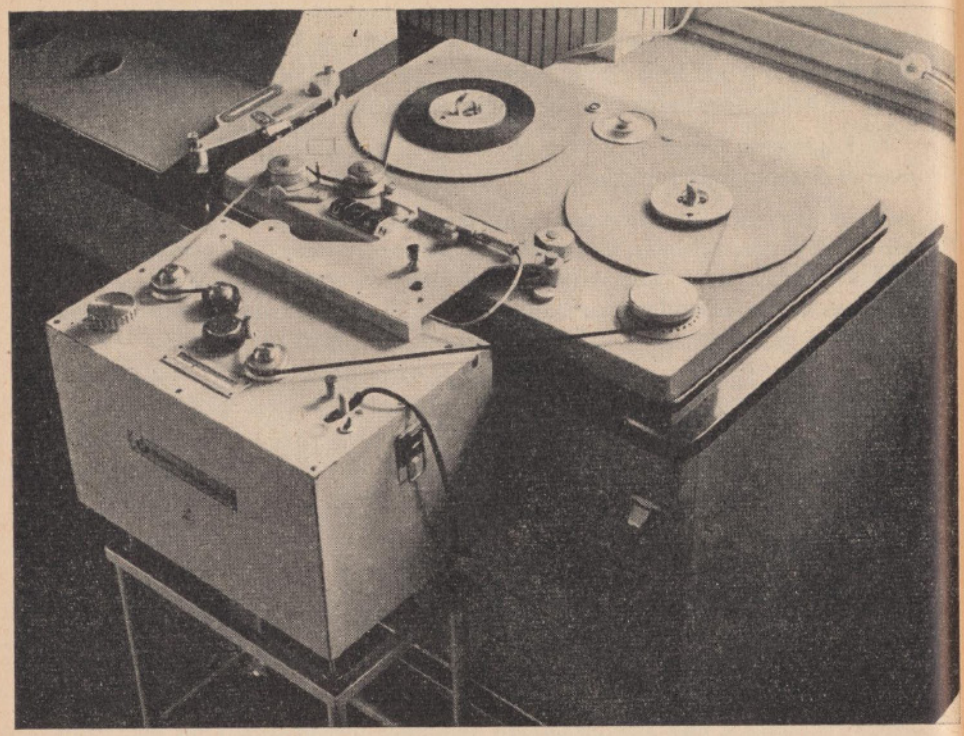
Im allgemeinen begnügte man sich dabei mit Pseudostereophonie, wobei mehr Gewicht auf die Verteilungsmöglichkeiten der Klangenergie auf 2 Wiedergabekanäle gelegt wurde, als auf die direkte Klangaufnahme mittels zweier voneinander unabhängiger Kanäle. So wurde eigentlich ganz allgemein „Pan Pot" mit mehreren Eingängen gemacht.

Inzwischen hat die sehr bemerkenswerte Klangqualität, die durch mehrere Aufnahmekanäle in historischen Schlössern gewonnen wurde, gezeigt, welche Vorteile die Mehrkanal-Klangaufnahme ermöglicht, und zwar selbst dann noch, wenn das Wesentliche der Wirkung nur einer Pseudostereophonie zu verdanken ist.

X.

Durch diese Darstellung der hauptsächlichsten Prinzipien, welche der Stereophonie zu Grunde liegen und der physischen Wirkung, die dabei angestrebt wird, wurde versucht, eine Klärung der Ideen vorzunehmen.

Um das Problem aber zu lösen, müßte man zuvor nochmals die Definitionen bereinigen und alle bisherigen Resultate überprüfen. Dies mag zum Teil schon überholt scheinen, da inzwischen mehr und mehr Normierungen für die Cinema-Industrie festgesetzt worden sind. Indessen bestehen noch immer weitgehende Verschiedenheiten in der Interpretation der Ideen und hinsichtlich der Arbeitsmethoden. Das ist wahrscheinlich die Ursache, warum man sich noch immer unbehaglich zu fühlen beginnt sowie definitiv und offiziel begonnen wird, die provisorisch schon in allgemeinen Gebrauch genommenen Charakteristiken einer internationalen Normalisierung unterziehen zu wollen.



AKUSTISCHER ZEITREGLER

für die Wiedergabe von Schallaufnahmen mit kontinuierlich veränderbarer Tonträgergeschwindigkeit ohne Änderung der Tonhöhe der Schallaufnahme. Regelbereich 50-200% der Aufnahmezeit. Für Sprache u. Musik.

Wurde April 1957 in Gravesano von Dr. Moles (RDF - Paris) zu erfolgreichen Experimenten eingesetzt.

TELEFONBAU UND NORMALZEIT · FRANKFURT AM MAIN

Mainzer Landstraße 134-146

Tonaufnahme mit mehreren Mikrophonen

Bericht über die Stipendiatatsperiode Dezember 1956

(Gravesano)

Folgende Möglichkeiten wurden untersucht:

A) *Mischung mehrerer getrennter Aufnahmekanäle auf einem Summenkanal* (einkanalige Konservierung):

1) zur Erhöhung des Volumens
2) zur Erfassung der einzelnen Abstrahlrichtungen von Klangerzeugern.

B) *Aufnahme und Konservierung auf getrennten Kanälen,*

wobei a) jedem Kanal eine bestimmte Klangfarbe (evtl. durch Geschmacksentzerrer) zugeordnet wird (die Konservierung erfolgt synchron, d. h. die Aufnahme erfolgt auf einem mehrspurigen Aufnahmegerät);

die mehrspurige Aufnahme mit n-Kanälen wird in einem zweiten Arbeitsgang einem Mischpult mit mehreren Kanälen zugeführt, wobei n-1-Kanäle über geeignete Verzögerungseinrichtungen geleitet werden, so daß im Endeffekt eine einkanalige Aufnahme eines Klangerzeugers entsteht, der durch Klangfarbenunterschiede vervielfacht erscheint;*)

b) sich die aufgenommenen Schallereignisse auf jedem einzelnen Kanal durch Betrag und Phase-Intensität und Laufzeit unterscheiden (Fall der Stereophonie).

* * *

Es sei hier kurz auf die notwendige Mindestzahl von Übertragungskanälen (vom Mikrophon bis zum Lautsprecher) zur Erhaltung des gewünschten Dimensionseindruckes eingegangen. Ist a die gewünschte Dimension, mit welcher das Schallereignis übertragen werden soll, so sind hierzu a + 1 Übertragungskanäle erforderlich. Dies bedeutet:

1) Übertragung der nullten Dimension: (a = 0)
die Übertragung erfolgt über einen Kanal.

*) Bei der Mischung der Einzelspuren eines mehrspurigen — in diesem Sinne synchronen — Bandes oder Filmes können beliebig viele sich voneinander unterscheidende Schallereignisse — aus einer einzigen Aufnahme gewonnen — zusammengebracht werden. Bei der Anwendung von Verzögerungseinrichtungen ist zu beachten, daß jeder Kanal mit verschiedenen Verzögerungszeiten versehen werden kann; es ist jedoch vor dem Einsatz derartiger Mittel daran zu denken, daß jede Schallaufnahme, die in der genannten Weise behandelt wird, an allen prägnanten Stellen den nachteiligen Eindruck einer Verwaschung erleidet.

Dieses Verfahren ist unter dem Namen einkanalige Aufnahme seit langem bekannt: die Perspektive wird lediglich durch Intensitätsänderung (Variation des Mikrophonabstandes oder Veränderung der Reglerstellung, ggf. unter Verwendung eines Entzerrers zur Einhaltung der Fletcher Munson-Kurven oder aber durch Anwendung eines physiologischen Reglers) hergestellt. Nach dieser Methode läßt sich eine Dimension vom Unendlichen bis max. zum Abstand Hörer zum Lautsprecher, in dieser Achse vortäuschen.

2) Übertragung der ersten Dimension: (a = 1)

die Übertragung erfolgt auf mindestens zwei Kanälen

(auf den Unterschied „kopfbezügliche Stereophonie" und „raumbezügliche Stereophonie" soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden).

Man kann dieses Verfahren der Übertragung der ersten Dimension noch variieren, indem man auf der Verbindungslinie der beiden Mikrophone zwischen diesen noch weitere aufstellt, die dann entsprechende Übertragungskanäle versorgen. Auf diese Weise kommt man zur dreikanaligen Stereophonie, die u. a. beim Cinema Scope-Verfahren angewendet wird. Eine Zwischenschaltung von drei Mikrophonen zwischen den Hauptmikrophonen führt dann zu der Methode, welche beim Cinerama Verwendung findet.

Auch bei dieser Methode ist eine Perspektive vom Unendlichen bis max. zum Abstand Zuhörer — Lautsprecher möglich.

Es verbleibt zu erwähnen, daß üblicherweise die Verbindungslinie der Mikrophone bzw. Lautsprecher eine Horizontale darstellt, da die dem menschlichen Ohr vermittelten bewegten Schalleindrücke im wesentlichen in dieser Achse liegen. Im Prinzip läßt sich diese Achse auch in die Vertikale verlegen.

3) Übertragung der zweiten Dimension: (a = 2)

Hierbei sind mindestens drei Schallempfänger erforderlich, welche in einer Ebene liegen, die auf der Verbindungslinie des Senders zum geometrischen Mittelpunkt der Empfänger senkrecht steht. Die Wiedergabe durch Lautsprecher muß dann in entsprechender Weise gewählt werden. Stellt man z. B. die Mikrophone in einem gleichseitigen Dreieck auf, dann ist theoretisch eine getreue Abbildung dieser Schallfläche möglich. In der Praxis wird man jedoch vier Übertragungskanäle wählen, wobei man die Mikrophone in einem Rechteck anordnet. Zur Verkleinerung der Einstelltoleranzen wird man dann im Schnittpunkt der Diagonalen ein weiteres fünftes Mikrophon anordnen, um die bei Aufnahme und Wiedergabe entstehenden Störerscheinungen zu verkleinern. Hierbei ist in erster Linie an die „Lochbildung" bei Passagen von Schallquellen gedacht, die parallel zu

den Mikrophonen erfolgen. Die Lochbildung wird durch die frequenzabhängigen Indicatrices der Empfänger und Sender hervorgerufen.

4) Übertragung der drei Dimensionen: (a = 3)

Unter 2) ist absichtlich gesagt worden, daß bei Verwendung von mehr als zwei Kanälen die weiteren Mikrophone resp. Lautsprecher zwischen den akustischen Haupt-Wandlern — nämlich links und rechts — angeordnet sind. Verlegt man zusätzliche Kanäle außerhalb dieser Kanäle und macht den Krümmungsradius der Verbindungslinie der Mikrophone endlich, so stehen die akustischen Wandler auf einer Kugelfläche, deren Mittelpunkt ein akustisches Zentrum darstellt. Es ist noch nachzuweisen, ob die Kugelfläche unter Aufrechterhaltung befriedigender Resultate in eine Zylinderfläche oder aber in die Flächen eines Quaders ausarten kann.**)

* * *

Allgemein ist zu sagen, daß bei stereophonischen Aufnahmen auf *die Reihenfolge der Mikrophone* zu achten ist. Der Zuhörer muß stets den gewohnten Eindruck der Verteilung vermittelt bekommen. Das bedeutet, daß *die Reihenfolge der stereophonen Kanäle* L — R (bei Zweikanal-Stereophonie) oder L — M — R (bei Dreikanal-Stereophonie) stets *von der Seite des Zuhörers aus* zu bestimmen ist.

**) Eine Abart dieser Methode ist beim CinemaScope-Verfahren angewendet worden. Die Effekt-Lautsprecher strahlen nicht nur gesonderte Schallereignisse wie Donner, Blitz und Regen etc. ab, sie werden vielmehr auch zur Verhallung von Haupt-Schallereignissen, die von den hinter der Bildwand angeordneten Lautsprechern abgestrahlt werden, hinzugezogen.

Optimale Lautsprecher-Anordnungen

von

WALTHER KÖNNECKE

Wenn auch eine wirklich naturgetreue Klangwiedergabe nur mittels eines stereofonischen Verfahrens zu erzielen sein wird, so bleibt es doch ein Ziel, schon beim bisherigen Einkanalverfahren einen möglichst hohen Grad qualitativer Vollkommenheit zu erreichen.

Da jede Umwandlung eines musikalischen Klangereignisses in einen *„analogen"* elektrischen Verlauf beträchtliche Schwierigkeiten bis nahezu zur Unlösbarkeit der Aufgabe mit sich bringt oder zumindest doch wichtiger Informationsinhalt verloren geht, soll hier nur daran erinnert werden, daß, selbst wenn ein Lautsprecher-Teilproblem gelöst werden sollte, andere sich mit umso größerer Hartnäckigkeit dagegen sträuben.

* * *

Die Aufgabe des Lautsprechers, einen zugeführten elektrischen Formverlauf in das akustische Analogon zu verwandeln, könnte mittels eines Strahlers nullter Ordnung gelöst werden. Aber selbst diese Möglichkeit ergibt wesentliche Abweichungen in der Struktur des reproduzierten Klangbildes gegenüber der des Originals, denn es wird der gesamte Raum mit demjenigen Klangbild erfüllt, wie es zufällig gerade am Ort des Mikrofons geherrscht hat.

Da eine Anordnung von Konuslautsprechern — Strahlern erster Ordnung — auf kugelförmiger Oberfläche ein relativ großes Gebilde ergäbe, ist der Weg einer Aufteilung der Frequenzbereiche auf mehrere Systeme naheliegend. Solche Anordnungen neigen jedoch dazu, im ganzen Raum das bereits erwähnte uniforme Klangbild zu erzeugen. Es sei deshalb auf den Sternstrahler hingewiesen, der weitgehend die Verhältnisse bei der Entstehung des Klanges der Musikinstrumente nachbildet. Der vom damaligen NWDR entwickelte Kugellautsprecher basierte auf der Annahme, daß die Musikinstrumente kugelförmig in den Raum abstrahlen. Indes sind die Abstrahlcharakteristiken der Instrumente (mit vereinzelten Ausnahmen) derart kompliziert, daß eine exakte Nachbildung mittels Lautsprechern praktisch nicht realisierbar ist und immer eine Vereinfachung der ursprünglichen Verhältnisse mit sich bringt. Auch der Sternstrahler stellt lediglich die bisher beste bekannte Annäherung der Reproduktion an den Originalklang dar. Er kompensiert recht zufriedenstellend jene Unzulänglichkeiten, die sich bereits bei der Aufnahme einstellen.

Als zweiter Nachteil bei der Anwendung von Konuslautsprechern ergibt sich zusätzlich der Einfluß der massebehafteten Membran, die ihrerseits

ein mechanisches Schwingsystem darstellt. Der Lautsprecher hat jedoch das ihm in elektrischer Form zugeführte Klanggeschehen in absolut sklavischer Weise exakt wiederzugeben. Es darf weder durch Resonanzen noch durch andere Eigenheiten verfälscht sein. Der Lautsprecher hat lediglich Mittler zu sein, ohne daß seine Eigenarten selbst irgendwie in Erscheinung treten dürfen.

Ausgehend von der üblichen Ausführungsform von Lautsprechern sollen im folgenden jene Effekte betrachtet werden, die ihn hindern, in exakter Weise zu reproduzieren, und es sollen Wege aufgezeigt werden, die diese Einflüsse unwirksam werden lassen. Das angestrebte Ziel ist, zu erreichen, daß man nicht mehr wahrnehmen kann, daß überhaupt ein Fremdkörper an der Klangwiedergabe beteiligt ist.

* * *

1) Aufteilung des übertragenen Frequenzbereiches auf mehrere Lautsprechersysteme:

Üblich sind — abgesehen von Breitbandausführungen mit Doppelmembran — Zweiweg-, Dreiweg- und Vierweg-Kombinationen, bei denen das gesamte übertragene Frequenzband mittels elektrischer Weichen in einzelne Teilbereiche aufgeteilt und zugehörigen Lautsprechersystemen zugeführt wird.

Optimale Lösung:

jedes Lautsprechersystem darf — von unten beginnend — nur soweit mit höheren Frequenzen belegt werden, wie keine Unterteilungen der Membran auftreten. Sobald Knotenlinien vorkommen, muß dieser Frequenzteil vom System ferngehalten und mittels elektrischer Weiche die Überlappung auf das nächste System vorgenommen werden.

Bei Aufteilung in vier Bereiche läßt sich eine absolut überragende Wiedergabe erzielen. Es empfiehlt sich, Zweiweg- (bi) Verstärker zu verwenden, die jeweils wieder je einen Zweiweg-Ausgang aufweisen. Als wesentliche Forderung bei der Aufteilung gilt, daß die Abmessungen eines Strahlersystems klein gegen die kleinste von ihm abgestrahlte Wellenlänge sein sollen.

Es sei hier noch auf einen Raumstrahler hingewiesen, der aus zwei mit den Membranen gegeneinander gerichteten Systemen besteht, an deren schmalem, rundum laufendem Spalt sich auf Grund von Beugungserscheinungen ein weitgehend kugelförmiges Schallfeld ausbildet und der speziell als Hochton-Strahler geeignet ist.

2) Korbgestaltung:

Die übliche konstruktive Ausführung des Membrankorbes eines Lautsprechersystems ergibt starre Flächen in nächster Membrannähe, so daß sich an ihnen schädliche Luftstauungen und Reflexionen ausbilden.

Optimale Lösung:

Formgebung der Rippen nach überschallgeschwindigkeitsmäßigen Gesichtspunkten: v-förmiges Profil mit der Spitze zur Membran hin. Da solche Ausführungen noch nicht im Handel sind, empfiehlt sich vorerst die Verwendung von Systemen mit schmalen Rippen, die evtl. noch in aerodynamischer Weise verkleidet werden.

Sehr wichtig ist jedoch das Ausfüllen des Raumes zwischen Membran und Korb mit Zellstoffwatte, wobei auch die Zuführungen zur Schwingspule sorgfältig zu umhüllen sind. Die Watte soll dabei locker liegen und darf keinesfalls gepreßt werden, damit die Membranbewegungen nicht gehemmt sind.

3) Gehäuseresonanzen:

Bei Lautsprechergehäusen treten zweierlei Arten von Resonanzerscheinungen auf, die unbedingt unterdrückt werden müssen: a) Resonanzen der Wände, und b) Hohlraumresonanzen. Das Auftreten dieser Erscheinungen ist oft ein Grund für unbefriedigende Wiedergabe.

Optimale Lösung:

zu a) absolut schalltotes Gehäuse, z. B. aus Stein gemauert, oder bei portablen Boxen aus doppelten Sperrholzwänden bestehend, deren Zwischenraum mit Sand ausgefüllt ist;

zu b) zur Vermeidung von Reflexionen an den Innenwänden sind diese mit Akustikplatten und Schaumstoffpolster zu belegen. Neben dieser Auskleidung bringt die „gestopfte" Box noch eine wesentliche Verbesserung. Hierbei wird zur Unterdrückung der Raumresonanzen der gesamte leere Innenraum der Box mit Schallschluckmittel ausgefüllt, z. B. mit Glas- oder Steinwolle, Watte oder Schaumstoff-Flocken.

4) Membranresonanzen:

Die Eigenschwingungen der Membran haben ebenfalls wesentlichen Anteil am Entstehen des Lautsprechertones. Sie verfälschen das Klangbild und machen sich besonders bei Sprungstellen unangenehm bemerkbar. Meßtechnisch sind sie durch einen Test mit Rechteckwellen (Gleichstrom) und mit Impulsen zu ermitteln. Sie sind a) durch eine elektrische Dämpfung der Schwingspule und b) durch eine mechanisch-aperiodische Dämpfung der Membran zu unterdrücken.

Optimale Lösung:

zu a) der dynamische Innenwiderstand des Verstärkers ist mittels kombinierter Gegen- und Mitkopplung auf den Wert des aperiodischen Grenzwiderstandes des Lautsprechersystems einzustellen. Dieser Grenzwiderstand ist jener Widerstandswert, mit dem die Schwingspule belastet sein muß, wenn sie ohne Überschwingen in kürzester Zeit die Endlage erreichen soll. Dieser Zustand wird als aperiodischer Grenzfall bezeichnet. Er liegt zwischen dem Schwingfall (offene Schwingspule) und dem Kriechfall (kurzgeschlossene Schwingspule). Da entsprechend Ziffer 1) keine Membranunterteilungen auftreten, hat die belastete Schwingspule innerhalb des bestrichenen Frequenzbereichs die gesamte Membran in der Gewalt. Falls durch Verluste im Ausgangsübertrager der Wert des Grenzwiderstandes bereits bei anodenseitig kurzgeschlossenem Übertrager erreicht sein sollte, müßte in diesem Fall der dynamische Innenwiderstand des Verstärkers sogar auf einen negativen Wert eingeregelt werden;

zu b) die mechanisch-aperiodische Dämpfung der Membran erfolgt durch eine Wattefüllung des Raumes zwischen Membran und Korb. Diese Füllung wurde bereits unter 2) erwähnt und erfüllt somit einen doppelten Zweck. Weiterhin soll sich das Wattepolster noch hinter dem Lautsprechersystem fortsetzen und dieses in Stärke von mindestens 1/2 m, besser aber 3/4 bis 1 m umgeben. Dies wurde auch schon unter 3b) erwähnt und erfüllt ebenfalls einen doppelten Zweck.

Mit solch einer „gestopften" Box läßt sich bei sorgfältigem Aufbau eine Reproduktion von wirklich überragender Qualität erzielen: brillante Wiedergabe mit absolut trockenen Bässen ohne jegliche Ausgleichsvorgänge. Es ist keinerlei Spur eines „Lautsprechertones" mehr festzustellen. Außerdem ist der Frequenzgang weitgehend eingeebnet.

* * *

Es wäre noch ein Wort über die Einstellung des dynamischen Innenwiderstandes des Verstärkers zur Schwingspulendämpfung zu sagen. Der Gesamtwert der Lautsprecherdämpfung setzt sich entsprechend 4a) und 4b) aus einem mechanischen und einem elektronischen Anteil zusammen. Dabei ist der mechanische Wert — im Gegensatz zum elektronischen — einer Berechnung kaum zugänglich. Er ist aber relativ leicht meßbar und wird sich in der Praxis aus der Erfahrung heraus ergeben. Es ist zweckmäßig, diesen mechanischen Anteil bei der Einstellung des elektronischen Anteils zu berücksichtigen, d. h. also, weil beide Anteile in der Ersatzschaltung parallel liegen kann der elektronische Anteil, bei dem die Reglung erfolgt, geringer bleiben als es ohne zusätzliche Wattedämpfung der Fall wäre.

Als Meßmethode bei der Einstellung eines optimalen Innenwiderstandes der Endstufe hat sich folgendes Verfahren bewährt:

Verstärker und Lautsprecher sind in betriebsfähigem Zustand. Der Eingang des Verstärkers ist kurzgeschlossen: die Schwingspule wird mit einem Oszillografen verbunden! Nun wird die Membran von außen mechanisch vorsichtig mit impulsförmigen Stößen erregt. Dabei soll der höchste Oberton des Impulses noch innerhalb des Arbeitsbereiches des Lautsprechers liegen. Der Innenwiderstand wird nun stetig soweit verkleinert, bis kein Überschwingen mehr auftritt und sich der kleinste Ausschlag einstellt. Wenn die richtige Einstellung erreicht ist, ist die Membran hart und starr und setzt jeder Auslenkung Widerstand entgegen. Diese Erscheinung verliert sich an den Frequenzgrenzen des Verstärkers.

Natürlich ist es ebenso möglich, den Verstärker mit Rechtecken oder Impulsen zu modulieren und Eingangs- und Ausgangsformen miteinander zu vergleichen. Jedoch muß man hierbei sicher sein, daß keine Verzerrung durch den Verstärker auftreten kann, was am besten bei Belastung mit einem Ohmschen Widerstand zu prüfen ist.

Es gibt natürlich außerdem noch eine ganze Reihe anderer Einzelheiten, die von Einfluß auf die Klangqualität einer Lautsprecheranordnung sind und die beim Bau einer solchen zu beachten sind, so z. B. das Volumen der Box oder die unsymmetrische Anordnung und Verwinkelung der einzelnen Systeme untereinander. Indessen haben vor allem die angegebenen Prinzipien entscheidenden Einfluß auf die originlagetreue Wiedergabe.

* * *

Der Einfluß des Wiedergaberaumes betrifft ein anderes Problem, das jedoch nur in Verbindung mit dem Aufnahmeraum behandelt werden könnte, da sich die Eigenschaften beider überlagern. Bei einer Klangreproduktion wird es im allgemeinen so sein, daß der Raum, in dem die Originaldarbietung stattfindet, nicht mit dem Wiedergaberaum identisch ist. Entweder versetzt man nun das Ohr des Zuhörers in den Aufführungsraum, oder den Klangkörper in den Wiedergaberaum. Im ersten Fall gehören die akustischen Eigenschaften des Aufnahmeraumes mit zum übertragenen Klangbild, während die Wiedergabe im reflektionsfreien Raum zu erfolgen hätte um dessen Eigenschaften auszuschließen. Im anderen extremen Fall ist lediglich das trockene Klangbild ohne Raumeinfluß zu übertragen, wobei dann im Wiedergaberaum sich dessen akustische Eigenschaften hinzufügen. Die Praxis wird jedoch meist eine Überlagerung beider Fälle ergeben. Es könnte deshalb als ein aufschlußreiches Experiment erwogen werden, bei einer Übertragung zwei Spuren zu verwenden, und zwar einen hochwertigen Kanal für die Darbietung ohne jeden Nachhall und eine zweite Spur ausschließlich mit optimalem Raumanteil ohne direkten Schall zur Möglichkeit einer Anpassung an den Wiedergaberaum mittels regelbarer Einblendung des Nachhalls.

Es würde vielleicht auch eine vertretbare Lösung sein, Wiedergaberäume mit veränderbaren Eigenschaften zu erstellen und als akustisch neutrale Räume auszubilden, die — in Analogie mit wechselbaren Wandverkleidungen — mit einer elektronischen Nachhallapparatur ausgestattet, die Einstellung optimaler Raumwerte für jede Art von Darbietungen erlauben.

Bei der Ausgestaltung einer Lautsprecheranordnung unter Berücksichtigung der hier abgegebenen Prinzipien ergibt sich eine Annäherung des reproduzierten Klangbildes an den Originalklang, die über alle Erwartung zufriedenstellend ist.

Indessen wird eine wirkliche High-Fidelity erst bei *stereofonischer* Klangübertragung möglich sein, wobei alle besprochenen Fragen ihre Gültigkeit behalten.

ALBISWERK AG ZÜRICH
ELEKTROAKUSTIK

Das von Professor

Ussaschefsky

Columbia-Universität, New York

MAI 1957

im Elektroakustischen Experimentalstudio

GRAVESANO

mit Erfolg für elektronische Musikstudien gebrauchte

ALBIS-TERZFILTER

kann zur Erzielung eines beliebigen Frequenzverlaufes innerhalb des zur Verfügung stehenden Bereiches benutzt werden. Es gelingt damit, besondere klanglich-kompositorische Effekte zu erzielen.

Albiswerk Zürich AG · Albisriederstraße 254

Neuerscheinung

Birkhäuser Verlag - Basel und Stuttgart

Raum- und Bauakustik für Architekten

von

WILLI FURRER

Professor an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich
Vorstand der Forschungs- und Versuchsanstalt PTT in Bern

(1956)

200 Seiten mit 160 Abbildungen - Ganzleinen Fr. 27.50 (DM 27.50)

INHALT: Akustische Grundbegriffe – Raumakustik – Bauakustik. Die modernen Bauweisen erlauben dem Architekten eine früher nicht gekannte Freiheit der Gestaltung. Damit treten aber neue Gefahren auf, und es sind nicht zuletzt akustische Probleme, die sich immer häufiger stellen. Das Buch behandelt diese Fragen, die sich in zwei große Komplexe gliedern: die Hörsamkeit von Räumen = Schulzimmer, Hörsäle, Turnhallen, Konzertsäle, Theater, Kirchen, Kinos. Auf der anderen Seite die Technik der Schallisolation und der Lärmbekämpfung = in der Wohnung, im Spital, im Hotel usw.

Zu beziehen durch jede Buchhandlung

Manipulation und Konzeption (III)

Einheitswissenschaft und Musik

von

HERMANN VAN SAN

Mein Gebrauch der Reihentechnik ist das Resultat einer zweifachen Synthese:

1. aus der MUSIKALISCHEN Reihentechnik und der elektronischen Klangproduktion,

2. aus der ELEKTRONISCHEN Reihentechnik und dem Empirico-Logicismus.

Musikalische Reihentechnik

Die Fragen nach Funktion und Wert der Dissonanz, sowie nach dem gegenseitigen Verhältnis von Harmonik und Kontrapunktik beherrschen den Beginn unseres Jahrhunderts.

Als Lösungen bieten sich an: Verneinung des Problems (1)
Polytonalität (2)
Chromatische Polarität (3)
Dodekaphonie (4)

Der Dodekaphonie liegen anfänglich zwei ästhetische Axiome zugrunde:
Dissonanz = O
Harmonik = Kontrapunktik (5)

Darüber beginnen sich ab 1923 zwei Systeme abzuzeichnen: das der EIN- und das der VIELreihigen Zwölftontechnik (6).

Die Einreihen-Dodekaphonie nimmt bald die Tendenz einer Erweiterung des Axioms der Isomorphie an: 1) WEBERN (Harmonik = Kontrapunktik = Klangfarbengestaltung = Melodieführung = Athematik); 2) *eine Gruppe junger Komponisten* beginnt ab 1950 das Prinzip der Isomorphie auf alle Komponenten des Klanges ebenso wie auf die Formstruktur der Musik zu übertragen, woraus 1952 die „Integrale Reihentechnik" hervorgeht (7).

Damit entstehen drei neue Probleme:

1) das der „Unausführbarkeit" (der Verstand fordert, daß wir uns klar und einfach ausdrücken; der mitzuteilende Gedanke kann aber so komplex sein, daß seine Darstellung „unausführbar" wird),

2) das der Reihenbildung aus Klangfarben (die aber mit den gebräuchlichen Musikinstrumenten unmöglich ist, da deren Timbre auf Obertönen beruht und somit unveränderlich ist),

3) das des Wesens der Reihe selbst (diese soll alle Bestandteile des Klanges und der musikalischen Struktur beherrschen; was ist sie also?)

Elektronische Darstellungsweise (8)

Alles klar gedachte ist realisierbar: aus Sinustönen können nach Belieben Klangfarben und Spektren gebildet werden.

Die elektronischen Musikmittel dienen ganz allgemein:

a) zur Frequenzgestaltung (Hz) — Primärgeneratoren (Sinustöne, weißes Rauschen, Impulse)
Sekundärgeneratoren (optische Sirene (9), durch Metallplatten hervorgerufene Produktvarianten der Primärgeneratoren (10),
Modulatoren (Multiplikatoren etc.; Wandler, Filter etc.)
Synchronische und Asynchronische Spektren etc.

b) zur Pegelgestaltung (dB) — Beschneidung, Kompression, Hüllkurven, Echo etc.

c) zur Zeitgestaltung (t) — Spreizung, Schrumpfung, Mosaiktechnik, Magnetophone, Synchronisatoren

d) zur Lautsprechergestaltung — Stereophonie, räumlich wandernde Projektion, Jonophonie

e) zur „schallgedämpften" Saalgestaltung (11).

Synthese

Die konsequente Ausweitung des Reihenprinzipes verlangt die Anwendung der elektronischen Gestaltungsmittel; da aber das Permutationsprinzip keine notwendigen Folgen kennt, gilt das „Umgekehrte" nicht (d. h. der konsequente Gebrauch der elektronischen Darstellungsmittel führt seinerseits nicht notwendig zur Reihentechnik). Wir ersetzen deshalb die zweite Form des Identitätsprinzipes durch dessen erste: die Gleichwertigkeit (pAq) A (qAp). Daraus folgt:

1) daß jede konsequente Isomorphie die konsequente Anwendung der elektronischen Gestaltungsmittel nach sich zieht. Das gilt selbst für das „Tonalitätsprinzip", für das die Anwendung der Isomorphie dazu führt, daß die Gesetze der Harmonik (z. B. das Verbot von Quintenparallelen etc.) sich auch auf die Harmonischen als Klangfarbenbestandteile und auf die Intensitätsverhältnisse erstrecken müssen;

2) ist festzustellen, daß gerade die akustischen Instrumente niemals die konsequente Herausarbeitung weder des Tonalitätsprinzips noch der Reihenmusik gestatten würden;

3) ergibt sich auch eine moralische (axiologische) Konsequenz, nämlich die, daß ein die elektronische Reihentechnik anwendender Komponist sich genötigt sehen könnte, ein *tonales* zeitgenössisches Musikwerk hoch einzuschätzen, das in sich konsequent ist, d. h. das die elektronischen Gestaltungsmittel ihren Prinzipien gemäß einsetzt. Darüber hinaus sagen wir, daß jede Musik, welche das Prinzip der Isomorphie nicht anwendet, inkonsequent und in sich zusammenhanglos ist, selbst wenn es sich dabei um instrumentale Reihenmusik handeln sollte.

Mit anderen Worten: die Form unserer Synthese ist die Identität. Bei Wahrung der inneren Konsequenz aber sind mehrere Synthesen möglich.

Empirico-Logicismus: logistische Analyse

1923 — im Geburtsjahre der Dodekaphonie — wurde im Wien Schönberg's, Berg's, Webern's und Hauer's unter der Führung von Prof. Moritz Schlick eine neue philosophische Schule begründet zur Propagierung und zum Aufbau einer wissenschaftlichen Weltvision (12).

Eine Einheitswissenschaft sollte entstehen, welche alle dem Menschen zugängliche Kenntnis der Realität umfaßt (und zwar ohne Aufspaltung in untereinander unverbundene Teildisziplinen). Als Methode dazu diente die von Boole 1847 erfundene logistische Analyse, welche von Peano, Frege, Whitehead, Russel, Hilbert u. a. inzwischen weiter entwickelt worden war. Einen Kulminationspunkt dieser neuen Philosophie hatte Rudolph Carnap's „Der logische Aufbau der Welt" bedeutet (Berlin, 1928).

Die logistische Analyse kennt zwei Aufgaben:

negativ — die Ausrottung aller metaphysischen und spekulativen „inhaltslosen" Begriffe

positiv — die genauere und vollständigere Definition aller wissenschaftlichen Begriffe.

Das führte zur Aufstellung (13):

wahrer Begriffe — (nachweislicher, zu Definitionen geeigneter) auf den Tatsachen unserer Sinne beruhend und diesen entsprechend

falscher Begriffe — (idem), aber den Tatsachen unserer Sinne widersprechend

sinnlos vager Begriffe — (d. h. empirisch nicht erweislicher).

Der „Empirico-Logicismus" bedeutet die Synthese aus dem rationalistischen COGITO und dem empirischen ESSE; das COGITO ist inzwischen zur physiologischen Wahrheit geworden (Cybernetik) und das PERCIPI hat einen radikal-konsequenten Sinn erhalten: einen „empirisierenden" (nicht empirischen). Die gegenwärtige Wissenschaft erdenkt das Weltall geometrisch neu, indem sie die Phänomene als Ableitungen aus Raumeigenschaften erfaßt (von Demokrit bis Einstein, Ettington, Wiener).

Semantik des Kunstbegriffes

Mit Leibnitz, Schillinger und den Cybernetikern behaupten wir, daß der Kunstbegriff eine klare Definition sei, so daß das Kunstwerk selbst, der Ausdruck und die ästhetische Erregung mit quantitativ-mathematischen Mitteln dargestellt werden können (denn da die Musik — wie die Kunst ganz allgemein — dem Kontinuum „Raum - Zeit" angehört, ist sie in geometrischen und algebraischen Formeln ausdrückbar).

Man kann drei morphologische Kunstzonen unterscheiden:

eine biologische (Schönheitssinn und reflektorischen Ursprung der Kunst)

eine ästhetische (die vom Menschen intuitiv nachgeschaffenen Formen seiner Umwelt und deren Varianten; diese Methode ist religiös, traditionell, emotional oder — wie im Falle der elektronischen Reihentechnik — rational)

eine „ästhetistische" (mittels wissenschaftlich mathematischer Methoden formt der Künstler ein vervollkommnetes, wissenschaftlich schönes Produkt in wissenschaftlicher Absicht; er konstruiert „pattern" (Muster), die — für den Schönheitssinn bestimmt — die üblichen Eigenschaften der Configuration (der mathematischen Komplexität) und der Periodizität (des Gehirnrhythmus) besitzen (14).

Daraus folgt ein sehr wichtiges Axiom: wo „pattern" vorkommen, ist Sinnbedeutung (15).

Mit den Cybernetikern behaupte ich, daß der „pattern der Erregung" (stimulus) dem „pattern der Reaktion" äquivalent ist (*verschiedene* Annäherungsgrade sind das Resultat von Erziehung und Unterricht etc.). D. h.: die physischen Bestandteile der Klangwelle entsprechen den durch sie hervorgerufenen physiologischen Reaktionen, und die Formstruktur der Musik den durch sie verursachten ästhetischen Reaktionen.*)

Die Musik gehört für mich zur Einheitswissenschaft (auf Basis der Logistik). Somit ersetzen wir „Kunst" (als Zusammenfassung vager Begriffe) durch eine klare und einheitliche Technologie.

Mathematisch elektronische Reihentechnik

Eine weitere Synthese schafft aus elektronischer Reihentechnik und mathematischer Logik die mathematisch elektronische Reihentechnik. So aufgefaßt ist die Reihentechnik ein axiomatisch komplexes System.

Es folgt daraus:

pragmatisch — daß ein mathematisch komponiertes Werk mittels eines Elektronengehirns realisiert werden kann, da jede mathematische Formel in schwach korrespondierende elektrische Ströme umbildbar ist. Der Ausdruck „mathematisch-elektronische Reihentechnik" geht also in den Begriffen der cybernetischen Reihengestaltung auf. Mathematische und elektro-akustische Methoden zusammen führen den Komponisten dann vielleicht vor das „Unrealisierbare", nämlich, daß eine einzige Komposition ein, ja zwei Arbeitsjahre beanspruchen wird, so daß die schon jetzt begrenzten elektronischen Kompositionsleistungen auf ±O hinabsinken werden.

Dazu tritt vielleicht bald eine neue „Unausführbarkeit", als Folge der Unfähigkeit der Magnettonband-Technik, die komplexen neuen Strukturen brauchbar zu realisieren.

sozial — da heute immer mehr Menschen Algebra etc. studieren, kann eine mathematische Grundlage der Musik vielleicht dazu dienen, den Abgrund zu vermindern, der Publikum und zeitgenössische Musik trennt. . . .

*) Zugunsten des Prinzips der Isomorphie sei hier bemerkt, daß dieser Dualismus eine Illusion bedeutet: die „Pattern der Schönheit" sind — wie alle Gedankenformen — geometrische Projektionen elektrochemischer Prozesse oder Gehirnprodukte.

Diese Synthese beruht wie die erste auf einer Identitätsrealisation: man kann ebenso eine elektronisch-mathematische Tonalität konzipieren wie man umgekehrt ev. Reihen- und elektronische Kompositionen, die nicht mathematisch sind, wird als „intuitiv" oder „inkonsequent" bezeichnen müssen. Reihentechnik, Tonalität (und auch Polarismus etc.) sind axiomatisch unabhängige Systeme, die weder einander entgegenzusetzen noch vorzuziehen sind, immer vorausgesetzt, daß sie konsequent angewendet werden.

Definition der Reihe

Die die Reihenkomposition behandelnde Literatur ist reich an intuitionistischen und vagen Definitionen der Reihe. Das Kennzeichen einer vagen Definition ist, daß sie widerspruchsvolle Interpretationen erlaubt, die alle beanspruchen, die „wahre" Definition zu sein. Kann ein vager Begriff nicht durch einen klar wissenschaftlich erhärtbaren ersetzt werden, so siegt die am wirksamsten propagandierte Begriffsauslegung. Eine vage Definition hat die Eigenschaft, daß weitere vage Begriffe aus ihr ableitbar sind. Akzeptiert man das Prinzip, daß die Reihe selbst der unauflösbare Kern der Reihe ist, dann muß man den Begriff der Reihe sehr klar definieren, um sich nicht in ein Labyrinth byzantinischer Diskussionen über „das Wesen der wirklichen Reihenmusik" zu verlieren. Arnold Schönberg definiert die Reihe folgendermaßen:

„12 Töne, welche nur je einer zu einem anderen in Beziehung stehen",

„kein Ton wird in der Reihe wiederholt",

„sie gebraucht alle 12 Töne der chromatischen Scala, jeden in einer anderen Anordnung".

Man kann diese Definition der Reihe für die integrale Reihenkomposition verwerten (4) mittels Einführung folgender Verallgemeinerungen:

„12" = n; „Ton" = variabler Ausdruck (d. h. dB, Hz etc.); „alle" = n; „chromatisch" = verfügbar (wir haben so den Sinn der Definition durch eine Interpretation gerettet). Zwei Begriffe sind jedoch in ihr enthalten, welche sie unwirksam machen: „andere Anordnung" und „in Beziehung stehen". Sollen wir „in Beziehung stehen" als ein Synonym von „anderen Anordnungen" auffassen, d. h. soll die Beziehung zwischen den Gliedern grade durch ihre Anordnung zum Ausdruck gelangen? Oder ist damit — wie bei der Tonalität — eine Beziehung gemeint, die nicht von der Anordnung abhängt? Worum also handelt es sich? Würde die Anordnung z. B. als Quintenzirkel definiert, so könnte man beinahe sagen, der Walzer aus dem „Rosenkavalier" sei dodekaphonisch komponiert . . . Welche Art von „Beziehungen" kommen eigentlich in Frage? In „Stil und Idee" sagt Schönberg, daß die Beziehungen nicht tonaler Art seien; Ernst Kreneck dagegen führt aus, daß sie modale Natur haben, und Paul Hindemith behauptet ihren polaren Charakter (16). Wir können also höchstens die negative Definition *weit* fassen und sagen, es handle sich weder um tonale noch um modale oder polare „Beziehungen". Will man indes positiv sein, so müßte man eine eindeutige Definition abgeben können (als was Schönberg die seine bezeichnet). Doch ist die Schönbergsche von allen intuitistischen noch immer die beste, da sie wenigstens wirklich positive Bestandteile besitzt.

Für Pierre Boulez (17) ist die Reihe keine Aufeinanderfolge, sondern eine Hierarchie. Definiere ich Hierarchie als Wertordnung von der Art, daß jedes Glied der Reihe dem nachfolgenden oder vorhergegangenen über- oder untergeordnet ist, so kann man daraus schließen, daß selbst Harmoniefolgen hierarchisch und Reihengebilde sein können, und — es machend wie Strawinsky das in seinen letzten Werken tut — meinen, daß man *so* Reihenkomposition ausübte . . .

Formal-Definition der Reihe

Die Reihe — wie ich sie gebrauche — ist nicht nur der prinzipielle Kern, sondern zugleich das Produkt der Reihenkomposition, da deren Prinzipien ja auf alle Teile der Komposition angewendet werden. Der Begriff der Reihe verschmilzt also mit der Problematik der Reihenmusik selbst.

A) Jede Reihe hat eine dreifache Struktur: $S = ((\Sigma(F\pm))\ E\ (\Sigma(D\pm)))$.

1) eine formale (durch Σ (F) symbolisiert und mittels der Interferenzial-Analyse berechenbar)

2) eine anordnende (durch Σ (D) symbolisiert und mittels Integral- und Differentialrechnung feststellbar)

3) eine axiomatische (durch $\Sigma(F+, -, \pm$ oder $\mp)$; $\Sigma(F+, -, \pm, \mp)$. symbolisiert und mittels der kombinatorischen und axiomatischen Analyse untersuchbar).

Die Beziehung der Reihenwerte untereinander ist durch das Prinzip des ausgeschlossenen Dritten bestimmt: $\{(+)$ oder $[(-; E \pm; E \mp) A (-)]\}$

Wir gebrauchen hier indes nur: $\Sigma(F+)$, $\Sigma(D+)$.

B) Die Reihe $\Sigma(F+)$ hat eine doppelte Funktion:

einmal fixiert sie die Ordnung der Reihenglieder,
dann aber bestimmt sie ihre geometrische Beziehung zueinander (jene zwi-

schen den Reihengliedern auf- und abwärts gehende Richtung der Intervalle, welche — nach dem Identitätsprinzip — genau inne gehalten werden muß).

Die Interferenzial-Analyse bedeutet die Auflösung der Reihe in Faktoren (was besagen würde, daß die Reihe *kein* unauflöslicher Kern ist). Diese Faktoren sind indes weder die Glieder noch die Intervalle der Reihe, sondern stellen nur ihre geometrische Beziehung dar.

Jede Reihe hat eine Formel (eine interferenziale Definition).

Von jeder Grundreihe können die Permutationsvarianten des ersten bis sechsten Grades und alle Kombinationen daraus berechnet werden: 1) = Quadratische Rotationen; 2) = Permutative Rotationen von 1); 3) = ihre Transpositionen etc.

Wir können positive Definitionen angeben für „transponieren", „umkehren" etc. Ich begnüge mich damit, hier die vier Definitionen der vier Quadratischen Rotationen der Serie: $\Sigma\,(F+)$ aufzuzeigen:

$$\Sigma\,(F+)\left\{\left[\frac{a}{2}\,(a) \pm \frac{a}{2}\,(a+1)\right]+\left(\frac{a}{2}\right)\right\} \quad \text{(Def. 1).}$$

$$\Sigma\,(F+)\left\{\left(\frac{a}{2}\right)+\left[\frac{a}{2}\,(2a+1) \pm \frac{a-2}{2}\,(2a)\right]+(2a)\right\} \quad \text{(Def. 2).}$$

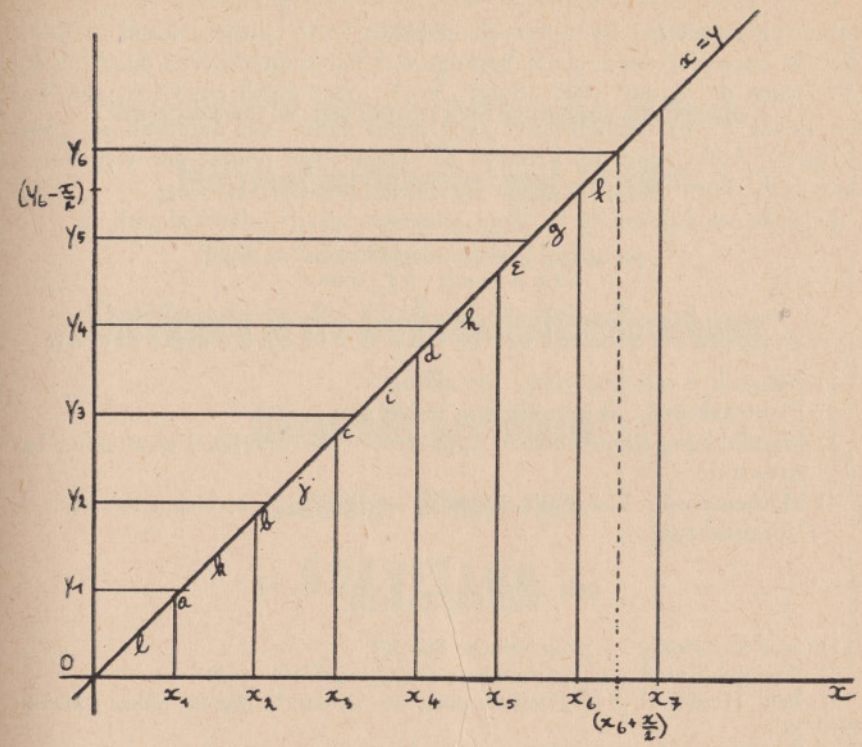
$$\Sigma\,(F+)\left\{(a)+\left[\frac{a}{2}\,(a-1) \pm \frac{a-2}{2}\,(a)\right]+\left(\frac{a}{2}\right)\right\} \quad \text{(Def. 3).}$$

$$\Sigma\,(F+)\left\{\left(\frac{2a}{2}\right)+\left[\frac{a}{2}\,(2a+1) \pm \frac{a-2}{2}\,(2a)\right]+\left(\frac{3a}{2}\right)\right\} \quad \text{(Def. 4).}$$

Definition 1) gibt das Original der Reihe; Definition 2) den Krebs des Originals; Definition 3) die Umkehrung von 1), und Definition 4) die Umkehrung von 2) . " — " bedeutet Interferenz, " : " bedeutet interferenziale Division. Neben der interferenziellen Division existiert aber auch die interferenzielle Multiplikation etc.
[Def. 5 $\Sigma\,(F+)$]:

Die Formalstruktur der Reihen des Typs $\Sigma\,(F+)$ ist eine endliche algebraische Summe**) von Gliedern und Intervallen zwischen den Gliedern, deren Anzahl bestimmt wird durch die Größe ihrer Faktoren, und deren Aufeinanderfolge und geometrische Beziehungen durch eine interferenzielle Operation festgelegt sind.

**) „Endliche", weil wir axiomatisch festsetzen, daß jedes Musikwerk Anfang und Ende hat; doch ist auch eine Reihe des Typs $\overset{\infty}{\Sigma}\,(F+)$ denkbar, deren Komposition durch ein Elektronengehirn ausführbar wäre.



Analyse interférentielle de $\Sigma\,(F+)$.

0. 1. $\Sigma\,(D+) = a < b < \ldots < l.$ ex: $1 < 2 < \ldots < 12.$
. 2. $\Sigma\,(F+) = 1 + a + \ldots + f.$ ex: $12 + 1 + \ldots + 6.$

1. 1. 1. $(x_n, x_{n-1}) = (x_{n-1}, x_{n-2}) = \ldots = x.$
. 2. $(y_n, y_{n-1}) = (y_{n-1}, y_{n-2}) = \ldots = x + 1.$

2. 0. 1. $f\left\{\left[(y_6), (x_6+\frac{x}{2})\right], \left[(x_6), (y_6-\frac{x}{2})\right]\right\}$; g { [$y_5$, etc.
. 2. $\Sigma\,(F+)\,(l + a + \ldots + f) = \Sigma\,(F+)\,(l, f).$

2. 1. $\Sigma\,(F+)\,(l, f) = (x) + [(x+1) - (x)] + [2(x) - (x+1)] + [2(x+1) - 2(x)] + [3(x) - 2(x+1)] + [3(x+1) - 3(x)] + [4(x) - 3(x+1)] + [4(x+1) - 4(x)] + [5(x) - 4(x+1)] + [5(x+1) - 5(x)] + [6(x) - 5(x+1)] + [6(x+1) - 6(x)].$
. 2. $\Sigma\,(F+)\,(l, f) = \Sigma\,(F+)\left\{\left[\frac{x}{2}\,(x) \pm \frac{x}{2}\,(x+1)\right] + \left(\frac{x}{2}\right)\right\}$ (Def. 1).

Es sei abschließend noch einer wichtigen Anwendung des Prinzips der Isomorphie gedacht: das Intervall zwischen zwei Gliedern kann realisiert werden entweder durch einen Sprung, was wir symbolisieren durch (a, b), (wir sagen dann, das Intervall sei „leer"); oder durch ein Glissando, was wir durch $\overline{(a, b)}$ symbolisieren (wir sagen dann, das Intervall sei „ausgefüllt"). Auf Grund des Prinzips der Isomorphie nimmt der Weg von a nach b die Form an: $\Sigma(F+)$

Jeder seiner Abschnitte ist dann seinerseits grad- oder krummlinig.

Studienprogramm
für die
mathematisch-elektronische Reihenkomposition

1) Ästhetik — als historische Einleitung
2) Elektroakustik — anstelle von Solfeggio
3) Handhabung elektronischer Apparaturen — statt Spiel akustischer Instrumente
4) Mathematische Kompositionsweise — mit Algebra, Geometrie etc. als Voraussetzung.

BIBLIOGRAPHIE

1) Igor Strawinsky — „Musikalische Poetik".
2) Darius Milhaud — „Polytonalität und Atonalität" (1923).
3) Paul Hindemith — „Unterweisung im Tonsatz" (Schott Söhne / Mainz: 1940/39).
4) René Leibowitz — „Einführung in die Zwöltonmusik" (l'Arche / Paris).
5) Arnold Schönberg — „Stil und Idee" (Williams & Norgate / London: 1951).
6) Josef Matthias Hauer — „Vom Melos zur Pauke" (Universal-Edition / 1925). „Zwölftontechnik" (Universal-Edition / 1925).
7) Herman Van San — „De niuwe Muzik" (Tijd ne Mens 1950, Sept./Okt.).
8) Werner Meyer-Eppler — „Technische Hausmitteilungen" (NWDR / 1954). Herbert Eimert — „Technische Hausmitteilungen" (NWDR / 1954).
9) J. F. Schuten — „Synthetisch gluind" (Philips Techn. / 1939). „Toonhoogtegewaarwordeing" (Philips Techn. / 1940).
10) Dr. Geluk — „Nachhallstudien" (Gravesaner Blätter, V, 1956).
11) Werner Meyer-Eppler — „Elektrische Instrumente" (Gravesano / Ars Viva Verlag 1955).
12) Wissenschaftliche Weltauffassung: „Der Wiener Kreis" (Verein Ernst Mach).
13) A. N. Whitehead and D. Russell — „Principia Mathematica" (Cambridge / 1924).
14) E. C. Berkeley — „Giant Brains" (Wiley N. Y. 1950).
15) W. Grey Walter — „The living brain" (Duckworth / London).
16) Paul Hindemith (siehe Nr. 3).
17) Pierre Boulez — „Auprès et au loin" (Cahiers Renaud-Barrault / Nr. III, 1954).

Das ursprünglich für April (Ostern) 1957 vorgesehene KOLLOQUIUM

„Informationstheorie und Musik"

findet im Zusammenhang mit zwei Seminaren:

„Einführung in die Kommunikationsforschung"

und

„Ultraschall und Musik"

September/Oktober 1957

in **GRAVESANO** statt

Die Tagung der

DEUTSCHEN KINOTECHNISCHEN GESELLSCHAFT

Das Klangelement in Tonfilm und Television

wurde aus administrativen Gründen auf den

10. März 1958

verlegt und wird ebenfalls im Elektroakustischen Experimentalstudio

GRAVESANO

abgehalten.

Die Bedeutung des Ultraschalls für musikalische Akustik, menschliche Physiologie und Psychologie

von

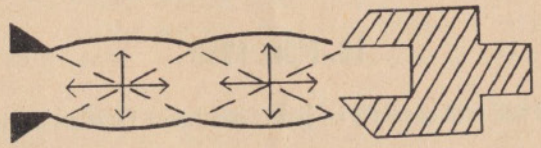
CLIFFORD THORNTON

Ultraschall — künstlich erzeugt mit Frequenzen über 20 000 Hz durch Druckwellen — wurde 1883 zuerst durch Experimente erkannt, welche GALTON mit Schneideton-Generatoren unternahm, um die höchste Grenze menschlicher Tonwahrnehmung festzustellen. — Vorhergegangene Untersuchungen hatten gezeigt, daß eine Pendelwirkung in einem Luftstrahl entsteht, der aus einem engen Spalt auf den scharfen Rand eines dem Spalt gegenüberliegenden Gegenstandes geleitet wird, die dadurch ihrerseits in dem umgebenden Medium einen musikalischen Ton hervorruft. Die Frequenz dieses Schneidetons hängt von der Geschwindigkeit des Strahles und dem Trennabstand zwischen Spalt und Kante ab:

$$U / lf = K$$

(f = Frequenz des Schneidetons; U = Geschwindigkeit des Strahles; l = Trennabstand)

Die Vergrößerung der Strahlgeschwindigkeit und die Verminderung des Trennabstandes können die Frequenz über die Schmerzschwelle erheben. Hartmann (1) ging weiter: er vergrößerte die Strahlgeschwindigkeit in dem verwendeten Luftstrahl über die der Klanggeschwindigkeit hinaus. Der Strahl soll damit auf einen ringförmigen Rand übergreifen (entsprechend der eines kleinen Flaschenresonators). Die Begrenzungen des Strahles reflektieren dann beim Austritt in die Atmosphäre im Gase entstandene, kreuz und quer laufende Schockwellen. Befindet sich die ringförmige Kante in einer reflektierenden Zone (Fig. 1), so entsteht eine kräftige Luftschwingung mit einer durch die obige Beziehung bestimmten Frequenz, deren genaue Lage gewöhnlich oberhalb des höchsten Hörbereichs ist.

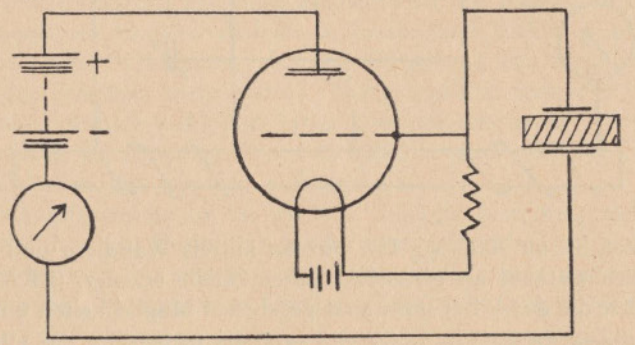


Solche Quellen und ebenso der singende *Bogen* DUDDELL's (2) können eine beträchtliche Menge von Ultraschallenergie liefern (bei letzterem wird ein elektrischer Lichtbogen zwischen zwei Kohlenstiften erzeugt, wodurch die dadurch auf einen Resonanz-Stromkreis übertragenen Schwingungen sowohl hörbare als auch Ultraschallwirkungen hervorrufen, die abhängig von den Induktions- und Kapazitätswerten des Stromkreises sind).

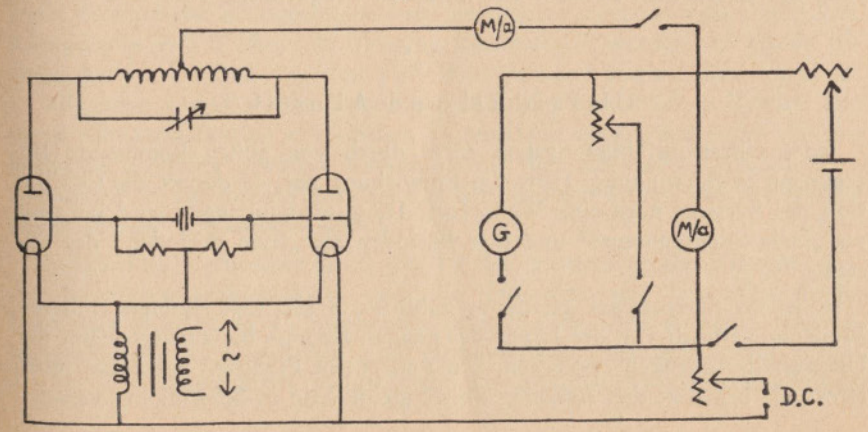
Trotz den aus diesen Methoden gewonnenen großen Energiemengen sind sie wegen der Zufälligkeiten bei ihrem Ausgang (Amplitude, Frequenz, etc.) für das Experiment ungeeignet. Man benötigt dazu weniger stark geladene Quellen mit indes stärkeren Resonanzcharakteristiken (z. B. piezoelektrischer und magnetostriktiver Art).

Eine Anzahl di-elektrischer Kristallsubstanzen erleiden bei gewissem Druck eine elektrische Polarisierung. Zu diesen Substanzen, die piezoelektrische Substanzen genannt werden, gehören vor allem Quarz ($Si\ O_2$) und Rochellesalz ($Na\ K\ C_4\ H_4\ O_6 \cdot 4\ H_2\ O$). Die unter dem Namen Elektrostriktion bekannte, entgegengesetzte Eigenschaft wird gebraucht, um Ultraschallenergie zu erzeugen. Ein Quarzplättchen, einem rapid wechselndem Feld ausgesetzt, wird durch seine elektrostriktive Eigenschaft abwechselnd gedehnt und zusammengezogen. Entspricht dieser Vorgang seiner Eigenfrequenz, so entsteht eine starke Resonanzwirkung in Richtung des Feldes.

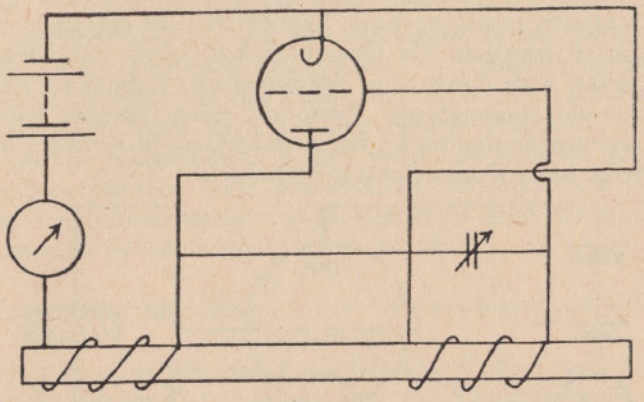
Fig. 2 zeigt einen Quarzresonator-Stromkreis.



Um größere Mengen von Ultraschallenergie zu erzielen, gebrauche man einen Resonanzstromkreis nach Fig. 3.



Magnetostriktive Oszillatoren sind weniger wirksam als — der Hysteresis entstammende — elektrostriktive Quellen. Ein Eisenstab wird als Kern eines Solenoids gebraucht. Als Folge der Magnetostriktion verändert sich periodisch die Länge des Kernes im magnetischen Feld. Zugleich geht ein Strahl von Ultraschallwellen vom Ende des vibrierenden Kernes aus (Fig. 4). Die durch diese Methode unter normalen Umständen und ohne spezielle Techniken erzielte maximale Frequenz beträgt ca. 60 000 Hz; für größere Werte wird der Kern zu kurz.



Frequenzen bis zu 3000 Mg Hz wurden mittels Wandlern und Substanzen wie Bariumtitanat als piezoelektrischer Quelle erzeugt. (BRADFIELD (3) hat zuerst die durch Bariumtitanat gegebenen Möglichkeiten untersucht).

Absicht dieses Artikels ist indes, die spezielle Bedeutung des Ultraschalls niederen Frequenzspektrums zu untersuchen, als einer logischen Erweiterung des akustischen Bereichs der hörbaren Frequenzen.

* * *

Ultraschall und Akustik

Jedes vibrationsfähige System gerät durch von außen kommende Erregungen in Schwingung. Hört die Einwirkung auf, so dauert die Oszillation des Systems noch eine Weile fort. Diese Schwingungen sind bekannt als „freie Schwingungen" und ihre Perioden als „freie Perioden" des Systems.

In jedem Konzertsaal existieren zahllose „freie Schwingungen", deren Wellenlängen sich von der Länge des ganzen Raumes bis zu derjenigen der Ultraschallfrequenzen erstrecken. Ein von einem Pianisten gespieltes mittleres „C" bedeutet den Anschlag dreier gleichzeitig in Schwingung versetzter Klavierseiten, die danach „freie Schwingungen" innerhalb des ganzen Frequenzbereiches ausführen. Mit der allmählichen Übertragung der Schwingungsenergie der Saiten auf die sie umgebende Luft mittels des Resonanzbodens, nimmt die Schwingungsenergie ab, bis sie ganz erlöscht. Wir können ebenso sagen, daß die Klaviersaiten Klangwellen in den Saal entsenden, als daß die erregten Saitenbewegungen auf die „freien Schwingungen" der Saalluft übertragen werden. (Diese Übertragung wird in der Hauptsache Schwingungen betreffen, welche die gleiche Frequenz haben wie die 3 Saiten von „C" selbst und deren Harmonische).

Niedrige hörbare Frequenzen erstrecken sich von der Klangquelle aus nach allen Richtungen und biegen um alle Ecken. Mit höherer Frequenzzahl nehmen die Klangwellen immer bestimmtere Richtungscharakteristiken an, während sich bei Hoch- (Ultraschall)-Frequenzen die Energie in einen abgestumpften Kegel konzentriert. Der Kegelwinkel selbst ist vom Verhältnis der Wellenlänge zum Durchmesser der Quelle abhängig. Je kleiner dieses Verhältnis ist, umso kleiner wird der Kegel. Hoch- (Ultraschall)-Frequenzen strahlen deshalb in bestimmter Richtung und mit zu vernachlässigender Krümmung ab. Die Dämpfung der Strahlen ist dem Quadrat der Frequenz proportional; Energiestrahlen von sehr hoher Frequenz können deshalb nicht über lange Distanzen verbreitet werden. Doch kann man noch bei Frequenzen von 20 000 Hz (also nahe der Hörgrenze) Richteigenschaften der Strahlen wahrnehmen.

Die Strahlungsintensität ist als diejenge Energie bestimmt, welche durch eine Raumeinheit pro Zeiteinheit hindurchgeht; Strahlen *sehr* hoher Intensität können durch Vereinigung von Ultraschallstrahlen zu einem Kegel erzeugt werden. Durch gewisse Ultraschallquellen wurde es möglich, mehr als 50 Watt pro cm^2 zu erzeugen und durch die Zusammenfassung in einen Brennpunkt lieferten Ultraschallstrahlen sogar 5000 Watt pro cm^2. Die Intensitäten hörbarer Klänge sind in Bezug auf diese Größen natürlich klein. Könnte die Klangenergie eines Sinfonieorchesters in eine punktuelle Klangquelle von 2 Meter Entfernung konzentriert werden, so würde die Intensität in der Ordnung von 10^{-4} Watt pro cm^2 liegen. Das entspricht — allgemein gesagt — der *Schmerzschwelle* des menschlichen Gehörs. Die durch Ultraschallwellen erhältlichen Intensitäten übertreffen indes die des hörbaren Bereiches gewaltig. Dieses — mit dem Ultraschall entdeckte — Phänomen ist das direkte Resultat aus der geringen Länge und der großen Intensität der Ultraschallwellen.

Nachdem so in einfacher Weise die Art der Aussendung der Klangenergie, die Richtungscharakteristiken und die Intensität der Ultraschallwellen betrachtet wurden, ist es angebracht, jetzt die Parallele zwischen elektromagnetischem Strahlspektrum und mechanischem Energiespektrum zu erörtern. Wir hoffen dabei, einiges Licht auf geläufige Probleme des Ultra-

schalls — mit speziellem Bezug auf die Experimentaltechniken — zu bringen, um den Ultraschall letztendlich als helfende Ergänzung zur musikalischen Akustik gebrauchen zu können.

Wir unterlassen es hier, die Richtungscharakteristiken von hörbaren und Ultraschallwellen sowie die Ausbreitung mechanischer Wellen durch solide Medien zu erörtern. Für die erwähnte Frage genügt es zu zeigen, daß das mechanische Energiespektrum ebenso quantisiert ist wie das elektromagnetische Strahlenspektrum.

Jedes System, das die Aussendung und Absorption elektromagnetischer Quanten (oder Photone) mit sich bringt, muß mit seiner eigenen Ausstrahlung im Gleichgewicht stehen. Somit sind, in jeder die Eigenschaften von Phontonen ausdrückenden Matrix, die entsprechenden Elemente einander gleich und die Matrix selbst ist symmetrisch. Eine große Anzahl von Experimenten hat den Beweis geliefert, daß die „Schwingungen" aller Photone einfach harmonische sind. Die auftretenden Veränderungen sind deshalb denen der Quantität $\cos (2\pi f t + \times)$ proportional (f = Frequenz und $\times$ = Phase). Nach De Moivres ist

$$e^{ia} = \cos a + i \sin a$$

(a = beliebig)
(e = Exponentialfunktion).

Es ist ein in der mathematischen Schwingungstheorie allgemein gebräuchlicher Kunstgriff, einen „der Beobachtung unzugänglichen" Zustand auszuschalten durch Summierung seiner Teile zu einer komplexen Zahl nach der Form

$$C = A + i B$$

Das ergibt für das obige Beispiel, in dem die Phase nicht „beobachtet" werden kann, nach De Moivres's Theorem (mit dem spezifischen Wert 2π für a und unserer Größe C)

$$Ce^{2\pi i ft} = \sqrt{A^2 + B^2}\,[\cos (2\pi ft + \times) + i \sin (2\pi ft + \times)].$$

Wo $\times$ vom Verhältnis A zu B abhängt, stellt

$$\sqrt{A^2 + B^2} \cos (2\pi ft + \times)$$

die geforderte Schwingung dar. Gebrauchen wir jetzt den erwähnten mathematischen Kunstgriff, so haben wir eine Matrix

$$\begin{vmatrix} C_{aa} e^{2\pi i (f_a - f_a) t}, & C_{ba} e^{2\pi i (f_b - f_a) t}, \\ C_{ab} e^{2\pi i (f_a - f_b) t}, & C_{bb} e^{2\pi i (f_b - f_b) t}, \\ C_{ac} e^{2\pi i (f_a - f_c) t}, & \text{etc.} \end{vmatrix}$$

wobei die Matrix ein System im Gleichgewicht bedeutet, z. B. einen Lichtstrahl. Eine ähnliche Matrix kann für die Energiezustände jedes im Gleichgewicht befindlichen mechanischen Schwingungssystems konstruiert werden.

Die durch fa, fb, fc für ein hydrogenes Atom bezeichneten Grundfrequenzen stehen im Verhältnis $\frac{1}{1^2} : \frac{1}{2^2} : \frac{1}{3^2} : \frac{1}{4^2}$ (Balmerserien). Im Falle mechanischer Energie wird indes daraus die einfache Beziehung 1 : 2 : 3 : 4.

Die mathematische Grundtheorie zeigt, daß die Energie jeder isolierten Störung im Raume als die Summe der Energien einer Anzahl freier Schwingungen betrachtet werden kann, die sich im ganzen in Frage kommenden Raum ausbreiten. Es spielt dabei keine Rolle, wie begrenzt der Bereich der Störung oder wie ausgedehnt der Raum sein mag. Im Bereich der Störung steigern sich die verschiedenen Schwingungen in ihren Wirkungen, während sie sich außerhalb davon durch Interferenz aufheben. Die in so begrenzten Bereichen vorherrschenden Energien können mit den Quanten identifiziert werden.

Betrachten wir für das statistische Elektron die Matrix Heisenberg's, so erhalten wir die einfache Formel:

$$p\,q - q\,p = \frac{h}{2\pi i} \times$$

In dieser Gleichung ist $\times$ selbt eine Matrix unitär diagonaler Form, so daß alle jene Elemente, die nicht in der Diagonale vorkommen, gleich Null sind, während die Elemente in der Diagonale $\frac{h}{2\pi i}$ betragen.

Die Gleichung $p\,q - q\,p = \frac{h}{2\pi i}$ drückt lediglich eine Beziehung zwischen zwei verschiedenen Mengen aus und das gilt nicht nur für das statistische Atom, sondern auch für *jedes* dynamische System. Der Zustand des Systems kann durch eine Anzahl von Ko-Ordinaten (q) gegeben werden und seine Bewegung durch die Werte der Kräfte (p), welche mit diesen Ko-Ordinaten verbunden sind. Daraus ergibt sich im Falle eines einzelnen Atoms, warum eine Gasmenge ein Spektrum scharfer Linien zeigt. Die Analogie kann erweitert werden, da die Aktionsgrößen, die bei Ereignissen großen Maßstabs auftreten, enorm große Vielfache von h sind (der Planck'schen Konstante). Das führt selbstverständlich zum Übergang auf die Newton'sche Mechanik.

Aus der vorangegangenen Erörterung ist zu schließen, daß eine äquivalente Quantisierung auf das mechanische Energiespektrum Anwendung finden kann. Das gewinnt besondere Bedeutung bei der Erörterung der Psychoakustik und Untersuchungen mittels Hörertesten. Hier mag indes genügen, die für ein im Gleichgewicht befindliches System erhaltene Matrix neu zu untersuchen. Vom Standpunkt der Konzertsaalakustik ist es ein Glück, daß wir nichts über die sogenannten „unbeobachtbaren" Zustände wissen müsen, sondern uns damit abfinden können, die Energiepegel der Klangquellen und die akustischen Charakteristiken des Konzertraumes zu kennen.

Damit hängt indes zusammen, daß unsere gegenwärtigen Kenntnisse noch immer begrenzte sind. Obgleich eine große Anzahl der für ein gutes Auditorium vorauszusetzenden Erfordernisse bekannt ist (Tonfülle, Deutlichkeit, Verschmelzung, Gleichgewicht, Fehlen von Echo etc.), so wurde den Ultraschallenergien, die durch hörbare Töne erzeugt werden, bisher kaum Aufmerksamkeit zugewendet. Noch weniger ist bekannt über die Verstärkung von solchen durch Ultraschall, die Wirkung des elektrisch erzeugten künstlichen Nachhalls sowohl im musikalisch hörbaren als im Ultraschallbereich und über die Probleme der Raumeinheits-Absorption.

Um ein klares Bild vom Energiepegel der Quelle eines Klangkomplexes zu erhalten, muß eine Matrix konstuiert werden, deren Form der früher beschriebenen ähnlich ist. Dadurch wird es bei der Untersuchung möglich, ebenso den ganzen hörbaren wie den zum Ultraschall gehörenden Frequenzbereich zu erfassen, da die Matrixelemente alle im durch die Klangquelle hervorgerufenen Komplex möglichen Energiegrade angeben. Hier interessiert uns die Klangintensität selbst noch nicht; wir klassifizieren lediglich die Energien als eine Funktion der Frequenz unter der Voraussetzung, daß die Quantelung ein direktes 1 : 1-Verhältnis zwischen Energie und Frequenz ergeben würde.

Es ist nunmehr möglich, die Frage der Raumeinheits-Absorption zu erörtern. Das Studium der akustischen Charakteristiken eines Auditoriums ergibt gewisse Faktoren, welche mit den Richtungscharakteristiken und der Summe, Dichtigkeit und Energie des Klanges, die auf irgend eine Raumeinheit des Auditoriums einwirken, zusammenhängen. Selbstverständlich kann hier statistisches Ausprobieren (mit der nötigen Bezugnahme auf die akustischen Daten) unternommen werden.

Es ist klar, daß die Klang-Streuung (bei der Beugung um Ecken) im höheren Frequenzspektum nicht mehr auftritt, so daß denkbar wird, daß ein von Ultraschall breit bewirkter Raumteil (vom Hören her betrachtet) eine Art Halbschattenfläche bedeuten kann, wobei der Entstellungsgrad umgekehrt proportional ist zur Größe der Frequenz. Daraus ergibt sich natürlicherweise die Frage nach der Vermehrung hörbarer Klänge durch Ultraschall.

Die zur Vergrößerung des Klangbereichs geeigneten Ultraschallfrequenzen müssen im Hinblick auf die Matrix bestimmt werden. Außerdem ist auf Grund der vorangegangenen Bemerkungen über die Raumeinheiten anzunehmen, daß gewisse Raumteile im hörbaren oder Ultraschallbereich möglicherweise leere oder halbleere Einheiten aufweisen werden.

Es empfiehlt sich, ein elektronisch erzeugtes Ultraschall-Texturmodell zu benützen, wobei die Frequenzen über einen Bereich den Eigenschaften der Matrix angepaßt sein sollen.

Es ist schwierig, große moderne Säle mit genügend langen Nachhallzeiten zu versehen, ohne das Risiko störender Echos einzugehen (dem großen Volumen entspricht eine nur geringe Absorption). Könnte man sich jedoch eines elektronisch erzeugten, *künstlichen* Nachhalls bedienen — vom natürlichen nicht unterscheidbar und jeweilig sogar dem speziellen Charakter der gespielten Musik angepaßt — so hätte das Problem nicht nur ein für alle Male seine Lösung gefunden, sondern es würden sich damit weitere Fortschritte der akustischen Forschung eröffnen (4).

Hierbei gewinnt der Ultraschall, ebenso wie bei den schon früher erörterten Problemen immer größere Bedeutung. Die Wirkung künstlich erzeugter Ultraschallstrahlung und ihre Fähigkeit Streuung, Beugung und Effekte in bestimmten Bereichen zu erzeugen als Resultat der hohen Direktivität und der relativen mechanischen Dichte der Ultraschallwellen sollte deshalb neu untersucht werden. Vor allem kann dieses System benützt werden, um regelwidrige Reflexions- und Absorbierungsmodelle zu erzeugen, wenn Ultraschallenergie in einem Auditorium mit reflektierenden und absorbierenden Medien angewandt werden soll. Der Gebrauch der von Prof. Erwin Meyer (5) entwickelten Modelltechnik könnte für die Methodik dieses Forschungszweiges von besonderem Nutzen werden.

Die Bedeutung des Ultraschalls für die Akustik weist in verschiedene Richtungen. Die vordringlichsten Untersuchungen sollten darin bestehen, den hörbaren Frequenzbereich mittels Ultraschalls natürlich und künstlich zu erweitern in Hinblick: auf Aufführungen, auf Wirkungen der künstlichen Nachhallgestaltung und der damit verbundenen akustischen Faktoren, auf die Probleme von Raumeinheits-Absorption und Raumbereichspegel, und endlich — sowie wahrscheinlich am wichtigsten — in Bezug auf die Berücksichtigung der mathematischen Analysis von Energiefunktionen und der Matrix-Wirkung in verschiedenen Bereichen.

Vor Abschluß dieser Übersicht soll noch besonders auf Richardson's (6) Bemerkungen über die Vorteile verwiesen werden, welche neue Fortschritte der elektrischen Ton-Synthese für die musikalische Akustik ergeben müßten. Untersuchungen haben die Bedeutung der Kenntnis und des Studiums von Formanten und Ausgleichsvorgängen der Musikinstrumente für deren Unterscheidung erwiesen. Dieses Studium kann erfolgreich zu weiteren Resultaten führen, wenn das gleiche Problem in Hinsicht auf durch Ultraschall modulierte Wellen untersucht wird. Besondere Bedeutung aber würde es für die Klangaufnahme bei Schallplatten und die Wiedergabe so aufgenommenen Schalls haben, besonders bei der Verwendung der neuen Techniken von Stereophonie und vieldimensionalen Klangspiegeln.

Ultraschall, menschliche Physiologie und Psychologie

Vor einer Untersuchung der speziellen Aspekte des Ultraschalls in Bezug auf den menschlichen Organismus müssen verschiedene Gehörsphänomene

betrachtet werden, die dabei eine Rolle spielen. Dies sind u. a.: vom Ohr erzeugte Harmonische (einst „subjektive Töne" genannte, im Ohr erzeugte Tonwahrnehmungen); Kombinationstöne; im Ohr gebildete Kombinationstöne; Verdeckungen; Schwebungen.

Eine besondere Tatsache des Hörens ist, daß Töne wahrgenommen werden können, denen in der äußeren Klangerregung keine einfachen harmonischen Schwingungen entsprechen. Diese Töne entstehen im Ohr, das in sich selbst einen asymmetrischen, nicht linear wirkenden Sender darstellt. Im Falle einer einzelnen Erregung verzerrt jedes Schwingungssystem die ihm aufgezwungene Schwingung und fügt — wenn es selbst Teil eines Übertragungssystems ist — zu der aufgezwungenen Frequenz die ganze Reihe ihrer Harmonischen hinzu. Diese Töne können natürlich auch von Klangquellen in der Luft stammen — sie werden dann vom Ohr normal wahrgenommen; indessen hat Helmholtz (7) gezeigt, daß Trommelfell und Knöchelchen als ein Mikrophon wirken, das selbst im Ohre Harmonische hervorruft.

Durch sorgfältige Nachprüfung mittels eines Masstabmodells der Ohrenknöchelchen bestätigte Stuhlman (8) dies mittels Nachweis einer Asymmetrie zum Original. Die Existenz dieser vom Ohr produzierten Harmonischen kann man demonstrieren durch gleichzeitige Einführung eines starken Sinustones der Frequenz f und eines anderen Sinustones von variabler Intensität und Frequenz in das Ohr. Wenn die Frequenz des Prüftones dabei in die Nachbarschaft von 2 f, 3 f, 4 f gerät, so werden Schwebungen wahrgenommen, die aus dem Prüfton zusammen mit dem im Ohr entstehenden Oberton, hervorgehen.

Erklingen 2 Töne gleichzeitig, so wird ein dritter (Kombinations-Ton) deutlich gehört, mit einer Frequenz gleich der Differenz aus den Frequenzen der beiden angegebenen Töne. Dieser deutlich wahrnehmbare Ton heißt *Differenzton 1. Ordnung*. Das Gegenbild dazu ist der *Summationston*, welcher als Summenfrequenz der beiden angegebenen Töne erklingt.

Bragg (9) wies auf die wesentliche Gleichartigkeit zwischen diesem Phänomen, den Randbändern beim Radio und dem Ramaneffekt bei Lichtstrahlung hin.

Die Analyse der — gewissen Tönen entsprechenden — Luftvibration zeigt eine Schwäche des Grundtons an. Trotzdem definiert dieser die Tonhöhe und wird normalerweise allein wahrgenommen. Besteht der Ton aus einer Reihe von harmonischen Teiltönen f, 2 f, 3 f, 4 f, so ergibt der Differenzton erster Ordnung jedes der aufeinanderfolgenden Teiltonpaare die Grundfrequenz. Die Qualität des im Innenohr wahrgenommenen Tones kann deshalb etwas völlig verschiedenes sein von der, welche die Analyse der außerhalb des Ohres erfolgenden Luftschwingungen ergibt. Die Erklärung dafür besteht darin, daß der Gehörsmechanismus mit nicht-linearer Reaktion auf außerhalb wirkende Kräfte antwortet. Diese Nichtlinearität ruft Ohrentöne hervor, welche als Summations- und Differenztöne, Harmonische und aufgezwungene Frequenzen alle das Nervensystem stimulieren. Werden der Grundton und die ersten Obertöne des Außentones ausgeschaltet, so erzeugt der Gehörsmechanismus sie von neuem (wenn auch mit einer ganz anderen Intensität). Békésy (10) behauptet, daß die Ohrenharmonischen fast mit Sicherheit in der Cochlea und die Differenztöne im Mittelohr entstehen.

Wenn während des Erklingens eines andauernden Tones ein anderer Ton, zunächst mit geringer, dann aber ständig wachsender Intensität angegeben wird, so wird der erste zu einem bestimmten Zeitpunkt — dem Verdeckungspunkt — unhörbar. Hohe Töne können leicht durch tiefere verdeckt werden, während das Umgekehrte schwerer ist. Doch bleibt immer Bedingung, daß der tiefe Ton eine sehr hohe Intensität erreicht, bis er einen viel höheren verdecken kann (dasselbe gilt umgekehrt für einen hohen, um einen nur wenig tieferen zu verdecken).

Es soll ferner in dieser vorbereitenden Übersicht über Gehörsphänomene die Entstehung von Schwebungen durch Überlagerung berührt werden. Sehr tiefe Schwebungen sind nur schwer hörbar, in dem sie zunächst eine Art pulsierenden Mitteltones hervorrufen („intertone"). Mit dem Anwachsen des die Schwebungen erzeugenden Intervalls, werden allmählich 2 verschiedene Töne als Ursache bemerkbar. Wächst das Intervall weiter an, so verschwindet der Mittelton völlig, während die Schwebung bis zu einem unangenehmen Eindruck an Stärke zunimmt. Es ist bedeutsam, daß die Lokalisierung einer Klangquelle von der Fähigkeit der Ohren abhängt beim Ankommen der Klangquellen an den Ohren Laufzeitunterschiede festzustellen. Das ist der Grund, warum der Eindruck des beständigen Richtungswechsels einer Klangwelle entsteht, wenn 2 Töne mit einer Schwebungsfrequenz (gewissermaßen als Phrasendifferenz-Effekt) beiden Ohren über Kopfhörer getrennt zugeführt werden.

Endlich ist zu beachten, daß die Frequenzwahrnehmungen des Ohres räumlich auf die Membrane verteilt sind. Darüber haben Stevens, Davies und Lurie (11) ebenso interessante als aufschlußreiche Versuchsresultate mitgeteilt. Auch Kellaway's (12) Werk über die Theorie des Hörens ist der Beachtung wert.

Aus den nur das Ohr betreffenden akustischen Wirkungen des Ultraschalls können interessante Folgerungen gezogen werden. Zunächst einmal sollte es möglich werden — mittels nur wenig die Hörschwelle überschreitende Ultraschallfrequenzen — in Form von Prüftönen *Ohren*harmonische eines gerade unterhalb des höchsten Hörbereichs liegenden Sinustones festzustellen; ferner müßten durch Ultraschall die Töne von Streichinstrumenten „reicher" gemacht werden können. Die eingehende

Kenntnis des diesen Phänomena zugrunde liegenden Mechanismus würde sicher dazu beitragen, die bis heute unerklärbaren Anomalien der sogenannten „subjektiven" Innenohr-Tonqualitäten und der hoch in der Nähe der Schmerzschwelle vibrierenden Streichinstrumente zu erklären. Das Umgekehrte gilt selbstverständlich gleichermaßen; es ist möglich, die Ultraschallwelle als „Sinus"-Ton zu benutzen und den vibrierenden hohen Streicherklang in der Art von „Prüftönen. Diese Maßnahme würde zugleich Aussichten auf neue Möglichkeiten der Klanggestaltung eröffnen.

Auch für die Kombinationstöne bedeutet die Anwendung des Ultraschalls eine wichtige Untersuchungsmöglichkeit. Der Gebrauch zweier Töne, von denen jeder sich auf einer Seite der Hörschwelle befindet, gestattet es, Differenztöne verschiedener Ordnung zu demonstrieren. Sorgfältige Einstellung und automatische Frequenzanpassung in Hinsicht auf einen variablen Ultraschallgenerator erlauben es ferner, jede gewünschte Kombinationsfrequenz hervorzurufen. Diesen „Schatten aus dem Unhörbaren" muß auf Grund ihrer Wirkungsgrade durchaus Substanz zugemessen werden. Sinustöne, welche mit im Ultraschallbereich entstandenen, ihrerseits aus Tönen des Hörbereichs hervorgegangenen Summationstönen resonieren, können dazu verhelfen, Amplitudewirkungen der Generatortöne nachzuweisen.

Man darf auch erwarten, daß durch die Verwertung von Ultraschallenergie bekannter Frequenzen, welche in Übereinstimmung mit Harmonischen von Grundtönen hörbarer Frequenz berechnet worden sind, mehr Licht auf das Problem der Nichtlinearität bei der Ohrenantwort auf außenwirkende Kräfte fallen wird. Die mehrfach erwähnten wichtigen Arbeiten Békésy's könnten aus der Anwendung solcher Techniken bei erneuter Aufnahme sicher Vorteile ziehen.

Obwohl das Verdeckungsphänomen zunächst seiner Natur nach für Ultraschalluntersuchungen kaum geeignet scheint, könnten durch die Verdeckung eines Ultraschalltones durch Harmonische von hörbaren Tönen neue Resultate und diese durch den Gebrauch eines Interferometers an der Diffraktion des Lichtes demonstriert werden.

Endlich ist es mittels Gebrauch von Ultraschall möglich, leichter als bisher Klangquellen des Schwellgebietes zu erfassen und zu lokalisieren, wobei Phasendifferenzen zwischen einer hörbaren und einer Ultraschallquelle Verwertung finden können. Doch scheint die Ultraschallforschung hierfür nicht die gleiche Bedeutung zu haben, als im Falle der anderen, aufgezeigten Ohrenphänomene.

Deren nähere Erkenntnis berechtigt zu sagen, daß vielleicht bald schon in Orchesterpartituren neben den üblichen Angaben für Musikinstrumente solche für einen Ultraschallgenerator variabler Frequenz auftauchen werden, der dann mit dem gleichen Recht als Musikinstrument zu betrachten wäre wie jede andere elektronische musikalische Erfindung.

Wir können also bei der Anwendung der Utraschalltechnik auf diese Probleme die verschiedensten physiologischen und psychologischen Entdeckungen erwarten. Besonderen Wert werden indes Experimente haben, welche auch Hörerteste umfassen und so das wahrnehmende Subjekt als Teil des Ganzen in das Experimentiersystem mit einbeziehen. Sowohl Beranek (13) als Chavasse (14) haben darauf immer wieder hingewiesen, mit der Begründung, daß die Wissenschaft der Psycho-Akustik sich noch ganz in den Kinderschuhen befände. Chavasse ging dabei so weit zu sagen, daß die Gehörsmessungen außer den psychologischen Reaktionen auch Nachprüfungen mehr physischer Art einschließen sollten, wie z. B. die der Impedanz des Außenohrs.

Hinsichtlich des Vergleichs von Hörschwellen, von Geräuschbändern und von Sinustönen wurden interessante Untersuchungen durch die Britische Admiralität veranlaßt (15). Es wurden bei 27 Personen, mittels der Freifeld-Methode, in einem schalltoten Raum Vergleichsversuche durchgeführt. Die Testperson befand sich auf einem Stuhl vor dem Lautsprecher. Diese Experimente ergaben als das Verhältnis der Schwelle für Geräusch zu der für Sinustöne fast 1 (während durch Berechnung mittels kritischer Bandbreiten der Wert hätte 20 betragen sollen). Dieses Resultat widerspricht einer Resonanztheorie des Hörens, bei der das thermische Rauschen des Resonators die Schwelle bestimmt hatte, welche indes durch Kopfhörermessungen der Verdeckung von Sinustönen durch Geräusch bekräftigt zu werden scheint, welche Hawkins und Stevens (16) durchführen. Solche Untersuchungen sollten ihrer großen Bedeutung für die Resonanztheorie des Hörens wegen unter besseren akustischen Voraussetzungen, mit weit mehr Testpersonen und über einen größeren Frequenzbereich weitergeführt werden (man experimentierte zunächst nur mit 1200—2000 Hz) und zwar mit so einstellbarer Anwendung breiter Geräuschspektrumsbänder, daß — durch Anpassung an die Hörkurven — das Vorherrschen eines schmalen Frequenzbereichs vermieden werden kann, indem man die psychoneurale Geräuschschwelle festlegt. Die psychoneurale Reaktion auf gleichwertige Ultraschalltöne und — „geräusch"-bänder könnte durch ein ähnliches Experiment mit diesen Frequenzen erprobt und dann versucht werden, die Resultate aus beiden Untersuchungsreihen in Wechselbeziehung zu bringen.

In der Medizin und der Biologie wird Ultraschall angewandt, angefangen von der Bekämpfung nervöser Krankheiten und des Krebses bis zur Förderung des Weizenwachstums und bis zur Zerstörung von Bakterien. Über all das gab der Kongreß vom Jahre 1955 in Marleille (17) weitgehend Aufschluß. Die erwähnten Gebiete betreffend wurden ganz besondere Wirkungen einiger ausgewählter Wellenlängen oder Frequenzen angeführt; doch schien es im allgemeinen, daß — abgesehen von den jeweils erstrebten Energiekonzentrationen — eine Art Stufenleiter der Frequenzen wirksam gebraucht werden könnte.

Trotz der jetzt schon 30 Jahre andauernden Experimente mit Ultraschall in der angewandten Biologie wurde noch keine klassische Theorie darüber entwickelt, in wieweit die biologischen Wirkungen thermischer oder mechanischer Natur seien. Stebber (18) beschreibt ein Experiment mittels dessen er beide Wirkungen zu unterscheiden versuchte und zwar in dem er zuerst kontinuierliche Wellen und dann sich wiederholende Impulse von verschiedenen Wellenlängen anwandte. Die thermische Wirkung wird hauptsächlich therapeutisch eingesetzt, wogegen das „Entleeren" von Zellen ein Beispiel biologischer Verwertung des mechanischen Effektes bedeutet.

Viele Beispiele haben die Wirkung von Ultraschallstrahlen auf lebende Gewebe gezeigt. So versuchte man — innerhalb des lebenden Gewebes — Ultraschallwellen in Brennpunkte zusammenzufassen, um Zellen örtlich genau begrenzter Regionen zu zerstören. Bei der Bekämpfung tiefsitzender Tumore durch *Röntgen-Strahlen* wird nicht nur der Tumor, sondern das dabei auch in Frage stehende Gewebe zerstört. Indessen kann durch Brennpunktfixierung von Ultraschallstrahlung die alles vernichtende Wirkung der Röntgen-Strahlung vermieden werden, wenngleich auch die Technik — mit Ausnahme für die Gehirnchirurgie — hier noch keine unbeschränkten Erfolge zu erzielen vermochte. Durch die Entwicklung spezieller Ultraschall-Präzisionsapparaturen (20) ist indes eine Gehirn-„Chirurgie" möglich geworden ohne jedes Zerschneiden oder eine Elektro-Coagulation des Gehirngewebes. Doch ist es nötig, die Kopfhaut herauszuschneiden und einen Teil der Hirnschale zu entfernen, um den hohen Ultraschallfrequenzen den Zugang zu ermöglichen. Durch die äußerst genaue Ausrichtung der Strahlung mittels der neuen Apparaturen können Ultraschallwellen jetzt so scharf in Brennpunkte zusammengefaßt werden, daß der eventuell noch immer zerstört werdende Gewebeanteil genau zu kontrollieren ist. Blutgefäße des Gehirns werden bei der Operation trotz der unvermeidlichen Zerstörung eines Nervengewebes nicht verletzt.

Es ist naheliegend, von der Bestrahlung lebenden Gewebes auf die wichtigen Untersuchungen Selman's und Counce's (21) überzugehen hinsichtlich der Bestrahlungswirkung während der embrionalen Entwicklung von Drosophila. Eine spezifische Differenzierung (Veränderung) des Nervensystems wurde neben anderen Wirkungen dadurch verursacht, daß man den Embrio Wellen von 1 mega Hz Frequenz bei 0,3 — 0,5 Watt/cm² während ungefähr 30 sec aussetzte. Damit wurde ein neues Forschungsgebiet erschlossen, das inzwischen schon weit ausgebaut worden ist.

Ein letztes Beispiel der Einwirkung von Ultraschallstrahlung auf den psychophysischen Organismus des Menschen: am Pennsylvania State College Acoustical Laboratory (22) wurde eine Ultra-Sirene eingesetzt, um Ungeziefer und Krankheit übertagende Insekten zu vernichten. Nach geringer Zeit begannen die dabei selbst der Strahlung ausgesetzt gewesenen Laboratoriumsmitarbeiter eine ungewöhnliche Müdigkeit zu empfinden, begleitet von krampfartigen Gleichgewichtsstörungen (trotzdem sie Ohrenschutz getragen hatten) und unangenehmen Kitzelempfindungen in Mund und Nase. Bei ähnlichen anderen Anlässen wurden die gleichen psychosomatischen Reflexe festgestellt.

Nach dieser Aufzeigung physiologischer und psychologischer Ultraschallphänomene soll zusammenfassend versucht werden, Erfordernisse für die definitive Grundlegung einer Wissenschaft der Psycho-Akustik festzustellen, welche den Gebrauch des subjektiven und objektiven Untersuchungsmechanismus einschließen würde. Wie schon früher angedeutet, ist der Ausbau einer mathematisch-statistischen Theorie der mechanisch-subjektiven Sende- und Empfangsfunktionen, beruhend auf einer Quantelung des Wellenfeldes, das Wichtigste. Innerhalb eines solchen Rahmenwerkes sollte es möglich sein eine verallgemeinerte Feldtheorie aufzustellen, welche alle erörterten Ohren- und mechanischen Phänomene einschließen und erklären könnte.

Eine solche Entwicklung würde wahrscheinlich den größten direkten Fortschritt in der Geschichte der Akustik bedeuten seit der Entdeckung der künstlichen Erzeugung von Ultraschallstrahlen. Sollten inzwischen einige der hier ausgeführten Gedankengänge schon Veranlassung geben können zu Versuchsreihen, so würde die diesem Artikel zugrunde liegende Absicht voll zur Verwirklichung gelangen.

Die beigefügten Beilagen enthalten Vorschläge für Experimente mit Ultraschall sowohl hinsichtlich der musikalischen Akustik als auch betreffs psycho-physiologischer Stimulantien und Reaktionen.

Beilage I

Musikalische Akustik

1) Untersuchung der Wirkung minimaler Ultraschallstrahlungs-Intensität auf die Raumeinheits-Absorption hörbarer, mechanisch gemessener Frequenzen.

Messung der Dimensionen und Interferenzränder des Energiekegels, bei Einstellung von zwei Ultraschallstrahlen auf ein Zielgerät in einer Reihe von entsprechend $\theta = \lambda/d$ für den Kegelwinkel jeder der beiden Strahlen berechneten Entfernungen, mit besonderer Beachtung jedes einzelnen Strahles.

2) Wiederholung der gleichen Experimente mit einem Michelson-Interferometer in funktionell von den Resultaten von (1) abgeleiteten Entfernungen.

3) Prüfung der Wirkungen eines in verschiedenen Stellungen postierten Generators niedriger Ultraschallfrequenzen innerhalb des Perimeters einer Reihe von Musikquellen (einzelne Instrumente, Unisonogruppen, Bläser und Streicher, Kombination beider, volles Orchester), wobei der Ausgang des Generators von einer darüber so im Winkel befestigten Fläche reflektiert wird, daß die Ultraschallwellen mit minimaler Konzentration auf das Auditorium fallen.

4) Feststellung der Wirkungen zweier Ultraschallstrahlen, die in einem konvexen Reflektor im Brennpunkt vereint sind, bezüglich von Schattenrändern in einem Auditorium von unregelmäßiger, aber regulierbarer Form. Als Klangquelle seien Metallscheibenreflektor-Sirenenpfeifen der General Electric Company empfohlen.

5) Ausrichtung der Nachhallzeit eines Auditoriums mittels Reflexion hörbarer Wellen hoher Intensität durch quer hindurchgehende Ultraschallstrahlen.
Messung dieser Wirkungen.

* * *

Das von Professor Erwin Meyer auf der Ultraschallkonferenz Mai 1955 in Marseille beschriebene und vorgeführte Modell hat große Bedeutung für diese Experimente. Seine Apparatur wiederholt in kleinem Maßstabe die Verteilung der von einer kontinuierlichen Klangquelle hervorgerufenen Klangamplitude. Mittels Variierung des Gebrauchs der auf einer Wand angebrachten Erhebungen ist es möglich — während die anderen Wände nackt oder absorbierend bleiben — die diffusierenden Egenschaften des Modells für den Ultraschall zu studieren.

Beilage II

Ultraschallforschung in Hinsicht auf psychophysiologische Stimulantien und Reaktionen

Die folgenden Experimente beziehen Hörerteste weitgehend mit ein. Bei guten akustischen Voraussetzungen können sie ebensogut in Wohnräumen als in Auditorien durchgeführt werden.

6) Wiederholung der Experimente 3) und 4) mit altersmäßiger Auswahl von Testpersonen zur Erzielung besonderer Resultate hinsichtlich der Probleme von: Schwellen-Pegel, besonderen Effekten und ästhetischen Phänomenen. Die Resultate werden statistisch analysiert und interpretiert.

7) Untersuchungen über Ultraschall-Resonanz bei Kombinationstönen (mit spezieller Berücksichtigung der Nichtlinearität und der Ohrenkombinationen) an Gruppen von Testpersonen, die altersmäßig oder auf Grund ethnischer Faktoren zusammengesetzt werden.

Erneute Nachprüfung der Arbeiten Békésy's an Hand von aus den vorhergehenden gewonnenen Daten.

8) Experimente, die Außenohr-Impedanz im Schwellenbereich betreffend. Untersuchung der durch den Kopf verursachten Beugung von niedrigen Ultraschallfrequenzen und der Wirkungen auf künstlich (d. h. mittels Gehörshilfen) teilnehmende Testpersonen.

9) Versuchsreihen wie die von 3), 5) und 7), mit spezieller Bezugnahme auf Teste in Auditorien unter Bedingungen, die durch den Faktor Publikum in gleicher Weise für die Ausführung und die Hörbarkeit, wie für die Empfindungsschwellen gegeben sind.

10) Experimente über die Ultraschallmodulation von hörbaren Wellen, sowie über die mechanisch-akustische Reaktion und die des Ohres darauf.

11) Anwendung von Ultraschallzellen als „Licht-modulierenden Elementes" bei Licht- und Magnetton.

* * *

Diese Vorschläge sind keineswegs erschöpfend. Es ist aber zu erhoffen, daß diese Diskussion der Bedeutung des Ultraschalls weitere Experimentalreihen veranlassen wird.

BIBLIOGRAPHIE

1) Hartmann J. — J. Sci. Instr., 101, 4, 1947.
2) Duddell W. — The Electrician, 269, 46, 1900.
3) Bradfield G. — T. R. E. Mem. Nr. 67, 1949; N. P. L. Mem. Gen. etc. of Ultrasonic Waves, 1949.
4) Parkin P. H. and Allen W. A. — Nature, 172, 98, 1953.
5) Meyer E. — Conf. on Ultrasonics, Marseilles, May 1955; vide Nature, 176, 387, 1955.
6) Richardson E. G. — International Electroacoustical Congress (Delft), Sect. VI, June, 1953.
7) Helmholtz H. — Sensations of Tone, Longman's, 1895.
8) Stuhlman O. — J. Acoust. Soc. Amer., 7, 119, 1937.
9) Bragg W. H. — Proc. Roy. Inst. 30, 424, 1939.
10) Bekesy G. — Ann. a. Physik, 20, 809, 1934.
11) Stevens S. S. et al. — J. Gen. Psych., 13, 297, 1935.
12) Kellaway P. — Amer. J. Psych., 58, 25, 1945.
13) Beranek L. — Int. Electroacoustical Cong. (Delft), Sect. 111, June 1953.
14) Chavasse P. — Int. Electroacoustical Cong. (Delft), Sect. IV, June 1953.
15) Wentworth-Jessop J. and Vigoureux P. — Nature, 179, 374, 1957.
16) Hawkins J. E. and Stevens S. S. — J. Acoust. Soc. Amer. 22, 9, Fig. 3, 1950.
17) Various — Conf. on Ultrasonics, Marseilles, May 1955.
18) Stebler J. — Conf. on Ultrasonics, Marseilles, May 1955.
19) Laufer A. — Ultrasonics, Ann. Rev. of Smithsonian Inst., 221, 1951.
20) C. I. B. A. News — Ultrasound Waves in Brain Surgery, Discovery, 482, 1956.
21) Selman G. G. and Counce S. J. — Nature, 172, 503, 1953.
22) Laufer A. — Ultrasonics, Ann. Rev. of Smithsonian Inst., 221, 1951.

ARS-VIVA-VERLAG
(HERMANN SCHERCHEN) GMBH. MAINZ

„Informationstheorie und
ästhetische Empfindung"

von ANDRÉ MOLES

(Autorisierte Übersetzung von Hermann Scherchen)

Erscheint im Herbst 1957

WESTDEUTSCHER RUNDFUNK

PIERRE BOULEZ

„LES VISAGES NEPTIALES"

für Orchester, Soli und Frauenchor

Uraufführung 4. Dezember 1957 in Köln

Öffentliches Konzert

(Dirigent Hermann Scherchen)

EIN AMERIKANISCHES ARCHITEKTUR-MUSEUM

I a) DER PLAN

1) Das Kernstück ist eine Halle für beständig wechselnde Ausstellungen von Werken zeitgenössischer Architekten, Städtebauer, Ingenieure und Landschaftsgestalter!
2) Vor der Ausstellungshalle liegt ein ausschließlich der Entwicklung der Architektur ab 1850 gewidmeter Raum (als mit dem Kristall-Palast in LONDON eine neue Struktur- und Form-Idee verwirklicht wurde).
3) Eine große Bibliothek vereint alle die Architektur betreffenden Materialien.
4) Ein Gewölbe enthält Originale und Fotokopien kostbarer Zeichnungen und architektonischer Entwürfe aus der ganzen Welt.
5) Eine Galerie zeigt die wichtigsten Baumaterialien (Fensterrahmen, Dachwerke, Eisenmaterialien etc.), die international zur Anwendung gelangen.
6) Ein Auditorium steht für Vorlesungen, Filmvorführungen, Diskussionen etc. bereit.
7) Ein besonderer Raum verdeutlicht die Beziehungen zwischen Inneneinrichtung und Architektur (Muster neuester Möbel, kunstgewerblicher und handwerklicher Gegenstände).
8) Dieser „lebendigen Ausstellung" sind retrospektive Darstellungen der Entwicklung der Architektur angeschlossen:
   A) Okzident (Mittelmeer- und Mittelalterliche Zivilisation),
   B) Orient (China, Indien, Japan),
   C) Präkolumbianische Zivilisation Amerikas.

I b) ABÄNDERUNGSVORSCHLÄGE

1) Da das Museum *allen* Interessenten an der Architektur dienlich sein soll, wird vorgeschlagen, außer dem *amerikanischen Zentrum* Nebenstellen in anderen Ländern zu errichten, die deren Besonderheiten unterstreichen und das amerikanische Zentrum als „Clearing-Stelle" benutzen.
2) Architektur ist schwer „auszustellen"; deshalb gewinnt die Verwendung dreidimensionaler Filme besonders Gewicht.
3) Modelle in verkleinertem Maßstabe sind ebenfalls von großem Werte.
4) Mikrofilme könnten das individuelle Studium erleichtern.
5) Die Stadtplanung sollte besonders gefördert werden mittels der Verwendung von — Pläne und Modelle ergänzenden — Luftraumaufnahmen.
6) Komplette Verzeichnisse der neuesten Baumaterialien sind aufzustellen.
7) Bandaufnahmen wichtiger Vorlesungen über Architektur sollen mehrsprachig zur Verfügung stehen.
8) Die Herausgabe eines Mitteilungsblattes spezieller Art ist anzustreben.

Die Idee zu einem Architektur-Museum ist nicht neu:

Kaiser HADRIAN errichtete auf dem Gelände seiner Villa bei ROM verkleinerte Nachbildungen berühmter Bauten aus den Provinzgebieten von Delphi bis Thessalien;

die NORWEGER rekonstruierten als Freiluft-Museum bei OSLO eine Art früher Trutzkirche und primitive Bauernwohnungen;

WATSON WILSON vereinte in SHELBURNE originelle Nachbauten historischer Strukturformen Amerikas (von der überdachten Brücke bis zum Einzimmer-Schulhaus).

FRANKLIN W. SMITH veröffentlichte 1891 den Entwurf zu einer „Nationalen Galerie der Geschichte und Kunst" in WASHINGTON, welcher große Monumente vergangener Zeiten in tatsächlichen Dimensionen (!) erträumte.

1954 faßte die Witwe ERICH MENDELSOHN's obigen Plan zu einem *Museum der Architektur*. Eben jetzt haben FORD-STIFTUNG und Amerikanisches Institut der Architekten beschlossen, ein Komitee zur weiteren Ausgestaltung ihres Entwurfes zu bestellen.

Zuschriften, welche dessen Ausführung diskutieren, sind an folgende Adresse erbeten:

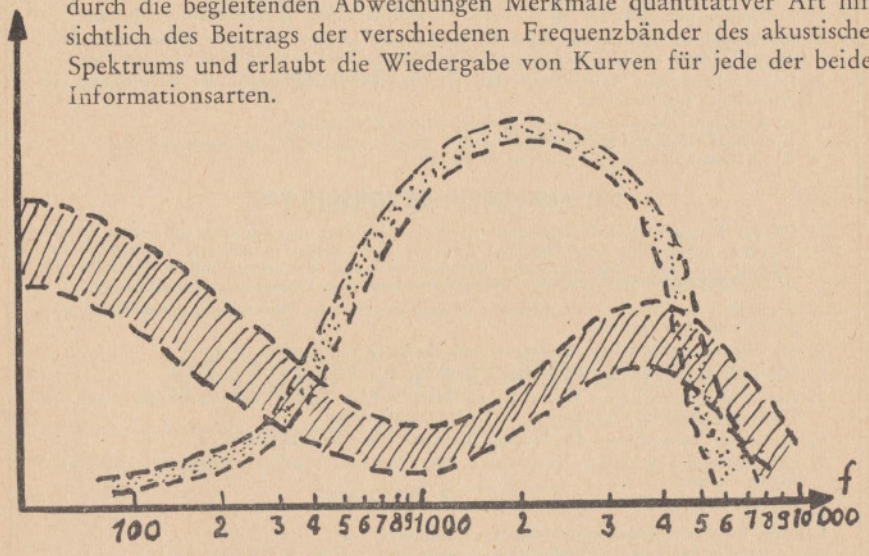
LOUISE MENDELSOHN,
2304-A Leavenworth Street
SAN FRANCISCO, KALIFORNIEN.

Nachtrag zu Heft Nr. VI

von

ANDRÉ MOLES

In meinem Artikel der Nr. VI der Gravesaner Blätter ist der Gebrauch des Albis-Terzfilters beschrieben, mittels dessen die Verteilung der semantischen und der ästhetischen Informationen innerhalb des musikalischen Signals untersucht wurde. Wenn wir in Betracht ziehen, daß das Prinzip der Trennung durch Filter darin besteht, daß das ursprünglche Signal einer Reihe von Umformungen unterworfen wird, welche auf die im Gesamtsignal einander überlagernden semantischen und ästhetischen Botschaften in verschiedener Weise einwirken, so ergibt der Vergleich der SO erhaltenen Resultate bei einer Gesamtheit von Personen, die gewissermaßen ein Model der üblichen Musikhörerschaft bedeutet, durch die begleitenden Abweichungen Merkmale quantitativer Art hinsichtlich des Beitrags der verschiedenen Frequenzbänder des akustischen Spektrums und erlaubt die Wiedergabe von Kurven für jede der beiden Informationsarten.



Der objektiv erkennbar definierte Teil des Signals entspricht der semantischen Botschaft und zeigt den Anteil der verschieden hohen Frequenzbandbereiche an der Verständlichkeit der Botschaft (Striche zwischen den beiden Linien). Der eigentlich ästhetische, dem „Vergnügen" verhaftete Teil der Botschaft kann gleichermaßen mittels der Darstellung eines Kontinuums der ästhetischen Werte der verschiedenen Umwandlungen des Signals „geschätzt" werden, indem man diese gemäß den der Hörerschaft unbewußt bleibenden relativen Bevorzugungen der einzelnen Veränderungen des akustischen Spektrums klassifiziert. Unter diesen Voraussetzungen erhält man durch einen sorgfältigen deduktiven Verzicht die Figur, welche den in den verschiedenen Höhenbereichen erfolgten Veränderungen der ästhetischen Informationen entspricht (punktiertes Gebiet zwischen zwei Linien). Die in diesen beiden Verteilungskurven verdichteten Resultate sind von großer Bedeutung für die Anwendung der Informationstheorie auf die Musik. Sie werden bekräftigt durch die anderen elektroakustischen Methoden, welche dazu beitragen, diese Verteilung auf die Klangmusterkarte durchzuführen (Inversion, Beschneidung etc.).

Probleme des Hörens

von

FRIEDRICH TRAUTWEIN

Es ist interessant, daß gegenwärtig die Gehörforschung auch durch die Bedürfnisse der Schallübertragungstechnik, der Raum- und Bauakustik u. a. große Bedeutung gewonnen hat, durch Fragen: wie genau die elektroakustische Übertragung arbeiten muß, welche Toleranzen das Gehör zuläßt u. a. Namhafte Akustiker — Erwin Meyer 1.), R. Feldtkeller 2.), G. von Bekesy 3.), Lothar Cremer 4.) — haben Untersuchungen über die Leistungsfähigkeit des Gehörs angestellt, die sich nach dem heutigen Stand der Erkenntnis vielfach darauf beschränken mußten, Tatsachen festzustellen, ohne dafür physikalische Erklärungen geben zu können. Unsere Erkenntnisse über die Physiologie des Gehörorgans und dessen physikalische Wirkungsweise sind wesentlich geringer als die analogen über das Auge. Von dem Auge haben wir seit Leonardo da Vinci in der Camera obscura ein Analogiemodell und die Fotografie kennt heute sogar eine Analogie zum Farbsehen. Eine apparative Analogie des Ohres gibt es noch nicht und ist auch nach dem heutigen Stand der physikalischen Erkenntnis und technischen Gestaltbarkeit noch nicht möglich. Anwendungsgebiete gäbe es für ein solches Gerät.

Solange wir uns auf die Feststellung des phänomenologischen Befundes und die Ermittlung statistischer Durchschnittswerte über die Leistung des Gehörs beschränken müssen, widerspricht es nicht naturwissenschaftlicher Exaktheit, Arbeitshypothesen über eine vermutliche physikalische Wirkungsweise der physiologischen Vorgänge aufzustellen. Ein klassisches Beispiel ist die von *Helmholtz*[5]) vertretene Resonanzhypothese des Hörens.

---

[1]) vgl. z. B. den zusammenfassenden Bericht von *G. Schodder,* Subjektive Effekte in der Raumakustik; Gravesano, Musik, Raumgestaltung, Elektroakustik, Ars viva Verl. Mainz.

[2]) *R. Feldtkeller,* Tonempfindungsstufen und Frequenzgruppen. Tagung der Nachrichtentechn. Gesellschaft Karlsruhe 1955, Bericht in Hausmitteilungen des NWDR 7 (1955) 202.

[3]) *G. v. Bekesy,* Über die Schwingungen der Schneckentrennwand beim Präparat und beim Ohrmodell, Akust. Zeitschr. 7 (1943) 173.

[4]) a) *Lothar Cremer:* Kongreß-Bericht Lüneburg 1950: „Über unser zweifaches Tonhöhenempfinden".

b) *L. Cremer* und *L. Schreiber:* Mitteilung aus dem Institut für Technische Akustik der Technischen Universität Berlin: „Über die verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten von akustischen Spektren".

[5]) *v. Helmholtz,* Die Lehre von den Tonempfindungen; Mathematische Prinzipien der Akustik.

Helmholtz wußte sehr wohl, daß die Dimensionen der Fäserchen der Basilarmembran als Masse und Feder (oder als Induktivität und Kapazität) eine Erklärung als eigenschwingungsfähige Gebilde kaum zulassen und daß die hohe Selektivität der Frequenzerkennung nicht mit der extrem kurzen Ein- und Ausschwingzeit beim Hörvorgang in Einklang zu bringen ist. Trotzdem ist es nicht unzulässig, einen physikalisch bekannten Vorgang zum Vergleich heranzuziehen, wenn man ihn auf das Vergleichbare beschränkt. Richtig ist jedenfalls, daß auf der Basilarmembran die Frequenz als Funktion der Länge dargestellt wird. v. Bekesy[3]) hat diese Tatsache durch anatomische Präparierung eines Ohres nachgewiesen und dabei eine zuvor physikalisch noch wenig erforschte Art der Frequenzselektion in einer in ein konisches Gefäß eingeschlossenen Flüssigkeit entdeckt. Er hat auch ein mechanisches Analogiemodell gebaut, das zwar den physikalischen Vorgang zu demonstrieren geeignet ist, aber eine technische Durchbildung zu einem Frequenzanalysator nicht ermöglicht. In einem (unveröffentlichten) Briefwechsel des Verfassers mit v. Bekesy hält dieser es für unwahrscheinlich, einen Frequenzanalysator in der Form eines Analogiemodells des Ohres technisch durchzubilden, u. a. weil kein Material für eine sehr dünne und kleine Membran bekannt ist, das von der Flüssigkeit, mit der es ständig in Berührung ist, nicht angegriffen wird.

I.

Die Klangfarbenempfindung

Die Lokalisierung der Frequenzen auf der Basilarmembran ist als Bestimmung der absoluten Frequenzen auf diesem Teil des inneren Ohres zu deuten. Daß nur wenige Menschen über das absolute Tonhöhenbewußtsein verfügen, erscheint nach dieser Erkenntnis widerspruchsvoll. Aber die Natur hat dem Menschen die Fähigkeit der absoluten Frequenzerkennung primär nicht für die Musik, sondern für die Sprache verliehen, die ja entwicklungsgeschichtlich weiter zurückliegt. *Die Klangfarben* der Sprachlaute und der ihnen physikalisch verwandten Musikinstrumentenklänge *sind durch die absoluten Frequenzen* der in jeder Periode der Grundschwingung vorkommenden sogenannten *Formantschwingungen* gekennzeichnet. Der Klang ist ein zweischichtiges Phänomen: Klangfarbe und Tonhöhe. Für die Sprachlaute ist die Tonhöhe, in welche die Formanten eingebettet sind, nebensächlich. Geflüsterte Vokale und die Konsonanten bestehen aus unperiodisch erregten Formanten bezw. Formantbereichen ohne Tonhöhe. Jeder Vokal ist unabhängig von der Tonhöhe, auf der er gesungen oder gesprochen wird, definiert. Das Kleinkind erkennt zuerst die Sprachlaute, gleichviel ob sie der Vater oder die Mutter eine Oktave höher spricht oder singt und wiederholt sie selbst noch etwa eine Quinte höher. Das musikalische Tonhöhenbewußtsein kommt später. Höher entwickelte Tiere erkennen Klangfarben,

aber keine musikalischen Tonhöhen. Der Sprachgebrauch hat unabhängig von der Wissenschaft, die die Schwingungsnatur des Lichtes und das Farbsehen als das Erkennen der absoluten Frequenz im visuellen Bereich definiert, den analogen Vorgang der absoluten Frequenzerkennung im akustischen Bereich zutreffend mit Klang„farbe" bezeichnet.

Unser Gehör empfindet den einfachen Schwingungsvorgang, also etwa eine Sinusschwingung von z. B. 1000 Hz gemeinhin nicht nach der absoluten Tonhöhe, während es die Frequenz 1000 (wenn sie als Formantschwingung innerhalb jeder Periode eines Vorganges von einer tieferen Periodizität z. B. 200 Hz vorkommt) eindeutig als helles A erkennt. Wäre die Formantfrequenz ca. 500 Hz, wäre es ein U, 600 Hz ein O, 2000 Hz ein E, 4000 Hz ein I. Zu diesen Hauptformanten kommen noch Nebenformanten hinzu. Änderungen der Formantfrequenz um ca. 8 % werden als Änderung des Vokalcharakters empfunden. Zur Aufklärung dieses Verhaltens muß man die Frage nach der Reaktionsgeschwindigkeit der Tonhöhenempfindung stellen. Verfasser beantwortet sie wie folgt: wenn man aus einer Tonaufzeichnung von z. B. 1000 Hz (Lichtton oder Magnetton) ein schmales Stück ausschneidet, das gerade 2 Perioden (mit der Sinusphase beginnend) enthält, es auf Inaktivband klebt und ablaufen läßt, so hat man eine deutliche Tonhöhenempfindung. Ähnliches erreicht man, wenn auf einem gleich kurzen Stück höherfrequente Vorgänge von entsprechend höherer Anzahl von Perioden aufgezeichnet sind. Läßt man diese Aufzeichnungen schneller laufen, so daß dem Gehör weniger als 2 ms zur Frequenzerfassung bleiben, so geht die Kurztonempfindung bald in eine Knallempfindung über. Unser Gehör ist also in der Lage eine Schwingung von entsprechend hoher Frequenz in ca. 2 ms als Tonhöhe wahrzunehmen. In dem vorigen Beispiel, in welchem der Vokal A mit dem (Haupt-) Formanten 1000 Hz auf der Tonhöhe 200 Hz gesungen — oder elektronisch gebildet — wurde, hat das Gehör bereits in ca. 40 % der Grundperiodendauer die Formantfrequenz 1000 Hz, also den Vokal A erfaßt. Erst in einem zweiten Akt nimmt *das Gehör* zur Kenntnis, daß sich die Formantfrequenz mit der Periode 200 Hz wiederholt, das heißt es *hört erst in zweiter Linie musikalisch*. Wir können in jede Periode des Grundtones hineinhören, vorausgesetzt, daß sie mindestens 2 ms dauert, also die musikalische Grundtonhöhe unter 500 Hz liegt. So erklärt sich auch die als Stumpf'scher Versuch[6]) bekannt gewordene Schwierigkeit, Instrumentalklänge voneinander zu unterscheiden, wenn der Klangbeginn, der Einschwingvorgang, abgeschnitten wird. Stumpf ließ Violin-, Trompeten- und Oboenklang von einem Zimmer ins andere übertragen, wobei durch ein Rohr eine Verbindung hergestellt war, die man mittels eines Hahnes öffnen und schließen konnte. Wurde die Verbindung erst nach Beginn der Klänge freigegeben, so konnte man die 3 Instrumente

[6]) *C. Stumpf*, Die Sprachlaute.

nicht voneinander unterscheiden. Mit elektroakustischen Mitteln ist dieser Versuch leicht zu wiederholen, indem man mit dem Lautstärkeregler eines Verstärkers erst nach dem Klangbeginn einblendet. Dabei kann man aber feststellen, daß der Stumpf'sche Effekt bei musikalischen Tonhöhen oberhalb der eingestrichenen Oktave eintritt. In tieferen Lagen kann man auch bei abgeschnittenem Einschwingvorgang die Klangcharaktere unterscheiden. Wir wissen jetzt, warum dem so ist: weil man unterhalb der zweigestrichenen Lage in die Grundtonperiode hineinhören kann. Für höhere musikalische Tonhöhen hat das Gehör an dem Einschwingvorgang ein Ersatzkriterium, sofern sich die verschiedenen Instrumente in den Einschwingvorgängen unterscheiden. Schneidet man dieses Unterscheidungsmerkmal ab, so verliert das Gehör die Erkennungsfähigkeit. Verfasser bezeichnet die kürzeste zur Tonhöhenerkennung erforderliche Zeit als „Gnostikzeit" (zur Abgrenzung gegen eine Veröffentlichung von Bürck, Kotowski und Lichte[7]), die bei Untersuchungen über ein ähnliches Problem „Kennzeiten" von etwas größerer Dauer ermittelt haben). Auch in der Übertragungstechnik ist man bei der automatischen Dynamikregelung auf den Grenzwert 2 ms gestoßen, der zulässig ist für die vorübergehende Überhöhung der Übertragungsdynamik über die festgelegte Grenze.

In Bild 1 ist der Versuch gemacht, die Gehöreigenschaften als Funktion der Zeit bezw. der Frequenz darzustellen. Außer der Gnostikzeit muß man

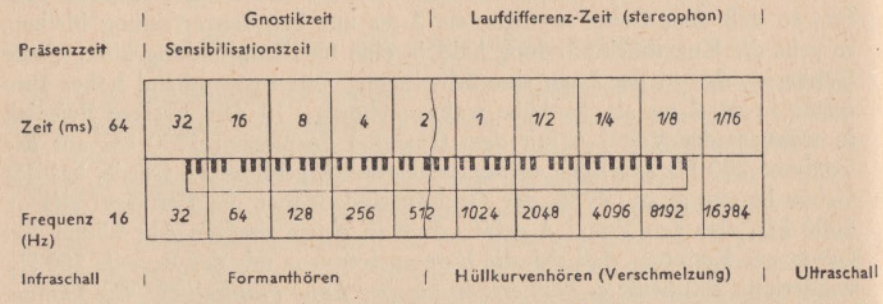


Bild 1 Darstellung wichtiger Gehöreigenschaften als Funktion von Zeit und Frequenz.

wahrscheinlich noch eine etwas längere, die „Sensibilisationszeit" annehmen für den Übergang aus der Ruhe zur Wahrnehmung. Diese Zeit kann man durch den Willen abkürzen. Aus dem starken Ineinandergreifen physiologischer und psychologischer Wirkungsweisen sind vermutlich auch die Unterschiede in den Beobachtungen („Kennzeit" und „Gnostikzeit") zu erklären. Daß im Laufe einer Wahrnehmung die Gnostikzeit mit 2 ms und

[7]) *Bürck, Kotowski* und *Lichte*, Ann. d. Phys. 25 (1936) 433—449.

weniger maßgebend ist, darf jetzt als gesichert angenommen werden. Die sogenannte Präsenzzeit ist der reciproke Wert der tiefsten hörbaren Frequenz (16 Hz). Sie bedeutet in der Akustik das Analogon zu der Kinofrequenz (16 Bilder / s), nämlich die Grenze zwischen Einzelwahrnehmung und Verschmelzung aufeinanderfolgender Vorgänge.

Die Arbeitshypothese der Gnostikzeit findet auch in neurophysiologischen Untersuchungen von *Galambos* und *Davies*[8]) eine Stütze, die in den USA während des Krieges durchgeführt und in Deutschland weniger bekannt wurden. Danach vollzieht sich die Sinneswahrnehmung (nicht nur die des Gehörs) in der Weise, daß vom Zentralorgan her radarartige Impulse zur Abtastung der Zustände an den Sinnesorganen ausgehen. Die Impulsfrequenz liegt in der Ruhe bei ca. 500 Hz, steigert sich sofort beim Beginn eines Sinnesreizes auf einige Tausend und hält sich während der Dauer des Reizes etwa auf 1000 Hz. Die Aktivität liegt also ganz beim Zentralorgan. Das Sinnesorgan „telegraphiert" nicht zum Zentralorgan. Aufschlußreiche Untersuchungen über die Reagibilität des Gehörs wurden auch von *Sala*[9]) durchgeführt, die nicht von sinusförmiger Erregungsweise (welche in der Akustik lange bevorzugt wurde) ausgeht, sondern von impulsförmiger. Sala hat interessante Analogien von Resonanzkreisen zur Wirkungsweise des Gehörs gefunden, die wie eine nachträgliche Stütze der Resonanzhypothese des Hörens erscheinen.

Die Annahme einer Gnostikzeit von ca. 2 ms liefert auch eine wahrscheinliche Aufklärung des Klangumbruchs der Klarinette, der an der Grenze der ein- und zweigestrichenen Oktave liegt. Der Klarinettenklang — ähnlich dem Gedackt der Orgel — ist durch den gegenphasig gleichen Verlauf der Formantschwingungen in den ungeraden und geraden Halbperioden der Grundtonhöhe gekennzeichnet. Bis ca. 500 Hz erkennt das Gehör die Phasenumkehrungen, da es in die Grundperiode hineinhören kann, und bezeichnete diese Empfindung als hohl. Oberhalb 500 Hz bestimmt die Hüllkurve der der Flöte ähnelt, wird auch der Klangcharakter flötenähnlich. Nach der strengen Definition der Klangfarbe als Element der absoluten Frequenz in der Musik müßte man den Klarinettenklang nicht als Klangfarbe, sondern etwa als Klanggruppe bezeichnen.

Wollte man die Terminologie „Klanggruppe" einführen, so müßte man zunächst zwei Gruppen unterscheiden: die der ganzperiodischen Schwingungen, das sind solche, bei denen alle Harmonischen möglich sind; und

[8]) *R. Galambos* und *H. Davies*, J. Neurophys. 6 (1943) 39.

[9]) *O. Sala*, Objektive und subjektive Resonanzeffekte bei kurzdauernden Impulsfolgen, Frequenz 5 (1951) 250—258.

— — Psycho-physische Konsequenzen elektro-akustischer Klangsynthesen, Frequenz 5 (1951) 13—20.

die der halbperiodischen (mit Phasenumkehrung nach jeder Halbperiode) antisymmetrischen Schwingungen, bei denen nur ungeradzahlige Harmonische möglich sind. Bei der Orgel entsprechen den ersteren die Prinzipalregister, offene Labialpfeifen, den letzteren die oben geschlossenen Labialpfeifen, die Gedacktregister. Diese beiden Klanggruppen finden in der Musikalischen Elektronik ihre volle Analogie. Man kann auch in der Musikalischen Elektronik von Prinzipal- und Gedacktklängen sprechen. Um die babylonische Sprachverwirrung zwischen Physik und Musik nicht weiterzuführen, sollten neue Bezeichnungen vermieden werden, die dem allgemeinen Sprachgebrauch zuwiderlaufen oder in ihm nicht vorhanden sind. (Es ist schlimm genug, daß die Physik z. B. dem Wort „Ton" eine Bedeutung beilegt, die es in der „Ton"-Kunst überhaupt nicht gibt, nämlich die Beschränkung auf Sinusschwingungen. Sinusschwingungen, reine obertonlose Töne, sind in der Musik so schädlich wie destilliertes Wasser als Getränk. Die Physik käme mit dem Wort „Teilton" völlig aus und könnte den „Ton" der Tonkunst ganz überlassen. Teilton als Synonym für Harmonische genügt. Der erste Teilton ist das gleiche wie die erste Harmonische, nämlich der Posten der wesentlichen Periode in der Fourier'schen Reihe). Wenn man terminologisch koordiniert, was z. T. begrifflich subordiniert gehört, so begeht man keinen Fehler, wenn die Definitionen klargelegt sind, und man gewinnt an Verständlichkeit. Sprechen wir also von „Formantklangfarben" als von Klängen, die durch die Konstanz der innerhalb jeder wesentlichen Periode bei veränderbarer wesentlicher Frequenz vorkommenden Schwingungen (die Formanten) gekennzeichnet sind, von „Prinzipalklangfarben", charakterisiert durch Zerlegbarkeit in Teiltöne, wobei *alle* Harmonische möglich sind; und von „Gedacktklangfarben", gekennzeichnet durch eine Zerlegbarkeit in Teiltöne, wobei nur ungeradzahlige Harmonische möglich sind. Auf „Formant-Prinzipalklangfarben" treffen Formant- und Prinzipalkennzeichen zu. Analoges gilt für „Formant-Gedacktfarben". Orgelpfeifen sind nahezu formantlos; „Orgel-Prinzipalklangfarben" haben im wesentlichen sägezahnförmige, „Orgel-Gedacktklangfarben" mäanderförmige Oszillogramme. Bild 2 zeigt Schwingungsformen und die ihnen entsprechenden Terminologien.

Die elektronische Darstellung von (Formant-) Klangfarben, die erstmals dem Verfasser im Jahre 1930 gelungen ist[10]), kann man als den Anfang der Musikalischen Elektronik bezeichnen. Für frühere Versuche, die sich nur elektrischer, nicht elektronischer Methoden bedienten, oder, sofern sie Röhrengeneratoren einsetzten, das Formantprinzip noch nicht anwendeten, ist die Bezeichnung „Musikalische Elektronik" noch nicht am Platze.

[10]) *F. Trautwein,* Elektrische Musik, Veröffentlichungen der Rundfunkversuchsstelle bei der Musikhochschule Berlin, Herausg. *G. Schünemann,* Berlin, Weidmannsche Buchhdlg. 1930.

Bild 3 zeigt das Blockschema des ersten elektronischen Klangerzeugers, mit dem es gelungen ist, bekannte Klangfarben mit überzeugender Ähnlichkeit nachzubilden. Nicht nur Flöten-, Oboen-, Fagott- usw.-Klänge, sondern auch der ganze Nimbus der Geigenklänge sind elektronisch darstellbar.

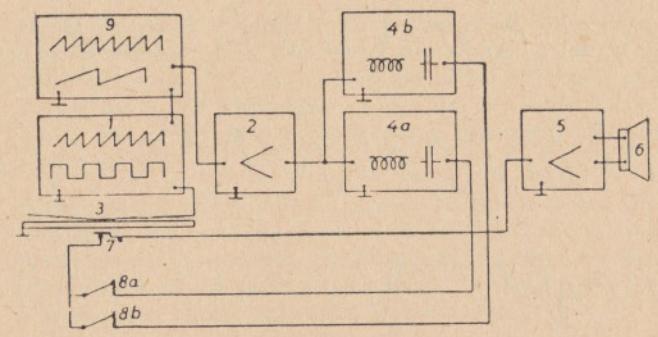


Bild 3 Blockschema einer Mixtur-Trautonium-Stimme. 1. Kippschwingungsgenerator (wahlweise unsymmetrisch und antisymmetrische Stoßform), 2. Entkopplung, 3. Manual, 4a, 4b. Formanten, 5. Verstärker, 6. Lautsprecher, 7. Druckregler (Einblendung), 8a, 8b. Dynamikpedale, 9. Subharmonische Synchronisation.

Um die Nachbildungen bekannter Klangfarben zu vervollständigen, wurden auch Schaltungen zur elektronischen Darstellung von Gedackt- (Klarinetten-) Klangfarben entwickelt. Hierzu bieten sich verschiedene Möglichkeiten. Man kann von einer sägezahnförmigen Schwingung hoher Amplitude ausgehen, durch diese ein Amplitudensieb leiten, so daß der Steilheitsunterschied zwischen Anstieg und Abstieg wenig ins Gewicht fällt und eine Rechteckschwingung entsteht. Man kann einen Rechteckgenerator (z. B. einen Multivibrator) verwenden, man kann eine Sägezahnschwingung zu einer zweiten Sägezahnschwingung von halber Amplitude und entgegengesetzter Phase addieren u. a. m. Am bequemsten zum Ziel führt ein Zweieruntersetzer. Dieser teilt bekanntlich eine Schwingung in ungerad- und geradzahlige Perioden auf. Es ist schaltungstechnisch leicht, den geradzahligen Perioden den phasenumgekehrten Verlauf zu erteilen wie den ungeradzahligen. Bild 4 zeigt eine solche Schaltung. Man erkennt, daß bei dieser Art der Gedacktumformung die Suboktave der Ausgangsschwingung entsteht. Die Analogie zu den Orgelpfeifen liegt auf der Hand: durch Abdecken einer offenen Pfeife entsteht die Suboktave als Gedacktklang. Es kann jede beliebige periodische Schwingung in die Suboktave sowohl der Prinzipal- wie Gedacktform umgewandelt werden. Z. B. kann eine mikrophonisch aufgenommene Frauenstimme ohne Änderung der Klangfarben (Vokale) in eine Männerstimme umgewandelt werden mit oder ohne Ge-

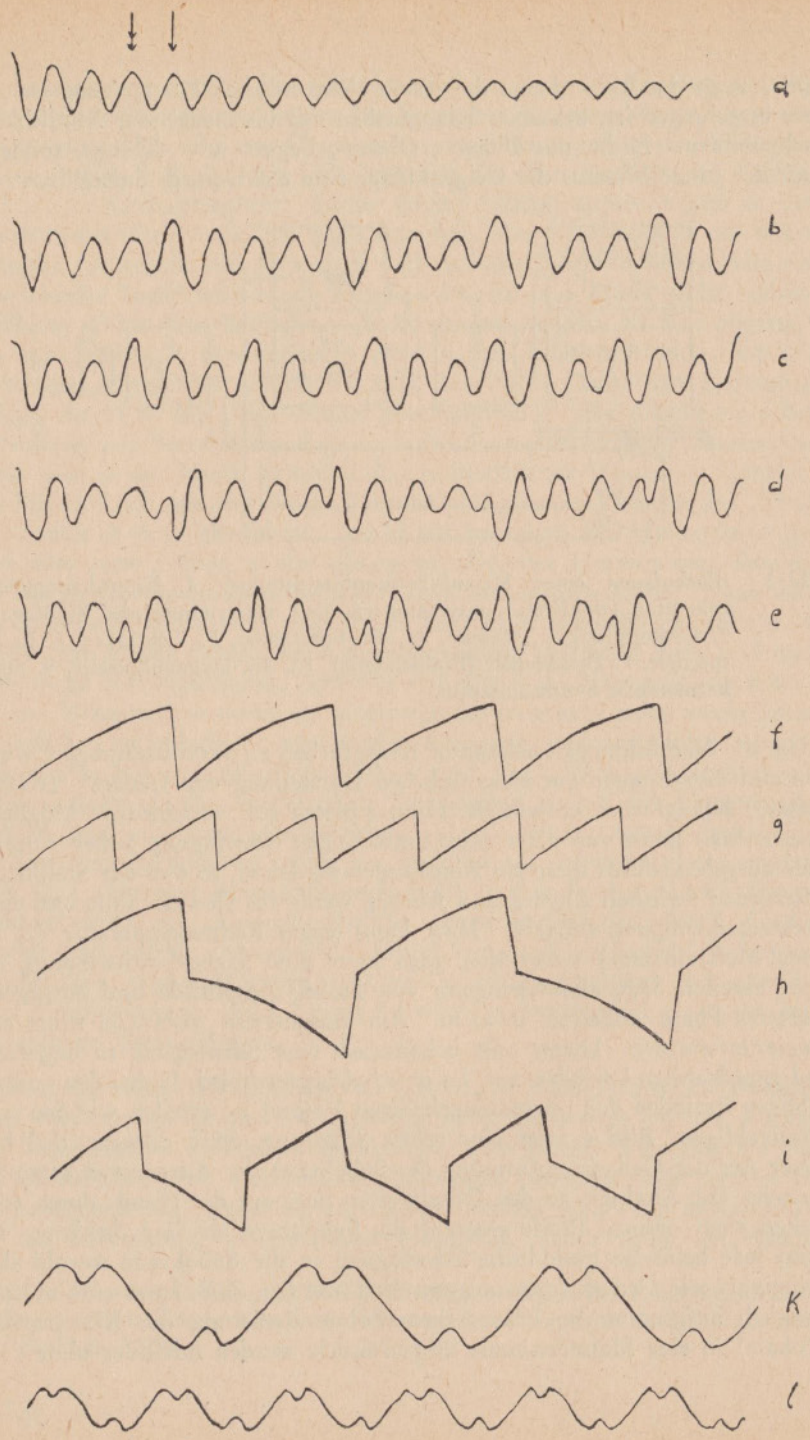


Bild 2 Schwingungsformen von Klangfarben

Reihe a: Schwingungsbild einer Fortmantschwingung. Die meisten Formantklangfarben sind durch mehrere Formanten gekennzeichnet. Hier ist zur Vereinfachung der Darstellung nur ein Formant angenommen.

Reihe b: Durch periodische Wiederholung der Schwingungsform Reihe a entsteht eine Formantklangfarbe. Von der Reihe a wird so viel in die Reihe b übernommen, als in einer Periode der Tonhöhe von b untergebracht werden kann. Die Schwingung a wird also so weit von hinten her gekürzt, daß sie in der Grundperiode von b untergebracht werden kann (Prinzipaltyp).

Reihe c: Gleiche Klangfarbe wie Reihe a, aber höhere Tonhöhe. Die Formantschwingung ist, um sie in der Periodizität der Reihe c unterzubringen, noch mehr als in b gekürzt. Die Schwingungsbilder von Formantklängen gleicher Klangfarbe aber verschiedener Tonhöhen sind nicht ähnlich, ergeben daher auch verschiedene Fourieranalysen.

Reihe d: Gleiche Klangfarbe wie Reihe b, aber im Gedackt und eine Oktave tiefer.

Reihe e: Gleiche Klangfarbe wie Reihe c, aber im Gedackt und eine Oktave tiefer.

Reihe f: Formantlose Prinzipalklangfarbe. Exponentialanstieg der Schwingungsform.

Reihe g: Formantloser Prinzipal gleicher Klangfarbe wie Reihe f, aber höhere Tonhöhe.

Reihe h und i: Für formantlose Gedacktklänge, entsprechend den Reihen f und g, gilt Analoges wie für formantlose Prinzipalklänge. Auch formantlose Prinzipal- und Gedacktklänge haben ihre einheitliche Klangfarbe bei Veränderung der Tonhöhe nicht durch Ähnlichkeit der Schwingungsbilder (entsprechend Verhältnisgleichheit der Fourierkoeffizienten), sondern durch die Gleichheit des in jeder Grundtonperiode unterzubringenden Teiles des Schwingungsbildes. Für die elektronische Klangerzeugung sind die Schwingungsformen gemäß Reihen f und g und die entsprechenden Gedacktformen h und i die günstigsten Formen der Urschwingung. Sie sind gekennzeichnet durch Beibehaltung der Zeitkonstante bei Veränderung der Tonhöhe. Das hat zur Folge, daß die Amplitude mit der Tonhöhe abnimmt. Dieses Charakteristikum entspricht den Gehöreigenschaften.

Reihe k: Mixturschwingung, tiefe Tonhöhe.

Reihe l: Mixturschwingung höherer Tonhöhe als Reihe k. Die Schwingungsbilder von Mixturklängen bei verschiedenen Tonhöhen sind ähnlich, die Fourierkoeffizienten verhältnisgleich. Mixturen können daher (und nur diese!) aus harmonischen Teiltönen zusammengesetzt werden. Bei Änderung der Tonhöhe verändert sich auch die Klangfarbe. Das Gehör kann die Teiltöne der Mixturen zumeist einzeln erkennen.

dacktcharakter. Der Anschluß elektronischer Methoden an die Vokalmusik ist an diesem Beispiel aufgezeigt.

Es erschien weiterhin als eine reizvolle Aufgabe, *neue* Klangfarben elektronisch darzustellen. Die althergebrachten Instrumente sind ja an ihre festen Klangfarben gebunden. Das Vorbild der Sprache, die Veränderbarkeit der Klangfarbe — das wesentliche Element des Sprachorgans —, wurde noch von keinem Musikinstrument erreicht. Physikalisch-technische und

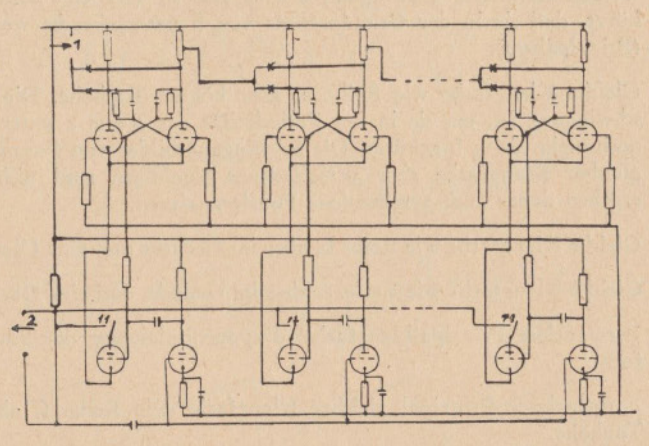


Bild 4 Zweierpotenzuntersetzer mit Wähler für beliebige Subharmonische

Die obere Doppeltriodenreihe ist eine bekannte Zählerschaltung nach dem Prinzip des Zweierpotenzuntersetzers. Bei 1 wird die Bezugsfrequenz zugeführt, bei 2 die Subharmonische abgenommen. Die untere Doppeltriodenreihe ist eine Koinzidenzschaltung. Mittels der Schalter 11, 12, ... 19 wird die geforderte Subharmonische nach dem Zweierpotenzsystem gewählt. Z. B. für die 100. Subharmonische müßte man die Schalter 16, 15 und 12 schließen. Wenn die Gitter der zu diesen Schaltern gehörenden Röhren alle negativ sind, ist die geforderte Subharmonische vorhanden. Der Punkt 2 wird plötzlich positiv, die Anoden der rechten Röhre der unteren Reihe werden negativ und stellen die Gitter aller linken Röhren der oberen Reihe auf negatives Potential, das ist die Ausgangsstellung.

hörpsychologische Studien zeigten aber, daß grundsätzlich neue Klangfarben mit der Schaltung nach Bild 3 nicht erreicht werden. Wohl können zahlreiche Zwischenstufen von Formantfrequenzen und -kombinationen besetzt werden, die in althergebrachten Instrumenten nicht vorkommen, wohl sind die elektronisch gebildeten Klangfarben klarer, wandlungsfähiger als die alten. Aber die spontane Hörerreaktion auf neue Klangfarben dieser Art war immer der Vergleich mit dem Bekannten: flötenähnlich, violoncelloähnlich, klarinettenähnlich usw. Das Kleben an dem Bekannten ist

eine so gewichtige psychologische Tatsache, daß eine Neuheit sehr ausgeprägt sein muß, wenn sie als solche erkannt wird. Skurrile oder primitive, etwa aus Sinusschwingungen zusammengesetzte Klangkombinationen (Mixturen) o. ä. konnten und können den Weg in klangliches Neuland nicht weisen. Man darf indes das hörpsychologische Urteil des geringen Unterschiedes zwischen den althergebrachten und den nach Bild 3 erzeugten Klängen nicht als menschliche Schwäche abtun. Es hat bei genauerer Betrachtung auch eine physikalisch beachtliche Richtigkeit: die Analogie der mechanischen und elektrischen Schwingungsvorgänge muß auch zu analogen Hörempfindungen führen. Der Ersatz von Masse und Feder durch Induktivität und Kapazität ist eben nur ein Ersatz. Er ist in dem oben definierten Sinne nicht elektronisch, sondern elektrisch und es zeigt sich hier, daß die „Prinzipienreiterei" nicht falsch ist. Durch die Wechselwirkung von Masse und Feder und ebenso von Induktivität und Kapazität entstehen sinusförmig gedämpfte Schwingungen und keine anderen Bewegungsformen. Dieses einheitliche Merkmal erkennt das Gehör als Verwandtschaft. Um sehr viel differenziertere Formantschwingungen zu bilden, muß man das elektronische Prinzip in reiner Form anwenden. Bild 5 zeigt eine Anordnung, bei der

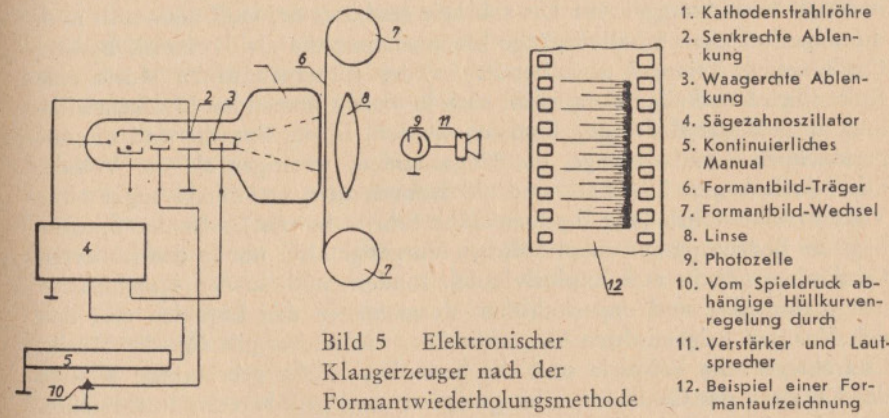


Bild 5 Elektronischer Klangerzeuger nach der Formantwiederholungsmethode

ein Elektronenstrahl nach einer Schablone (einem „Programm", das der Musiker aufzeichnet) bewegt oder modifiziert wird. Mit dieser Anordnung, deren physikalische Richtigkeit in dem elektroakustischen Experimentalstudio Hermann *Scherchen* in Gravesano (Schweiz) durch den Verfasser erprobt worden ist[11]) — musikalische Studien stehen noch aus — oder mit ähnlichen rein elektronischen Methoden, die auch andere als sinusförmige

[11]) *F. Trautwein,* Gravesaner Blätter 2/3 (1956), Ars viva Verlag Hermann *Scherchen,* Mainz.

Bewegungen realisieren, kann erst das Ideal einer Klangfarbenmusik in greifbarere Nähe gerückt werden.

Zur Vervollständigung der Terminologie der Klangfarben und in Konzession an den allgemeinen Sprachgebrauch muß noch von „Mixturklangfarben" gesprochen werden. Mit einer Definition der Klangfarbe als frequenzkonstantem Element steht die Mixtur im Widerspruch, da sie ja nicht die Frequenz, sondern Frequenzverhältnisse über den ganzen Tonhöhenumfang konstant hält.

Die Mixturen sind für die Orgel charakteristisch, für das was man gemeinhin als Orgelklangfarbe bezeichnet. Es sind nicht nur die als Mixturen bezeichneten Register, die diesen Klangeindruck hervorrufen, sondern auch die Verschiedenheit der Fußtöne wirkt in gleicher Weise, denn es entstehen dabei ja parallel laufende Akkorde über den ganzen Tonhöhenbereich. Elektrische und elektronische Orgelimitationen, denen Formantklangfarben (entsprechend den Zungenregistern) fehlen, machen deshalb einen orgelartigen Eindruck, weil sie das Mixturprinzip durch vielfältiges Parallelschalten harmonischer Intervalle weitgehend anwenden.

Zu dieser weiten Fassung des Klangfarbenbegriffs, der durch Unterteilung in Sonderbezeichnungen vor Unexaktheit geschützt ist, muß man auch noch die unperiodischen Schallvorgänge hinzunehmen, die als Trommel, Becken, Castagnetten, Triangel u. ä. bereits in der althergebrachten Musik eine Rolle spielen und aller Voraussicht nach in einer kommenden Musikentwicklung zu größerer Bedeutung kommen werden. In der Sprache sind die unperiodischen Schallvorgänge, die Konsonanten, wichtiger als die Vokale. Die Schrift kennt 5 Vokale und 20 Konsonanten und bleibt sogar ohne Vokale verständlich (wie die hebräische Schrift beweist). In der Sprache liegt die Bedeutung der unperiodischen Vorgänge nicht nur in den isolierten Geräuschen (Zisch- und Explosivlaute), sondern auch in den Kombinationen periodischer und unperiodischer Vorgänge, in den Liquiden und den den Vokalen beigemischten Geräuschteilen. Ähnliches gilt für die Musik. Charakteristische Beispiele sind die besonders häufig gebrauchten Klänge des Klaviers, des Cembalos, aller gezupften und geschlagenen Instrumente. War das elektronische Grundelement des Klanges der Impulsgenerator, so ist es für die unperiodischen Vorgänge der Rauschgenerator. Durch Frequenz- und Amplitudenmodifikationen wird vielfältige Gestaltbarkeit erzielt.

Auch der (künstliche oder natürliche) Nachhall kann in dieser weitgefaßten Definition dem Klangfarbenbegriff zugezählt werden. Was die Pioniere der neuen Musik unter Farbigkeit verstehen, was vermutlich Schönberg mit seiner Zukunftsphantasie der Klangfarbe gemeint hat, ist das Zusammenwirken all der vorstehend besprochenen Schallerscheinungen, die mit elektronischen Mitteln beliebig gestaltbar zur Verfügung stehen.

II.

Die Harmonieempfindung

Zur Erklärung der physiologisch-physikalischen Wirkungsweise der Konsonanz- und Dissonanzempfindung ist von v. Helmholtz die bereits widerlegte Hypothese der Tonverwandtschaften aufgestellt worden. Stumpf, Riemann, v. Oettingen und andere Forscher haben andere Hypothesen aufgestellt, die schon ihre Autoren wenig befriedigten und deren historische Darlegung hier zu weit führen würde. Hier sei eine in den alten z. T. enthaltene, z. T. neue Arbeitshypothese aufgestellt, die wie die Resonanzhypothese der Tonhöhenerkennung von einem ähnlich wirkenden physikalischen Gerät ausgeht. Die Natur gibt uns die Fähigkeit, schnelle Bewegungen der Luft, in der wir leben, durch das Gehör wahrzunehmen und auf diese Weise die Vorgänge in unserer Umgebung zu erkennen. Die Intensitätsunterschiede dieser Luftbewegungen verhalten sich wie Eins zu einer Billion. An der unteren Grenze geht die Natur bis dicht an die Brown'schen Molekularbewegungen heran, so daß wir außerordentlich kleine Schallintensitäten wahrnehmen können (10^{-16} W/cm²) und wir können den lautesten Donner hören, ohne daß unser Ohr Schaden nimmt (10^{-4} W/cm² und mehr). Die elektroakustische Übertragungstechnik hat zur Bewältigung eines großen Dynamikbereiches die automatische Dynamikregelung und die Fadingkompensation entwickelt, bei welcher die ankommende Schwingung den Verstärkungsgrad automatisch regelt, derart, daß er bei großen Amplituden klein, bei kleinen groß wird. Diese Regelung ist nicht möglich ohne nichtlineare Verzerrungen. Um die Regelspannung zu gewinnen, muß die ankommende Wechselspannung gleichgerichtet und mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung behaftet werden. Diese Regelspannung verschiebt den Arbeitspunkt in einer Verstärkerstufe so, daß hohe Regelspannung in Gebiete geringer, kleine Regelspannung in Gebiete hoher Arbeitssteilheit führt. Die Steilheit der Verstärkung ist also nicht linear, Verzerrungen sind unvermeidlich. Man versucht sie in der Elektroakustik niedrig zu halten, aber sie sind vorhanden und um so stärker je größer die Amplituden sind. Sollte die Natur in unserem Gehör eine ähnliche Wirkungsweise anwenden? Die Bejahung dieser Frage ist die Arbeitshypothese, die sowohl die Weber-Fechner'sche Gesetzmäßigkeit der Intensitätswahrnehmung als auch die harmonische Prägnanzempfindung aufklären soll.

In der Übertragungstechnik bedient man sich zur automatischen Dynamikregelung und Fadingkompensation einer Regelröhre, das ist eine Verstärkerröhre mit exponentiellem Charakteristikverlauf. Geht man von der Reihe aus

$$e^z = 1 + z + (z^2 / 2!) + (z^3 / 3!) + \ldots\ldots, \qquad (1)$$

und betrachtet man, was uns hier besonders interessiert, die Übertragung von 2 Sinusschwingungen, deren Amplituden a wir als gleich annehmen

und deren Frequenzen wir mit h (high) und l (low) bezeichnen wollen, so können wir für z setzen a (sin h + sin l). Der erste Posten in (1) rechts entspricht physikalisch einem Ruhestrom, der zweite Posten einer unverzerrten Übertragung. Der dritte Posten (das quadratische Glied) wird zu:

$$(a^2 / 2!)\ (\sin h + \sin l)^2 = (a^2/2) - (a^2/4)\cos 2h - (a^2/4)\cos 2l - (a^2/2)\cos(h+l) + (a^2/2)\cos(h-l). \quad (2)$$

Auf der rechten Seite von (2) entspricht der erste Posten einer Gleichrichtung. Der zweite und dritte Posten liefern die doppelte Frequenz der ursprünglichen Schwingungen, der vierte Posten liefert die Summenfrequenz und der letzte die Differenzfrequenz. Für die Summen- und Differenzfrequenz heißt der Oberbegriff „Kombinationsfrequenz"; die entsprechenden Töne sind „Summentöne", „Differenztöne", „Kombinationstöne". Der quadratische Posten in (1) liefert keinen Beitrag zur unverzerrten Übertragung. Für das kubische Glied gilt

$$(a^3/3!)\ (\sin h + \sin l)^3 = (3a^3/8)\sin h + (3a^3/8)\sin l - (a^3/24)\sin 3h - (a^3/24)\sin 3l - (a^3/8)\sin(2h+l) + (a^3/8)\cos(2h-l) - (a^3/8)\sin(2l+h) + (a^3/8)\sin(2l-h). \quad (3)$$

Bei dem kubischen Glied bedeuten rechts die beiden ersten Posten eine unverzerrte Übertragung, alle folgenden bis auf den letzten bedeuten Summenfrequenzen; der letzte ist eine Differenzfrequenz und zwar die Differenzfrequenz zweiter Ordnung.

Würde man noch zu einem biquadratischen Glied übergehen, so würde darin die Differenzfrequenz (3 l — 2 h) — die Differenzfrequenz dritter Ordnung — vorkommen usf.

Die Annahme, daß bei unserem Gehör eine ähnliche Verzerrung nach einem Exponentialgesetz vorliegt, findet darin ihre Stütze, daß wir den Differenzton erster Ordnung gut hören können, wenn die Lautstärke der beiden zusammenklingenden Frequenzen mittelgroß ist. Um den Differenzton zweiter Ordnung zu erkennen, muß die Lautstärke größer sein, der Differenzton dritter Ordnung wird nur bei sehr großen Lautstärken vernehmbar.

Die Lautstärkeverhältnisse der gehörten Differenztöne entsprechen ungefähr den Amplitudenverhältnissen, die nach den Gleichungen (1), (2) und (3) zu erwarten sind.

Daß wir die Differenztöne deutlicher erkennen als die Summationstöne, kann dadurch eine Motivierung finden, daß wir das Vorhandensein von Obertönen gewohnt sind, da diese auch bei nur einem Ton auftreten. Wenn nun durch das Hinzutreten eines zweiten Tons die Obertöne in ihren Stärkeverhältnissen geändert werden, fällt dies nicht so sehr auf wie das

Auftreten völlig neuer Töne, der Differenztöne. Man kann aber bei geschärfter Beobachtung auch die Summationstöne zum Bewußtsein bringen. Die nichtlinearen Verzerrungen unseres Gehörorgans sind, wie schon Helmholtz feststellte, wahrscheinlich organphysiologisch, nicht neurophysiologisch bedingt. Sie werden nur beobachtet, wenn die Töne von vornhereine gemischt sind. Führt man jedem Ohr für sich einen Ton zu, so hört man keine Differenz- oder Summationstöne. Vielleicht liegen die Nichtlinearitäten schon in dem Übertragungsmechanismus vom Trommelfell zum ovalen Fenster, also in den Gehörknöchelchen, deren Lagerungen und Einbettungen. Wenn die Wirkungsweise der Dynamikpressung im Gehör mit der elektroakustischen Analogie übereinstimmen soll, muß man eine zeitlich verzögerte Verschiebung des Arbeitspunktes auf der Übertragungskennlinie (also außer der nichtlinearen Verzerrung eine zweite Regelvorrichtung) annehmen. Allein in dem ersten Posten rechts der Gleichung (2), der physikalisch eine solche Verschiebung des Arbeitspunktes bedeutet, findet die Dynamikpressung keine hinreichende Erklärung. Ob man die eigentümliche Form der Gehörknöchelchen und deren Lagerungen als Feder-Reibungsglieder erklären kann, die eine solche zeitlich verzögerte Arbeitspunktverlagerung herbeiführen, ist noch nicht genügend geklärt. Sala[12]) nimmt an, daß der von v. Bekesy untersuchte hydrodynamische Vorgang[3]) im Cortis'schen Organ eine quasilogarithmische Dynamikpressung herbeiführt. Beim Auge kann man die Dynamikpressung und deren zeitliche Verzögerung leicht beobachten, wenn man die Iris betrachtet und plötzlich eine Lichtquelle einschaltet. Die Iris verengt sich.

Verhalten sich nun die Frequenzen h und l wie kleine ganze Zahlen, so sind auch die Differenz- und Summationsfrequenzen ganze Zahlen. Darauf stützt sich die Arbeitshypothese zur Erklärung der harmonischen Prägnanzempfindung: die Differenz- und auch die Summationsfrequenzen gliedern sich in eine arithmetische Reihe von Frequenzen ein, deren erstes Glied eine ähnliche Rolle spielt wie die wesentliche Frequenz bei der Fourieranalyse eines periodischen Vorganges, d. h. eines Klanges. Die Summationstöne spielen dabei eine geringere Rolle als die Differenzhöhe. Bei der Oktave 2/1 entsteht nur ein Differenzton, und er fällt mit dem tiefen ursprünglichen Ton zusammen. Bei der Quinte 3/2 entsteht auch nur ein Differenzton, er ist die Suboktave des tiefen ursprünglichen. Bei der Quarte 4/3 entstehen 2 Differenztöne, der erste liegt 2 Oktaven, der zweite eine Oktave tiefer als der hohe ursprüngliche. Bei der großen Terz 5/4 entstehen 3 Differenztöne, von denen zwei den tiefen ursprünglichen in Suboktaven verstärken, während der dritte, zusammen mit den ursprünglichen Tönen den Durdreiklang ergibt. Bei der kleinen Terz 6/5 entstehen 4 Differenztöne, von denen der erste und der zweite die kleine Terz zum Durdrei-

[12]) O. *Sala*, Experimentelle und theoretische Grundlagen des Trautoniums, Frequenz 2 (1948) 315—327, 3 (1949) 13—19.

klang ergänzen usf. Das Gehör hat infolge der Differenztöne zwei Anhaltspunkte zur Kontrolle des Schwingungszahlverhältnisses: die Anzahl der Differenztöne und den Abstand des ersten und zweiten, vielleicht auch dritten Differenztones von den ursprünglichen Tönen. Die Anzahl der Differenztöne ist vermutlich das erste Kriterium, das den alten Konsonanzbegriff geprägt hat. An dem Beispiel der Quinte, die, wenn sie rein ist, nur einen Differenzton ergibt, kann man den Einfluß der Unreinheit ermessen, wenn man z. B. statt 2 den Wert 2,2 setzt. Um auf ganze Zahlen zu kommen, muß man erweitern auf 15/11 und kommt so auf 14, das heißt eine ganze Schar von Differenztönen. Die Frequenzverteilung auf der Basilarmembran ist nicht mehr einfach und übersichtlich. In der weiteren Entwicklung der Konsonanzempfindung zur Prägnanzempfindung scheint der Abstand des ersten und zweiten Differenztones die wesentliche Rolle zu spielen.

Gegen die Differenztonhypothese der Harmonik wird eingewendet, daß die Differenztöne im Verhältnis zu den ursprünglichen Tönen zu schwach seien. Aus der geschätzten Stärke der Differenztöne ergibt sich für das Gehör ein Klirrfaktor von weniger als 5 %. Dieser Einwand setzt voraus, daß die psychologische Bewertung von Sinneseindrücken ungefähr der Stärke des physiologischen Reizes proportional sei. Diese Voraussetzung trifft aber vielfach nicht zu. Wir sehen aufrechtstehend (obgleich das Bild auf der retina kopfsteht) u. a. m. Warum sollten wir nicht die Harmonieempfindung aus der Gleichzeitigkeit von Wahrnehmungen sehr unterschiedlicher Intensität ableiten? Die Verdeckung hindert nicht die gleichzeitige Wahrnehmbarkeit mehrerer Frequenzen, wenn diese nur nicht zu nahe beieinanderliegen. Gerade die Verdeckung liefert eine zusätzliche Stütze für die Differenztonhypothese der Harmonieempfindung: treten zu den ursprünglichen Tönen nur diskret verteilte, wenn auch schwache, tiefere und daher auffallende, neue Töne hinzu, so vermerkt dies die Empfindung als harmonisch. Belegen die hinzutretenden Töne zahlreichere Punkte oder gar ganze Zonen der Basilarmembran, so entfällt die Erkennbarkeit, der Eindruck wird chaotisch, disharmonisch.

Die Differenztonhypothese liefert zugleich auch eine schlagende Erklärung des musikalischen Grundtonhörens, dessen, was man in der Musik als „Gesetz der Schwere" bezeichnet — und damit eine weitere Bestätigung der Differenztonhypothese der Harmonieempfindung. Wir hören eine nichtsinusförmige Schwingung bekanntlich nur als *eine* musikalische Tonhöhe, die der wesentlichen Periode in der Fourieranalyse entspricht. Die höheren Harmonischen als solche hören wir nicht, sie sind nur ein klangfärbendes Nebenphänomen. Die musikalische Tonhöhenempfindung ist also nicht (ebensowenig wie die Tonhöhenempfindung überhaupt) fourieranalytisch zu erklären. Wäre dies der Fall, so müßten wir alle Harmonischen je für sich hören. Das musikalische Schweregesetz ist so ausgeprägt, daß wir den Grundton als einzige Tonhöhe empfinden, auch wenn er im Verhältnis zu

den Obertönen sehr schwach, ja überhaupt nicht vorhanden ist. Schneidet man alle tiefen Frequenzen in einer Übertragung ab (z. B. alles unterhalb 6000 Hz), so hört man eine Melodie, die sich etwa in der eingestrichenen Oktave bewegt, eindeutig in dieser Tonhöhenlage, obgleich nur höhere Harmonische oberhalb der 10. vorhanden sind. Offenbar bildet das Gehör die Differenzfrequenzen 10—11, 11—12 usf. und rekonstruiert auf diese Weise den ursprünglichen Vorgang. Sogen. akustische Orgelregister machen von dieser Tatsache Gebrauch, nehmen zwei Pfeifen im Frequenzverhältnis 3 : 2, um die Tonhöhe mit dem Schwingungsverhältnis 1 zu bilden. Nur wenn eine oder einzelne höhere Harmonische stark hervortreten, etwa 30 db über den anderen liegen, hören wir diese heraus und verlieren u. U. die Orientierung über die Tonhöhenlage.

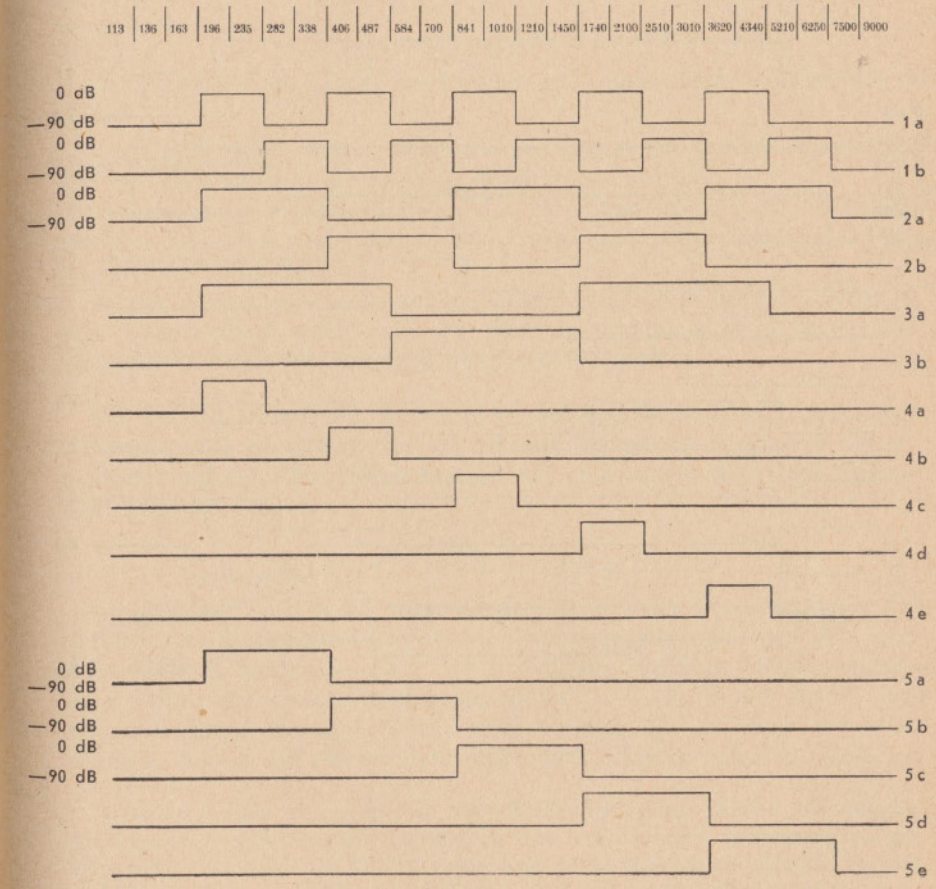
Man ist versucht, die Harmonie aus einer Schwierigkeit zu erklären, in der die Natur durch das Problem der Dynamikpressung geraten ist, und das sie nur durch eine Verzerrung, also Fälschung des von außen kommenden Schwingungsbildes lösen konnte. Aber gerade diese Verlegenheit hat uns das schöne Geschenk unserer abendländischen Musik beschert, die wesentlich auf der Harmonie aufgebaut ist. Nicht nur ihre Tonleitern, auch die meisten Melodien vor allem in der Romantik und der volkstümlichen Musik sind weitgehend aus gebrochenen Akkorden gebildte, ja man bezeichnet gemeinhin eine Tonfolge als melodiös, wenn sie harmonischen Charakter trägt. In der Gleichsetzung von Melodik und Harmonik, unter den Gegebenheiten der instrumentonomen Musik (ermöglicht durch die temperierte Zwölfteilung der Oktave) hat die Tonkunst durch Joh. Seb. Bach einen Höhepunkt erreicht. In dem künstlerischen Ineinander-„Fugen" melodischer und harmonischer Elemente liegt der Reiz der Polyphonie. Die statischen Harmonien sind auf akkordliche Partien, vorzugsweise die Schlußakkorde beschränkt. In der Polyphonie ergeben sich aus der Stimmenführung accidentielle Harmonien als prägnante Punkte des musikalischen Ablaufs. Die Entwicklung im vorigen und Ende des vorvorigen Jahrhunderts bevorzugte die Harmonik, besonders in der Romantik. Die neuzeitliche Musik scheint der wenigen Harmonien, die die Zwölfteilung der Oktave bietet, überdrüssig. Die meisten Komponisten überspringen die Verhältniszahlen, die mit 7, 10, 11, 12, 13, 14, 19 gebildet werden. Diese Lücke ist aber sehr bedauerlich, denn die Musikalische Elektronik lehrt uns, daß die Zusammenklänge mit den Zahlen dieser Lücke besonders reizvoll sind. Daß in dem Überdruß an den traditionellen Zusammenklängen die Zwölfton- und Reihenmusik die Harmonie ganz ablehnen, ist vielleicht als Exceß zu bewerten, ähnlich wie ihn die Geschichte der Revolutionen vielfach bestätigt. Die Diktatur, hier die der Instrumentonomie, wird nicht beseitigt, sondern sanktioniert. Die Musikalische Elektronik läßt erkennen, daß die Entfaltung der Tonkunst sich nicht einseitig auf dem melodischen, seriellen Wege vollziehen muß.

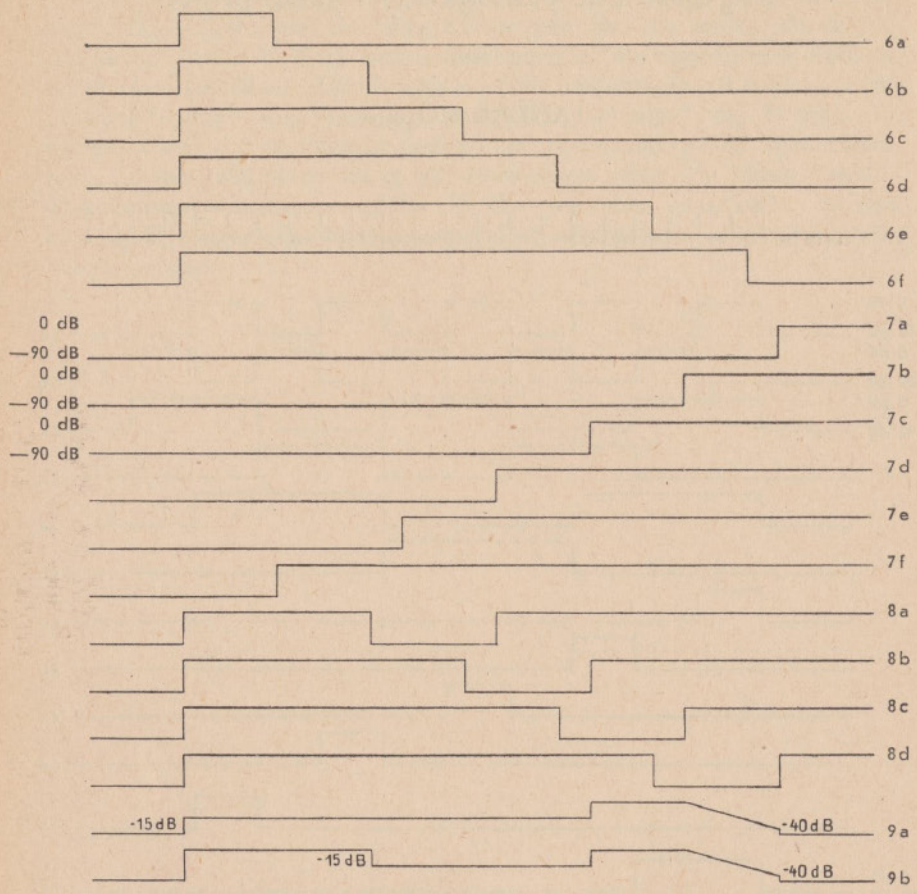
Die Verselbständigung und sinnvolle Weiterbildung der Harmonik würde der Melodik erst den Weg frei machen, den die serielle Musik vor Augen hat. Dabei wird die engere Anlehnung an die Sprache eine wichtige Rolle zu spielen haben. Zwei Beispiele sollen andeuten, was hier gemeint ist: „Pierrot lunaire" von Schönberg und „Der Landarzt" von Hentze. In beiden Fällen wird die Sprache nicht in der traditionellen Lied- oder Arienform, sondern mit ihren arteigenen Merkmalen neben die Musik gestellt. Elektronische Modifikationen der Sprache wie oben angedeutet, werden künftig (besonders in surrealistischer Darstellungsweise) Hervorragendes leisten können.

Legende zur beiliegenden Schallplatte

von

ANDRÉ MOLES





Musik und „Normen“ (II)

Die Stimmung von Musikinstrumenten

von

ROBERT W. YOUNG

I

Die Stimmung der Flöte*)

Der Ausdruck „Stimmung des Instrumentes“ kann mehrere Bedeutungen haben:

1) drückt er den *Vorgang des Stimmens* aus, so wie der Klavierstimmer ihn ausführt, wenn er die Saitenspannungen kontrolliert;

2) bedeutet er die *Nachprüfung des Stimmtons*, so wie die Orchestermusiker sie vornehmen, wenn sie ihre Instrumente dem international festgelegten „a“ anpassen;

3) gibt er den *inneren Stimmungszustand* eines Instrumentes wieder, so wie dieser evident wird, wenn die Töne des Instrumentes in Bezug aufeinander und auf den Stimmton verglichen werden.

Die hier beginnende Artikelserie wird sich hauptsächlich mit der *inneren Stimmung* von Musikinstrumenten befassen, wobei die berichteten Untersuchungsresultate allerdings immer wieder auch das Problem der Stimmton-Normung berühren.

Die Untersuchungsmethode

Ein Musiker spielt einen zu prüfenden Ton, dessen Frequenz durch das chromatische Stroboscop (Stroboconn)[1]) gemessen wird. Die typische Dauer jeder Messung beträgt 3—4 sc. Das Stroboconn empfängt den Ton mittels eines Mikroskops (oder Schwingungs pic-up) und verwandelt ihn in aufblitzendes Licht, dessen Frequenz stroboscopisch mit der eines speziellen Modells, das sich auf einer von 12 rotierenden Scheiben befindet, verglichen

*) Dieser Aufsatz ist der erste in einer Reihe von kurzen Studien, die sich mit der Stimmung eines einzelnen Instruments oder von Gruppen zusammengehöriger Instrumente befassen. Der Verfasser war eine Reihe von Jahren hindurch für die C.-C. Conn, Limited of Elkhard, Indiana — eine sehr große, Blasinstrumente herstellende Firma — tätig. Während dieser Zeit hat er aktiv an der Entwicklung des Chromatischen Stroboscops (Stroboconn) mitgearbeitet, mit Hilfe dessen alle hier beschriebenen Messungen durchgeführt worden sind.

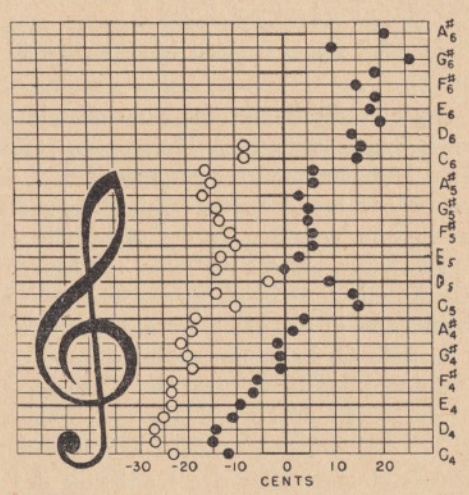
1) Robert W. Young und Allen Lomis, I. Acoust. Soc. Am. 10. 112—118 (1938); U. S. Patent 2,286,030 (1942).

Stroboconn

wird (jeder dieser rotierenden Scheiben entspricht ein chromatischer Ton der Oktave). Das Modell setzt sich aus 7 Ringen mit je 2, 4, 8, 16, 32, 64 und 128 „dunkel und lichten" Segmenten zusammen. Die aufeinander folgenden Scheibenpaare stehen im Schnelligkeitsverhältnis von $\sqrt[7]{12}$ zueinander, was abwechselnd durch die Übersetzungsverhältnisse 89/84 und 107/101 erzielt wird. Ein Synchron-Motor treibt die Scheiben mit einer Geschwin-

digkeit an, die durch die Frequenz einer elektrisch vibrierenden Stimmgabel bestimmt wird, deren Ton bis zu einer kleinen Sekunde veränderlich ist und welche eine Skala in Cents besitzt (100 Cents entsprechen dem temperierten Halbtonintervall; die Oktave hat 1200 Cents). Innerhalb des Umfanges von 7 Oktaven kann jede Abweichung von der das „a" = 440 Hz benutzenden temperierten Stimmung mittels des Stroboconn's direkt abgelesen werden.

Die innere Stimmung der Flöte



Diese Figur gibt die innere Stimmung einer 1933 gebauten („a" = 435 Hz!) Böhmflöte in Cents wieder. Die schwarzen Kreise gelten für die Einstimmung der Flöte auf 440 Hz, die leeren für die auf 435 Hz:

Fabrikant und Serien Nummer: W. S. Haynes, Nr. 12 200.
Raumtemperatur: 24 ° Celsius (75 ° Fahrenheit).
Herausziehen des Kopfstückes: 3 mm (0,12 inch).
Flötist: I. R. Mac Gaughey.
Datum der Experimente: 8. Februar 1946.
Anzahl der Versuche für jeden Ton: 5.

Die Figur zeigt Durchschnittsresultate aus immer je 5 verschiedenen Messungen eines Tones. Jede Horizontal-Linie entspricht einem chromatischen Ton. Einzelne stärker ausgezogene deuten die 7 Töne der diatonischen Tonleiter an: C_4—E_4—G_4—H_4—D_5—F_5—A_5).

Aus hier nicht zu erörternden Gründen[2]) ist der gewöhnlich „mittleres C

[2]) Robert W. Young, I. Acoust. Soc. Am. 11. 134—139 (1939).

des Klaviers" genannte Ton mit C_4 bezeichnet; alle Noten bis zur Oktave darüber tragen den gleichen Index$_4$. Die folgende Oktave beginnt mit C_5. Durch die Art der Placierung der (ausgefüllten oder leeren) Kreise rechts oder links von der dick gedruckten Vertikale wird ausgedrückt, um wieviel ein Ton zu hoch oder zu tief klingt. „Plus" (+) oder gar kein Zeichen (rechts von der Vertikalen) bedeutet „zu hoch", minus (—) (links von ihr) heißt „zu tief". Wenn alle ausgefüllten Kreise mit der vertikalen Null-Linie zusammenfielen (ein wohl nie erreichtes Ideal) würde die Flöte genau mit der gleichtemperierten Scala übereinstimmen. „a" = 435 Hz aber läge dann um —20 Cents zu tief links.

So finden wir C_4 um 12 Cents — also fast um den 8. Teil eines Halbtons — zu niedrig**).

Diese Untersuchung gibt die Symptome eines mittels Verkürzung seines Kopfstückes höher klingend gemachten Holzblasinstrumentes wieder: gewisse Noten sind zu hoch, andere zu tief geworden. Z. B. sind alle Töne von C_4 bis Fis$_4$ zu tief, während andere Töne des gleichen Registers (H_4, C_5, Cis$_5$) zunehmend zu hoch werden. In der nächsthöheren Oktave, welche die gleichen Griffe gebraucht, besteht die selbe Tendenz von „zu tief" nach „zu hoch", wenngleich auch nicht in gleich ausgeprägtem Maße. Diese Verstimmung des Instrumentes in sich selbst ist das Resultat seiner künstlichen Verkürzung. Das zu tiefe C_4 kann nur mühsam durch „Lippenspannung" zu einer Null-Abweichung erhöht werden; die Tatsache, daß es verhältnismäßig höher ist als das direkt daneben gelegene Cis$_4$ weist darauf hin, daß vielleicht sogar ein Teil des Fuß-Stückes der Flöte abgeschnitten worden ist.

Während der Untersuchungen war das Kopfstück der Flöte um 3 mm herausgezogen. Nimmt man es um weitere 5 mm heraus (also ungefähr um soviel, als nötig ist, um „a" von 440 Hz auf 435 Hz hinabzusenken), so stimmt das Instrument weit besser in sich selbst. Betrachtet man jetzt die offenen Kreise der Figur (links), welche „tiefer gestimmt durch Ausziehen des Instrumentes" bedeuten, so sieht man, daß sich alle ca. —20 von der Vertikalen entfernt zusammendrängen, daß also tatsächlich das Instrument *besser* in sich selbst stimmt, wenn es *so* ausgezogen wird. Es ist deshalb anzunehmen, daß es ursprünglich für „a" = 435 gebaut worden war!

Defekte der inneren Stimmung charakterisierten die 1946 durch Ahrens[3]) untersuchten Flöten. Sicherlich sind viele Flöten dieser Art in den Vereinigten Staaten hergestellt worden und bleiben — aus ökonomischen Gründen — noch heute und vielleicht sogar in den nächsten Jahren in Gebrauch.

Der Übergang des normierten Stimmtons von 435 Hz auf 440 Hz war in Amerika im Jahre 1917 beschlossen worden! Trotzdem leiden noch heute

**) Siehe den entsprechenden, schwarz ausgefüllten Kreis.

[3]) Alvin W. Ahrens, I. Expl. Education 15. 268—290 (1947).

— 40 Jahre später! — Musik und Musikhörer unter den Auswirkungen der durchgeführten Erhöhung des Stimmtons. Um so wichtiger ist es, heute „a" = 440 Hz festzuhalten als international anerkannten Norm-Stimmton und keine weiteren Erhöhungen zuzulassen.

Hier muß gesagt werden, daß die Durchschnittswerte unserer Figur leider selbst nicht ganz einwandfrei sind. So betrugen z. B. die 5 Messungen für C_4 : —16, —5, —6, —18 und —13 Cents und der Mittelwert 11,6 Cents, Die mittlere Abweichung dieser Meßreihe betrug also 5,2 Cents und der mittlere Fehler 2,6 Cents. Auf Grund der üblichen statistischen Voraussetzungen hätte man von dem gleichen Spieler auf dem selben Instrument den Mittelwert für C_4 zwischen —9 und —14 Cents für zwei Drittel der Versuche erwarten können, während er für das dritte Drittel außerhalb dieser Grenze gefallen wäre. Übrigens sind diese Experimente ohne Begleitung, also „solistisch" gemacht worden; wir haben aber nicht die geringste Sicherheit, ob sich — beim Spielen im Orchester — nicht ganz andere Resultate ergeben hätten.

In Fällen, wo der selbe Ton vielleicht auf verschiedene Arten (d. h. mit verschiedenen Griffen) ausgeführt worden ist, gibt die Figur nur die Resultate für die *übliche* Griffart; so klingt C_5 bei Gebrauch des linken Zeigefingers um +15 Cents zu hoch; es steigt indes sogar um +36 Cents an, wenn alle Klappen der Flöte geschlossen sind. Im Gegensatz dazu blieb C_4 bei gleichem Griff (alle Klappen geschlossen) um —12 Cents zu tief! Das Intervall zwischen den beiden Tönen (C_5 und C_4) wird also um 48 (!) Cents größer als die Oktave, selbst beim „überblasen" mit gleichem Griff. Der zweite Schwingungston zeigt somit als *Harmonischer* durchaus keine exakten Beziehungen zum ersten! Solche Widersprüche kommen bei allen Blasinstrumenten vor, besonders in ihren tiefen Lagen.

Es wäre wünschenswert, eine Stimmungskurve zu besitzen, die für alle Arten von Flöten und Spielern Geltung hätte. Unsere Artikelserie wird sich aber zunächst darauf beschränken, nur erst zur Problemklärung beitragende Untersuchungen mitzuteilen (und zwar immer mit je einem Spieler auf dem selben Instrument).

Eine neue Art objektiver Qualitätsfeststellung von Geigen

von

ULRICH ARNS

Obwohl unser Jahrhundert so reich an Erfindungen ist, so reformlustig auch viele Dinge nur deswegen umgeändert werden, weil man sie auch anders ausführen und auch in neuen Formen gestalten kann, so ist die Konstruktion der Instrumente der Geigenfamilie doch seit Generationen immer noch die alte geblieben. Es hat auch auf diesem Gebiete bis zum heutigen Tage nicht an Versuchen gefehlt, die Geige besser, schöner und klangvoller zu gestalten. Keine der neuen Konstruktionen konnte sich aber bisher durchsetzen. Liegt es an dem Nimbus, den die alten Instrumente eines Stradivari, eines Guarneri oder eines Klotz aufgrund ihres ehrfürchtigen Alters haben oder liegt es an der wirklich überzeugend besseren Qualität?

Die Antwort zu dieser Frage ist immer wieder versucht worden. Doch eindeutig konnte sie noch nicht entschieden werden. Diese Unsicherheit wurde leider allzuhäufig von geschickten Geschäftleuten so ausgenutzt, daß eine billige Geige als klassische Meistergeige zu sehr hohem Preis verkauft wurde. Andere versuchten wieder, wirklich echte Instrumente in ihrem Wert herabzusetzen und ihre Geschäftskonkurrenten dadurch zu schädigen. Ein solcher Streit überspannt bereits alle Kontinente der Erde. Es sind Millionenwerte, um die es bei diesem „Geigenkrieg" geht.

Die vorliegende Arbeit soll zur Beantwortung der oben gestellten Frage neue Grundlagen und neue Methoden liefern, die die Entscheidung über die Güte einer bestimmten Geige auf objektive Weise erleichtern soll. Darüber hinaus soll auch der heutige Geigenbau durch diese Arbeit neue Anregungen erhalten.

I

Die Residuumtheorie

Der Kauf einer Geige ist im allgemeinen eine Vertrauenssache. Trotz der ehrlichen Beteuerungen des Geigenhändlers zahlt man nur ungern den hohen Preis für das gerade erworbene gute Instrument, das einem klanglich noch gar nicht so recht gefällt. Im großen Konzertsaal dagegen scheint sich der Ton des guten Instrumentes erst entfalten zu wollen und den großen Klang abzustrahlen. Wie erklärt sich nun diese allzu häufig beobachtete Tatsache?

In einem normalen Zimmer ist der Anteil der von den Wänden reflektierten Schallwellen am Gesamtschalldruckpegel verhältnismäßig groß. Im

großen möglichst noch gut besetzten Konzertsaal dagegen werden die Schallwellen höherer Frequenz auf ihren langen Reflexionswegen ziemlich stark durch Vorhänge, durch die Stuhlbepolsterung und die Zuhörermasse gedämpft. Die höheren Frequenzen erreichen also das Ohr des Zuhörers mit einer geringeren Lautstärke als es in einem gewöhnlichen Zimmer der Fall ist.

Bei billigen neuen Instrumenten ist der Energieanteil der abgestrahlten hohen Frequenzen gegenüber den tieferen verhältnismäßig groß (Lit. 1). Das menschliche Ohr hat nun die Eigenschaft, getrennt gehörte Obertöne zu ihrem Grundton zusammenzufassen, da das Auflösungsvermögen des Ohres bei tiefen Frequenzen nicht ganz ausreicht. Das Ohr kann sich zu den gehörten Partialtönen das Residuum bilden (Residuum-Theorie von Schouten, Lit. 2). Das bedeutet z. B., daß das Ohr zu den beiden besonders gut abgestrahlten Obertönen von 2500 Hz und 3000 Hz sich den Grundton von 500 Hz selbst bildet, ohne daß er in dem gehörten Klang vorhanden zu sein braucht.

Wenn eine billige Geige nun recht starken Obertongehalt hat, so empfindet der Hörer im Zimmer trotzdem einen vollen Klang, weil das Ohr sich den notwendigen Grundton selbst bildet. Im Konzertsaal sind die Obertöne beim Zuhörer zwangsläufig gedämpfter. Demzufolge ist auch der selbstgebildete Grundton leiser. Eine billige Geige verliert also im Konzertsaal stark an Klangfülle und Lautstärke.

Bei der Meistergeige dagegen wird der mitabgestrahlte Grundton im Konzertsaal nur unwesentlich geschwächt, vielleicht durch Podium und mitschwingende Wände sogar verstärkt. Die gute Geige kann auf die Bildung des Residuums aus den Partialtönen durch das Ohr verzichten. Sie kann den Konzertsaal also viel leichter mit ihrem Klang erfüllen als die obertonreiche billige Geige.

Die klangverbessernde Wirkung des Nullstrahlers

Gerade bei besonders gut beurteilten Geigen ist der Künstler oftmals von dem Ton seines Instruments enttäuscht. Der starke, tragende Ton seines Instruments scheint sich erst in größerer Entfernung beim Zuhörer zu bilden. Diese Eigenschaft wird durch den Schwingungstyp eines Nullstrahlers erreicht.

Ein mathematischer einwandfreier Nullstrahler ist eine atmende Kugel, ein Luftballon, der rhythmisch mit Tonfrequenzgeschwindigkeit dicker und dünner wird. Auf dieser Kugel ist die Bewegung auf der ganzen Oberfläche immer in Phase. (Fig. 1a). Es gibt keine Stellen, die gegenphasig schwingen und den abgestoßenen Luftteilchen einen Kurzschlußweg zum gegenphasigen Gebiet ermöglichen. Da also alle Luftteilchen an der Entstehung einer Schallwelle, die von der pulsierenden Kugeloberfläche aus-

geht, beteiligt sind, ist der Wirkungsgrad für die Abstrahlung — der Akustiker sagt: der Strahlungsfaktor bzw. der Strahlungswiderstand des Nullstrahlers — besonders groß. Der Schalldruck eines solchen Schwingers nimmt proportional mit der Entfernung ab, der Schalldruck Schwinger höherer Ordnung dagegen schwindet schneller als nur einfach proportional mit der Entfernung.

Gute Geigen sind nun durchaus in der Lage, im Prinzip eines Nullstrahlers zu schwingen. Allerdings ist das nur bei einem relativ kleinen Frequenzbereich möglich.

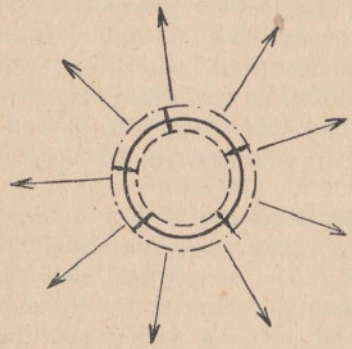


Abb. 1a

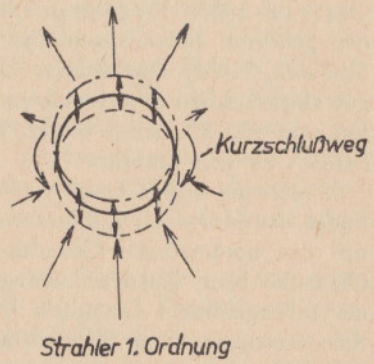


Abb. 1b

Aufgrund umfangreicher Untersuchungen und zahlreicher Aufnahmen der Körperschwingungsformen von Geigen, die in den Jahren 1952 bis 1955 mit Professor Backhaus an der technischen Hochschule in Karlsruhe durchgeführt worden sind, konnte eindeutig festgestellt werden, daß gute Geigen im Frequenzbereich von 500 bis 900 Hz nullstrahlerähnlich schwingen können. Besonders oft wird von den berühmten alten Instrumenten und den guten Meistergeigen der Jetztzeit das Frequenzgebiet von 530 bis 800 Hz nullstrahlerähnlich abgestrahlt. Dieses Frequenzgebiet umfaßt den für den Melodiegehalt eines Musikstückes so überaus wichtigen Bereich von d_2 bis h_2. Die Kompositionen zur Zeit Bachs und Händels verwandten sogar keine höheren Töne als e_3 (1200 Hz).

Die Schwingungsform eines solchen Instrumentes verläuft etwa wie im Bild 2 dargestellt. Die von links unten nach rechts oben schraffierte Fläche bedeutet eine gegenphasige Schwingung gegenüber der Fläche, die weiß gelassen worden ist. Schraffierungen anderer Art deuten gemischte Schwingungszustände an, also Flächen, die vornehmlich in der Umgebung von Knotenlinien mit Phasenwinkeln schwingen, die um 90° herum liegen. Die Ziffern in den Bildern geben den Phasenwinkel der Schwingung an. Auf Geigendecke und -boden sind die Gebiete, die gleichphasig schwingen, aus-

dehnungsmäßig am größten. Die kleinen Flecken, die in entgegengesetzter Phase schwingen, sind im allgemeinen bei der bisher gebräuchlichen Konstruktion des Geigenkörpers unvermeidlich.

Denn wenn der Steg durch den Geigenbogen an seiner oberen Kante parallel zur Geigendecke angeregt wird, dann wird er hauptsächlich Kippschwingungen über die beiden Stegfüße ausführen müssen. Die beiden Stegfüße drücken abwechselnd auf die Geigendecke. Zwischen ihnen muß sich also zwangsläufig eine Knotenlinie befinden. Der Stimmstock, der Decke und Boden starr miteinander verbindet, wird daher auf dem Boden eine Schwingung auslösen, die um 180° gegenüber der Decke verschoben

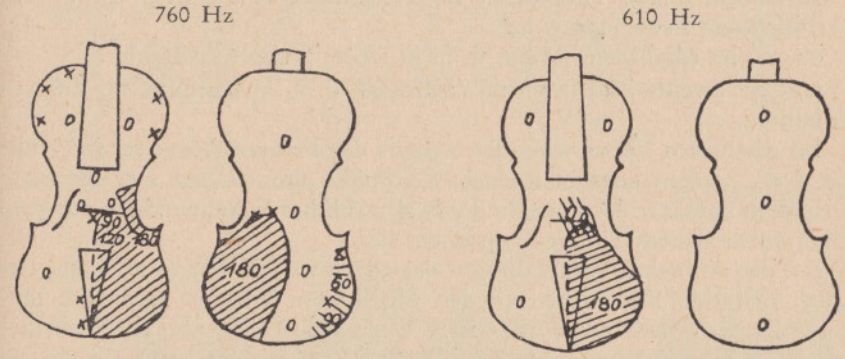


Abb. 2

ist. Alle Knotenlinienbilder der Geige müssen also an den beiden Enden des Stimmstockes gegenphasige Schwingungen zeigen, wenn nicht gerade eine Knotenlinie über den Stimmstock läuft.

Instrumente mit solchen nullstrahlerähnlichen Schwingungsformen vermögen also ihren Ton in diesem Frequenzbereich mit einem besonders hohen Strahlungswiderstand auszusenden. Mit zunehmender Entfernung überwiegt der Schalldruckanteil des Nullstrahlers wegen der langsameren Abnahme gegenüber dem Anteil des Schalldruckes Strahler höherer Ordnung immer mehr. Mit zunehmender Entfernung tritt der Grundton des Instrumentes immer deutlicher in Erscheinung. In größerer Entfernung entwickelt sich der Melodieton immer klarer, man sagt „die Geige hat einen tragfähigen Ton".

Diese Erkenntnisse aber dazu verwerten zu wollen, auf diese Weise ein objektives Meßverfahren für die Güte und die Qualität einer Geige zu begründen, würde wegen der Umständlichkeit der Aufnahme der Körperschwingungsformen verfehlt sein.

Das Urteil, ob ein Instrument einen tragfähigen Ton abstrahlen kann, ist subjektiv nur mit einiger Sicherheit im gut besetzten Konzertsaal zu bilden. Denn der Konzertsaal bietet der Schallwelle den notwendig langen

Weg, über den er sich nahezu störungsfrei ausbreiten und der Klang sich entwickeln kann. Nach den ersten Reflexionen ist die rückkehrende Welle meist so tark gedämpft, daß sie zur Lautstärkebestimmung nicht mehr beiträgt.

In ähnlicher Form läßt sich die Prüfung der Qualität einer Geige objektiv durchführen, wobei das Urteil jederzeit reproduzierbar nachzuprüfen ist.

Das objektive Prüfverfahren

Zu diesem Zwecke nimmt man die Frequenzkurve der Geige unter zwei verschiedenen Bedingungen auf:

einmal im schalltoten Raum, d. h. in einem freien Schallfeld

und ein zweites Mal in einem Hallraum, d. h. in einem völlig diffusen Schallfeld.

Im schalltoten Raum wird der Verlauf der Frequenzkurve in der Nähe der Geige aufgenommen, zu einem Zeitpunkt also, in dem sich der klare Grundtoncharakter des Klanges durch allmähliches Herauswachsen aus dem Obertonanteil noch nicht ganz gebildet hat.

Bei der Aufnahme im Hallraum dagegen wird ein Klang erhalten, der trotz vielfacher Reflexionen an den schallharten Wänden auch nach längerer Laufzeit noch gut hörbar ist. Wenn eine Geige also in einem bestimmten Frequenzbereich nullstrahlerähnlich schwingen kann, in diesem Bereich also bei hohem Strahlungswiderstand einen Ton aussenden kann, der nur linearproportional mit der Entfernung abnimmt, dann muß sich dieser Frequenzbereich in der geschriebenen Frequenzkurve gegenüber derselben bei der Aufnahme im schalltoten Raum deutlich herausheben. Das Maß in Dezibel, um das die Durchschnittsamplitude im betrachteten Frequenzbereich (500 bis 900 Hz) im Hallraum höher liegt als im schalltoten Raum, könnte man gleich als Maßeinheit für eine neue Güteklassenbezeichnung für Geigen anwenden.

An die technische Haltung des Instrumentes zur Aufnahme reproduzierbarere Frequenzkurven wird für diese Zwecke keine so große Forderung auf Rückwirkungsfreiheit gestellt, wie man es verlangen muß, wenn man die Frequenzkurven der verschiedenen Geigen bezüglich ihrer Feinstruktur genauer miteinander vergleichen will. Es hat sich nämlich herausgestellt, daß der Verlauf der Frequenzkurve und damit auch der Schwingungscharakter sehr stark von der Art der Einspannung der Geige abhängig ist. Nur bei einer ganz bestimmten Weise der „Einspannung" schwingt die Geige echt, also frei und ungezwungen.

Zum Vergleich sieht man auf Bild 3a) die Frequenzkurve einer ausgezeichneten Geige im schalltoten Raum, auf Bild 3b) die Frequenzkurve derselben Geige im Hallraum. Wegen der unzähligen Reflexionen im Hallraum kann man natürlich bei dieser Aufnahme keinen so kontinuierlichen Kurvenzug erwarten wie im freien Schallfeld des schalltoten Raumes. Die Ziffern in Abbildung 3a) deuten auf besondere Untersuchungen hin. An der Stelle „8" wurde die Schwingungsform der Abb. 2a) gefunden.

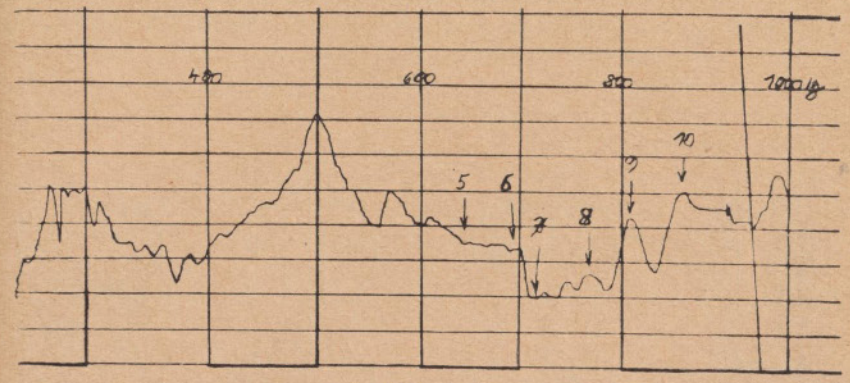


Abb. 3a

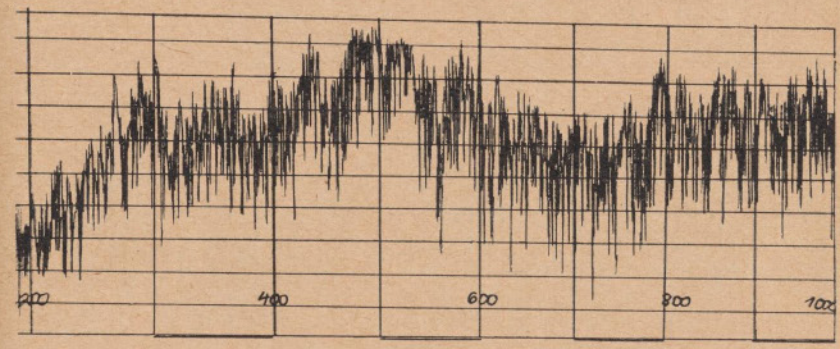


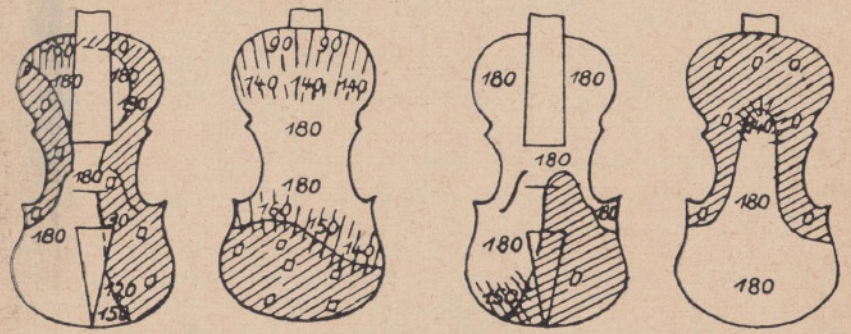
Abb. 3b

Das auffällige und breite Minimum zwischen 600 und 800Hz wird bei sämtlichen Geigen beobachtet. Es ist der Bereich, der im Übergangsgebiet zwischen Hauptresonanz bei allgemein etwa 500 Hz und den höheren Frequenzen liegt, bei der die abgestrahlte Wellenlänge in die Größenordnung des verhältnismäßig kleinen Geigenkörpers kommt. Die Hauptresonanz ist bei zunehmender Tonhöhe, also abnehmender Wellenlänge, die erstmals mögliche aktive Körperresonanz, die eine besonders große Lautstärke bei 500 Hz ermöglicht.

Die tiefste Resonanz bei etwa 270 Hz wird durch die Luftraumresonanz des Hohlkörpers der Geige verursacht, die auf nicht einfache Weise mit der Körperresonanz in Wechselbeziehung steht. Die Luftraumresonanz bei

270 Hz und die Hauptresonanz bei 500 Hz kann bei allen Instrumenten beobachtet werden.

Bei steigender Tonhöhe durchläuft die Geige nun ein kritisches Gebiet, in dem die abzustrahlende Wellenlänge für den Geigenkörper noch zu groß ist. Diese Schwierigkeit kann nur die Meistergeige durch Ausbildung eines nullstrahlerähnlichen Schwingungstypes überwinden. Die Ausbildung des Nullstrahlertyps wird durch die zweite Hauptresonanz bei 530 Hz eingeleitet, die beide verhältnismäßig scharfe Knotenlinien aufweisen. Die typischen Schwingungsformen dieser beiden wichtigen Geigenresonanzen zeigt die Abbildung 4.



1. Hauptresonanz (500 Hz) 2. Hauptresonanz (530 Hz)

Abb. 4

Eine gute Geige vermag nun den in Abbildung 2 angedeuteten Nullstrahler auch bei höheren Frequenzen beizubehalten. Ab 800 Hz beginnt der nullstrahlerähnliche Schwingungstyp dann im allgemeinen durch häufigere Unterteilung des Körpers zu zerfallen (Abbildung 5). Doch allmählich ist die Wellenlänge so klein geworden, daß sich wieder günstige Körperresonanzen einstellen können, die so vielgestaltig und kompliziert sind, daß eine genauere Untersuchung ihrer Entstehung unmöglich wird.

860 Hz

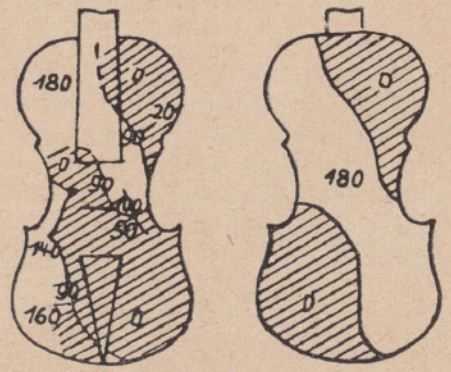


Abb. 5

Die beiden Frequenzkurven einer Fabrikgeige beweisen (Bild 6), daß eine billige, nur nach reinen geometrischen Formen gebaute Geige im Hallraum keine Anhebung des üblichen Loches zwischen 600 und 800 Hz erreichen kann. Zur Ausbildung des Nullstrahlers, für den wegen der Konstruktion des Steges — wie oben bereits beschrieben — keine leichte Voraussetzung gegeben ist, muß die besondere Eigenart des betreffenden verwendeten Holzes unbedingt individuell berücksichtigt werden. Es gibt ja selbst an ein und dem selben Baum kein Holz, das gleiche Eigenschaften hat. Die Natur ist so vielgestaltig, daß sie den Begriff „identisch“ gar nicht kennt.

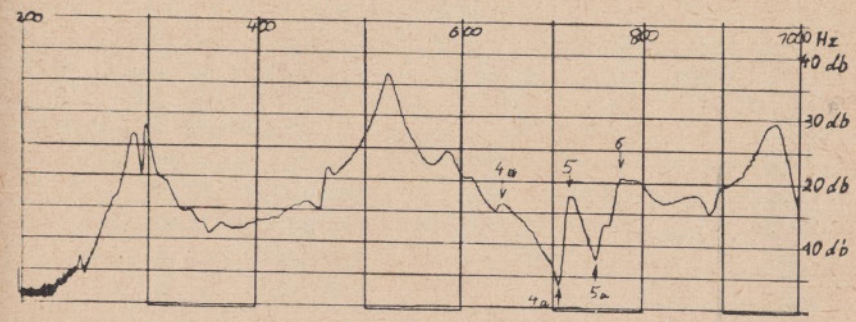


Abb. 6a

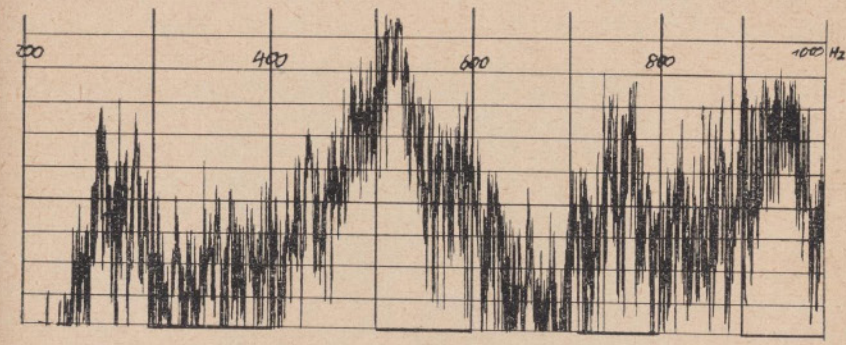


Abb. 6b

Wenn man als Bezugspunkt die Amplitude der Hauptresonanz annimmt, die ja bei allen Geigen bei 500 Hz zu finden ist, und man die relative Absenkung der Schalldruckamplitude im Gebiet um 700 Hz im Maßstab dB

für jede Frequenzkurvenaufnahme angibt, dann kann man eine Tabelle aufstellen, die die im Auszug bisher beschriebenen Versuche folgendermaßen zusammenfaßt. Die relative Absenkung bei 700 Hz wird in dieser Tabelle kurz mit Dynamik bezeichnet. (Bei den Frequenzkurvenaufnahmen beträgt der Abstand zwischen den wagerechten Linien 5 dB).

Dynamik	im schalltoten Raum	im Hallraum	Diff.
Fabrik-Geige (Abb. 6)	25 dB	30 dB	—5
Maggine-Copie (unbekannt)	26 dB	27 dB	—1
Strad.-Copie (Fabrik-Geige)	20 dB	20 dB	0
Wahl, op. 536 (falsche Stimmenspg.)	25 dB	23 dB	2
Padewet, anno 1953	23 dB	20 dB	3
N. A. Chappuy	28 dB	24 dB	4
Gärtner	26 dB	24 dB	2
Riechers	28 dB	22 dB	6
Wahl, op. 533	29 dB	20 dB	9
Wahl, op. 475	30 dB	20 dB	10
Wahl, op. 500 (Abb. 3)	25 dB	15 dB	10

Die Dynamik kann natürlich nur ungefähr angegeben werden. Man nimmt zweckmäßig den mittleren Verlauf der Kurve. Trotzdem zeigt die rechte Spalte, in der die Differenz zwischen Schallraum und Hallraummessung angegeben ist, eine sehr schöne Gesetzmäßigkeit. Die entsprechend dieser Differenz vorgenommene Reihenfolge in dieser Aufstellung deckt sich ziemlich gut mit der subjektiv empfundenen Qualität der betreffenden Violinen. Durch besondere Anpassungsmethoden des Geigenholzes an die entsprechenden Schwingungsbedingungen konnte der moderne Geigenbaumeister Wahl, wie man sieht, in dem in Frage kommenden Frequenzbereich ausgezeichnete Abstrahlungseigenschaften erreichen.

Das beschriebene Verfahren stellt neben der bisher üblichen Methode eine nützliche, wenn nicht sogar notwendige Ergänzung dar, wenn man das subjektive Urteil einer Geige objektiv vervollständigen will. Die Aufnahme der Frequenzkurve im freien Schallfeld bringt leider nicht die notwendigen Indizi zum Vorschein, die eine gute Geige kennzeichnen. Der Verlauf der Frequenzkurve ist so leicht von der Art der Einspannung, der Art der Saiten, der Anregungsrichtung der Saiten durch den Geigenbogen, durch das Wetter oder die Stellung des Mikrofons bestimmt, daß die Feinstruktur der Frequenzkurve sich sehr stark verändern kann. Aus der Frequenzkurve allein kann man kein wesentliches Urteil über eine Geige herauslesen.

Die Aufnahmetechnik der Frequenzkurven und die Art, wie man im Laboratorium auch bei schlechten Geigen einen nullstrahlerähnlichen Schwingungstyp anregen kann, woraus der aufgeschlossene Geigenbaumeister sicherlich einige Anregungen entnehmen wird, sollen Themen des zweiten Teiles dieser Arbeit sein.

II

„Bei nichts ist man mehr in Gefahr, Ursache und Wirkung in einem falschen Zusammenhange zu bringen, als bei der Geige", sagte sehr treffend einmal Fuhr 7). Auf der Geige spielen sich recht komplizierte Vorgänge ab, die durch die verschiedensten Faktoren verursacht werden. Bei der Geige ist es aber nicht sicher, ob man durch Verändern einer Versuchsbedingung nicht auch gleichzeitig eine andere mit verändert, von deren Existenz man noch nichts weiß. Es ist daher notwendig, daß man das komplizierte Schwingungssystem einer Geige auf ein möglichst einfaches zurückführt.

Die Aufnahmetechnik akustischer Frequenzkurven

Den Einfluß der Saiten auf den Klang der Geige, der ja bekannterweise recht groß ist, wird dadurch ausgeschaltet, daß man den Steg auf elektromagnetische Weise in der Höhe der Saitenauflage wagerecht zur Geigen-

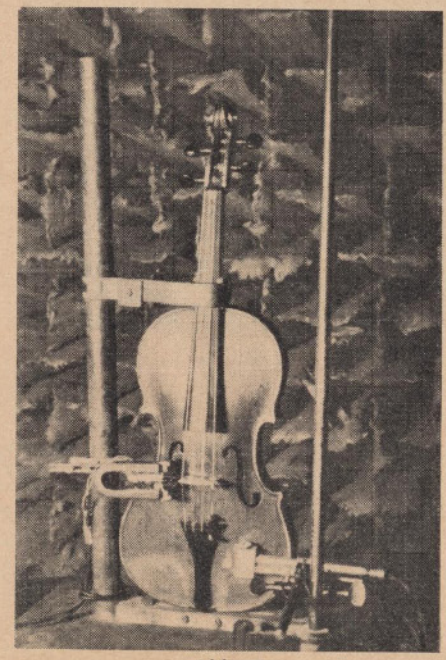


Abb. 7

decke anregt. Durch einen Filzstreifen zwischen den Saiten werden sie am Mitschwingen gehindert. Die störenden Reflektionen der Schallwellen von den Wänden des Zimmers können dadurch vermieden werden, daß die Aufnahmen der Frequenzkurven in einem stark gedämpften, am besten in einem schalltoten Raum vorgenommen werden.

Bild 7 zeigt vor den Schallschluckkörpern eines schalltoten Raumes die in Untersuchung befindliche Geige. Links am Steg ist der Anregungsmagnet zu sehen, der den Steg über ein kleines Metallplättchen aus Trafoblech von 0,3 mm Dicke und 5×3 mm Fläche zu Schwingungen erregt (siehe Pfeil in Bild 8).

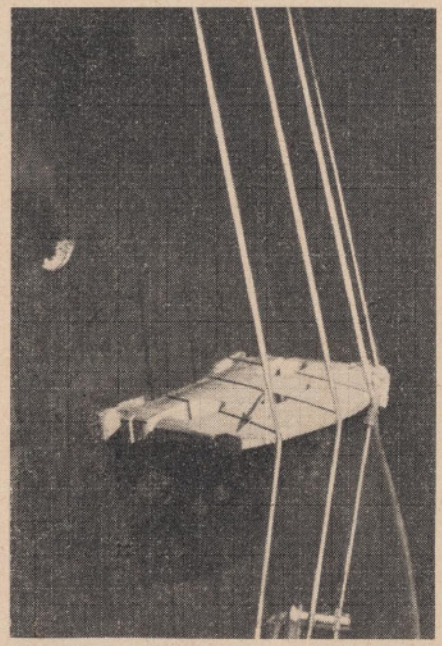


Abb. 8

Dieses Plättchen ist mit Schellack an den Steg geklebt und beeinflußt durch sein vernachlässigbar geringes Gewicht die natürlichen Stegschwingungen nicht. Rechts unten ist die elektrische Meßsonde, die die Schwingungsformen des Geigenkörpers abtastet. Diese Sonde wird in etwa 1 bis 2 mm Abstand vom Geigenkörper gehalten, während man gleichzeitig an einem entsprechenden Meßinstrument die Phasenlage und die Amplitude des geraden „abgetasteten" Punktes abliest. Die Geige wurde also bei den vorliegenden Untersuchungen weder zur Anregung noch zur Abtastung berührt oder gar belastet. Weder brauchte irgend ein Meßpunkt präpariert

zu werden noch wurde der Lack des Instrumentes während der Untersuchung der Schwingungsformen beeinflußt.

Dies sind zwei nicht zu überschätzende Vorzüge des Verfahrens. Durch diese Art „ferndiagnostische" Untersuchungsmethode können gerade die wertvollsten Geigen unserer alten Meister einer Untersuchung jetzt sehr viel leichter zugänglich gemacht werden.

Da kein einziger Punkt der Geige sich beim Tönen im Ruhezustand befindet, wie man mit dieser Meßsonde leicht nachweisen kann, ist das Festklammern der Geige zur Untersuchung ein besonderes Problem, wenn man durch die Art der Einspannung die der Geige eigentümliche und natürliche Schwingungsform nicht willkürlich verändern will. Nur am Drehpunkt des Griffbrettes am oberen Geigenklotz ist es statthaft, die Geige festzulegen. Über alle anderen Festhaltepunkte bildet die Geige Koppelschwingungen mit dem Haltegestell. Sie verändert daher ihre natürliche Schwingungsform und damit die Feinstruktur in ihrer Frequenzkurve.

Das Einspielen einer Geige

Die leichte Veränderbarkeit der Schwingungsformen und Abstrahlungsbedingungen des Geigenkörpers äußert sich in der Verschiebung vorhandener oder in der Entstehung neuer Resonanzhöcker, ohne den prinzipiellen Verlauf der Resonanzkurve, im großen gesehen, zu verändern.

Diese leichte Beeinflußbarkeit der Resonanzkurve muß sich auch beim normalen Spiel der Geige bemerkbar machen. Man kann hierdurch das sogenannte „Einspielen" einer Geige erklären. Der Spieler einer neuen Geige lernt erst ganz allmählich durch den ständigen Gebrauch, wie er das Instrument zu halten hat, um den besten Klang herauszuholen. Durch kleine Spannungen im Geigenkörper, wie sie durch Fingerdruck etwa bewirkt werden können, kann der Spieler die Schwingeigenschaften der Geige und damit auch den Verlauf der Resonanzkurve in gewissen Grenzen beeinflussen. Er kann die Abstrahlbedingungen für bestimmte Töne verbessern oder aber auch verschlechtern. Diese im Unterbewußten erworbenen Kenntnisse wendet der gute Spieler dann instinktiv zu seinem Vorteil an. Man sagt: „Das Instrument ist eingespielt", während in Wirklichkeit der Spieler sich auf das Instrument eingespielt hat. Bleibt das Instrument längere Zeit unbenutzt, so muß der Spieler wieder lernen, das Instrument richtig zu führen, da er sich an die verschiedenen Haltungen nicht mehr genau erinnert.

In einem Versuch wurde eine ganz neue, ungespielte Geige 35 Stunden lang ohne Unterbrechungen mit der größtmöglichen Lautstärke angeregt. Die vor und nach dem Versuch aufgenommenen Frequenzkurven wurden miteinander verglichen. Es ergaben sich nicht die geringsten Änderungen, obwohl die Meßapparatur sehr empfindlich ist und sonst die geringsten „un-

begründeten" Änderungen anzeigt (s. a. Meinel, Lit. 3). Wenn sich neue Geigen ändern, dann tun sie das nicht deswegen, weil sie bespielt werden, sondern nur deshalb, weil der Lack noch nicht ganz abgebunden hat. Die Amplituden der Schwingungen sind zu klein, als daß sie Holzstrukturänderungen hervorrufen könnten. Sie sind mit maximal 10 μ zu klein, um aus dem Elastizitätsbereich des Hook'schen Gesetzes zu kommen.

Witterungseinfluß

Seiner Natur nach ist im Holz immer Leben, solange es gesund ist. Es reagiert auf jede Feuchtigkeitslage des Wetters. Auch durch mehr oder weniger guter Präparation des Geigenholzes ist das Leben in ihm nicht erloschen.

Mit einer genauen Apothekerwaage wurde im Verlauf von zwei Jahren das Gewicht einer Geige laufend überprüft. Es schwankte zwischen 437,35 gr und 449 gr, also um genau 11,65 gr, dem Flüssigkeitsinhalt eines halben Schnapsglases also. In der Zwischenzeit wurde die Geige immer im Geigenkasten aufbewahrt, der seinen Platz auf einem Schrank hatte.

Es nimmt natürlich nicht wunder, daß diese enorme Flüssigkeitsmenge sich irgendwie auf den Klang und auf die Frequenzkurve der Geige auswirkt. Abbildung 9 und 10 zeigt die Frequenzkurve ein und derselben Geige, die einmal in feuchter Witterung und einmal in einem trockenen zentralgeheizten Raum aufgenommen worden ist. Bei der Frequenzkurve 10 der trockenen Geige sieht man entsprechende Resonanzspitzen zu höheren Frequenzen hin verschoben, dabei sind ihre Amplituden im Verhältnis zur unveränderten Luftraumresonanz bei 300 Hz gegenüber der Frequenzkurve der feuchteren Geige höher.

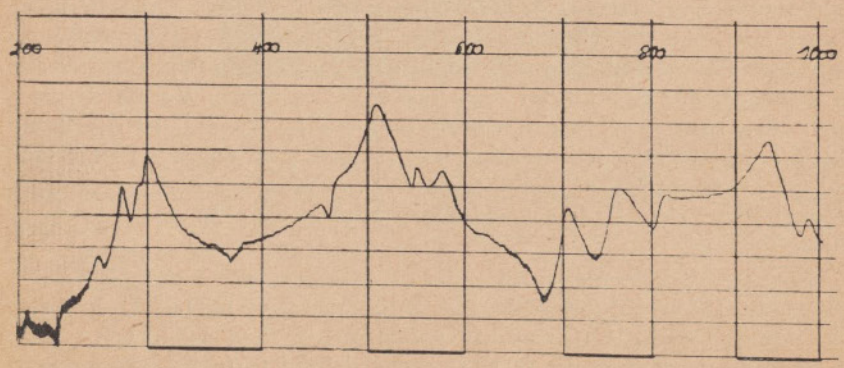


Abb. 9 Feuchtere Geige

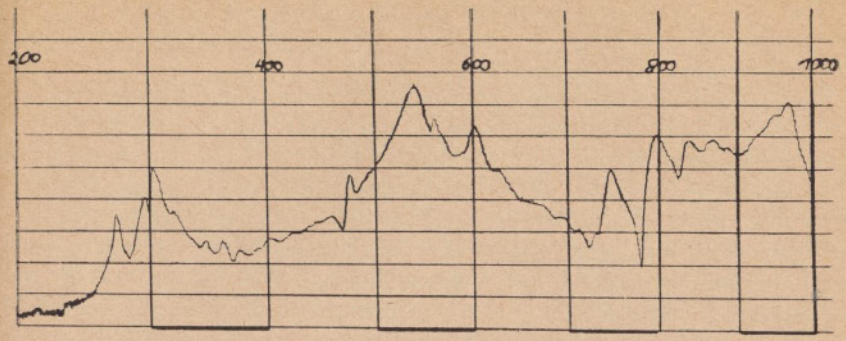


Abb. 10 Trockenere Geige

Nach der Formel

$$\text{Frequenz} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\text{Steife}}{\text{Masse}}}$$

ist die Erhöhung der Resonanzfrequenz bei der trockneren Geige (geringere Masse) auch verständlich. Die Abnahme der Amplitudenhöhe in der Resonanz der feuchteren Geige begründet sich auf das mit der Feuchtigkeit zunehmende logarithmische Dekrement, wie in einer zu diesem Zweck angefertigten Apparatur nachgewiesen werden konnte. 8)

Beide Dinge, die Erniedrigung der Resonanzfrequenzen und die Abnahme ihrer Resonanzamplituden, erklären augenscheinlich den bekannten gedeckten Kang einer Geige bei sehr feuchtem Wetter. Ihr Ton ist dumpfer und verklingt schneller.

Die Schwingungsmechanik der Geige

Die natürliche Anregungsrichtung ist bei verschiedenen Saiten verschieden. Bei früheren Untersuchungen wurde fast ausschließlich die Anregung parallel zur Geigendecke gewählt, was einem Anstreichen etwa der a- oder d-Saite entsprechen würde. Bei der g- und e-Saite streicht der Bogen steiler. Beim Versuch, diese etwas steilere Anregungsrichtung nachzuahmen, wurden Wirkungen gefunden, die mich veranlaßten, die Versteilerung bis zur Senkrechten zu übertreiben. Obwohl diese Anregungsrichtung in der Praxis nicht vorkommen kann, gab sie im Versuch doch wesentliche Aufschlüsse.

Man sieht an den 4 Kurven der Abbildungen 11 bis 14 einer guten Geige, wie das Gebiet zwischen 600 und 800 Hz, das bei den meisten Geigen ein tiefes Loch in der Resonanzkurve darstellt, sich immer mehr und mehr anhebt, je steiler man die Anregung macht. Bei senkrechter Anregung ist von einem Bereich geringerer Lautstärke nur noch wenig zu bemerken.

Was ist die Ursache dieser breitbandigen, bedeutenden Änderung in der Frequenzkurve, die schon durch kleine Winkeländerung der Anregungsrichtung bewirkt werden konnte?

Die Geigenbauer scheinen die günstige Wirkung eines steileren Bogenstriches auch geahnt zu haben, indem sie den Steg nicht symmetrisch bauten, sondern die Seite der e-Saite tiefer legten. Dadurch kann der Bogen beim Spiel auf der a-Seite, die für dieses Frequenzgebiet von ca. 600 bis vielleicht 800 Hz im allgemeinen in Frage kommt, steiler geführt werden.

Wenn man nun den Verlauf der Schwingungsbilder auf der Geige (Abb. 15) mit den zugehörigen Frequenzkurven (Abb. 11 mit 14) in Beziehung setzt, dann findet man (Schwingungsbild 20 bzw. 23 oder 24), daß bei senkrechter Anregung, dort wo sonst ein Minimumgebiet liegt, die Knotenlinie sich ringförmig um den Steg herum zieht. Sie geht nicht mehr zwischen beiden Stegfüßen hindurch. Schwingungsmäßig heißt das, daß der Steg hier nicht mehr drehend schwingt, also nicht mehr wechselseitig mit dem einen und dann mit dem anderen Stegfuß auf die Decke drückt, sondern in sich parallel und senkrecht zur Decke schwingt. Die Schwingungsamplituden sind dabei relativ hoch. Die Brust der Geige schwingt bei 700 Hz herum besonders leicht conphas. Das heißt, daß durch senkrechte Anregung das Prinzip eines Nullstrahlers besonders leicht zur Ausbildung kommen kann.

Wird der Steg nun so angeregt, wie es beim normalen Spiel auf der a- und d-Saite geschieht, dann kann der Steg nur eine Drehschwingung in der eigenen Ebene ausführen. Die Brust der Geige hat aber in diesem Frequenzgebiet die Neigung, mit recht großer Amplitude einheitlich in ihrer ganzen Ausdehnung zu schwingen. Dieser Drehschwingung des Steges überlagert sich dann eine Parallelschwingung, wodurch beide Stegfüße gleichzeitig auf- und abschwingen. Wird die Amplitude dieser Parallelschwingung gleich bzw. größer als die der Drehschwingung, dann kann die

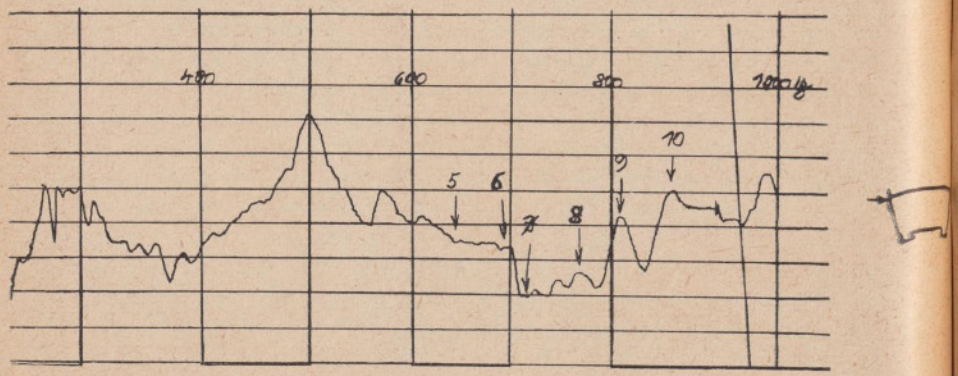


Abb. 11

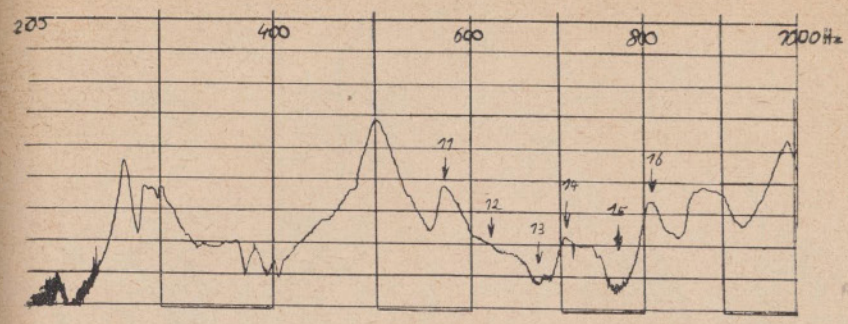


Abb. 12

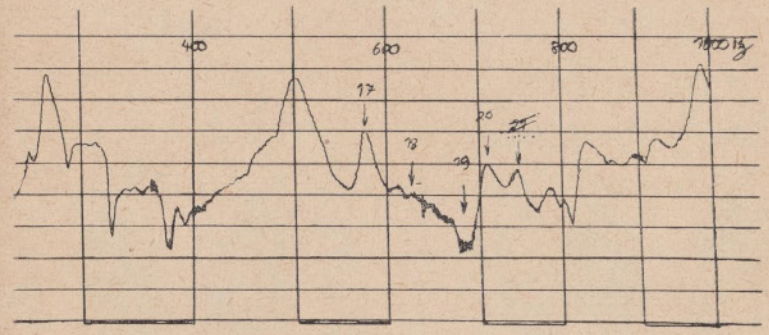


Abb. 13

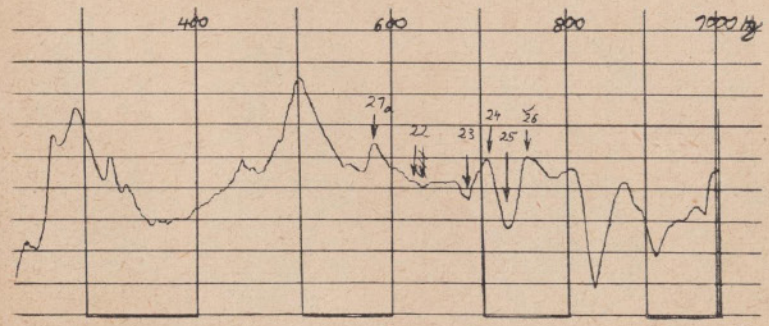


Abb. 14

650 Hz

690 Hz

720 Hz

760 Hz

810 Hz

860 Hz

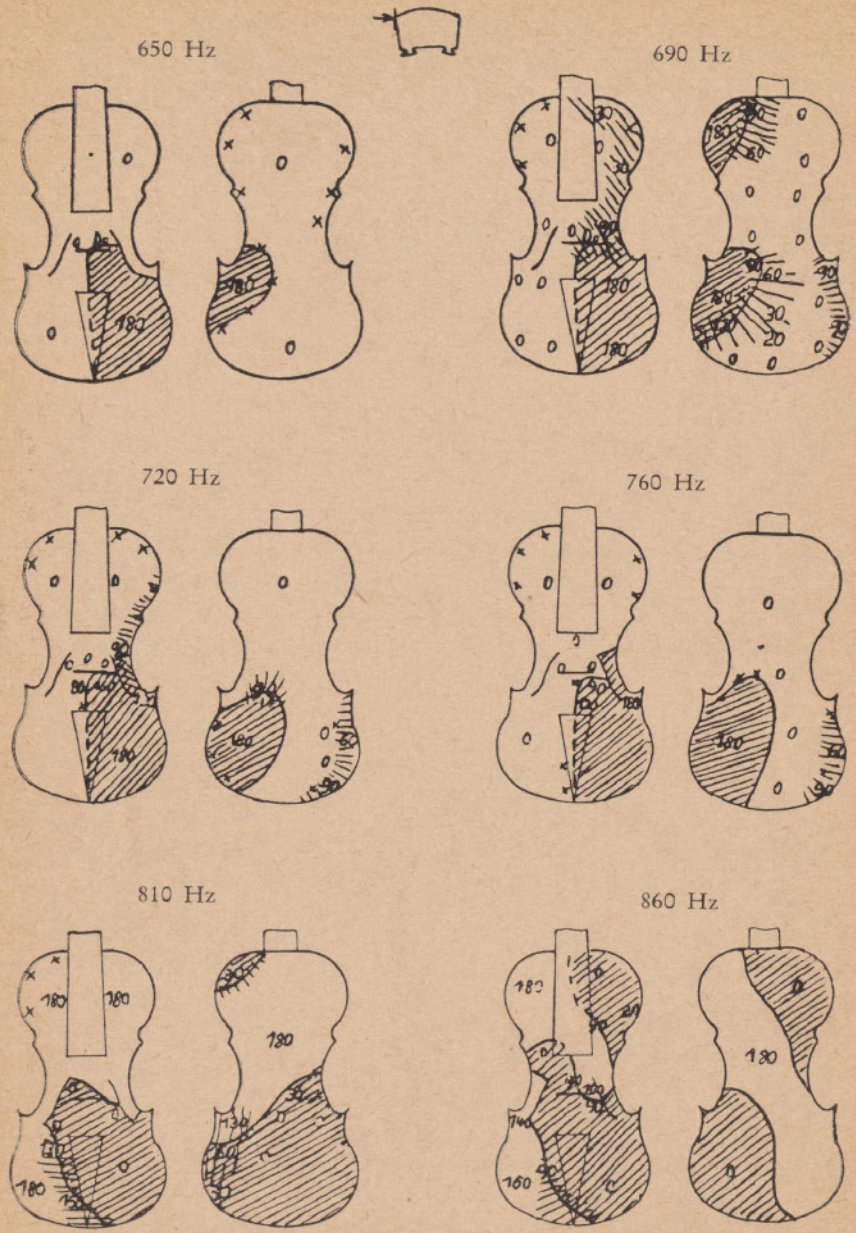


Abb. 15

580 Hz

620 Hz

670 Hz

775 Hz

11

12

13

15

710 Hz

810 Hz

14

16

580 Hz

620 Hz

690 Hz

760 Hz

17

18

19

21

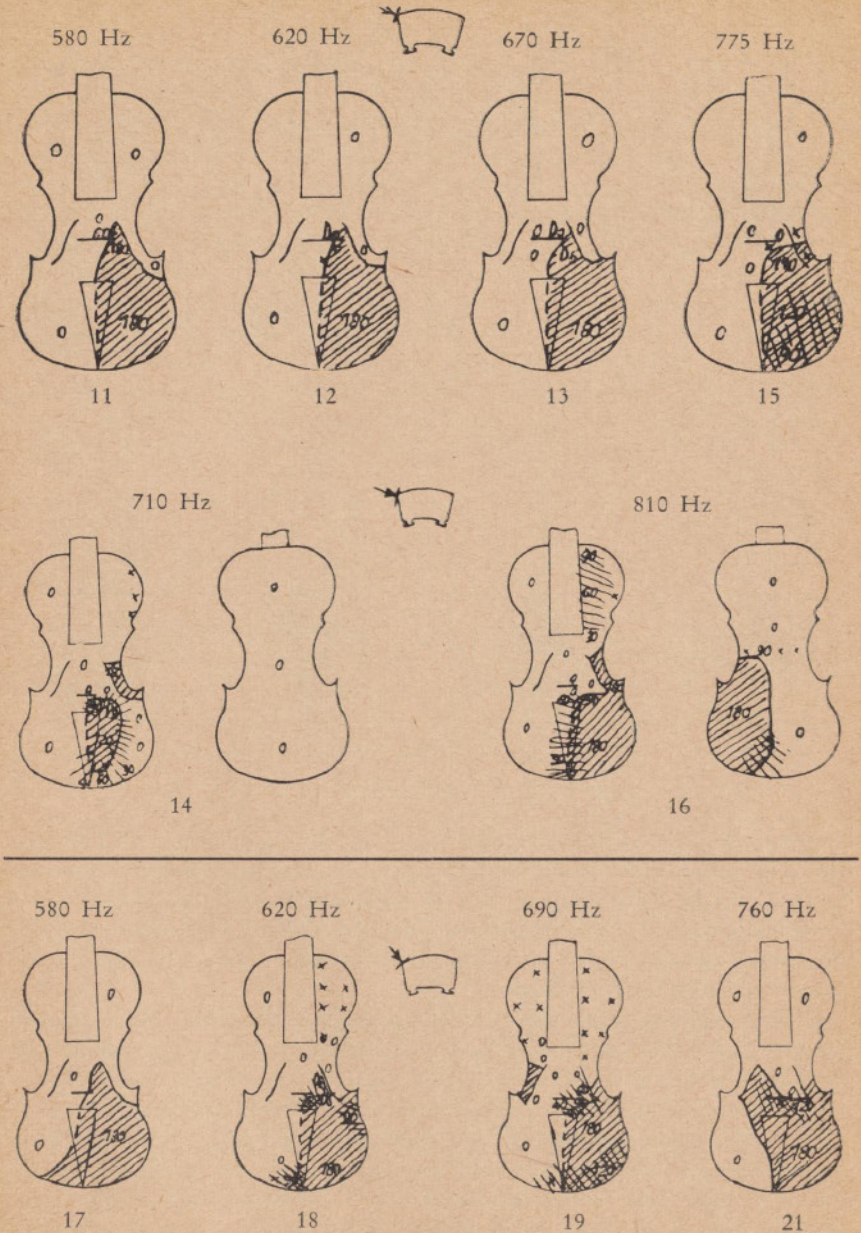


Abb. 15

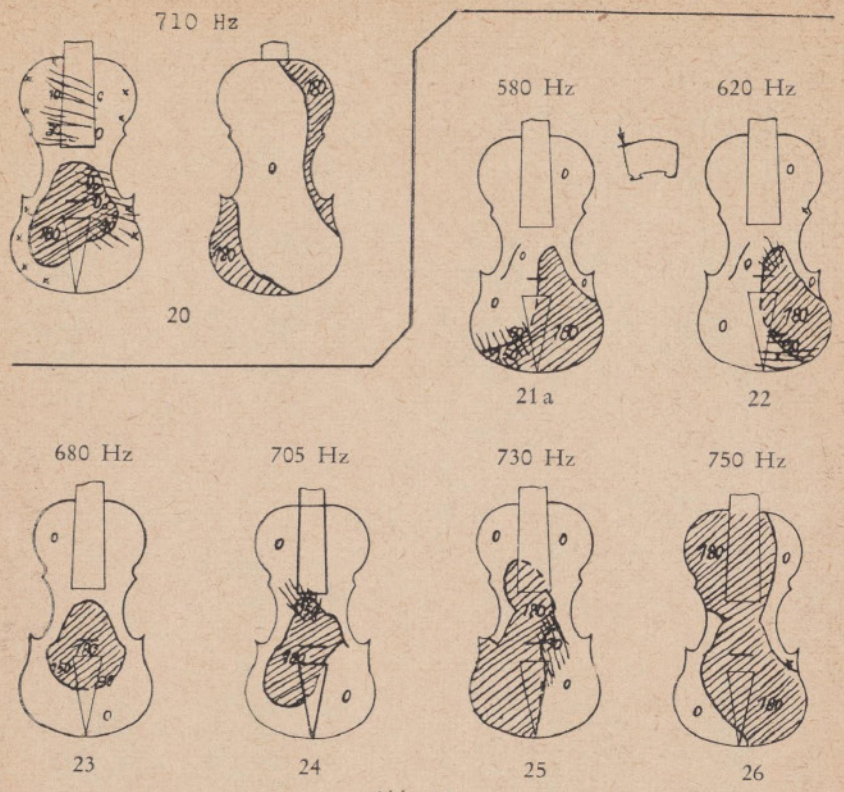


Abb. 15

Knotenlinie nicht zwischen beiden Stegfüßen hindurchlaufen. So kann das Bild 5, 6, 7 und 8 der Abbildung 15 entstehen. Der linke Stegfuß überträgt dann allein die Schwingungen auf den Baßbalken und die Decke. Wenn der Stimmstock sich in Ruhe befindet, dann werden die Schwingungen über die Zargen auf den Boden übertragen. Stellenweise findet man dann an den Zargen recht große Amplituden.

Die Schwingungsformen des Bodens sind sehr viel einfacher als diejenigen der Decke. Die Bilder der Bodenschwingungen sind immer dann nicht gezeichnet worden, wenn sie sich gegenüber dem bei der nächst tieferen Frequenz gefundenen nicht oder nur unwesentlich unterscheiden.

Die wagerechte Schwingung der Anregung wird über die Drehschwingung des Steges in eine senkrechte Schwingung umgewandelt. Dadurch wird nur ein kleiner Teil der anregenden Kraft zur Schwingungsanfachung ausgenutzt. Der Ton ist daher auch immer bei diesen Schwingungsformen schwach. Wirkt die ganze Anregungskraft gleich, also ohne den Umweg

über die Drehschwingungen, in die für die Schwingungsanfachung nutzbare Richtung, dann entstehen die Bilder 23 und 24 für senkrechte Anregungsrichtung, deren Lautstärke bedeutend größer ist.

Bei dieser eigenartigen Schwingung der Bilder 5, 6, 7 und 8 bewegen sich große Teile von Decke und Boden gegeneinander. Vernachlässigt man die verhältnismäßig kleine Fläche, die gegenphasig schwingt, so haben wir hier das Beispiel einer atmenden Kugel vor uns, den Typ des Nullstrahlers. Backhaus stellte bereits 1931 fest 9), daß die nullstrahlerartige Schwingungsform in der Gegend um 700 Hz ein Charakteristikum einer guten Geige sei.

Die zahlreichen Aufnahmen von Schwingungsbildern ergaben, daß bei sämtlichen Geigen, ob sie handgearbeitet oder industriell hergestellt sind, sich im Gebiet um 700 Hz den Drehschwingungen des Steges große Amplituden überlagern, die senkrecht zur Decke gerichtet sind und den Steg zu Parallelschwingungen veranlassen, die senkrecht zur Anregungsrichtung liegen.

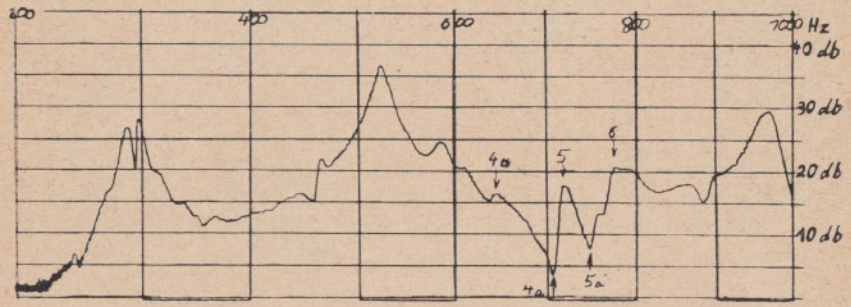


Abb. 16

Zum raschen Vergleich zu den Schwingungsbildern der guten Geige der Abbildung 15 werden in Abbildung 16 und 17 die Frequenzkurve und die Schwingungsbilder einer Fabrikgeige bei wagerechter Anregung gezeigt. Man findet hier im Gegensatz zu den Ergebnissen der guten Geige keine scharfen Knotenlinien. Nur bei 645 Hz ist eine schwache Andeutung eines nullstrahlerähnlichen Schwingungstypes zu finden, der aber nicht zur richtigen Ausbildung kommt. Bei der Stegschwingung zeigt sich hier deutlich eine Überlagerung von Parallel- und Drehschwingung, so daß keinem Stegfuß eine klare Phase von 0 bzw. 180° zugeordnet werden kann.

An einer ganz ausgezeichneten 200jährigen italienischen Deconet-Geige (1754) und einer Amatikopie von Sebastian Klotz mit einem sehr tragfähigen Ton zeigte sich, daß der Unterschied in der Frequenzkurve zwischen wagerechter und senkrechter Anregung sehr gering war. Bei senkrechter Anregung bildeten sich wohl auch Inseln, aber die Knotenlinien

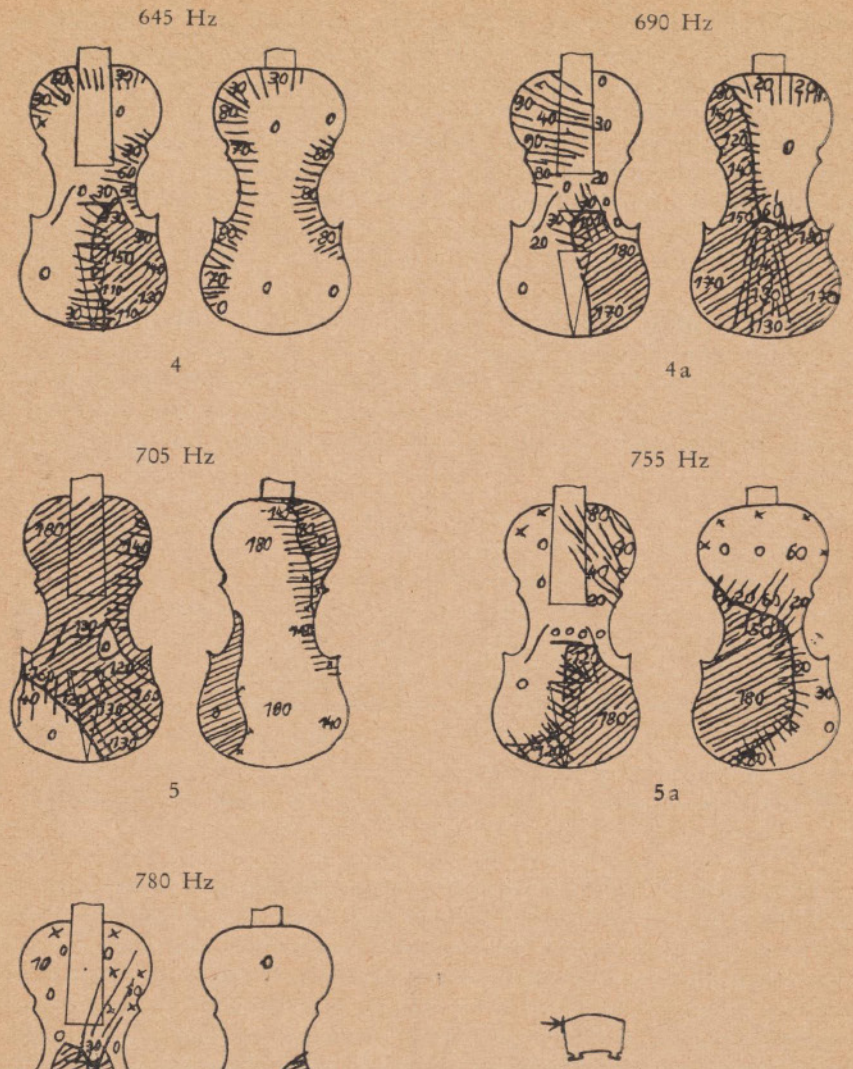


Abb. 17

gingen immer zwischen den beiden Stegfüßen hindurch. Bei wagerechter Anregung dagegen drückte sich die Knotenlinie mit Vorliebe am Steg vorbei, so daß der Nullstrahlertyp gemäß Bild 5 oder 14 der Abbildung 15 ganz klar herauskam. Die Abbildung 18 und 19 zeigt, daß bei der genannten Klotzgeige bezüglich der Lautstärkeabsenkung von 700 bis 800 Hz (man vergleiche mit den Abbildungen 11 und 14) zwischen wagerechter und senkrechter Anregung kaum ein Unterschied zu bemerken ist.

Auch bezüglich der Schwingungsformen ist kein wesentlicher Unterschied zwischen senkrechter und wagerechter Anregung festzustellen. Die Schwingungsbilder 2 bis 5 der Abbildung 20, die bei senkrechter Anregung aufgenommen worden sind, unterscheiden sich hinsichtlich ihrer prinzipiellen Form nicht von den Aufnahmen 6 bis 11 für übliche wagerechte Anregung. (Abb. 21). Der Boden dieser Amati-Kopie schwang bei allen Bildern ganz ähnlich wie Bild 6 sie zeigt. Bemerkenswert bei diesem Instrument ist die Tatsache, daß der Nullstrahler bei 610 Hz, der zwischen 720 und 800 Hz wieder etwas zerfällt, bei 900 Hz noch einmal in ganz besonders ausgeprägter Form wiederkehrt. Erst bei noch höheren Frequenzen wird die Decken- und Bodenunterteilung so stark, daß der Nullstrahlertyp bei dieser Geige nicht mehr wiederkehren kann.

Diese Amati-Kopie vermag etwa von 600 bis 900 Hz mehr oder weniger gut als Nullstrahler zu schwingen. Sie hat daher einen viel bewunderten, raumfüllenden Ton. Die große Bedeutung des Nullstrahlertypus für den Klang, die schon in früheren Arbeiten vermutet worden ist 9), findet hierin eine deutliche Bestätigung.

Die Stegschwingungen spielen also nach dem bisher gesagten eine besonders wichtige Rolle für die Ausbildung von günstigen Schwingungsformen auf der Geige. Man kann diese Ergebnisse in folgenden Punkten zusammenfassen:

1. Die Phasenverschiebung der Bewegung der beiden Stegfüße muß entweder 0° oder 180° sein. (Vergl. die Abb. 17, wo diese Forderung nicht erfüllt ist).
2. Der nullstrahlerähnliche Schwingungstyp ist in jedem Falle — auch bei schlechten Geigen — anzuregen, wenn der Steg längs der auf dem Baßbalken senkrecht stehenden schmalen Seitenkante, d. h. zu Parallelschwingungen, angeregt wird (entspr. Abb. 14).
3. Bei guten Geigen kann auch bei wagerechter Anregungsrichtung eine kleine Komponente parallel zur senkrechten Seitenkante (s. Abb. 15, Fig. 8) entstehen.
4. Sehr gute Geigen sind bezüglich ihrer abgestrahlten Lautstärke unabhängig von der Anregungsrichtung (Abb. 18/19). Die Umwandlung der wagerechten Anregungskraft in eine senkrechte vollzieht sich hier ohne merkbare Verluste (Abb. 21, Fig. 11).

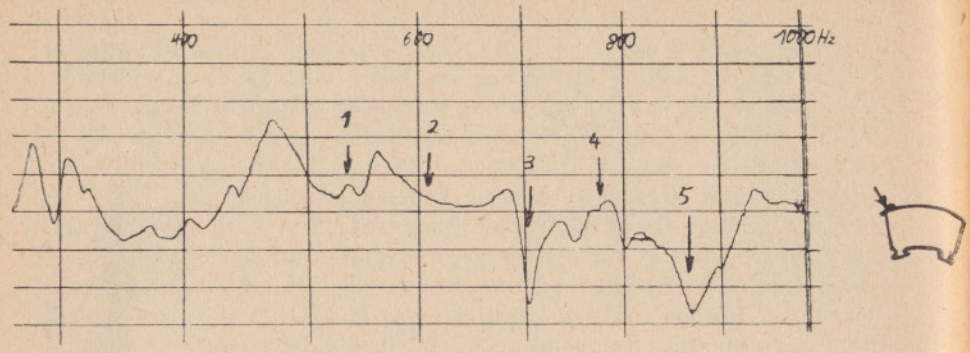


Abb. 18

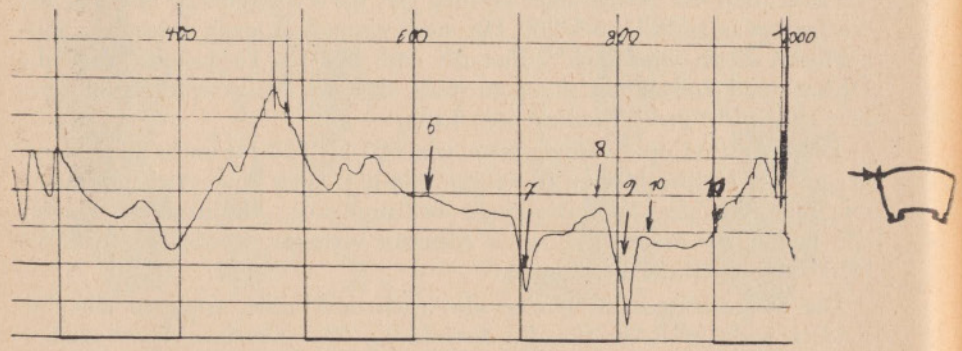


Abb. 19

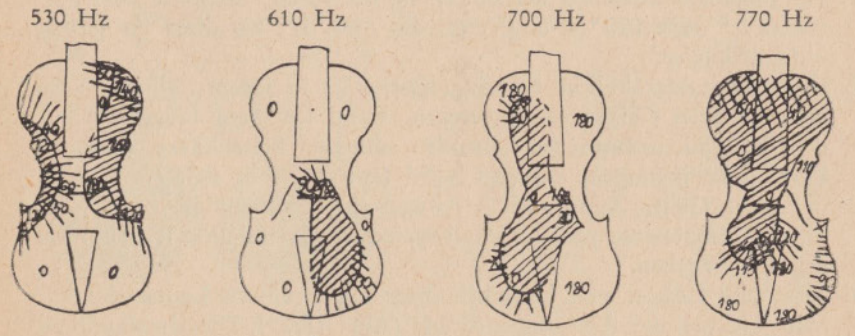


Abb. 20

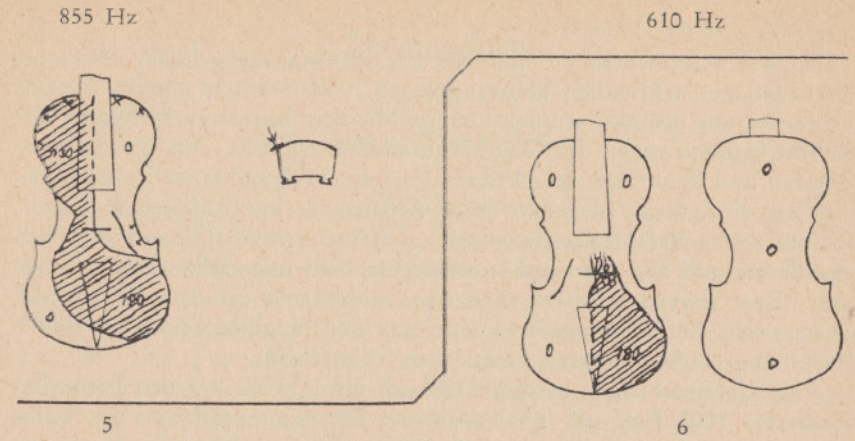
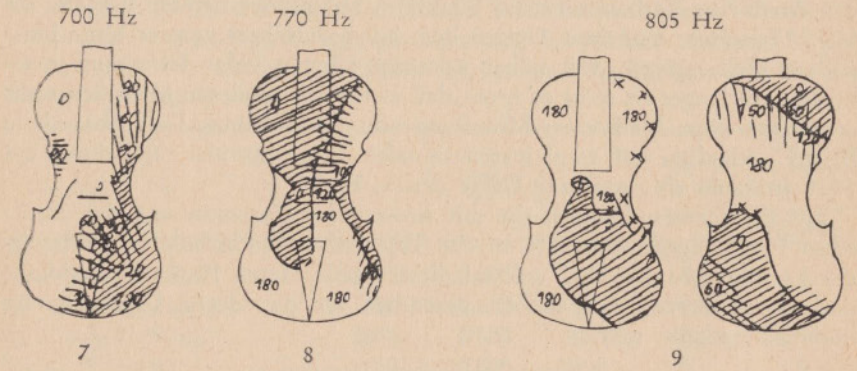


Abb. 20



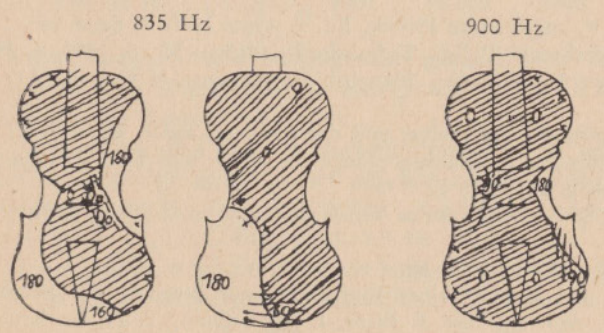


Abb. 21

Auswertung der Versuche

Die oben aufgestellten 4 Punkte für die Schwingungsmechanik des Steges entstanden aus zahlreichen Untersuchungen, von denen in diesem Aufsatz nur ein Auszug gebracht werden konnte. Mit dem benutzten Meßgerät, das die Schwingungsformen der Geige abzunehmen gestattet, ohne sie dabei zu berühren und ohne besondere Präparation der Meßpunkte, sollte man nun beim Bau einer Geige suczessive jeden Arbeitsgang kontrollieren und somit langsam solche Erfahrungen sammeln, daß man willkürlich auf die oben gefundenen und für notwendig erachteten Schwingungsformen kommen kann. Der Geigenbaumeister wird dann nicht mehr auf den Zufall oder nur auf sein Gefühl angewiesen sein, um eine möglichst günstige Schallabstrahlung bei bevorzugten Frequenzen zu erreichen.

Obige Untersuchungen beschränkten sich mit Absicht auf den Frequenzbereich bis 1000 Hz, um das komplexe Schwingungsgebilde der Geige wenigstens in einem Teilbereich näher beleuchten zu können. Nach den Feststellungen von Backhaus/Weymann 10), Meinel 3) und Rohloff 1) würden durch eine Verbesserung der Schallabstrahlung der tieferen Bereiche bis 1000 Hz unsere modernen Geigen dem Klangcharakter unserer alten klassischen Meistergeigen viel näher kommen können. Das Geheimnis eines Stradivariklanges ist nicht so groß, daß es für uns moderne Menschen nicht erreichbar wäre. Nach einer Mitteilung von Adolf König, Geigenbauschule Brienz, erhielten auf zwei internationalen Wettbewerben in Brüssel um 1930 jedesmal eine moderne Geige den 1. Preis!

Für die Untersuchungen, die mit finanzieller Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der Technischen Hochschule in Karlsruhe durchgeführt worden sind, soll an dieser Stelle Herrn Professor Backhaus und Herrn Professor Spandöck besonders für die ideelle Unterstützung nochmals gedankt sein.

LITERATURVERZEICHNIS:

E. Rohloff, Zeitschrift f. angewandte Physik, Bd. 2, 1950, Heft 4, Seite 145

J. F. Schouten, Residuentheorie, Philips Technische Rundschau Nr. 5, 1940, S. 294

Meinel, Die akustischen Eigenschaften klanglich hervorragender Geigen, AZ 4 1939, S. 89

Fr. Kollmann, Die Technilofie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Bd. 1, 1951

Skudrzyk, Die Bedeutung der Ausgleichsvorgänge für Musik und Tonübertragung, Elektrot. u. Maschinenbau, 67, Heft 10, 1950

H. Backhaus, Über die Schwingungsformen von Geigenkörpern, Zeitschr. f. Physik, 72, 1931

K. Fuhr, Die akustischen Rätsel der Geige

H. Kinscher, Aufbau und Eichung einer Einrichtung zur Messung der Feuchte von Holzstäben. Dipl. Arb. am Inst. f. theor. Elektrotechnik, T. H. Karlsruhe, 1950

Backhaus und Weymann, Über neuere Ergebnisse der Geigenforschung, A. Z. 5, 1939, S. 302

Musikräume

von

WILLI FURRER*)

Konzertsaal

Es gibt keine eindeutige, scharf definierte optimale Nachhallzeit für Musik. Es kommt dabei auf die Art der Musik an, und auch die individuellen Beurteilungen sind oft recht verschieden; ferner gibt es auch verschiedene Geschmachtsrichtungen, die sich mit der Zeit ändern usw.; sicher ist jedoch, daß für einen guten Musiksaal immer eine verhältnismäßig lange Nachhallzeit notwendig ist. Durch diese Überlegung allein ist im allgemeinen schon die maximal zulässige Raumausnützung, das heißt das notwendige Volumen pro Zuhörer, bestimmt, da das Publikum immer den weitaus größten und dabei unvermeidlichen Anteil an der Gesamtabsorption eines Saales darstellt. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten einiger besonders typischer, als sehr gut bekannter Konzertsäle dargestellt, wovon zwei im 19. Jahrhundert gebaut wurden und die übrigen drei aus der letzten Zeit stammen.

Saal	Baujahr	Volumen m^3	Platzzahl	Volumen/ Zuhörer m^3	Nachhallzeit im mittleren Frequenzgebiet mit Publikum
Stadt-Casino, Basel	1876	10 500	1400	7,5	1,7 s
Gewandhaus, Leipzig	1886	10 000	1500	6,6	1,3 s
La Chaux-de-Fonds	1955	6 800	1032	6,6	1,6 s
Turku, Finnland	1953	10 000	1000	10	1,9 s
Royal Festival Hall, London .	1951	22 000	3400	6,4	1,5 s

Vier dieser Säle sind im folgenden genauer beschrieben und abgebildet. Als wichtigste Grundlagen für den Entwurf großer Konzertsäle lassen sich die folgenden Punkte festhalten:

Das Volumen pro Zuhörer muß mindestens 6,5 m^3 betragen; kleinere spezifische Volumina gehen immer auf Kosten der akustischen Qualität. Das Optimum liegt bei 7—8 m^3/Zuhörer, die obere Grenze, bei der schon zusätzliche Ausorption nötig wird, bei 10 m^3/Zuhörer.

Das maximal mögliche Volumen liegt bei höchstens 20 000 m^3, wobei für Solisten schon Schwierigkeiten entstehen. Das optimale Volumen liegt etwa

*) Nachdruck mit freundlicher Erlaubnis des Verlegers *Birkhäuser, Basel und Stuttgart*, aus dem eben erschienenen Buch: *W. Furrer / Akustik* (Raum- und Bauakustik für Architekten).

zwischen 10 000 und 15 000 m³, wobei auch kleine Volumina von 6000 bis 7000 m³ sehr gute Resultate ergeben.

Das maximal mögliche Fassungsvermögen für einen Konzertsaal mit optimalen akustischen Eigenschaften ergibt sich daraus zu 1600 bis 1700 Plätzen.

Musiksaal, Basel

Der Musiksaal des Stadt-Casinos in Basel und der heute leider zerstörte Gewandhaussaal in Leipzig sind beide durch ihre vorzüglichen akustischen

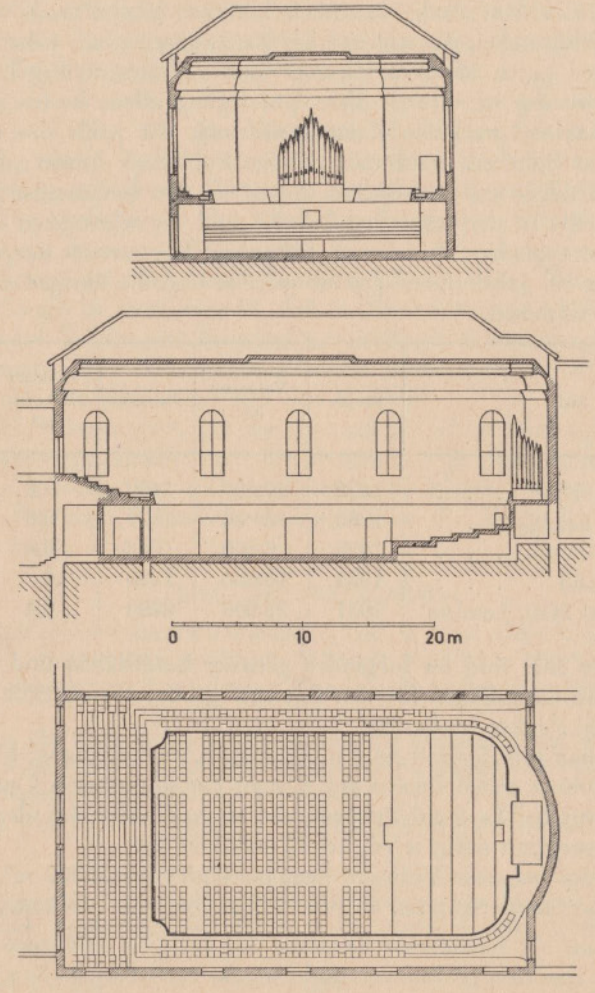


Abb. 77 Musiksaal Stadt-Casino, Basel (1876)

Eigenschaften bekannt; sie stammen aus der gleichen Zeit und sind sehr ähnlich gebaut. Wie die Abb. 77 zeigt, ist die Raumform des Musiksaales in Basel sehr einfach, im wesentlichen quaderförmig, doch ist aus der Abb. 78 ersichtlich, daß die dem Geschmack des 19. Jahrhunderts entsprechende Ausschmückung des Saales die Diffusität stark erhöht, was unzweifelhaft mit ein Grund für die vorzügliche Akustik ist. Da die Säle ursprünglich nicht nur für Konzerte benutzt wurden, sondern auch für alle möglichen gesellschaftlichen Anlässe, wie Bälle, Bankette usw., zu dienen hatten, mußte der Boden des Parketts eben, das heißt ohne Sitzüberhöhung gebaut werden. Dies ist der einzig wirkliche Nachteil, den diese Säle in akustischer Beziehung aufweisen. Ferner konnte nur eine leichte Holzbestuhlung vorgesehen werden, die ohne großen Aufwand wegnehmbar sein muß. Das kommt deutlich in den Nachhallkurven zum Ausdruck; ohne Publikum beträgt die Nachhallzeit bis zu 3,5 s; nur im besetzten Zustand liegt sie mit 1,7 s im optimalen Bereich. Dadurch werden zum Beispiel Proben im leeren Saal sehr erschwert. Die aufgehängte Stuckdecke und die zahlreichen Holzverkleidungen bewirken die notwendige Absorption der tiefen Frequenzen.

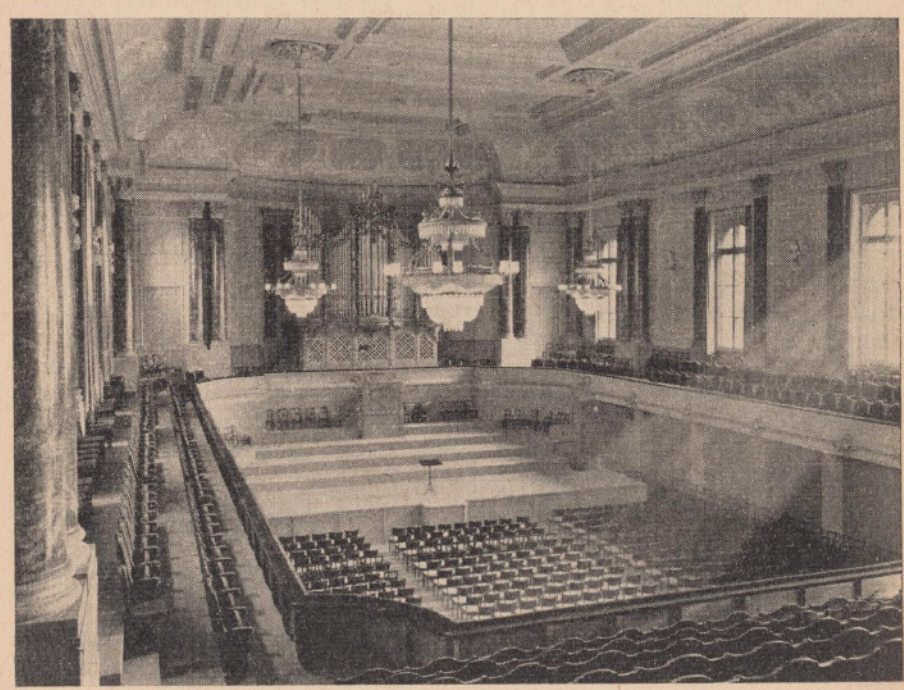


Abb. 78 Musiksaal Stadt-Casino Basel (Photo Spreng, Basel)

Konzertsaal „Musica“, La Chaux-de-Fonds

Dieser Saal hat ebenfalls eine sehr einfache quaderförmige Form, wobei aber durch eine sorgfältige Detailplanung für eine genügende Diffusität gesorgt wurde (Abb. 79). Aus baulichen Gründen war leider nur eine ungenügende Sitzüberhöhung des Parketts möglich, dagegen konnten Mittel- und Seitengalarien richtig überhöht werden; diese laufen zudem leicht trapezförmig zu, und die Galeriebrüstungen sind nach oben geneigt. Ebenso sind die Galerieunterseiten stark geneigt. Die großen Längswände sind durch kräftige, vorstehende Holzstäbe unterbrochen, unterhalb der Galerien sorgen die tiefen Türnischen für genügend Diffusität. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Ausbildung der aufgehängten Gipsdecke geschenkt, deren tiefe Kassetten sehr diffus reflektieren; die glatten Randflächen erhielten eine Neigung von 10 %. Die Wände haben eine Holzverkleidung auf Lattenrost; sie besteht nur aus einer sehr dünnen Holzschicht, die auf einer Holzfaserplatte aufgeklebt ist; mittels verschieden bemessener Luftzwischenräume und Veränderung der Plattenmassen durch hinten aufgeklebte Holzstücke wurde dafür gesorgt, daß sich die Resonanzfrequenzen der Wandverkleidung über einen möglichst weiten Bereich verteilen.

Ursprünglich war ferner vorgesehen, über dem Orchesterpodium Reflektoren aus Gips oder Holz aufzuhängen, um eine möglichst gleichmäßige Schallversorgung über den ganzen Zuhörerraum, besonders seiner hinteren Reihen, zu gewährleisten; mit Rücksicht auf die Orgel mußte dieser Gedanke dann aufgegeben werden. Die Orgel hinter dem Orchesterpodium ist möglichst hoch oben angeordnet, um in der Aufstellung von großen Orchestern und Chören möglichst frei zu sein. Für kleine Orchester und Solistenkonzerte kann das Podium verkürzt werden, wodurch sie die Zahl der Zuhörerplätze von 1032 auf 1150 steigern läßt; dies ist nicht nur akustisch vernünftig, sondern auch wirtschaftlich gegeben.

Originell ist auch die Ausbildung der Rückwand. Die aus verschiedenen Gründen gewünschten Fenster müssen bei abendlichen Konzerten abgedeckt werden, zudem wäre ihre Schalldämmung zu gering, um Störungen durch Straßenlärm auszuschalten. Sie werden daher durch eine innen angebrachte Faltwand überdeckt, wodurch sich nicht nur eine wesentliche Verbesserung der Schalldämmung erzielen läßt, sondern auch eine große Vorhangfläche vermieden wird, die eine unerwünschte Erhöhung der Absorption bei den hohen Frequenzen mit sich gebracht hätte.

Die Abb. 80 zeigt die gemessenen Nachhallzeiten dieses Saales; dank der Polsterbestuhlung ist der Unterschied zwischen dem leeren und dem voll besetzten Zustand nur gering. Der Frequenzgang ist sehr ausgeglichen, und die Nachhallzeiten liegen im optimalen Bereich.

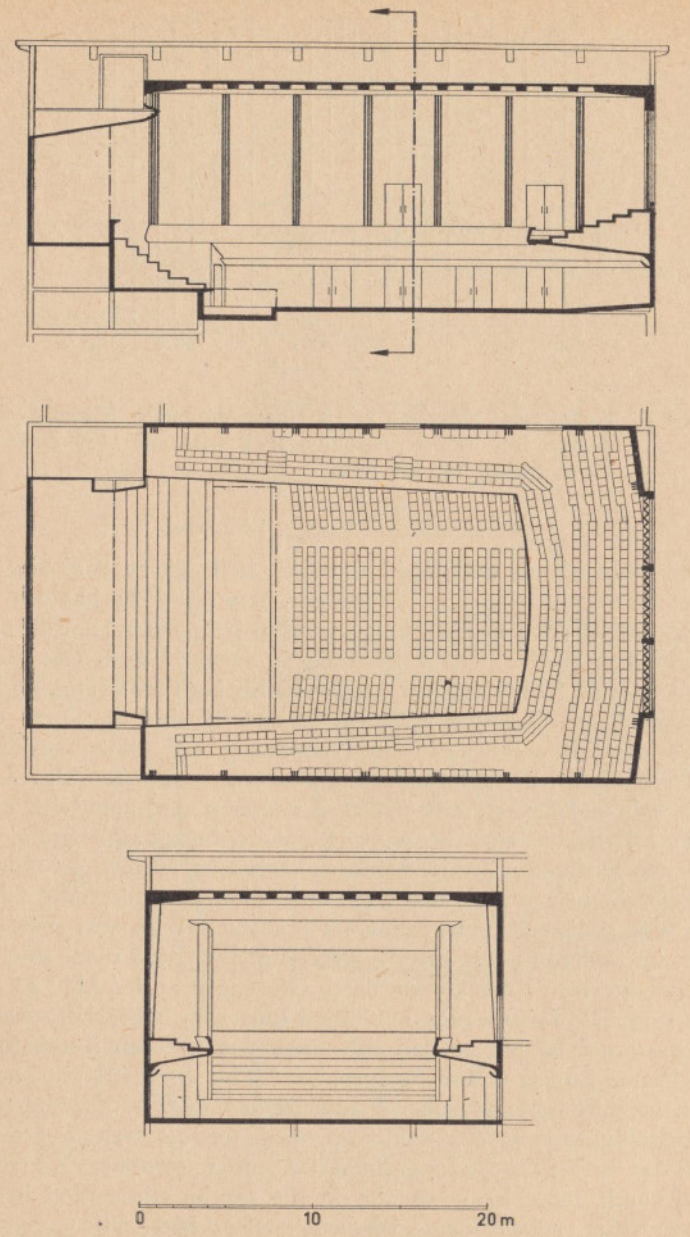


Abb. 79 Konzertsaal in La Chaux-de-Fonds (Architekten H. Bieri und R. Chapallaz, 1955)

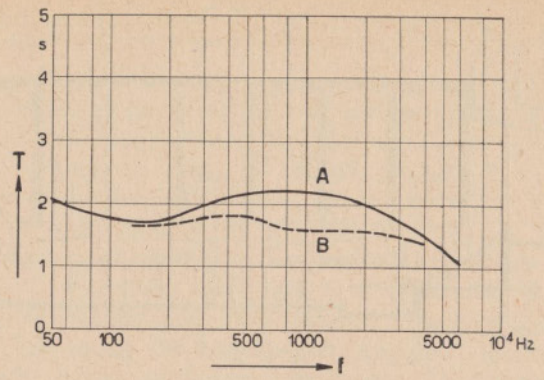


Abb. 80 Konzertsaal »Musica« in La Chaux-de-Fonds; Nachhallzeiten. A Saal leer (Polsterbestuhlung); B Saal mit 1030 Zuhörern, 70 Musikern, 140 Sängern.

Konzertsaal in Turku, Finnland

Sowohl akustisch als auch architektonisch stellt dieser Saal eine ebenso bemerkenswerte wie originelle Lösung dar. Der Architekt hat sich bewußt von allen überlieferten Formen und Lösungen freigemacht, um die funktionell akustischen Forderungen vollständig zu verwirklichen. Das spezifische Volumen ist mit 10 m³/Zuhörer ungewöhnlich hoch und ermöglicht eine lange Nachhallzeit. Aus den Abb. 81, 82 und 83 sind die Form und die Bauweise deutlich ersichtlich. Die Anordnung der Plätze gewährleistet kurze, freie Schallwege und gleichzeitig eine ausgezeichnete Sicht. Alle größeren Wand- und Deckenflächen sind so aufgelöst und unterteilt, daß eine vorzügliche Diffusität entsteht, wobei für die technisch günstigsten, konvex gekrümmten Diffusoren architektonisch interessante Formen gefunden wurden. Ferner ist bemerswert, daß Holzverkleidungen vollständig fehlen, so daß für eine genügende Absorption im Frequenzbereich von etwa 100 bis 400 Hz eine andere Lösung gesucht werden mußte; dazu dient eine Anzahl von Helmholtzschen Resonatoren, deren Öffnungen in der Abb. 83 deutlich sichtbar sind. Die Innenwände mit ihrem Luftraum haben tiefe Resonanzfrequenzen unter 50 Hz, so daß sich zusammen mit den Resonatoren die Absorption im ganzen untern Frequenzbereich bis etwa 400 Hz kontrollieren läßt. Im mittleren und hohen Frequenzgebiet (400—3000 Hz) stellt die Polsterbestuhlung, bzw. das Publikum wiederum die weitaus größte Absorption dar, wobei die Sitzunterseiten der Stühle perforiert sind (Abb. 83), damit sie auch aufgeklappt annähernd die gleiche Absorption bewahren. Verhältnismäßig unbedeutende Flächen poröser Materialien wurden an Stellen angebracht, wo die Gefahr von stehenden Wellen oder Flatterechos besteht, zum Beispiel an der Unterseite der Galerie. Die Nachhallzeit des

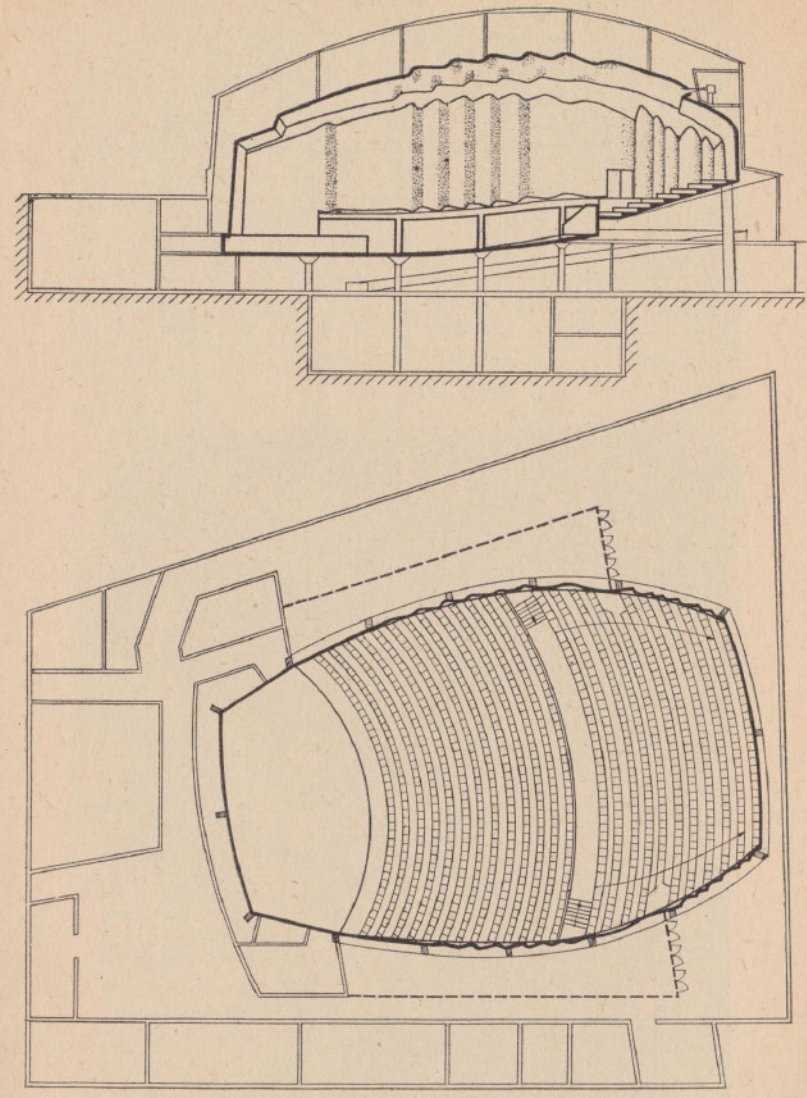


Abb. 81a Konzertsaal Turku (Architekt R. V. Luukkonen, Ingenieur P. Arni, 1953)

Raumes liegt im mittleren Frequenzgebiet bei 2,0 s leer und 1,8 s besetzt, um bei den tiefen Frequenzen gegen 3 s anzusteigen, so daß der Saal für romantische Musik optimale Verhältnisse bietet.

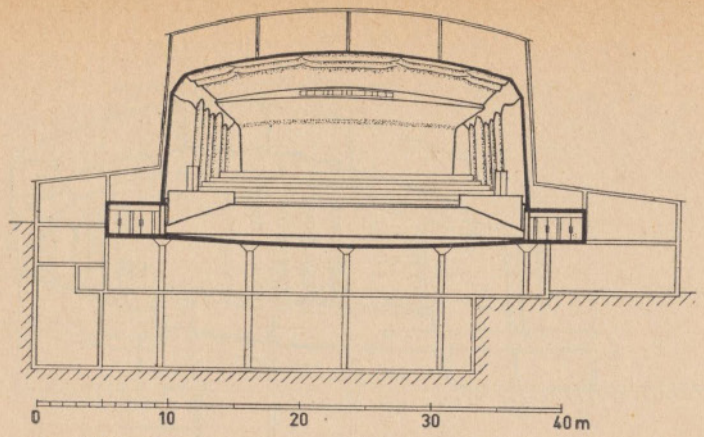


Abb. 81b Konzertsaal Turku (Architekt R. V. Luukkonen, Ing. P. Arni, 1953)

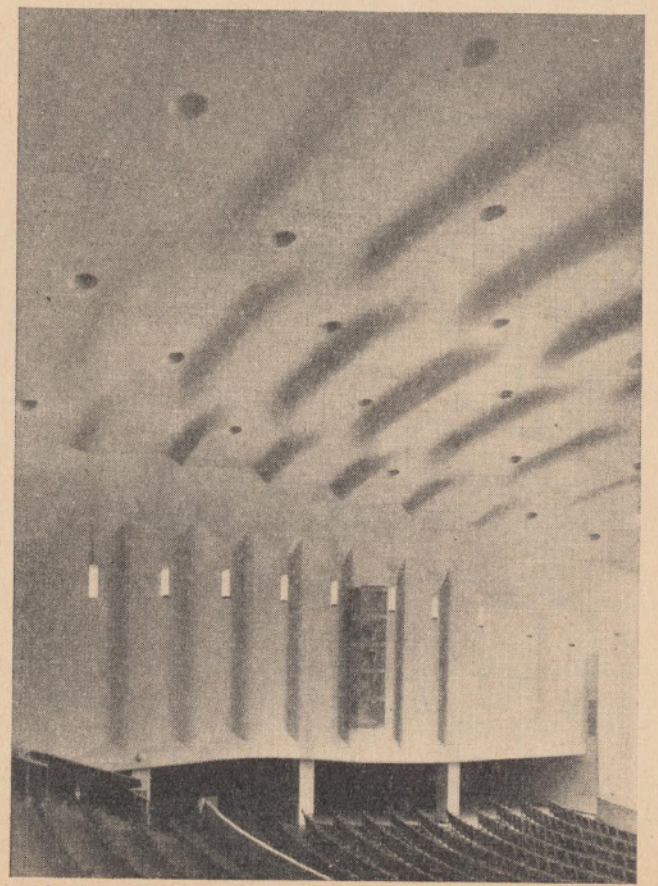


Abb. 82 Konzertsaal Turku, Finnland. Ansicht der Decke

Abb. 83 Konzertsaal Turku, Finnland. Ansicht der hintern Seitenwände

Royal Festival Hall, London

Mit einem Volumen von 22 000 m³ und 3400 Plätzen ist dieser 1951 erbaute Saal einer der größten Konzertsäle überhaupt. Die großen Abmessungen — die Entfernung Mitte Podium bis letzte Reihe der Galerie beträgt über 45 m — verlangten schon aus optischen Gründen eine optimale Anordnung und Überhöhung der Plätze (Abb. 84, 85 und 86). Ebenso mußte auf eine möglichst gleichmäßige Schallverteilung für alle Saalteile sorgfältig geachtet werden; dazu dienen vier große über dem Podium aufgehängte Reflektoren aus Holz (Abb. 84 und 86). Den gleichen Zweck verfolgt die

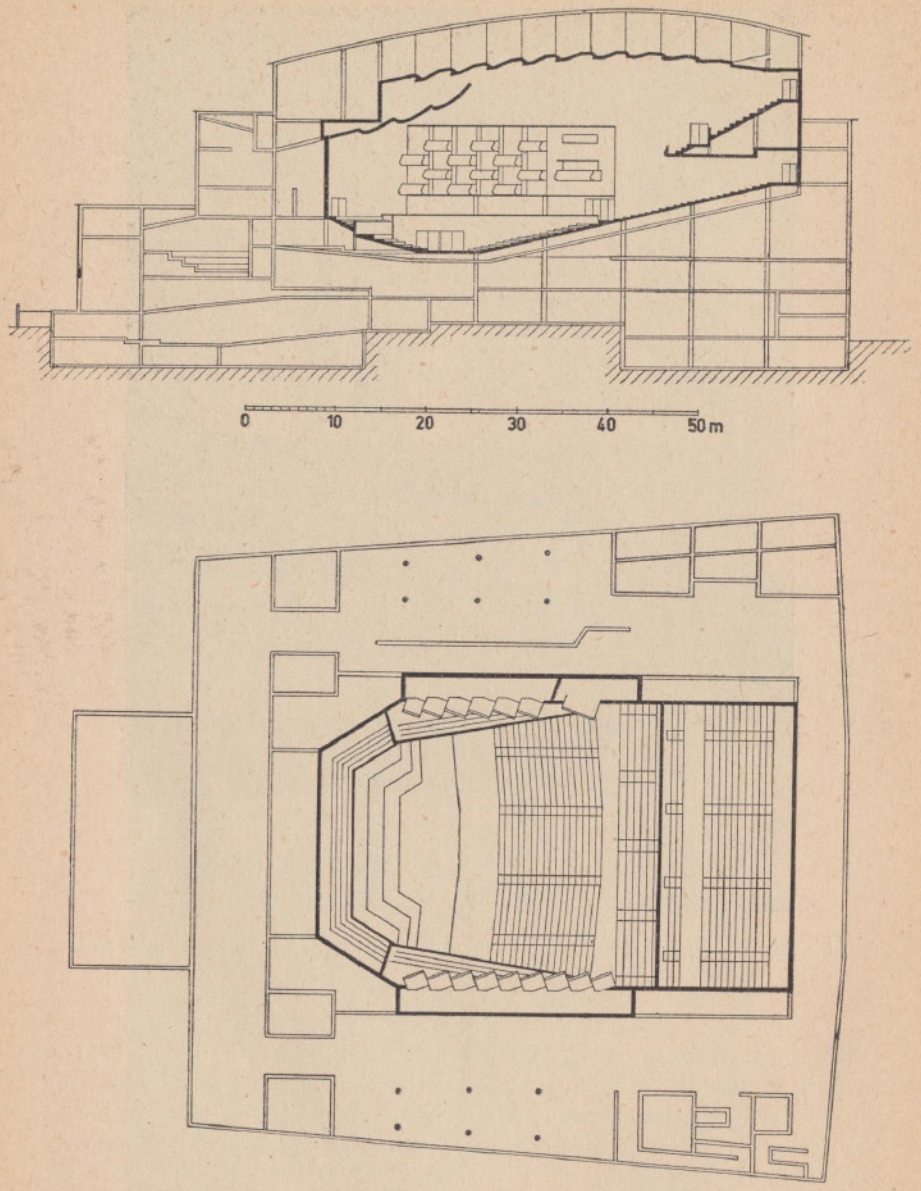


Abb. 84 Royal Festival Hall, London (Architekt Robert Matthew, Akustik Hope Bagenal, P. H. Parkin)

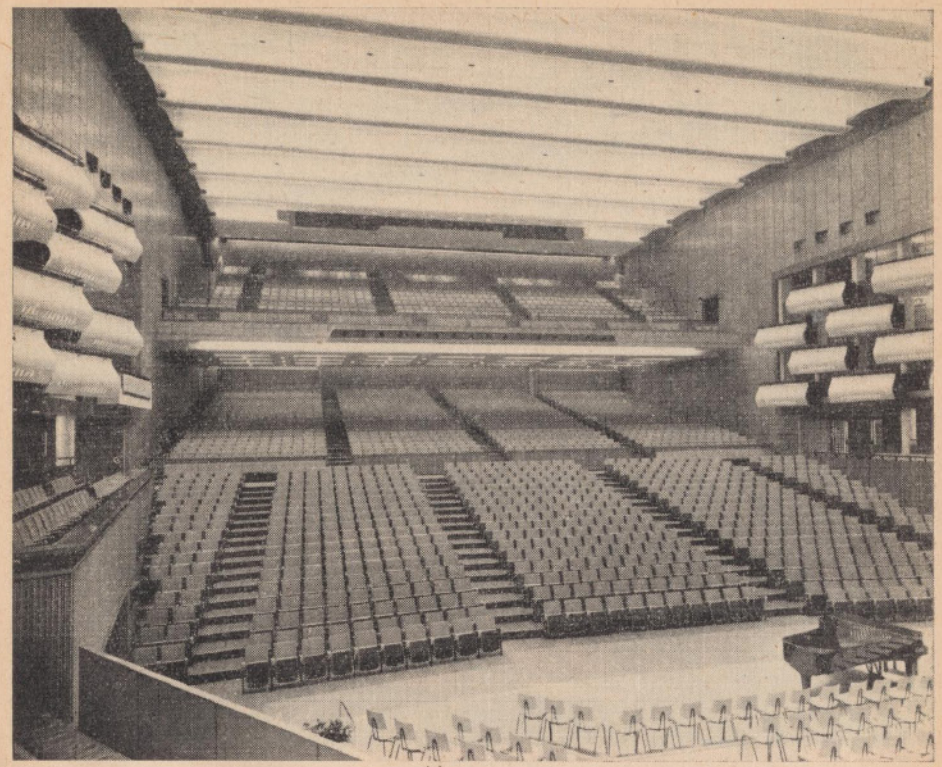


Abb. 85 Royal Festival Hall, London (Crown Copyright, published by permission of the Director of Building Research)

Gestaltung der Decke, wobei durch eine weitgehende Unterteilung in einzelne Elemente gleichzeitig auch noch eine hohe Diffusität erreicht wurde. Besonders originell sind die Seitenwände mit einzelnen, stark vorspringenden kleinen Balkonen (Abb. 85 und 86), wobei die beiden Seiten untereinander verschieden sind. Es ist einleuchtend, daß auch dadurch die Diffusität stark verbessert wird. Die Nachhallzeit (Abb. 87) ist auch hier, dank der Polsterbestuhlung, nur wenig von der Publikumsbesetzung abhängig. Ihr Frequenzgang ist sehr ausgeglichen; besonders auffallend ist das Absinken gegen die tiefen Frequenzen, was auf eine vielleicht etwas allzu reichliche Verwendung schwingungsfähiger Materialien schließen läßt.

Die Royal Festival Hall ist ein hervorragendes Beispiel eines modernen Saales mit vorzüglichen akustischen Eigenschaften; vereinzelte Kritiken sind auf das außerordentlich große Volumen zurückzuführen, das viele Instrumententalsoli nicht mehr zur vollen musikalischen Wirkung kommen läßt.

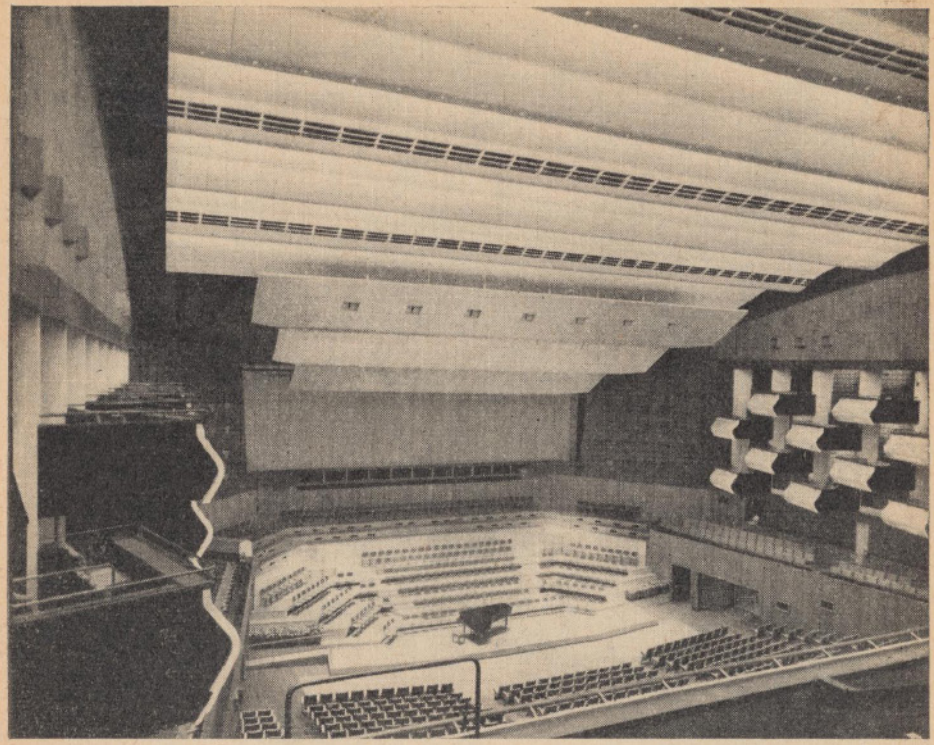


Abb. 86 Royal Festival Hall, London (Crown Copyright- published by permission of the Director of Building Research)·

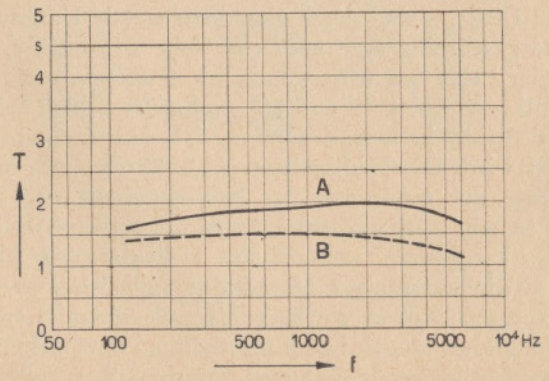


Abb. 87 Royal Festival Hall, London; Nachhallzeiten. A leer; B mit Publikum (P. H. Parkin und Mitarbeiter)

WESTMINSTER NEW YORK
275 SEVENTH AVEN

NEUE AUFNAHMEN

STEREOPHONISCH
MONAURAL

WESTMINSTER NEW YORK
275 SEVENTH AVEN

Ab Juli 1957 (Jahrgang III) erscheinen die

GRAVESANER BLÄTTER

volltextlich ENGLISCH und DEUTSCH

begleitet von

akustisch demonstrierenden SCHALLPLATTEN

der künstlerisch - technisch - wissenschaftliche HAUPTTEIL

ergänzt

a) durch **Internationale Mitteilungen**

über Neueste Apparaturen und Problemlösungen

b) durch **Internationale Kritiken**

von Schallplatte · Radio · Klangfilm · Television

Herausgeber: Hermann Scherchen

Redaktion: Gravesano (Schweiz)