SCHUMANN

AKUSTIK

JEDERMANNS
BUCCHIERER
VERLAG HIRT
IN BRESLAU

P.GAERTNER
PG
K
KRÓL.HUTA
WOLNOŚCI 7

8.60

JEDERMANNS BÜCHEREI

Natur aller Länder / Religion und Kultur aller Völker
Wissen und Technik aller Zeiten

*

ABTEILUNG: MUSIK

Herausgegeben von
Johannes Wolf

Ferdinand Hirt in Breslau
1925

Karl Erich Schumann

Akustik

Ferdinand Hirt in Breslau
1925

E II a

Mit 42 Abbildungen und zahlreichen Notenbeispielen
im Text

1326 A



Made in Germany
Copyright 1925 by Ferdinand Hirt in Breslau

166/61

INHALTSÜBERSICHT

	Seite
Einleitung	6
I. Schwingung, Welle, Ton	8
II. Klang	15
III. Tonsysteme	19
1. Leiterbildung, pythagoreisches System und harmonisches Tongewebe	19
2. Temperaturen und partielle reine Stimmung	30
IV. Resonanz	36
V. Akustik der Gebäude (Raumakustik)	39
VI. Das Problem des Hörens	47
VII. Unterschiede der musikalischen Klangfarben	
1. Klänge der Saiten und Saiteninstrumente	53
2. Klänge der Labialpfeifen	59
3. Klänge der Instrumente mit harten Zungen	65
4. Die Orgel	67
5. Klänge der Instrumente mit weichen Zungen	70
a. Holzblasinstrumente	70
b. Blechblasinstrumente	72
6. Klänge der Vokale	74
7. Klänge der Stäbe, Platten und Membranen	80
VIII. Intensitätsprobleme	85
IX. Schwebungen	87
X. Kombinationstöne	92
XI. Dissonanz und Konsonanz	98
XII. Diskordanz und Konkordanz	107
Anmerkungen	110
Literaturverzeichnis	116
Register	118
Abbildungen	121

EINLEITUNG

Den Gehörsempfindungen entsprechen bestimmte Bewegungen von Körpern ponderablen Charakters, d. h. von Körpern gewöhnlicher Materie. Die Analyse der Bewegungserscheinungen der Natur, die Untersuchung der Veränderungen in dem Körper, von dem die Bewegung ausgeht, und die Feststellung, wie diese Bewegung durch den Raum bis zu unseren Sinneswerkzeugen fortschreitet, ist Aufgabe der Physik. Deshalb bildet die Lehre von denjenigen Bewegungserscheinungen der Natur, denen Wirkungen auf den Gehörssinn entsprechen, den Gegenstand der physikalischen Akustik. Diese erfährt wie die meisten physikalischen Gebiete eine physiologische Umgrenzung, indem eben die unsere Gehörsnerven reizenden Vorgänge eine Auswahl von den Bewegungserscheinungen sonst gleicher Art bilden. Vom Standpunkte der Physik betrachtet ist die Akustik ein Teil der Mechanik, und zwar insonderheit ein Abschnitt der Elastizitätslehre; denn in den elastischen Eigenschaften der Körper liegen die Schallschwingungen, sowie deren Form und Ausbreitung als Wellen im Raum begründet. Der physikalische Teil bildet für alle anderen Zweige der allgemeinen Akustik die Grundlage, oder mindestens finden in ihnen seine Ergebnisse grundlegende Anwendung. So mischen sich die physikalisch-akustischen Tatsachen mit denen der physiologischen Akustik, die den Akt des Hörens und die menschliche Stimme untersucht; und ebenso eng sind die physikalischen Ergebnisse mit der psychologischen Akustik verknüpft, die sich mit den den Gehörseindrücken zugrunde liegenden psychischen Gesetzmäßigkeiten, mit den durch Töne angeregten psychischen Leistungen befaßt. Weiter bildet die physikalische Akustik das Fundament der technischen Akustik, zu der die Architektur- oder Gebäudeakustik und der Instrumentenbau zählen, und geht mit der mathematischen Akustik, deren Feld in der Hauptsache die theoretische

Behandlung der physikalischen Schallerscheinungen, d. h. der Mechanik elastischer Körper ist, Hand in Hand.

Wenn nun die musikalische Akustik zunächst alles das zu vereinigen sucht, was aus den angeführten akustischen Zweigen verschiedener selbständiger Disziplinen, wie Physik, Physiologie, Psychologie, Technik, Mathematik, für den Musiker wichtig erscheint, so hat die für die akustischen Zweige dieser Wissenschaften grundlegende physikalische Akustik für die musikalische Akustik dieselbe fundamentale Bestimmung. Das Bestreben aber, die wissenschaftliche Grundlage der Musik ganz in die Physik zu verlegen, ist nicht berechtigt, denn Probleme der Musiktheorie, die einen großen Teil der musikalischen Akustik bilden, sind meistens mehr psychologischer Natur und besonders mit der Ästhetik eng verknüpft. Aus diesem Grunde empfiehlt sich keine Einteilung — wie zunächst zweckmäßig erscheinen will — nach den einzelnen Disziplinen, aus denen die musikalische Akustik schöpft, weil dieselbe Frage verschiedene Hauptwissenschaften verbindet und ein Zerreißen des Problems oder mehrfaches Besprechen manchmal vermieden werden kann.

ERSTER ABSCHNITT

Schwingung, Welle und Ton

*

Die den Schallempfindungen entsprechenden physikalischen Vorgänge sind Schwingungs- und Wellenbewegungen. Jeder Schallerreger kann als ein materielles Punktsystem aufgefaßt werden, das verschiedenartiger Schwingungen, die zum Teil alle gleichzeitig bestehen können, fähig ist. Diese schwingenden Punktsysteme sind räumlich ausgedehnt, ihre Form wird im allgemeinen bei den Schwingungen geändert. Schwingungen sind nur möglich, wenn die wirkenden Kräfte das Bestreben zeigen, die Massenpunkte in bestimmte Gleichgewichtslagen, in denen keine Kräfte auf die Massenpunkte wirken, zurückzuführen.

Die Bewegungsmöglichkeit eines materiellen Punktes sei durch den Freiheitsgrad der Bewegung ausgedrückt. Ein nur längs einer Kurve — im einfachsten Falle einer Geraden — beweglicher materieller Punkt besitzt einen Freiheitsgrad der Bewegung, während ein Massenpunkt, der sich auf einer Fläche bewegen muß, zwei Freiheitsgrade, und der im Raume freibewegliche Massenpunkt drei Freiheitsgrade hat. Diesen drei Freiheitsgraden entsprechen die Richtungen eines irgendwie zugrunde gelegten Koordinatensystems. Die Anzahl der Freiheitsgrade ist also gleich der der voneinander unabhängigen Koordinaten, mit Hilfe deren die Lage des Punktes in jedem Augenblick bestimmbar ist. Ein System von Massenpunkten kann nun unendlich viele Freiheitsgrade haben, denn es wird nicht gefordert, daß sich die Koordinatenachsen unter rechten Winkeln schneiden. Die schwierige Untersuchung der Schwingungen eines Systems mit unendlich vielen Freiheitsgraden ist nur möglich, indem die Zahl der Größen, von der

die Bewegung abhängig ist, beschränkt wird, so daß man zu Systemen gelangt, deren Lage von einer endlichen Anzahl von Koordinaten, und wenn es möglich ist, von einer Koordinate bestimmt wird. (Systeme mit unendlich vielen Freiheitsgraden können dann z. B. als Grenzfälle von Systemen mit reduziertem Freiheitsgrad aufgefaßt werden.) Für das Verständnis des Wesens der den Schallerscheinungen entsprechenden Bewegungen genügt als Grundlage das Studium der Schwingungen materieller Punkte oder Systeme, deren Bewegungen so beschaffen sind, daß die Lage jedes Teilchens durch eine Koordinate bestimmt werden kann, oder daß die Zerlegung der Bewegung in mehrere von je einer Koordinate abhängige, sich überlagernde Bewegungen möglich ist. Die meisten Schallerreger führen aber nicht so einfache und physikalisch leicht analysierbare Bewegungen aus (wie man auch nach dem Studium einer elementaren physikalischen Akustik und mancher für Musiker bestimmten Darstellungen der Akustik meinen möchte). Dies sei hervorgehoben, weil von der erwähnten Grundlage im Rahmen dieser Schrift, für die ja die physikalische Akustik nicht Hauptgegenstand ist, nur die wichtigsten Gesichtspunkte gegeben werden können. —

Ein schwingender Punkt kann zwischen zwei Grenzlagen als sich bewegend erkannt werden. Er schwingt um seine Ruhelage (Gleichgewichtslage) unter dem Einfluß einer Kraft, die ihn in diese zurücktreibt. Der jeweilige Abstand des schwingenden Teilchens von seiner Ruhelage heißt seine Elongation (y), die größte Elongation seine Amplitude (r). Die Annahme einer der Elongation proportionalen inneren Kraft, die einen Punkt, der seine Ruhelage verlassen hat, in diese zurückzuführen strebt, ist die Grundlage der Elastizitätslehre. Je größer die Amplitude, desto größer ist die Energie der Schwingungsbewegung, und desto stärker ist der dieser Schwingungsbewegung entsprechende Ton*). Während die Geschwindigkeit des Punktes an den Umkehrpunkten (Grenzlagen) den Wert Null annimmt, steigt ihr Wert mit Annähe-

*) Für die Messung der physikalischen Intensität ist von Wichtigkeit, an welchem Orte sie vorgenommen wird; denn die unmittelbar an der Schallquelle gemessene physikalische Stärke ist verschieden von der am Ort der Schallempfindung (im Ohr) physikalisch gemessenen Stärke.

rung des Punktes an die Ruhelage und ist am größten, wenn er diese passiert. Die Zeit, die der Punkt von einer Grenzlage bis zur andern und zurück braucht, also die Zeit einer ganzen oder Doppelschwingung, wird die (in Sekunden gemessene) Schwingungsdauer oder die Periode (T) genannt. Die Anzahl der in einer Sekunde verlaufenden Perioden und damit auch die Anzahl der ganzen Schwingungen in einer Sekunde ist gleich der Frequenz oder Schwingungszahl (n); $n \cdot T = 1$, daher $n = \frac{1}{T}$. Mit der Anzahl der Schwingungen in der Sekunde wächst die von ihr abhängige Tonhöhe. Von zwei hinsichtlich der Höhe verschiedenen Tönen entspricht dem höheren eine kürzere Schwingungsdauer (Periode) und größere Schwingungszahl. Bezeichnet man — wie früher beim Pendel üblich — die Hälfte der Schwingungsdauer als Periode, so ist die Schwingungszahl das Doppelte der oben definierten Schwingungszahl. So wird z. B. in Frankreich nach Halbschwingungen (v. s. = vibrations simples) gerechnet. Sind Doppelschwingungen — der Zeit eines vollständigen Hin- und Herganges entsprechende — gemeint, so erfährt die betreffende Zahl den Zusatz v. d. (vibrations doubles). So kann z. B. der Kammerton *a* durch 435 v. d. und 870 v. s. dargestellt werden.

Der jeweilige Bewegungszustand heißt die Phase. Gleiche Phase haben z. B. zwei schwingende Teilchen, wenn sie sich gleichzeitig im selben Bewegungszustand befinden. Die Phase wird also festgelegt, indem man den von dem Teilchen eingenommenen jeweiligen Ort einer Zeit zuordnet. Besitzen zwei schwingende Teilchen denselben Bewegungszustand nicht gleichzeitig, so haben sie eine Phasendifferenz, die in Bruchteilen der Periode gemessen wird und den Unterschied der Phasen ihrer Schwingungsbewegung angibt.

Übersteigt die Anzahl der Schwingungen in der Sekunde einen Wert, der durchschnittlich 20000 beträgt, so entspricht den physikalischen Schwingungen keine Tonempfindung. Dasselbe gilt für die durch Werte unterhalb einer gewissen Grenze — etwa 16 Schwingungen in der Sekunde — bestimmten physikalischen Schwingungen.

[Weil diejenigen Schwingungen, die jenseits des durch die erwähnten Gehörgrenzen bestimmten Gebietes liegen, von gleicher Art wie die für die Gehörsempfindungen in Frage kommenden sind, werden sie oft noch zur physikalischen Tonreihe gerechnet, aus der die physiologische einen kleinen Ausschnitt darstellen soll. Da aber jeder Tonschwingung eine Tonempfindung entsprechen muß, weil es sonst keinen Zweck hätte, dem Worte Schwingung das Wort Ton beizugeben, so ist es nur richtig, die der physiologischen Tonreihe entsprechenden physikalischen Schwingungen als Ausschnitt aus dem großen Gebiet der physikalischen Schwingungen zu betrachten und diesen Ausschnitt das Gebiet der physikalischen Tonreihe zu nennen. Die Neigung, die für das Tonreich nicht mehr in Frage kommenden zu schnellen oder zu langsamen Schwingungen als „unhörbare Töne" oder zur physikalischen Tonreihe gehörig zu bezeichnen, erklärt sich aus der Tatsache, daß mit „Schall" und den Bezeichnungen für die einzelnen Schallgattungen — wie Ton, Klang, Geräusch usw. — entweder die Empfindung, also etwas Subjektives oder Physiologisches, oder der der Empfindung entsprechende objektive oder physikalische Vorgang gemeint sein kann, daß also, wenn z. B. nicht streng zwischen „Tonreiz" und „Tonempfindung" unterschieden wird, eine doppelte Auslegung möglich ist. Die Begriffe „Schall", „Ton", „Klang" usw. in Anwendung auf physikalische Vorgänge, denen kein Gehörseindruck entspricht, oder in Verbindung mit Bezeichnungen solcher physikalischer Vorgänge haben also nicht den sachlich geforderten Sinn.]

Das Schwingen des Massenpunktes um seine Ruhelage gleicht im einfachsten Falle einer Pendelschwingung, die auch harmonische Schwingung genannt wird. Bewegt man das Ende *k* (vgl. Fig. 1, S. 121) eines gespannten, so lang wie möglich gewählten Seiles in der Weise auf und ab, daß die Bewegung einer harmonischen Schwingung entspricht, so pflanzen sich die Verschiebungen auf dem Seil „wellenförmig" fort, und zwar entspricht der harmonischen Bewegung des Punktes *k* eine Welle von der Form einer Sinuskurve. (Dazu Fig. 1*d* und Fig. 2, wo auch die Gleichung abgeleitet wird, die den einfachen oder Pendelschwingungen zugrunde liegt und ihnen den Namen Sinusschwingung gibt.) Die Teilchen

schwingen in einer Ebene senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung, d. h. sie führen transversale Schwingungen aus. Schwingen die Teilchen in der Bewegungsrichtung, rücken sie also abwechselnd zusammen und auseinander, so werden die Schwingungen longitudinal genannt. Longitudinale Wellen sind immer Verdichtungs- und Verdünnungswellen, und Verdichtungs- und Verdünnungswellen müssen immer longitudinal sein. Gase und Flüssigkeiten sind nur longitudinaler Schwingungen fähig, während feste Körper transversal und longitudinal schwingen können. In Gasen können sich also keine transversalen Wellen ausbreiten. Den Verschiebungen der Teilchen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung bei der transversalen Bewegung entsprechen genau die Verschiebungen der Teilchen in der Fortpflanzungsrichtung bei der longitudinalen Bewegung. Deshalb stellt man den longitudinalen Schwingungsverlauf genau so wie den transversalen zeichnerisch dar: als transversale Welle. Die Welle besteht aus zwei symmetrischen Hälften; der oberhalb der (die Ruhelagen der schwingenden Punkte verbindenden Linie oder) Normalen gelegene Abschnitt heißt Wellenberg, der unterhalb dieser Linie gelegene Wellental, die Stellen größter Elongationen werden Bäuche genannt. Zur Periode T gehört die Wellenlänge λ, die gleich der durch die Verbindung zweier Punkte gleicher Phase gegebenen Strecke ist, z. B. gleich dem Abstand der beiden Anfangspunkte einer Welle (Fig. 1*d*) oder gleich dem Abstand der Punkte größter Elongation zweier aufeinander folgenden Berge.

Durch die oben im Beispiel angeführte Ausbreitung der Schwingung auf neue Punkte oder Teile, die in einer Linie liegen, alle nacheinander gleiche oder ähnliche Bewegungen ausführen und die Bewegung um so später beginnen, je weiter sie von der Erregungsstelle entfernt sind, ist die fortschreitende Welle charakterisiert. So pflanzen sich die Schwingungen des Schallerregers als longitudinale Wellen (Verdichtungs- und Verdünnungswellen) im stofferfüllten Raume nach allen Richtungen fort. Wenn ein Teilchen eine ganze Schwingung ausführt, so ist die Wellenbewegung um eine Wellenlänge (λ) fortgeschritten. Da nun der Zeit einer ganzen Schwingung die Schwingungsdauer T entspricht, und der

zurückgelegte Weg gleich λ ist, so folgt für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit (Geschwindigkeit = Weg durch Zeit) in einer Sekunde: $v = \frac{\lambda}{T}$; T ist $\frac{1}{n}$, also $v = n \cdot \lambda$. (Anm. 1, S. 110). Mit der Elastizität wächst die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, sie ist also für Gase, flüssige und feste Körper verschieden, für Luft bei 0° C beträgt sie 330,8 m in der Sekunde.*)

Wird dieselbe Punktreihe gleichzeitig zu zwei oder mehreren fortschreitenden Wellen angeregt, so überlagern sich die Wellenbewegungen in der Weise, daß jedes zu der Punktreihe gehörende Teilchen in dem jeweiligen Zeitpunkt diejenige Elongation hat, die gleich der (algebraischen) Summe seiner den einzelnen Bewegungen entsprechenden Elongationen ist. Der Grund liegt darin, daß ein physischer Körper nicht gleichzeitig verschiedener Schwingungen fähig ist, sondern immer nur eine einzige Schwingung ausführen kann. Dieses Prinzip der Superposition (Übereinanderlagerung) findet Anwendung, wenn die Amplitude klein gegen die Wellenlänge ist. Fig. 3 zeigt die resultierende (stark ausgezogene) Welle, die aus den beiden andern Wellen entstanden ist, indem die gleichsinnigen Elongationen der punktierten Wellen addiert wurden.

Spezieller werden die beim Zusammentreffen von Wellen auftretenden Erscheinungen, die dadurch entstehen, daß die Wellen sich zu einer Resultierenden zusammensetzen, Interferenz genannt. Im engeren Sinne wird mit Interferenz die völlige Aufhebung der Wirkungen bezeichnet, wie sie z. B. Fig. 4 zeigt, wo die beiden Wellenzüge die Phasendifferenz $\frac{\lambda}{2}$ und gleiche Amplitude haben, die Amplitude der resultierenden Wellenbewegung also gleich Null ist.

Aus dem Wellencharakter der Schallausbreitung sind die Erscheinungen der Reflexion, Brechung und Beugung (Anm. 2) erklärbar. Die transversale Welle kehrt sich bei der Reflexion an einer festen Wand, auf die sie trifft, um; Wellenberg kehrt als

*) Dieser für 0 umgerechnete Wert entspricht den während des Krieges (Schallmeßverfahren zur Auffindung von Geschützstellungen) unabhängig voneinander in Deutschland und Frankreich gefundenen Werten 339,8 bzw. 339,9 m/sec. für die Schallgeschwindigkeit in Luft bei 15° C.

Wellental, Wellental als Wellenberg zurück (Fig. 5). Dagegen wird bei der longitudinalen Welle Verdichtung als Verdichtung, Verdünnung als Verdünnung reflektiert. Handelt es sich um entgegengesetzt verlaufende Wellenzüge von gleicher Schwingungszeit und Wellenlänge, so setzen sie sich zu einer stehenden Welle zusammen. Auf diese Weise bildet die bei senkrechtem Auftreffen reflektierte Welle mit der ankommenden stehende Wellen. Dieser Schwingungstyp ist charakteristisch für alle Musikinstrumente, wie überhaupt für die elastischen Körper. Streng genommen dürfte der Name „Welle" nur auf die fortschreitende Welle Anwendung finden; denn die stehende Welle ist nur ein Spezialfall der Schwingung. Es handelt sich bei der sogenannten stehenden Welle wie bei der Schwingung um einen stationären Zustand. Da die stehende Welle durch Übereinanderlagerung von fortschreitenden Wellensystemen entsteht, sich dann aber nicht weiter ausbreitet, kommen bis zur Erreichung des stationären Zustandes eben fortschreitende Wellen in Frage; ist die Bewegung aber stationär geworden, so hat sie dieselben Merkmale wie die Schwingung. Denn alle Punkte gehen gleichzeitig durch die Ruhelage, und alle haben gleichzeitig ihre größte Elongation, gegenüber der schon definierten fortschreitenden Welle, bei der die auf einer Linie liegenden Punkte die gleichen oder ähnliche Bewegungen nacheinander ausführen. Der Name „stehende Welle" ist aber in der Wellenlehre und Akustik so fest eingebürgert, daß es sich nicht empfiehlt, ihn in einer einführenden Schrift wie dieser durch eine geeignetere Bezeichnung zu ersetzen.

Neben dem oben angeführten Merkmal des gleichzeitig gleichen Schwingungszustandes aller Punkte des betreffenden Systems ist für die stehende Welle entscheidend, daß sie nur in abgeschlossenen Systemen möglich ist, daß nicht wie bei der fortschreitenden Wellenbewegung Energieübertragung in einer Richtung stattfindet. Bei allen stehenden Wellen, z. B. den transversalen der Saiten und den longitudinalen der Luftsäulen, gibt es Stellen, an welchen das elastische Medium in Ruhe ist, dazwischen sind die Teilchen in Bewegung (Fig. 6). Die Ruhestellen heißen Knoten. Die Punkte der durch zwei Knoten getrennten Abteilungen schwingen in entgegengesetzter Richtung.

Klang

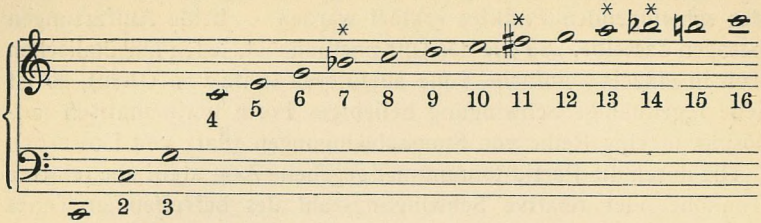
*

Den harmonischen Schwingungen (Sinusschwingungen) entsprechen, soweit die Schwingungszahl zwischen den angegebenen Grenzen liegt, einfache Töne, die Sinustöne genannt werden. Diese unterscheiden sich nur durch ihre Höhe und Stärke, wenn man von Eigenschaften absieht, die mit der Höhe parallel gehen und später besprochen werden. Sie klingen dünn und kommen einzeln auch in der Natur nur sehr selten vor. Da nun Töne gleicher Höhe, von verschiedenen Musikinstrumenten oder menschlichen Stimmorganen angegeben, qualitative Unterschiede aufweisen, so müssen den einzelnen Instrumenten- und Gesangstönen, also den von der Musik benutzten Tönen — die kurz als „musikalische Töne" bezeichnet werden —, andere periodische Schwingungsbewegungen als den einfachen Tönen zugrunde liegen. Wird also die schwingende Bewegung eines Punktes des betreffenden Musikinstrumentes aufgezeichnet (z. B. durch chronographische Auflösung: ein an einem schwingenden Teilchen befestigter Schreibstift berührt eine Schreibfläche, die sich senkrecht zur Richtung der Schwingungsbewegung gleichförmig bewegt), so kann die Kurve nicht von der Gestalt des der Sinusschwingung entsprechenden Bildes (Fig. 1d) sein. Vielmehr liefern Töne der verschiedenen Musikinstrumente Kurven verschiedener Gestalt, selbst wenn die Höhe der Töne die gleiche ist. Unterschiede der Klangfarbe (Timbre) — wie die durch die qualitativen Unterschiede bedingte Eigenschaft des musikalischen Tones genannt wird — drücken sich also durch die Form der Kurve aus; denn ein weiteres Merkmal der Welle kann für die Klangfarbe nicht in Frage kommen,

da ja die Wellenlänge als bestimmend für die Schwingungszahl, also für die Tonhöhe, und die Amplitude als ausschlaggebend für das andere Charakteristikum des einfachen Tones, die Stärke, erkannt wurde. So zeigt z. B. Fig. 7 zwei Kurven, die verschiedene Form aufweisen. Der schwingende Punkt bewegt sich um so schneller, je steiler die Kurve verläuft; so ist seine Geschwindigkeit in Kurve *a* bei *A* und *B* (wie bei der Sinusschwingung in den Umkehrpunkten) am langsamsten und beim Durchschwingen der Ruhelage bei *C* am größten; dagegen ist die Geschwindigkeit in Kurve *b* gerade in der Nähe der Umkehrpunkte am größten, weil hier die Kurve steiler verläuft. Da nun die den Kurven *a* und *b* entsprechenden (phasengleichen) musikalischen Töne gleich hoch und gleich stark (von gleicher Amplitude) gewählt sind, so kann der verschiedene Klang dieser beiden Töne nur dadurch bedingt sein, daß die beiden Punkte nicht demselben Geschwindigkeitsgesetz während jeder einzelnen Schwingung folgen. Das Geschwindigkeitsgesetz wird bildlich durch die chronographische Auflösung der Schwingungen, durch die Wellenform dargestellt.

Man erklärt jedoch den Klang der Töne in anderer Weise, indem nicht das Schwingungsgesetz als Ausgangspunkt gewählt wird, sondern der wichtigste Apparat der Akustik, das menschliche Ohr, befragt wird. Durch Aufmerksamkeit und Übung ist es möglich, die musikalischen Töne in Elemente zu zerlegen und die einzelnen Elemente als einfache Töne zu erkennen. In diesem Komplex einfacher Töne werden im Gegensatz zum tiefsten, dem Grund- oder Hauptton, die andern als Obertöne, auch als Partial-, Teil-, Neben- oder Aliquottöne bezeichnet. Die Schwingungszahlen dieser — harmonisch genannten — Obertöne sind einfache Vielfache des Grund- oder Haupttones und entsprechen ebenso wie der von Obertönen befreite Grundton einfachen Schwingungen, sind also Sinustöne, klingen dünn und haben, einzeln wahrgenommen, nicht mehr das Typische der Klangfarbe des betreffenden Instrumentes.

Von der harmonischen Obertonreihe mit dem Grundton *C*, die sich — wie jede Obertonreihe — theoretisch beliebig weit fortsetzen läßt, sind die ersten 16 in Notenschrift hier angegeben:



1 (Die mit * bezeichneten Töne sind etwas zu tief.)

Klangfarbenunterschiede beruhen darauf, daß die Intensität der Obertöne verschieden ist und entweder alle Töne der Obertonreihe oder nur ein Teil von ihnen vorhanden ist. So kann die Klangfarbe als abhängig von der Zahl und dem Intensitätsverhältnis der Obertöne erklärt werden.

Obgleich nun diese Definition mit der vorher gegebenen, nach der der Klang auf dem Geschwindigkeitsgesetz des schwingenden Punktes beruht, anscheinend nichts gemeinsam hat, so ist die Übereinstimmung nicht schwer einzusehen. Angenommen, ein Punkt führte eine Sinusschwingung aus und wäre fähig, gleichzeitig noch mehrere Sinusschwingungen zu vollführen, die zweimal, dreimal, viermal usw. so schnell sind, und jede der einzelnen einfachen Schwingungen habe eine bestimmte Amplitude, dann wäre ein von Obertönen begleiteter Grunton, also ein Ton von bestimmter Klangfarbe zu hören. Die einzelnen Sinusschwingungen können aber in Wirklichkeit von dem Punkt nicht gleichzeitig ausgeführt werden, weil er immer nur einer einzigen Schwingung fähig ist. Das Bild der von dem Punkt wirklich ausgeführten Schwingung ist die Resultierende (in Fig. 8 stark ausgezogene) Kurve, die entsteht, indem an allen Stellen die Elongationen der einzelnen Sinusschwingungen addiert werden. Je nach den Amplitudengrößen der Sinusschwingungen ist die Gestalt der resultierenden Kurve verschieden. Jede dieser Kurven drückt ein bestimmtes Geschwindigkeitsgesetz des schwingenden Punktes aus, wie an den Kurven Fig. 7a und b erläutert ist, die auch Resultierende mehrerer Sinusschwingungen darstellen. Der Klang kann also durch die Anzahl und das Intensitätsverhältnis der den Grundton begleitenden Obertöne oder mathematisch und physikalisch durch das Geschwindigkeitsgesetz

des schwingenden Punktes erklärt werden — beide Auffassungen besagen dasselbe. So wie das Ohr imstande ist, jeden musikalischen Ton in einzelne einfache Töne aufzulösen (Satz von Ohm), so ist jede regelmäßige Schwingung beliebiger Form mathematisch auflösbar in eine Reihe von Sinusschwingungen (Satz von Fourier).

Die durch die Partialtonnummer gegebene Zahl stellt die relative Tonhöhe oder relative Schwingungszahl des betreffenden Tones dar, nämlich in bezug auf den durch die Zahl 1 vertretenen Grundton. Mit der Partialtonnummer muß man die absolute Schwingungszahl des Grundtones multiplizieren, um die absolute Schwingungszahl des betreffenden Partialtones zu erhalten. So ist das relative Schwingungsverhältnis irgend zweier Töne der Obertonreihe durch die beiden diesen Tönen entsprechenden Partialtonnummern gegeben. In der letzten Spalte folgender Übersicht sind zunächst nur die relativen Schwingungsverhältnisse einiger wichtiger Intervalle unserer natürlich harmonischen Leiter — deren Bildung noch besprochen wird — angegeben:

Partialtonnummern			Absolute Schwingungszahl	Notenbeispiel	Relatives Schwingungsverhältnis einiger Intervalle
Grundton	1. Partialton (Grundton)		1 *n*	*C*	
Obertöne	2. „	(Oktave d. G.-T.)	2 *n*	*c*	1:2 Oktave
	3. „	(Duodezime d. G.-T.)	3 *n*	*g*	2:3 Quinte
	4. „	(Doppeloktave d. G.-T.)	4 *n*	*c'*	3:4 Quarte
	5. „	(Terz der Doppeloktave)	5 *n*	*e'*	4:5 gr. Terz; 3:5 gr. Sexte
	6. „	(Quinte d. Doppeloktave)	6 *n*	*g'*	5:6 kl. Terz
	7. „	(natürl. Sept d. Doppelokt.)	7 *n**	*b'*	5:8 kl. Sexte
	8. „	(dritte Oktave)	8 *n*	*c''*	
	9. „		9 *n*	*d''*	8:9 gr. Ganzton
	10. „		10 *n*	*e''*	9:10 kl. Ganzton
	11. „		11 *n**	*fis''*	
	12. „		12 *n*	*g''*	
	13. „		13 *n**	*a''*	
	14. „		14 *n**	*b''*	
	15. „		15 *n*	*h''*	
	16. „	(4. Oktave d. G.-T.)	16 *n*	*c'''*	15:16 Halbton

Tonsysteme

*

1. Leiterbildung, pythagoreisches System und harmonisches Tongewebe

Da das Gebiet der musikalisch brauchbaren Töne unendlich viele Töne umfaßt — denn wir haben es ja mit einer kontinuierlichen Reihe zu tun —, so wird eine Auswahl von bestimmten Stufen getroffen. Die Auswahl ist nicht immer die gleiche, unser Tonsystem ist nicht das einzig mögliche. Wie die Leitern anderer Völker beweisen, ist die Struktur durchaus verschieden, und zwar lassen die Leitern im allgemeinen erkennen, welches Prinzip bei der Bildung maßgebend gewesen ist. Anscheinend beruht die Auswahl der Stufen auf dem Zusammenwirken zweier Prinzipien: des Konsonanz- und des Distanzprinzips.

Stehen zwei Töne im Oktav-, Quint-, Quart-, Terz- oder Sextenverhältnis, so erscheinen sie uns als miteinander vereinbar, sie konsonieren; ihr Konsonanzgrad wird durch Versetzung eines Intervalltones um eine oder mehrere Oktaven nicht geändert. (Die Äquivalenz der Oktavtöne ist noch nicht erklärt.) Von einem beliebigen Ton aus wird nun die Tonhöhenlinie durch die mit diesem Tone konsonierenden Töne in feste Abschnitte gegliedert. So ist in allen Tonsystemen die Oktave, das den höchsten Konsonanzgrad zeigende Intervall, vertreten. Während bei manchen Leitern auch für die Bestimmung der innerhalb der Oktave gelegenen Töne das Konsonanzprinzip maßgebend gewesen ist, war bei anderen Leitern das Prinzip der Gleichheit der Schritte,

das Distanzprinzip, grundlegend. Besonders in der primitiven Musik ist das Streben nach Gleichstufigkeit erkennbar (Anm. 3); in entwickelteren Formen der primitiven Musik tritt dann das Konsonanzprinzip mehr hervor, indem neben der Oktave auch die Quinte und Quarte anscheinend eine hervorragende Stellung innerhalb der Melodien und der daraus entwickelten Tonleitern einnehmen. Beispiele von Leitern, die auf der Fixierung bloßer Abstandsbeziehungen innerhalb der Oktave beruhen und vollkommen gleiche Stufen haben, sind die siebenstufige siamesische und fünfstufige javanische Leiter. In ihnen herrscht zweifellos das Distanzprinzip vor, obgleich (wie Stumpf hervorhebt) auch diese Leitern nicht ganz ohne Mitwirkung des Konsonanzbewußtseins entstanden sind, auch abgesehen von der Festlegung der Grenzen durch die Oktave.

Unserem natürlich-harmonischen System liegt das Konsonanzprinzip zugrunde; denn für die Bildung des unsere jetzige europäische Musik beherrschenden Dreiklangs in seinen beiden Formen Dur und Moll war das Konsonanzkriterium ausschlaggebend (vgl. auch S. 107/108).

Sämtliche Töne des Dur- und Molldreiklanges konsonieren unter sich; auch die in den Umkehrungen der Dreiklänge enthaltenen Intervalle sind Konsonanzen.

Dur:

$$c : e : g : c^1$$
$$4 : 5 : 6 : 8$$

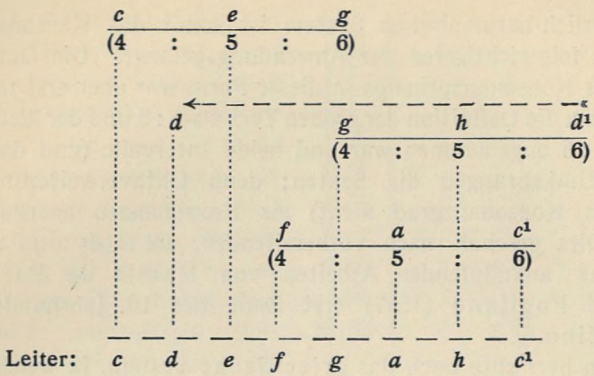
(große Terz u. kleine Terz: $\frac{4}{5}$ u. $\frac{5}{6}$)

Moll:

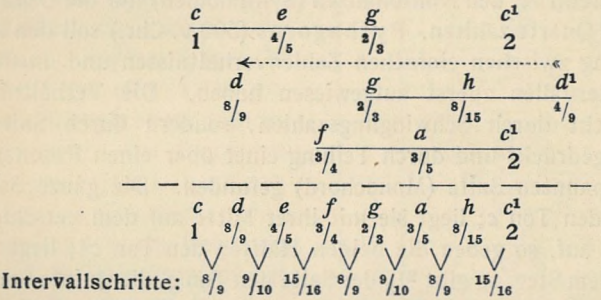
$$c : es : g : c^1$$
$$10 : 12 : 15 : 20$$

(kleine Terz u. große Terz: $\frac{5}{6}$ u. $\frac{4}{5}$)

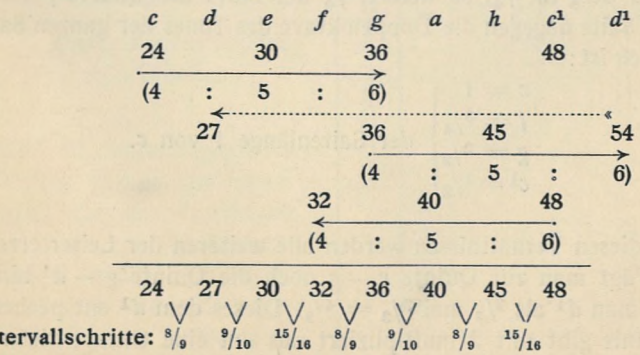
Werden auf den mit dem Grundton (Tonika) am stärksten konsonierenden Tönen nach oben hin, der Dominante (*g*) und der Subdominante (*f*), wieder Dreiklänge von derselben Art wie auf dem Grundton aufgebaut, so hat man, je nachdem ob ein Dur- oder Molldreiklang benutzt wurde, die Töne der Dur- oder Molleiter. Für die C-dur-Leiter folgt demnach:



Die relativen Verhältnisse (Anm. 4) sind:



Wird *c* mit 24 Schwingungen angenommen, so folgt:



Im natürlich-harmonischen System ist somit das Konsonanzprinzip am folgerichtigsten zur Anwendung gelangt. Die Durchführung des Konsonanzprinzips in dieser Form war aber erst möglich, nachdem die Definition der großen Terz als 4 : 5 und der kleinen Terz als 5 : 6 angenommen war und beide Intervalle (und damit auch als Umkehrungen die Sexten; denn Oktaverweiterungen ändern den Konsonanzgrad nicht) als Konsonanzen anerkannt wurden. Dies geschah nach vorbereitenden, an Didymus und Ptolemäus anknüpfenden Arbeiten von Ramis de Pareia (1482) und Fogliano (1537) erst Ende des 16. Jahrhunderts durch Zarlino.

Bis dahin herrschte noch das griechische System, in welchem Terzen und Sexten wie Sekunden als Dissonanzen (Diaphonien) galten, während zu den Konsonanzen (Symphonien) nur die Oktave, Quinte und Quarte zählten. Pythagoras (500 v. Chr.) soll den Zusammenhang zwischen einfachen Zahlenverhältnissen und musikalischen Intervallen zuerst aufgewiesen haben. Die Verhältnisse wurden nicht durch Schwingungszahlen, sondern durch Saitenlängen ausgedrückt und durch Teilung einer über einen Resonanzkasten gespannten Saite (Monochord) gefunden. Die ganze Saite gebe z. B. den Ton *c*; liegt sie mit ihrer Mitte auf dem verschiebbaren Steg auf, so geben die beiden Hälften den Ton c^1; liegt sie in $^1/_3$ auf dem Steg, so gibt $^2/_3$ der Saite den Ton *g*, die Quinte von *c*, und der andere Saitenteil ($^1/_3$) die Duodezime (g^1) von *c*. Befindet sich der Steg in $^1/_4$, so liefert $^3/_4$ der Saite die Quarte *f* von *c*, $^1/_4$ der Saite dagegen die Doppeloktave des Tones der ganzen Saite. Demnach ist:

$$\left.\begin{array}{l} c = 1 \\ f = {}^3/_4 \\ g = {}^2/_3 \\ c^1 = {}^1/_2 \end{array}\right\} \text{ der Saitenlänge 1 von } c.$$

Aus diesen Verhältnissen werden alle weiteren der Leiter errechnet. Fügt man zur Quinte $c - g$ noch die Quinte $g - d^1$ hinzu, so hat man d^1 als $^2/_3$ mal $^2/_3 = {}^4/_9$. Dieses dem d^1 entspechende Verhältnis gibt mit 2 multipliziert das um eine Oktave tiefere *d*

als $^8/_9$. Die Quinte ($^2/_3$) auf d ($^8/_9$) liefert a als $^{16}/_{27}$, und die darauf gebaute Quinte ergibt für e^1 das Verhältnis $^{32}/_{81}$. Da aber e^1 nicht innerhalb der Oktave c — c^1 liegt, muß man $^{32}/_{81}$ mit 2 multiplizieren, um das Verhältnis für e als $^{64}/_{81}$ zu erhalten. Durch das abermalige Hinzufügen einer Quinte erhält man h als $^{128}/_{243}$. Die Quinte spielt also im pythagoreischen System die Hauptrolle; jeder pythagoreische Wert ist mit Hilfe aneinandergereihter Quinten und der Oktaventransposition bestimmbar. Die diatonische pythagoreische Skala weist nur zwei Fortschreitungen auf: den Ganzton $^8/_9$ und den Halbton $^{243}/_{256}$:

(Siehe nebenstehende Tabelle)

Zwölf übereinandergebaute Quinten führen zu einem Tone, der die 7. Oktave des Ausgangstones um ein weniges überragt, und zwar nennt man den sich ergebenden kleinen Unterschied

	Grundton	Ganzton	gr. Terz	Qa.	Qi.	gr. Sexte	gr. Sept.	Ok.
Notenbeispiel	c	d	e	f	g	a	h	c'
Ableitung		$\frac{2\,\text{Qi.}}{1\,\text{Ok.}}$ $\frac{\left(\frac{2}{3}\right)^2}{\frac{1}{2}}$	$\frac{4\,\text{Qi.}}{2\,\text{Ok.}}$ $\frac{\left(\frac{2}{3}\right)^4}{\left(\frac{1}{2}\right)^2}$	$\frac{\text{Ok.}}{\text{Qi.}}$ $\frac{\frac{1}{2}}{\frac{2}{3}}$	Qi.	$\frac{3\,\text{Qi.}}{\text{Ok.}}$ $\frac{\left(\frac{2}{3}\right)^3}{\frac{1}{2}}$	$\frac{5\,\text{Qi.}}{2\,\text{Ok.}}$ $\frac{\left(\frac{2}{3}\right)^5}{\left(\frac{1}{2}\right)^2}$	Ok. $\frac{1}{2}$
Saitenlänge	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{64}{81}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{16}{27}$	$\frac{128}{243}$	$\frac{1}{2}$
Intervallschritt:		$\frac{8}{9}$ $\frac{8}{9}$	$\frac{243}{256}$	$\frac{8}{9}$	$\frac{8}{9}$	$\frac{8}{9}$	$\frac{243}{256}$	

das pythagoreische Komma, ausgehend von $C_1 = 1$ ist $G_1 = \frac{2}{3}$, $D = \left(\frac{2}{3}\right)^2$, $A = \left(\frac{2}{3}\right)^3$, $e = \left(\frac{2}{3}\right)^4$, $h = \left(\frac{2}{3}\right)^5$, $fis^1 = \left(\frac{2}{3}\right)^6$, $cis^2 = \left(\frac{2}{3}\right)^7$, $gis^2 = \left(\frac{2}{3}\right)^8$, $dis^3 = \left(\frac{2}{3}\right)^9$, $ais^3 = \left(\frac{2}{3}\right)^{10}$, $eis^4 = \left(\frac{2}{3}\right)^{11}$, $his^4 = \left(\frac{2}{3}\right)^{12}$. Dieser Wert für $his^4 = \frac{4096}{531441}$ gibt verglichen mit $c^5 = \frac{1}{2^7}$, der 7. Oktave von c_1, das pythagoreische Komma $\frac{531441}{524288}$ $\left(\text{ungefähr } \frac{73}{74}\right)$.

Reiht man Quinten nach unten aneinander, so ergibt sich ebenfalls zwischen der 12. Quinte und dem um 7 Oktaven reduzierten Ausgangston das pythagoreische Komma als Unterschied. Die gleiche Operation kann durch Fortschreiten in Quarten nach oben hin angestellt werden, z. B. von *C* aus bis zur 12. Quarte $deses^3 = \left(\frac{3}{4}\right)^{12}$, die um das pythagoreische Komma kleiner ist als die 5. Oktave des Ausgangstones $c^4 = \frac{1}{2^5}$.

Das entwickelte pythagoreische Tonsystem ist als Spezialfall im natürlich-harmonischen System enthalten. Dies wird deutlich durch eine Darstellungsart, deren man sich zur Erkennung des harmonischen Zusammenhanges der Töne bedient:

In einer Horizontalreihe werden die um Quinten voneinander abstehenden Töne nebeneinandergestellt. Jeder Schritt nach rechts entspricht einem Quintenschritt aufwärts, jeder Schritt nach links einem Quintenschritt abwärts oder — da von Oktavunterschieden abgesehen wird — um eine Quarte aufwärts:

— — — — *ges des as es b f c g d a e h fis* — — — —.

Im Dreiklang auf *c* bildet *c* und *g* eine reine Quinte, die natürlich-harmonische große Terz *e* von *c* ist um $\frac{80}{81}$ kleiner als die pythagoreische, gehört also nicht in die Quintenreihe hinein, in der *c* und *g* vorkommen. Deshalb schreibt man sie in erhöhter Stellung zwischen *c* und *g*:

e

c *g*

Dies ist das Bild des Tonikadreiklanges von C dur. Es kann nun jeder Durdreiklang so dargestellt werden. Durch

a e h
f c g d

wird ausgedrückt, daß von den Tönen der natürlich-harmonischen C dur-Leiter — die ja drei Durdreiklänge enthält — *f*, *c*, *g* und *d* einer Quintenreihe angehören. Als große Terz von *c* ist $e = {}^4/_5$, für *a* als große Terz von $f = {}^3/_2$ folgt $\frac{3}{2} \cdot \frac{4}{5} = \frac{6}{5}$; somit bildet auch *a* — *e* eine reine Quinte, denn $\frac{4}{5} : \frac{6}{5}$ gibt $\frac{4}{6} = \frac{2}{3}$. Weil ferner $h = \frac{8}{15}$, so folgt für das Intervall *e* — *h* ebenfalls das Quintverhältnis. Die erhöht geschriebenen Töne bilden also ebenfalls eine Quintenreihe.

Der großen Terz entspricht das Bild  , der kleinen dagegen  . Da nun auch der Molldreiklang wie der Durdreiklang aus großer und kleiner Terz, nur in umgekehrter Reihenfolge, besteht, entspricht dem Molldreiklang das Bild eines gleichseitigen Dreiecks, das die Spitze nach unten hat:  , während beim Bild des Durdreiklangs die Dreieckspitze nach oben zeigt.

c g
es

stellt also einen Molldreiklang dar, wie auch

g d *f c*
und
b *as*

Die 3 Dur- und die 3 Molldreiklänge sind als „tonale Gruppe von *c*“ — wie Eitz sie nennt — in folgendem „Abbild“ dargestellt:

a *e* *h*
f *c* *g* *d*
as *es* *b* (Anmerkung 5.)

Setzt man diese drei Reihen reiner Quinten nach beiden Seiten hin fort, so findet man in jeder Reihe die Töne in derselben Reihenfolge wieder. Jede der Reihen stellt ein pythagoreisches Quintensystem dar. Aber zwischen den gleichnamigen Tönen zweier verschiedener Reihen besteht ein überall gleicher Unterschied. Z. B. ist das *e* der mittleren Reihe vom *c* derselben Reihe durch 4 Quintenschritte zu erreichen, wäre also $e = \frac{16}{81}$; reduziert man $\frac{16}{81}$ um zwei Oktaven, so folgt für die pythagoreische große Terz $\frac{64}{81}$. Das *e* der oberen Reihe ist die natürlich-harmonische große Terz von dem *c* der mittleren Reihe, also $\frac{4}{5}$. Den Unterschied dieser beiden Terzen nennt man syntonisches Komma; und zwar ist das *e* der mittleren Reihe um $\frac{80}{81}$ höher. Ebenso sind alle Töne irgendeiner Reihe stets um das Intervall $\frac{80}{81}$ höher als die entsprechenden gleichnamigen der darüberliegenden Reihe. Die Töne der Ausgangsreihe werden durch den Exponenten ^{0} bezeichnet; die um ein syntonisches Komma tieferen Töne, also die der darüberstehenden Reihe, mit dem Exponenten $^{-1}$, die um zwei syntonische Komma tieferen mit dem Exponenten $^{-2}$ usw. Entsprechend fügt man den Tönen, die um ein syntonisches Komma höher als die der Ausgangsreihe (Nulltöne) sind, den Exponenten $^{+1}$ bei, usw.*). Indem Töne berücksichtigt werden, die sich um weitere Kommata von den Nulltönen unterscheiden, kann die Zahl der Horizontalreihen beliebig vermehrt werden, so daß ein unbegrenztes „harmonisches Tongewebe“ (oder das „harmonische Tonsystem“) entsteht:

*) Die Exponenten sind nicht in mathematischem Sinne zu verstehen.

fis^{-3} *cis*$^{-3}$ *gis*$^{-3}$ *dis*$^{-3}$ *ais*$^{-3}$ *eis*$^{-3}$ *his*$^{-3}$ *fisis*$^{-3}$ *cisis*$^{-3}$ *gisis*$^{-3}$ *disis*$^{-3}$

d^{-2} *a*$^{-2}$ *e*$^{-2}$ *h*$^{-2}$ *fis*$^{-2}$ *cis*$^{-2}$ *gis*$^{-2}$ *dis*$^{-2}$ *ais*$^{-2}$ *eis*$^{-2}$ *his*$^{-2}$

f^{-1} *c*$^{-1}$ *g*$^{-1}$ *d*$^{-1}$ *a*$^{-1}$ *e*$^{-1}$ *h*$^{-1}$ *fis*$^{-1}$ *cis*$^{-1}$ *gis*$^{-1}$ *dis*$^{-1}$

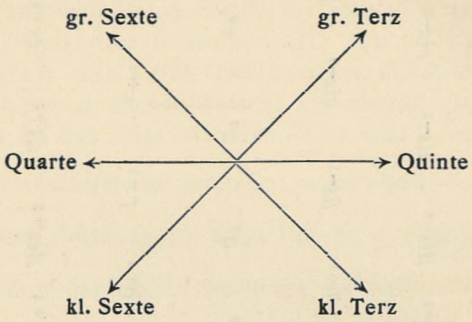
des^{0} *as*^{0} *es*^{0} *b*^{0} *f*^{0} **[*c*^{0}]** *g*^{0} *d*^{0} *a*^{0} *e*^{0} *h*^{0}

fes^{+1} *ces*$^{+1}$ *ges*$^{+1}$ *des*$^{+1}$ *as*$^{+1}$ *es*$^{+1}$ *b*$^{+1}$ *f*$^{+1}$ *c*$^{+1}$ *g*$^{+1}$ *d*$^{+1}$

deses^{+2} *asas*$^{+2}$ *eses*$^{+2}$ *bb*$^{+2}$ *fes*$^{+2}$ *ces*$^{+2}$ *ges*$^{+2}$ *des*$^{+2}$ *as*$^{+2}$ *es*$^{+2}$ *b*$^{+2}$

feses^{+3} *ceses*$^{+3}$ *geses*$^{+3}$ *deses*$^{+3}$ *asas*$^{+3}$ *eses*$^{+3}$ *bb*$^{+3}$ *fes*$^{+3}$ *ces*$^{+3}$ *ges*$^{+3}$ *des*$^{+3}$

In diesem harmonischen Tongewebe entspricht ein Schritt nach rechts einer Quinte, nach links einer Quarte, nach rechts oben einer großen Terz, nach links unten einer kleinen Sexte, nach links oben einer großen Sexte und nach rechts unten einer kleinen Terz:



[Die durch einen Pfeil verbundenen Intervalle — wie z. B. große Sexte $\left(\frac{3}{5}\right)$ und kleine Terz $\left(\frac{5}{6}\right)$ — ergänzen sich zu einer Oktave $\left(\frac{1}{2}\right)$. Jedes Intervall, das ein anderes zur Oktave ergänzt, wird als die „Umkehrung" des ergänzten Intervalls bezeichnet.]

Mit Hilfe der Oktave, der Quinte und Terz, also der Verhältnisse $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ und $\frac{4}{5}$, ist jeder Ton des harmonischen Tonsystems bestimmbar. Den Tritonus fis^{-1} bestimmt man von c^0 aus, z. B. über g^0 und d^0 (zwei Quintenschritte), von d^0 führt dann eine große Terz zu fis^{-1}, so daß man erhält: $\frac{2}{3} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{4}{5} = \frac{16}{45}$; dies ergibt um eine Oktave reduziert für $fis^{-1} = \frac{32}{45}$.

Die Bestimmung der Tonwerte wäre sehr mühevoll, wenn man nur mit gemeinen Brüchen rechnen wollte, besonders wenn solche Intervalle vorkommen, denen kompliziertere Verhältnisse ent-

sprechen. Wie schwierig ist es z. B. auch, die Reihenfolge der Töne, denen die hier angeführten gemeinen Brüche entsprechen, hinsichtlich ihrer Höhe sofort zu erkennen:

$$ges = \frac{729}{1024}$$
$$fis = \frac{512}{729}$$
$$eisis = \frac{268435448}{387420489}$$
$$asas = \frac{177147}{262144}$$
$$g = \frac{2}{3}$$

Drückt man dagegen die einzelnen Brüche durch Dezimalbrüche oder Logarithmen aus, so ist infolge der Übersichtlichkeit ein Ordnen leicht möglich:

Dezimalbrüche	Logarithmen (auf Basis 10)
$ges = 1{,}404663$	$ges = 0{,}1475725$
$fis = 1{,}423828$	$fis = 0{,}1534575$
$eisis = 1{,}443254$	$eisis = 0{,}1593509$
$asas = 1{,}479811$	$asas = 0{,}1702167$
$g = 1{,}5$	$g = 0{,}1760913$

Der Bestimmung mit Dezimalbrüchen ist aber die logarithmische Bestimmung der Tonhöhendifferenzen vorzuziehen; denn wenn man die den Tönen entsprechenden Werte durch Logarithmen ausdrückt, kann das bei allen anderen Tonbestimmungsmethoden nötige und bei größeren Werten äußerst umständliche Multiplizieren und Dividieren durch das einfachere Addieren und Subtrahieren ersetzt werden.

2. Temperaturen und partielle reine Stimmung

Die praktische Durchführung der harmonischen Reinheit stößt aber auf Schwierigkeiten. Man war der Ansicht, daß es bei Instrumenten mit nicht gebundener Intonation und beim a cappella-Gesang möglich sei, absolut reine Akkorde zur Anwendung zu bringen. Zweifellos ist dies in manchen Fällen, aber nicht immer und meist nicht der Fall; denn die harmonische Reinheit der Akkorde verträgt sich nicht immer mit einer natürlichen melodischen Stimmführung. Es wird daher an manchen Stellen zugunsten der melodischen Stimmführung von der absoluten Reinheit etwas aufzugeben sein. Z. B. weist M. Planck (in einer Schrift: „Die natürliche Stimmung in der Vokalmusik" 1894) auf eine Stelle aus einem geistlichen Gesang von H. Schütz hin; dort müßte der Chor nach wenigen Takten erheblich gesunken sein, wenn er streng harmonisch rein singen würde. Zahllose Beispiele dieser Art lassen sich anführen, die alle beweisen, daß das Prinzip der reinen Harmonik nicht mit dem Prinzip der Erhaltung der Tonika vereinbar ist. Dies hat seinen Grund darin, daß sich die Quinten-, Quarten-, Terzen- und Sextenprogression ins Unendliche verliert; denn ein dem Ausgangston äquivalenter Ton — d. h. der denselben Notenbuchstaben trägt und vom Ausgangston durch Oktavenschritte erhalten werden kann — wird nie genau erreicht, immer bleibt ein Rest: 12 aneinandergereihte Quinten überragen die 7. Oktave des Ausgangstones um das pythagoreische Komma, 4 kleine Terzen übersteigen die Oktave um die große *Diesis* $\left(\frac{625}{648}\right)$, und 3 aneinandergereihte große Terzen bleiben hinter der Oktave um die kleine *Diesis* $\left(\frac{125}{128}\right)$ zurück. Innerhalb der Oktave sind daher unendlich viele Töne möglich.

Für einen nur durch Notenzeichen gegebenen Ton kommen somit verschiedene Töne des natürlich-harmonischen Systems in Frage; denn der Verwandtschaftsgrad zur Tonika kann verschieden sein. Der genaue Wert des betreffenden Tones ist immer dadurch bestimmt, auf welchem Wege der Ton gewonnen wurde. Die Frage,

ob z. B. *fis* oder *ges* höher sei, ist daher vollkommen unbestimmt und kann nur beantwortet werden, wenn ein gemeinsamer Ausgangspunkt angenommen wird und der Weg bekannt ist, auf welchem man zu den beiden Tonbezeichnungen gelangt ist. Für Instrumente mit fester Stimmung muß aber die Tonanzahl innerhalb der Oktave beschränkt sein. Dies führte zu Ausgleichsverfahren, d. h. zu musikalischen Temperaturen. Entweder beschränkt man sich auf einen kleinen Kreis reiner Werte oder man nimmt Mittelwerte an. Durch die Auswahl eines engeren Kreises reiner Harmonien bietet sich zwar der Vorzug, in einigen Tonarten rein spielen zu können, jedoch weisen die übrigen Tonarten Abweichungen von der Reinheit auf, die um so größer sind, je mehr reine Tonarten in der betreffenden Temperatur anzutreffen sind.

Arnold Schlick (1511) war wohl der erste, der bewußt einen Ausgleich zwischen den benutzten Tonwerten vorschlug. Er setzte die reine Oberterz eines Tones gleich der 4. reinen Quinte desselben Tones ($e^{-1} = e^{0}$), verteilte also das syntonische Komma auf die vier Quinten *c*—*g*, *g*—*d*, *d*—*a*, *a*—*e*, so daß jede Quinte um den vierten Teil des syntonischen Kommas zu klein war. Die Durchführung dieses Prinzips lieferte ein System, in dem nur die Durakkorde auf *es*, *b*, *f*, *c*, *g*, *d* und *a*, sowie die terzverwandten Mollakkorde brauchbar waren. Sehr verstimmt waren die Quinten *as*—*es* und *cis*—*gis*, die sogenannten „Wölfe". Die Schlicksche Temperatur wurde auch mitteltönige Temperatur genannt, weil der Ganzton genau in der Mitte zwischen dem großen und kleinen Ganzton liegt; sie war sehr lange im Gebrauch.

Während es aber Schlick und nach ihm noch vielen anderen Theoretikern und Praktikern auf die Verteilung des syntonischen Kommas ankam, machte Andreas Werkmeister einen äußerst fortschrittlichen Vorschlag, indem er die Verteilung des pythagoreischen Kommas, und zwar auf vier der zwölf Quinten des Zirkels: *c*—*g*, *g*—*d*, *d*—*a* und *h*—*fis*, forderte. Dies gibt eine Mischung von reinen und mehr oder weniger ungenauen Werten, jedoch tritt kein störender „Wolf" auf.

Neidhardt („Gänzlich erschöpfte mathematische Abteilungen" 1732) geht dann noch weiter und teilt das pythagoreische Komma

in 12 Teile; aber er verteilt diese noch nicht gleichmäßig auf die zwölf Quinten, sondern macht *c—g*, *g—d*, *d—a* und *a—e* um $^1/_6$ des pythagoreischen Kommas und *e—h*, *h—fis*, *as—es* und *es—b* um $^1/_{12}$ des pythagoreischen Kommas zu klein, *b—f*, *f—c* und *fis—cis* (*des*) rein. Es lag nahe, auch die drei reinen Quinten noch zu temperieren und dafür die um $^1/_6$ des pythagoreischen Kommas verstimmten Quinten zu entlasten. Auch trat die Notwendigkeit, Melodien zu transponieren, sowie die Forderung freier Modulation immer mehr hervor. Dies führte zur gleichmäßigen Verteilung des pythagoreischen Kommas auf die zwölf Quinten des Zirkels oder, was dasselbe bedeutet, zur Gleichsetzung der 12. Quinte und 7. Oktave. Erniedrigt man den Endpunkt einer Reihe von 12 Quinten, z. B. den Ton *his* der Reihe

c g d a e h fis cis gis dis ais eis his

um ein pythagoreisches Komma, und rückt die Töne der Reihe dann so aneinander, daß alle Schritte unter sich gleich sind, so wird der Fehler auf die 12 Intervalle vollkommen gleichmäßig verteilt.

Der Quintenzirkel ist in dieser, unserer 12stufigen gleichschwebenden Temperatur geschlossen, man gelangt mit 12 Quintenschritten wieder zu einem mit dem Ausgangston äquivalenten, d. h. durch Oktavenschritte zu gewinnenden Ton. Ebenso ist der Zirkel der großen und kleinen Terzen geschlossen; denn drei temperierte große Terzen oder vier temperierte kleine Terzen führen zur Oktave des Ausgangstones. Demnach müssen im gleichschwebend temperierten System enthalten sein: um den zwölften Teil des pythagoreischen Kommas erniedrigte reine Quinten, um den zwölften Teil des pythagoreischen Kommas erhöhte reine Quarten, um den dritten Teil der kleinen Diesis erhöhte reine große Terzen und um den vierten Teil der großen Diesis erniedrigte kleine Terzen.

Jeder Ton hat zum nächstfolgenden und zum vorhergehenden ein überall gleichbleibendes Verhältnis, dieselbe Melodie kann auf jeder Tonstufe begonnen werden; denn jede Tonart weist dieselben Intervallverhältnisse auf. Und mit dem Vorteil freier

Transposition ist ein anderer, für unsere akkordharmonische Musik wichtiger gegeben: der Vorteil freier Akkordbewegung; durch die sogenannte „enharmonische Verwechslung", die Umdeutung von einer Akkordbeziehung in eine andere, sind reiche Modulationsmöglichkeiten gegeben.

Die ungleichschwebenden Temperaturen konnten nur Genüge leisten, so lange man in der Modulation und Tonartenwahl verhältnismäßig beschränkt war. Für die Einführung der gleichschwebenden Temperatur setzten sich zuerst J. S. Bach („Das wohltemperierte Klavier") und Ph. E. Bach energisch ein, aber trotzdem wurden noch lange Zeit ungleichschwebende Temperaturen, z. B. die ungünstige von Kirnberger, benutzt. Diese enthält 7 reine Quinten:

$$des^0\ as^0\ es^0\ b^0\ f^0\ c^0\ g^0 \text{ und } b^0,$$

ferner die der nächsten Oberterzreihe angehörenden Töne e^{-1}, fis^{-1} und h^{-1}; die große Sexte a^* ist als Mitte zwischen der pythagoreischen großen Sexte (a^0) und der natürlichen großen Sexte (a^{-1}) gewählt. Die 12 Stufen waren:

c^0	des^0	d^0	es^0	e^{-1}	f^0	fis^{-1}	g^0	as^0	a^*	b^0	h^{-1}	c^0
1,	$\frac{243}{256}$	$\frac{8}{9}$	$\frac{27}{32}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{32}{45}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{81}{128}$	$\frac{161}{270}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{8}{15}$	2

Darin ist die Quinte fis^{-1}—des^0 um ein ganzes syntonisches Komma zu klein, die Terzen des^0—f^0, as^0—c^0, es^0—g^0 und b^0—d^0 sind um $\frac{80}{81}$ zu groß, also pythagoreische Terzen. Ebenfalls zu groß sind a^*—des^0, e^{-1}— as^0, h^{-1}—dis^0, fis^{-1}—b^0. Bei dem Kirnbergerschen System findet — abgesehen von a^* — nur eine Auswahl von reinen Werten, aber kein Ausgleich statt*). Dasselbe gilt auch für das bereits im 17. Jahrhundert von Kepler

$$(c^0\ cis^{-1}\ d^0\ es^{+1}\ e^{-1}\ f^0\ fis^{-1}\ g^0\ gis^{-1}\ a^0\ b^{+1}\ h^0\ c^0)$$

*) Die Bezeichnung „Temperatur" für derartige Systeme ist eigentlich nicht gerechtfertigt; in musikgeschichtlichen Werken werden die Auswahlsysteme aber zu den ungleichschwebenden Temperaturen gerechnet.

sowie für das 1729 von dem Mathematiker Euler

$(c^0\ cis^{-2}\ d^0\ dis^{-2}\ e^{-1}\ f^0\ fis^{-1}\ g^0\ gis^{-2}\ a^{-1}\ ais^{-2}\ h^{-1}\ c^0)$

vorgeschlagene Auswahlsystem (Anm. 6).

Das Streben nach harmonischer Reinheit liegt auch den Versuchen zugrunde, durch Vermehrung der Töne innerhalb der Oktave zu möglichst reinen Tonverhältnissen zu gelangen. Begründet wird dieses Verfahren damit, daß ja, je größer die Tonstufenzahl innerhalb der Oktave ist, die Unterschiede zweier benachbarter Töne immer weniger merklich werden, so daß sie bei einem gewissen Näherungsverhältnis miteinander vertauscht werden können, ohne daß die Vertauschung für die Gehörsempfindung wahrnehmbar wird (Anm. 7). Schon der Mathematiker Nicholas Mercator schlug zu Anfang des 18. Jahrhunderts eine 53stufige gleichschwebende Temperatur vor, deren Quinten und Terzen den reingestimmten sehr nahe kommen. (Die 53. Quinte liegt der 31. Oktave des Ausgangstones so nahe, daß sie als äquivalent angesehen werden kann.) P. v. Janko fand in der 41stufigen gleichschwebenden Temperatur eine Teilung, die auch schon weit bessere Quinten und Terzen als die 12stufige gibt. Die Stufenfolge der brauchbaren Teilung ist: 12stufig, 41stufig, 53stufig. Erst eine 347 stufige gleichschwebende Temperatur liefert Quinten und Terzen, die sich den reingestimmten noch mehr als die des 53stufigen Systems nähern, jedoch kommt man trotz der großen Stufenzahl den reingestimmten Intervallen auch nur unwesentlich näher, so daß das 53stufige System tatsächlich eine hervorragende Stellung einnimmt. Die praktische Durchführung eines solchen Systems scheitert aber an der Spielbarkeit der Instrumente. Daß die Herstellung derartiger Instrumente möglich ist, hat bereits Bosanquet gezeigt, der auf Mercators Vorschlag ein (in Helmholtz' Lehre von den Tonempfindungen beschriebenes) Harmonium konstruierte (Anm. 8), auf dem man in allen Tonarten so rein spielen kann, daß die Unterschiede auch vom empfindlichsten Ohr nicht bemerkt werden.

Anstatt die Tastenanzahl innerhalb der Oktave zu vermehren oder Tastenteilungen vorzunehmen, wurden in den der Darstellung

der reinen Stimmung dienenden Instrumenten Transponiermechanismen eingebaut, u. a. wurden Registerzüge, Kniehebel und Druckknöpfe zur enharmonischen Umstimmung oder zur Verschiebung des Systemes um eine bestimmte Anzahl von reinen Quinten- oder Terzenschritten verwendet. In der Praxis hat man von den Instrumenten mit reiner Stimmung wegen der komplizierten Spieltechnik bisher keinen Gebrauch gemacht; wohl eignen sie sich in hervorragender Weise für akustische Versuche und zur Demonstration der verschiedenen Stimmungsprinzipien. Dies trifft besonders für das von Eitz erbaute Harmonium zu, das ein größeres Stück des an sich unbegrenzten harmonischen Tongewebes gibt.

Die praktische Musikausübung fordert eben für Instrumente mit gebundener Intonation eine möglichst geringe Tonanzahl innerhalb der Oktave. Das 12stufige gleichschwebende System ist eine äußerst günstige Kompromißlösung; denn es ist für melodische wie harmonische Zwecke gleich geeignet, hat den Vorzug der Geschlossenheit und ist von den diesen Vorzug auch aufweisenden Systemen das einfachste. Der Grad der Reinheit steht zwar gegenüber dem der anderen gleichschwebend temperierten Systemen zurück, aber er ist befriedigend; denn unser Ohr ist in der Auffassung der Intervalle starker Akkomodationen fähig, d. h. es besitzt die Fähigkeit, innerhalb gewisser enger Grenzen das Gehörte zu idealisieren, es hört diejenigen Töne und Intervalle hinein, die seiner Gewöhnung entsprechen.

Streichinstrumentalisten und Sänger haben ein gewisses Maß von Intonationsfreiheit; sie lenken gelegentlich unbewußt auf harmonisch reine Intervalle (besonders, wenn es sich um konsonante, in langsamem Wechsel gegebene Akkorde handelt und diese Stellen leise genommen werden) oder andere dem 12stufig temperierten System fremde Intervalle ein. Die letzteren, durch das melodische Ausdrucksbedürfnis entstandenen Tonverbindungen deuten wir stets harmonisch. Bei gänzlicher Intonationsfreiheit fällt die Benutzung pythagoreischer Intervalle auf, jedoch nähern sich die Intervalle mehr den temperierten, wenn die Zusammenklänge harmonisch fortlaufend reguliert werden.

VIERTER ABSCHNITT

Resonanz

*

Schwingt ein Körper, der durch einen Impuls aus seiner Ruhelage gebracht wird und dann sich selbst überlassen bleibt, vermöge der rückwirkenden Kräfte (Elastizität, Schwerkraft) weiter, so führt er freie Schwingungen aus. Wirkt auf einen Körper dauernd eine äußere periodische Kraft ein, ist der Körper gezwungen, die Schwingungsperiode dieser äußeren Kraft anzunehmen, so führt er erzwungene Schwingungen aus.

Ein Spezialfall der erzwungenen Schwingung ist das Mittönen. Diese auch Resonanz (Synchronismus) genannte Erscheinung tritt ein, wenn ein Körper von einer äußeren periodischen Kraft im Rhythmus seiner Eigenschwingung erregt wird. Durch eine kräftig schwingende Stimmgabel wird eine zweite von gleicher Tonhöhe zum Mittönen gebracht. Die zweite tönt auch — je nach der Stärke des Anschlags länger oder kürzer — weiter, wenn die erste nach dem Anschlage zum Schweigen gebracht wird. Das Mitschwingen wird durch folgendes Beispiel klar: Versucht man einen aufgehängten Körper von schwerer Masse in Schwingungen zu versetzen — Helmholtz gibt dafür das Beispiel der von einem kleinen Knaben durch ein Seil in Schwingung zu versetzenden schweren Kirchenglocke — so wird eine kleine Kraft dem Körper nicht jede beliebige Periode aufzwingen können, weil der Widerstand zu groß ist. Jedoch wird der Körper durch einen Anstoß eine, wenn auch sehr geringe, Schwingung ausführen. Erfolgt der zweite Anstoß, wenn die erste Schwingung vollführt ist, so wirkt der zweite Anstoß beschleunigend, und die Amplitude der Schwingung wird größer. Erregt man nun weiter den schwingenden Körper

immer in der Weise, daß der Rhythmus der Erregung dem Rhythmus der Schwingung des Körpers entspricht, so wachsen die Amplituden sehr stark an. Eine kleine Kraft genügt also, um große Massen in Schwingung zu versetzen, wenn die Periode der einwirkenden Kraft mit der des zu erregenden Körpers übereinstimmt. So sind auch bei dem oben angeführten Stimmgabelversuch die Bewegungsstöße der Luft nur sehr schwach, sie erfolgen aber in einem Rhythmus, der dem Eigenton der zweiten Stimmgabel entspricht, jeder neue Impuls wirkt also beschleunigend, so daß die summierten Wirkungen imstande sind, die zweite Gabel zum Resonieren zu veranlassen. Je leichter und geringer die Masse der Körper ist, desto leichter gelingt es, sie zum Mitschwingen zu bringen; auch sprechen sie auf Töne an, deren Schwingungszahl nur annähernd mit der ihrigen übereinstimmt. Während die Schwingungen derartiger Körper (wie z. B. Saiten und Membranen), die erst durch Spannung schwingungsfähige Gebilde werden, starke Dämpfung erfahren, d. h. nach Aufhören des äußeren Anstoßes bald verklingen, zeigen Körper von großer Masse das umgekehrte Verhalten; z. B. resonieren Stäbe, Stimmgabeln, Platten und Glocken nur, wenn ihre Schwingungszahl genau mit der des erregenden Tones übereinstimmt. Man spricht in diesem Falle von auswählender, auch bestimmter oder singulärer Resonanz (Anm. 9). Der Resonanzbereich derartiger Körper ist sehr eng.

Resoniert ein Körper auf beliebige Schwingungen, hat er also einen sehr großen Resonanzbereich, so bezeichnet man die Erscheinung als allgemeine oder unbestimmte Resonanz. Dieser begegnet man beim Trommelfell des Ohres, das durch jede Schwingung in Mitschwingung versetzt wird, sofort nach Aufhören des äußeren Anstoßes aber nicht mehr schwingt. Auch zeigen die Eigenschaften der allgemeinen Resonanz von den festen Körpern namentlich Holzplatten, die zu Resonanzkästen bei den Saiteninstrumenten verwendet werden (deren Aufgabe und Wirkungsweise dort besprochen werden soll). Ebenso gehören hierher Luftmassen, die in Hohlräumen eingeschlossen sind. Streicht z. B. quer über die Öffnung einer Flasche ein Luftstrom, so gibt die in der Flasche eingeschlossene Luftsäule den Eigenton der Flasche.

Der Ton einer über die Öffnung gehaltenen Stimmgabel, dessen Schwingungszahl dieselbe ist wie die des Flascheneigentones, erfährt durch das Mitschwingen der in ihrem Eigenrhythmus erregten Luftsäule beträchtliche Resonanz. Diese Erscheinung führt Helmholtz zur Konstruktion der Resonatoren, die in ihren gebräuchlichen Formen in Fig. 9 *A* und *B* abgebildet sind. Die eine Öffnung (*b*) dieser metallenen oder gläsernen Hohlkugeln oder Röhren ist so gestaltet, daß sie, in das Ohr eingeführt, den Gehörgang möglichst gut abschließt. Führt man den Resonator in das eine Ohr ein, und schließt das andere, so wird, wenn ein mit dem Resonatoreigenton übereinstimmender Ton erklingt, dieser immer sehr stark zu hören sein, weil durch ihn die Luft im Resonator in besonders starke Schwingungen gerät. Alle Töne mit anderer Frequenz treten an Intensität weit hinter dem zurück, der dem Eigenton des Resonators entspricht. Mit diesem Hilfsmittel war Helmholtz imstande, die Analyse der Klänge in vollkommener Weise vorzunehmen — wenigstens hinsichtlich der Anzahl und Höhe der im Klange enthaltenen Partialtöne. Jeder mit dem bloßen Ohr kaum oder nicht wahrnehmbare Partialton war mit Hilfe des Resonators nachweisbar, vorausgesetzt, daß seine Intensität einschließlich der Resonatorverstärkung mindestens der schwächste Reiz ist, dem überhaupt noch eine Empfindung entspricht, der also oberhalb dieses sogenannten Schwellenwertes liegt.

FÜNFTER ABSCHNITT

Akustik der Gebäude (Raumakustik)

*

Die Hörsamkeit großer Räume ist ein altes, berüchtigtes Problem, dessen Lösung erst gelang, nachdem einwandfreie Untersuchungen über die Entstehung, die Ausbreitung und den Verbleib des Schalles möglich waren. Die wichtigsten Gesichtspunkte wurden durch Analyse der Schallwirkungen in schon vorhandenen Räumen gewonnen.

In einem Medium von durchweg gleicher Beschaffenheit breiten sich die Wellen von einem Erregungspunkt nach allen Richtungen hin gleichmäßig aus, die Einzelwelle hat also Kugelgestalt. Mit der Entfernung vom Erregungszentrum werden die Wellenflächen der sich im freien Raume ausbreitenden Kugelwellen immer größer. Daraus folgt, daß die Energie, mit der eine gleichgroße Fläche in verschiedenen Entfernungen getroffen wird, mit der Entfernung von der Schallquelle abnehmen muß. In der Praxis kommt aber eine Schwächung infolge der räumlichen Ausbreitung nicht in Frage, denn man hat es nie mit einer ungestörten Ausbreitung zu tun; immer treten Reflexionen (Rückwürfe) auf, die im begrenzten Raum besonders vielfältig und durch die Wände, den Boden, die Decke und andere Hindernisse bedingt sind. Durch diese Reflexionen werden dem Ohre des Hörers Teile der Tonmasse zugeführt, die — wenn keine Störung der Ausbreitung erfolgt wäre — dem Hörer verloren gegangen wären. So kann die sonst, d. h. bei ungestörter Schallausbreitung an der betreffenden Stelle des Raumes nachweisbare Stärke durch reflektierte Wellen vervielfacht und der durch die Entfernung bedingte Verlust an Intensität ausgeglichen werden. Diese vorteilhafte, notwendige Wirkung der Rückwürfe tritt aber nur dann ein, wenn die reflektierte Welle unmittelbar nach der

ursprünglichen (direkten) Welle die Stelle, an der sich der Hörer befindet, erreicht, so daß der Unterschied in der Ankunft des ursprünglichen Schalles und des Nachhalles nicht bemerkbar ist. In dem Falle hat die reflektierte Welle einen Mehrweg (Umweglänge) von höchstens elf Metern, trifft also mit einer Verzögerung von höchstens $^1/_{30}$ Sekunde ein. Überschreitet der Umweg der reflektierten Welle elf Meter, so tritt eine merkliche Verschleppung der Verstärkung ein. Diese Nachhallerscheinungen werden sehr lästig, wenn die reflektierte Welle einen Umweg von mehr als siebzehn Metern hat, also mit einer Verzögerung von mehr als $^1/_{20}$ Sekunde eintrifft. Je kleiner die Nachhalldauer, desto besser ist demnach die Hörsamkeit eines Raumes. Eine gegenseitige Verstärkung der Wellen ist aber nicht mehr möglich, wenn der Umweg der reflektierten Welle mehr als 23 Meter beträgt und die Welle somit mehr als $^1/_{15}$ Sekunde später als die ursprüngliche Welle ankommt. Man nimmt dann nach dem ursprünglichen Schall den reflektierten getrennt als sogenanntes Echo (Widerhall) wahr. Daraus erhellt, daß die Nachhall- und Echoerscheinungen hauptsächlich von der Größe des Raumes abhängen und daß bei einer Übertragung eines wegen seiner guten Hörsamkeit bewährten Raumes von kleineren auf größere Verhältnisse auch eine Änderung der Verhältnisse zu erfolgen hat.

Während die Rückwürfe zweiter Ordnung, — d. h. Schallwellen, die zweimal reflektiert worden sind —, sowie Rückwürfe höherer Ordnungen durch die mehrfachen Reflexionen schon geschwächt sind und deshalb vernachlässigt werden können, muß vor allem auf die Rückwürfe erster Ordnung, d. h. die nur einmal reflektierten Schallwellen, geachtet werden. Alle Rückwürfe erster Ordnung, deren Umweglänge weniger als elf Meter beträgt, sind durch geeignete Wahl der Reflexionsflächen zu unterstützen, weil die ursprüngliche Welle durch die sehr rasch folgenden Rückwürfe verstärkt wird, was von besonderer Wichtigkeit für die Hörsamkeit im rückwärtigen Teil des Raumes ist. Dagegen sind alle Rückwürfe erster Ordnung, die eine Umweglänge von mehr als elf Metern aufweisen, auszuschalten, weil sie infolge ihres Nachschleppens die Klangwirkung ungünstig beeinflussen.

Die Ausschaltung unliebsamer Rückwürfe geschieht durch Dämpfung der Schallwellen, die dadurch erreicht wird, daß als Reflexionsflächen solche gewählt werden, deren Dämpfungs- oder Absorptionsvermögen sehr groß ist. Diese Flächen scheinen stark schalldurchlässig. Je nach der Art des reflektierenden Stoffes ist die Fähigkeit, Schallschwingungen aufzunehmen oder umzuwandeln — z. B. in Wärme — verschieden. Schon früh hat man erkannt, welche Wirkung Vorhänge, Stoffbehänge, Stoffschleier, Draperien, Leinwandgemälde, Stoffausfütterungen, Teppichbelege usw. auf die Hörsamkeit des Raumes ausüben. Jedoch war eine richtige Anwendung derartiger Verkleidungen oder „Schalltücher" erst möglich, nachdem über die Dämpfungskraft von Wänden verschiedenen Materials, Bauteilen, Vorhängen, Einrichtungen und Personen, Aufschluß gegeben werden konnte. Es genügt im allgemeinen, wenn die den Raum umschließenden Flächen $^1/_{10}$ bis $^1/_7$ der auf sie entfallenden Schallmasse absorbieren. Bei der Wahl des dämpfenden Stoffes ist zu beachten, daß durch manche Stoffe hohe, durch andere tiefe Töne eine stärkere Dämpfung erfahren und so in gewissen Grenzen sogar die Klangfarbe eines Tones geändert werden kann.

Als sehr vorteilhafte Raumform hat sich — was zunächst den Grundriß betrifft — theoretisch und praktisch die langgestreckte Rechteckform erwiesen. Die an den Seitenwänden (Längswänden) einmal reflektierten Wellen, die Rückwürfe erster Ordnung, haben gegenüber den unmittelbaren Schallwellen nur einen kleinen Mehrweg, folgen also sehr rasch auf die ursprüngliche Welle und üben deshalb eine günstige, verstärkende Wirkung aus. Dies läßt auch schon der Verlauf einiger in das Grundrißbild eingezeichneten Wellen erkennen. Nur stören in solchen langgestreckten Gebäuden diejenigen Wellen, die an der dem Schallerreger gegenüberliegenden entferntesten Wand reflektiert werden; denn sie treffen besonders im mittleren und vorderen Raumteil infolge des langen Weges mit erheblicher Verzögerung gegenüber den unmittelbaren Schallwellen ein, so daß Nachhall oder Echo entsteht. Dem kann aber abgeholfen werden, indem als entfernteste Raumwand eine stark dämpfende Fläche gewählt wird, so daß die Rückwürfe infolge

der an der Reflexionsfläche erlittenen Dämpfungsverluste so schwach sind, daß sie nicht mehr störend wirken.

Aber auch die Höhe des Raumes ist für die Hörsamkeit entscheidend. Die an einer hochgelegenen Decke reflektierten Wellen haben einen großen Umweg gegenüber den unmittelbaren Schallwellen und sind daher schädlich. Durch Tieferlegen der Decke ist Abhilfe zu schaffen. Der Längsschnitt nimmt dann auch mehr eine langgestreckte Rechteckform an, so daß die erwähnten günstigen Reflexionsbedingungen eintreten. So wurde — wie Michel erwähnt — im Parlamentssaal in London und beim Abgeordnetenhaus in Berlin durch Tieferlegen der Decke die schlechte Hörsamkeit verbessert.

Die Kuppel als Deckenform ist für die Hörsamkeit ungünstig, weil durch die hohle Fläche eine ungleichmäßige Verteilung des Schalles bedingt ist. Gekrümmte Flächen vereinigen die reflektierten Strahlen zunächst im Brennpunkt, erst dann laufen die Strahlen wieder auseinander. Liegt der Brennpunkt der hohlen Fläche im Zuhörerraum, so ist der Schall an dieser bestimmten Stelle besonders stark. Haben die reflektierten Strahlen bei Erreichung des Zuhörerraumes den Brennpunkt bereits passiert, so wird die Schallzerstreuung für alle Stellen nicht die gleiche sein. Besonders störend wirken die Rückwürfe bei großen Abmessungen der Kuppel, da die Wegunterschiede zwischen den reflektierten und unmittelbaren Schallwellen dann erheblich sind. Will man die Kuppelform aus bauwissenschaftlichen Gründen trotzdem benutzen oder die Hörsamkeit eines so gestalteten, schon vorhandenen Raumes verbessern, so ist dafür Sorge zu tragen, daß die reflektierten Schallwellen den Zuhörerraum nicht erreichen. Eine derartige Zerstreuung ist durch geeignete Aufteilung (Gliederung) der Kuppelfläche möglich*). Die gute Hörsamkeit der Naturtheater und Freilichtbühnen und der antiken Theater kann zum Teil auf das Fehlen der Decke zurückgeführt werden.

Bei den im Raum vorhandenen kleineren gekrümmten Flächen ist die bei der Kuppel erwähnte zerstreuende Wirkung gekrümmter

*) Wie z. B. im großen Schauspielhaus in Berlin.

Rückwurfflächen wohl auch nachweisbar, kommt aber praktisch nur in Frage, wenn die betreffenden Flächen eine nennenswerte Größe im Vergleich zu den Schallwellen haben. Sind demnach nur die großen Linien von Bedeutung, so erfüllen Wandgliederungen kleinen Maßstabes nicht den angestrebten Zweck, wie auch jede Veränderung der Rauhigkeit der reflektierenden Fläche hinsichtlich der Schallstreuung ohne Wirkung bleibt. Die Gestalt und Größe der Reflexionsfläche ist ausschlaggebend für den Zerstreuungsgrad. Stark zerstreuende Flächen werden daher nicht selten zur Ausschaltung unliebsamer Reflexionen benutzt; wenn diese Flächen mit dämpfenden Stoffen verkleidet sind oder selbst aus dämpfungskräftigem Material bestehen, so wirken zwei, die Schallmasse gleichsam verschluckende Faktoren zusammen.

Entgegen der verbreiteten Meinung, daß Stützen — Pfeiler und Säulen — in einem Raum, von dem gute Hörsamkeit gefordert wird, zu vermeiden seien, kann betont werden, daß sie nur störend wirken, wenn sie in allzu großer Zahl auftreten oder teilweise so eng zusammenstehen, daß sich die Einzelreflexionen summieren und eine Wandwirkung ergeben. Verfolgt man zeichnerisch die von einem Punkte ausgehenden und auf einen quadratischen Pfeiler treffenden Schallwellen*), so zeigt sich, daß diese „gewissermaßen von beiden Seiten um den Pfeiler herumschlagen" (vgl. Anm. 2). Die Beugung der Schallstrahlen ist um so stärker, je größer die Wellenlänge ist. Runde Stützen (Säulen) zerstreuen infolge ihrer Umfangskrümmung die auftreffende Welle, so daß die nach allen Seiten hin reflektierten Teile wegen ihrer Schwäche nicht mehr störend wirken. Aus diesem Grunde sind Säulen den Pfeilern vorzuziehen; denn bei den Pfeilern werden die Schallstrahlen nicht auseinander geworfen, sondern ungeändert nach bestimmter Richtung reflektiert. Diese Rückwürfe können besonders bei breiten Pfeilern ungünstig sein.

Von Einfluß auf die Schallwirkungen sind ferner die Resonanzerscheinungen. Die Schallschwingungen pflanzen sich vor der

*) Wie dies E. Michel in seinem Werk: „Hörsamkeit großer Räume", (Braunschweig 1921) getan und ausführlich erläutert hat.

Erregungsstelle nicht nur durch die Raumluft, sondern auch in Bauteilen fort, so daß gegebenenfalls sämtliche, den Raum begrenzenden Flächen entsprechende Schwingungsbewegungen ausführen, die dann an die Raumluft abgegeben werden. Da die Schallgeschwindigkeit mit der Elastizität des leitenden Mediums wächst, feste Körper also die Schallschwingungen schneller fortpflanzen als Gase, gelangen die durch die Baumasse sich fortbewegenden Schallwellen trotz des Umweges fast zur gleichen Zeit an das Ohr des Hörers wie der von der Schallquelle auf kürzestem Wege durch die Luft vermittelte Schall. Durch die Resonanz kann daher eine günstige Verstärkung der unmittelbaren Schallwellen herbeigeführt werden. Der leitende feste Körper muß besonders für die allgemeine Resonanz befähigt sein; da nun dünnwandige Holzplatten die Eigenschaft der allgemeinen Resonanz in erhöhtem Maße zeigen, fertigt man die Umschließungsflächen eines Raumes oft aus Holz. Ebenso erklärt sich die günstige Wirkung hölzerner Emporen und Holzvertäfelungen. Durch starke Belastung der Bauteile wird eine starke Spannung erzielt und somit die Leitfähigkeit für Schallschwingungen erhöht; die meisten Baustoffe begünstigen die Ausbreitung von Schallschwingungen, denen tiefe Töne entsprechen. Natürlich kann auch durch die Energie der unmittelbaren Schallwellen, die sich durch die Raumluft vom Schallerreger fortpflanzen, die Mitschwingung veranlaßt sein. In jedem Falle ist — wie bei der Reflexion — zu beachten, daß für irgendeine Stelle des Zuhörerraumes der Luftweg der verstärkenden Welle nicht mehr als um 17 m größer ist als der Weg der unmittelbaren Schallwelle.

Besonders störend ist die auswählende Resonanz, die eintritt, wenn ein im Raum befindlicher Körper oder ein abgegrenzter Teil der Raumluft oder gar die gesamte Raumluft — was besonders bei kleinen Räumen der Fall ist — durch einen bestimmten Ton in Eigenschwingung versetzt wird. Das im Rhythmus seiner Eigenschwingung erregte Gebilde kann durch die kräftige Resonanz sehr ungünstig die Schallwirkung beeinflussen, während Baustoffe oder Einrichtungen, die durch alle Töne des musikalischen Bereichs in Mitschwingung versetzt werden, im allgemeinen günstig sind.

Nicht unwesentlich für die Hörsamkeit eines Raumes ist eine der Praxis schwierige Aufgaben stellende Erscheinung: Die reflektierten Schallwellen treffen mit den unmittelbaren oder anderen reflektierten Wellen aller Ordnungen zusammen, es treten also Interferenzen auf. An manchen Stellen des Raumes wird daher eine Verstärkung, an andern eine Schwächung des Schalles bemerkbar sein. Auch tritt der Fall ein, daß sich unmittelbare und die ihnen entgegenlaufenden reflektierten Wellenzüge zu stehenden Wellen zusammensetzen. Es ist sehr schwierig, die infolge der Vielfältigkeit der Reflexionen bedingten verschiedensten Interferenzen durch Gestaltung des Raumes so zu bestimmen, daß der an einer bestimmten Stelle erzeugte Schall an irgendeiner Stelle des Zuhörerraumes annähernd die gleiche Intensität hat. Als Radikalmittel schlägt der Physiker Auerbach vor, die Wandung geometrisch so zu formen, daß an jede Stelle des Raumes nur ein einziger Schallstrahl gelangt. Dies wird nur von einem Rotationsparaboloid mit der Schallquelle im Brennpunkt geleistet. Die Strahlen dürfen nicht unmittelbar in den Saal gelangen, sondern müssen erst an der Kappe des Paraboloids reflektiert werden (Fig. 10). Da dies praktisch nicht durchführbar ist, fordert Auerbach wenigstens für den Orchester- bzw. Bühnenraum parabolisch gekrümmte Seiten- und Deckenwände. Jedenfalls kann man durch eine geeignete Raumgestaltung die Interferenzen stets dahin regeln, daß grobe Störungen vermieden werden. Außerdem ist zu bemerken, daß die störenden Interferenzerscheinungen als kleinstes aller raumakustischen Übel in Frage kommen.

Bei der bisherigen Betrachtung galt die Raumluft als Medium von durchweg gleicher Beschaffenheit. Häufig sind aber Luftschichten von ungleicher Temperatur vorhanden; die Dichte dieser Schichten ist dann verschieden. An der Grenze solcher Gasschichten werden — wie überhaupt an der Grenze zweier Medien — Schallwellen im allgemeinen in zwei Wellen zerlegt. Ganz wie bei den Lichtwellen wird die eine reflektiert, während die andere bei nicht senkrechtem Auftreffen der Hauptwelle eine Ablenkung erfährt: es tritt eine Brechung ein. Es ist daher ratsam, besonders zwischen Schallquelle und Hörer, nicht durch Heizkörper, Lüftungsanlagen,

Flammen (Altarkerzen) usw. die Bildung von Luftschichten verschiedener Dichte zu begünstigen.

Vom physikalischen Standpunkt aus kann das Problem der Raumakustik in seinen Hauptzügen als gelöst betrachtet werden. Durch die Anhaltspunkte, die aus dem Vergleich der geometrisch-zeichnerischen Konstruktion des Verlaufs der Schallwellen in vorhandenen Räumen mit den in diesen Räumen vorgenommenen Versuchen gewonnen wurden, ist man imstande, aus dem Verlauf einiger wichtiger Strahlenbündel (Fig. 11 A.u.B), die aus der gesamten Schallstrahlenmenge ausgewählt sind, und in den Längsschnitt, Grundriß und Querschnitt eines geplanten Baues eingezeichnet werden, etwaige Rückwürfe, die den unmittelbaren Schall nicht mehr unterstützend überdecken, also Echoerscheinungen und schädlichen Nachhall, zu erkennen. Diese Störungen sind durch Änderung der Raumform, durch geeignete Rückwurfdämpfungen oder ablenkende und schallstreuende Einbauten zu vermeiden. Da es ferner möglich ist, störende Beugungen und Brechungen der Schallstrahlen, unliebsame Interferenzen und ungünstige Resonanzerscheinungen auszuschalten und für jede Stelle eines Raumes die Schallwirkung zu berechnen, kann im voraus die günstigste Raumbeschaffenheit hinsichtlich Gestalt und Größe sowie der zu verwendenden Baustoffe angegeben werden.

Wenn die Lehren der Hörsamkeit großer Räume trotzdem nicht „in starre Regeln zu binden sind", so liegt das an den Schwierigkeiten, die in der Vereinigung der akustischen und bauwissenschaftlichen (architektonischen) Forderungen bestehen. Sicher ist aber, daß sich mit Hilfe von Verfahren, die zur Feststellung des Verlaufes und der Stärke der Schallwellen dienen und besonders von Sabine, Michel und Biehle ausgebaut worden sind, ein Bauentwurf auf seine Geeignetheit hin prüfen läßt (Anm. 10) und bei schon vorhandenen Räumen die Ursachen ungünstiger Schallwirkungen richtig erkannt werden können. Eine Abhilfe ist unter Berücksichtigung der besprochenen — die Resonanz und die Reflexionserscheinungen, wie Echo, Nachhall, Interferenz usw. betreffenden — Gesichtspunkte stets möglich.

Das Problem des Hörens

*

Für das Verständnis der Hörtheorie, die vor allem die Analysierfähigkeit des Ohres sowie sekundäre Klangerscheinungen zu erklären versucht, sind Bemerkungen über die Beschaffenheit dieses für die Akustik wichtigsten Apparates notwendig.

Das äußere Ohr (Ohrmuschel und Gehörgang) Fig. 12 *G* wird durch das Trommelfell (*T*) vom mittleren Ohr abgeschlossen. Hinter dem Trommelfell liegt die Trommel- oder Paukenhöhle (*P*), die durch die eustachische Trompete oder Tuba (*E*), eine sich nach dem Rachen zu trompetenförmig erweiternde Röhre, mit dem Nasen-Rachenraum in Verbindung steht. Außer dieser Öffnung weist die von festen Knochen des Schläfenbeins umgebene Paukenhöhle noch drei durch Membranen verschlossene Öffnungen auf. Die eine Membran ist das Trommelfell, wo der äußere Gehörgang mündet; die anderen liegen an der dem Trommelfell gegenüberliegenden Seite der Paukenhöhle, heißen ovales (*o*) und rundes Fensterchen (*r*) und sind die einzigen Stellen, wo das ebenfalls in festen Knochen eingebettete innere Ohr nur durch Membranen von der Paukenhöhle getrennt ist. Die Verbindung zwischen dem Trommelfell und dem ovalen Fenster wird durch drei gelenkig miteinander verbundene Gehörknöchelchen, Hammer (*H*), Amboß (*A*) und Steigbügel (*St*), hergestellt. Während der Hammer am Trommelfell ansetzt und die Schwingungen dieser Membran dem Amboß überträgt, ist die Fußplatte des Steigbügels, dem die Schwingungen vom Amboß mitgeteilt werden, in die elastische Membran des ovalen Fensters eingelassen. Durch dieses Fenster werden die Schwingungen auf das ganz mit Labyrinthwasser (Lymphe) angefüllte innere Ohr (Labyrinth) übertragen.

Der durch die Schallwellen hervorgerufene, auf das ovale Fenster und so auf das Labyrinthwasser des inneren Ohres ausgeübte Druck muß sich, da das innere Ohr von festen Knochen umschlossen und das Labyrinthwasser — wie jede Flüssigkeit — nur in beschränktem Maße zusammendrückbar ist, irgendwie ausgleichen können. Dieser Ausgleich ist durch das runde Fenster möglich, dessen elastische Membran durch das Labyrinthwasser nach außen (d. h. in die Paukenhöhle) gedrückt und ausgebogen wird, wenn es der Überdruck des Labyrinthwassers fordert. Umgekehrt wird das runde Fenster nach innen, das ovale Fenster, die Gehörknöchelchen und das Trommelfell bei einer im Gehörgang entstehenden Druckverminderung nach außen gezogen.

Von dem am ovalen Fenster gelegenen Vorhof (vestibulum) (*V*) des inneren Ohres gelangt man in die eine Hälfte des durch eine Scheidewand in zwei Teile getrennten Schneckentunnels, so genannt, weil er sich schneckenförmig windet. Diese mit dem Vorhof direkt in Verbindung stehende, bis zur Kuppel der Schnecke hinaufreichende Hälfte des Schneckentunnels heißt Vorhoftreppe (scala vestibuli). Von ihr gelangt man nahe der Kuppel durch ein in der Scheidewand befindliches Loch (Helikotrema) in die andere Hälfte des Schneckentunnels, durch die der Weg durch die Schnecke nun in entgegengesetzter Richtung, d. h. nicht zur Kuppel hinauf, sondern von ihr aus nach unten und jetzt an der andern Seite der Schneckenwand entlang führt. Diese andere Hälfte des Schneckentunnels heißt Paukentreppe (scala tympani). Sie führt aber nicht zum Vorhof, sondern endet blind gegen die Paukenhöhle an dem durch eine elastische Membran verschlossenen runden Fenster (Schneckenfenster, fenestra cochleae). Denn die Scheidewand (Lamina spiralis), die den Schneckentunnel in Vorhoftreppe und Paukentreppe scheidet, trennt auch den Vorhof und den am runden Fenster gelegenen, unteren Teil der Paukentreppe; die Paukentreppe ist also vom Vorhof aus nicht direkt, sondern nur durch die Vorhoftreppe zu erreichen.

Vom Vorhof zweigen sich außerdem noch Bogengänge ab, die aber für den Akt des Hörens nicht in Frage kommen, sondern den Gleichgewichts- und Raumsinn betreffende Aufgaben haben.

Der Prozeß des Hörens spielt sich im engeren Sinne in der Schnecke ab; diese sei daher näher betrachtet.

Fig. 13 zeigt einen Querschnitt durch irgendeine Stelle des Schneckentunnels. Die knöcherne Lamina spiralis mit ihrer Fortsetzung, der Basilarmembran (membrana basilaris), bilden die Scheidewand, durch die der Schneckentunnel zunächst in die beiden erwähnten Kanäle, die Vorhoftreppe und die Paukentreppe, geteilt wird. Schräg zur Lamina spiralis spannt sich noch von dieser zur Außenwand der Schnecke eine sehr zarte Haut, die Reißnersche Membran (membrana vestibuli). Dadurch wird zwischen der Reißnerschen Membran, der Basilarmembran und der Außenwand der Schnecke ein kleiner, im Querschnitt dreieckiger Kanal, die mittlere Treppe oder der Schneckengang (ductus cochlearis), gebildet. Die Basilarmembran trägt im Schneckengang das Cortische Organ, das aus Zellen und Nervenfasern besteht und den Übergang der Schwingungen der Basilarmembran auf die Nerven vermittelt, so daß das Cortische Organ als das eigentliche akustische Sinnesorgan angesprochen werden muß. Von der Lamina spiralis her greift — gleichsam schützend — die Membrana tectoria über die Hörzellen des Cortischen Organs. Die Verästelungen des Hörnervs (nervus acusticus) treten von der Spindel, der Achse der Schnecke, her überall an der inneren Seite der Schnecke in die Lamina spiralis ein.

Das Trommelfell nimmt die von außen kommenden Schallschwingungen auf. Das Mittelohr hat nun die Aufgabe, die Amplitude der das Trommelfell erregenden Schwingungen stark zu reduzieren. Die Energie der Schwingungsbewegung muß daher wachsen, und so führt der Steigbügelfuß sehr kleine, aber kräftige Bewegungen aus. Die so durch die Steigbügel auf die Membran des ovalen Fensters und damit auf das Labyrinthwasser des inneren Ohres übertragenen Bewegungen erregen die Basilarmembran und kommen uns als Empfindungen zum Bewußtsein.

Die Basilarmembran weist Querfasern (Radialfasern) von großer Festigkeit auf, dagegen ist die Festigkeit in der Längsrichtung sehr gering. Helmholtz nimmt an, daß die Spannung der Basilarmembran in der Längsrichtung verschwindend klein gegen

die Spannung in der Richtung der Breite ist, und vergleicht die stark gespannten Querfasern der Basilarmembran mit einem System von stark gespannten Saiten. Dann können die Bewegungen dieser Saiten als unabhängig voneinander betrachtet werden. Helmholtz legt nun seiner Theorie des Hörens das Phänomen der Resonanz zugrunde. Jedes der als gespannte Saiten aufgefaßten Fäserchen der Basilarmembran ist auf einen bestimmten Ton abgestimmt und schwingt mit, wenn der betreffende Ton erklingt. Die Länge der „Saiten" ist an der Basis der Schnecke am kleinsten, nach der Kuppel der Schnecke hin nimmt die Länge allmählich bis auf mehr als das Zwölffache zu. Den längeren „Saiten" (Fäserchen) entsprechen tiefere Töne, den kürzeren höhere. Wirkt auf das Trommelfell ein musikalischer Ton, ein Klang, führt es also Bewegungen aus, die einer periodisch zusammengesetzten Schwingung entsprechen, so versetzt diese dem inneren Ohr durch die Knöchelchen des Mittelohres mitgeteilte zusammengesetzte Schwingung so viele Stellen der Basilarmembran in Mitschwingung, wie Teiltöne in dem Klang enthalten sind. Die zusammengesetzte Schwingung wird also analysiert, jede schwingende „Saite" (Faser) reizt die mit ihr verbundenen Nervenendigungen (Cortisches Organ), jeder Reiz wird zum Gehirn weitergeleitet, und dort erfolgt durch einen psychologischen Akt die Deutung des physischen Reizes als Ton, dort setzen sich auch die einzelnen Tonempfindungen zur Klangwahrnehmung zusammen. — Daß es sich beim Mitschwingen der Fäserchen wirklich um physikalische Resonanz handelt, — d. h. daß sie wirklich im Rhythmus ihrer Eigenschwingung erregt werden — ist kaum anzunehmen. Auch Helmholtz selbst hat schon Bedenken dagegen gehabt; jedoch muß ein der Resonanz ähnlicher Vorgang vorliegen. Durch die Helmholtzsche Resonanzhypothese ist die dem Ohr eigene, im Ohmschen Gesetz ausgedrückte Fähigkeit der Analyse erklärbar, wonach das Ohr die Sinusschwingungen als einfache Töne empfindet und jede zusammengesetzte Schwingung als Summe einfacher Schwingungen auffaßt und in einfache Töne zerlegt. Jede Klangmasse kann zunächst in Klänge, dann aber auch jeder Klang in seine Obertöne zerlegt werden, wobei Aufmerksamkeit und Übung eine

Rolle spielen. So leistet das menschliche Ohr dasselbe, was von der Fourieranalyse mathematisch dargestellt wird. Die Tatsache, daß sich Phasenverschiebungen für das Ohr nicht geltend machen, kann als kräftigster Beweis für die Richtigkeit der Helmholtzschen Annahme angesehen werden. Auch läßt sich durch die Helmholtzsche Hypothese das Zustandekommen der noch zu besprechenden Schwebungen im Ohr, sowie die Existenz der subjektiven Töne zwanglos erklären (z. B. das auf inneren Reizungen [Blutbewegung] beruhende Ohrenklingen: es werden einzelne Nervenelemente gereizt).

Bei dieser entwickelten Theorie haben wir es mit einer Lokalisierung zu tun; denn jeder Tonreiz erregt nur eine bestimmte Stelle der Basilarmembran und eins von den etwa 5000 Cortischen Organen. Und zwar wird nicht nur eine Faser der Basilarmembran durch einen einfachen Ton zur Mitschwingung veranlaßt, sondern es ist ein gewisser Resonanzbereich vorhanden; eine Gruppe von Fasern wird erregt. Jedoch schwingt die mittelste Faser dieses Bereichs, die dem erregenden Tone genau entspricht, weit stärker als alle benachbarten Fasern. Der Vorgang ist durch die schon besprochenen Gesetze der physikalischen Resonanz erklärbar, für die ja gilt, daß leicht erregbare schwingungsfähige Gebilde, die nach Aufhören der äußeren erregenden Einwirkung eine starke Dämpfung erfahren, auch durch diejenigen Töne in Mitschwingung geraten, deren Höhe nur annähernd mit dem Eigenton des betreffenden resonierenden Gebildes übereinstimmt. Die Resonanzkurve zeigt, wie schnell und in welchem Maße die Stärke der Resonanz abnimmt, wenn der erregende Ton vom Eigenton des resonierenden Körpers entfernt wird. Da nun die Breite der Resonanz desto stärker ist, je kräftiger die Schwingungen gedämpft werden, so wird jedem einfachen Tone ein gewisser Resonanzbereich der Basilarmembran entsprechen, weil die Dämpfung im Ohre als sehr kräftig angenommen werden muß. Die Annahme einer großen Dämpfung ist deshalb berechtigt, weil wir imstande sind, bei äußerst raschen Tonfolgen (Trillern) die einzelnen Töne noch gut zu unterscheiden; die schwingenden Fäserchen kommen also sehr schnell nach Aufhören der äußeren Einwirkung zur Ruhe.

Wenn nun aus der starken Dämpfung im Ohr — die nach Helmholtz so groß sein soll, daß nach $\frac{1}{5}$ Sekunden die Intensität des Mitschwingens auf $\frac{1}{10}$ der ursprünglichen Stärke gesunken ist — auf einen breiten Resonanzbereich geschlossen werden muß, also durch jeden einfachen Ton eine Gruppe von Fäserchen erregt wird, so müßte ein Gemisch von einfachen, nebeneinandergelagerten Tönen hörbar sein. Dies wird aber durch die Einrichtung des Cortischen Organs verhindert. Gerät ein Bereich von Fäserchen und somit Cortischen Organen durch einen einfachen Ton in Mitschwingung, so schwingt auch die Membrana tectoria im gleichen Sinne wie die Basilarmembran, so daß zwischen beiden ein gewisser Abstand bleibt. Nur in der Mitte des Resonanzbereiches schwingt die dem einfachen Ton entsprechende Faser der Basilarmembran so stark, daß eine Berührung zwischen der Membrana tectoria und den (von Stützzellen, die auf der Basilarmembran aufsitzen, getragenen) Hörzellen herbeigeführt wird und so eine Reizung der Nervenendigungen erfolgt. Erst durch diese Berührung wird eine Empfindung vermittelt.

Das Zustandekommen einer Tonempfindung ist nur möglich, wenn mindestens zwei Hin- und Herbewegungen stattfinden; denn durch eine Schwingung ist noch keine Periodik gegeben. Bei geeigneter, günstigster Versuchsanordnung genügen zwei Schwingungen. Über die Tonhöhe vermag man aber erst etwas auszusagen, wenn mindestens zehn bis fünfzehn Schwingungen erfolgt sind, und nach etwa 25 Schwingungen ist es erst möglich, die Klangfarbe des Tones zu bestimmen. Daraus erklärt sich die Vermeidung schneller Tonfolgen in tieferen Lagen; denn tiefere Töne führen in derselben Zeit weniger Schwingungen aus als höhere.

Unterschiede der musikalischen Klangfarben

*

1. Klänge der Saiten und Saiteninstrumente

Die Schwingungszahlen aller einfachen Töne, die die Saite hervorbringen kann, sind ganzzahlige Vielfache der Schwingungszahl des Grundtones; also gibt eine Saite die sämtlichen harmonischen Partialtöne. Fig. 14 zeigt, in welcher Weise sich die schwingende Saite in Unterabteilungen zerlegen kann. Die ausgezogene Linie gibt die eine Grenzlage der schwingenden Punkte an, die punktierte Linie zeigt die entgegengesetzte, nach $\frac{T}{2}$ eingenommene. Bei der Grundschwingung (α) bleiben nur die beiden Befestigungspunkte (Knoten) in Ruhe, die Saite schwingt als Ganzes um ihre Gleichgewichtslage. Der Oktave des Saitengrundtones entsprechen die beiden Hälften (β), der dritte Teil der Saite gibt die Duodezime, der vierte Teil die Terz der Doppeloktave. In derselben Weise kann die Teilung der Saiten fortgeführt werden, so daß die Saite nacheinander die Reihe der natürlich-harmonischen Obertöne gibt. Die verschiedene Saitenlänge bestimmt also bei gleichbleibender Spannung die Tonhöhe. Saitenlänge und Schwingungszahl sind einander umgekehrt proportional: der halben Saitenlänge entspricht die doppelte Schwingungszahl, einem Drittel der Saite entspricht die dreifache Schwingungszahl usw. Außerdem hängt die Schwingungszahl von der Spannung ab. Um die doppelte Schwingungszahl zu erhalten, muß man die Spannung vervierfachen, der dreifachen Schwingungszahl entspricht eine neunfache Spannung, allgemein: die Schwingungszahl ist der Quadrat-

wurzel aus der Spannung proportional. Schließlich ist für die Tonhöhe noch das spezifische Gewicht des Saitenmaterials und der Querschnitt der Saite ausschlaggebend. (Beide stehen zur Schwingungszahl im umgekehrten Wurzelverhältnis, vgl. Anm. 11.) Eine Metallsaite gibt unter sonst gleichen Umständen einen tieferen Ton.

Auch wenn die schwingende Saite in einem Knotenpunkte lose berührt wird, bleibt die Schwingungsbewegung erhalten. Darauf kommt es bei den Flageolettönen der Saiteninstrumente an; der Finger muß so lose auf die Saite aufgesetzt werden, daß das zwischen dem aufgesetzten Finger und dem Sattel gelegene Stück der Saite an der Schwingungsbewegung beteiligt bleibt. Sobald der Finger fest aufgesetzt wird, schwingt die Saite nur zwischen aufgesetztem Finger und Steg. Wird die Saite in der Mitte, dem Drittel, dem Viertel usw. lose berührt, so schwingt die Saite in zwei, drei, vier usw. Abteilungen und gibt die Oktave, Duodezime, Doppeloktave usw. als Flageoletton (Anm. 12).

Jedoch sind die Flageolettöne im allgemeinen keine einfachen Töne. Überhaupt kommen praktisch die einfachen Töne der Saite kaum vor. Immer setzen sich mehrere diesen einfachen Tönen entsprechende Saitenteilschwingungen mit der Grundschwingung zu einer Schwingungsbewegung zusammen. Diese ist also durch Superposition mehrerer, einfachen Tönen entsprechender Wellen entstanden. Demnach sind die Saitentöne der Musikinstrumente Klänge. Je nachdem, auf welche Art und an welcher Stelle eine Saite erregt wird, ist die Anzahl und das Stärkeverhältnis der Partialtöne und somit die Klangfarbe verschieden. Die Zusammensetzung des Klanges ist davon abhängig, welche Form die Saite hatte, ehe sie frei gelassen wurde. Je komplizierter, je eckiger die Form war, desto mehr Obertöne enthält der Klang. Dort, wo die Saite erregt wird, ist größte Bewegung, also ein Schwingungsbauch. Nur Partialtonschwingungen, die an der Erregungsstelle keinen Knoten haben, können im Saitenklang enthalten sein. Wird z. B. die Saite in der Mitte erregt, so fallen alle geradzahligen Partialtöne aus; denn die ihnen entsprechenden Schwingungsfiguren hätten in der Mitte der Saite einen Knoten; bei Erregung in einem Drittel der Saite können sich die dem dritten, sechsten, neunten,

zwölften usw. Partialton entsprechenden Schwingungsbewegungen nicht ausbilden. Je näher dem festen Ende die Erregungsstelle gewählt wird, desto höhere Partialtöne werden auftreten, desto schärfer wird der Klang sein. Je dicker eine Saite ist, um so geringer ist ihre Fähigkeit, in kleinen Unterabteilungen zu schwingen. Zur Vermeidung hoher Obertöne wählt man deshalb dickere Saiten. Dünne, lange Metallsaiten bilden leicht hohe Obertöne und haben — angerissen — einen klimpernden Klang. Bei den dehnbareren Darmsaiten, deren Elastizität geringer ist, werden die den hohen Partialtönen entsprechenden Schwingungen schnell gedämpft, so daß gerissene Darmsaiten nicht einen so scharfen, obertonreichen Klang geben, wie gerissene Metallsaiten.

Neben dem Saitenmaterial und der Erregungsstelle ist für den Klangcharakter aber noch die Art der Erregung entscheidend; die drei Haupterregungsarten sind Zupfen, Schlagen und Streichen. Beim Zupfen oder Reißen wird die Saite durch einen andern Körper, z. B. den Finger oder einen Metallstift, zur Seite gebogen und dann freigegeben: sie führt freie Schwingungen aus (Fig. 15). Von der Form des zupfenden Körpers, dem sich der an der Zupfstelle gelegene Teil der Saite anschmiegt, hängt die Form, welche die Saite am Anfang ihrer Schwingungsbewegung annimmt, und somit auch die Klangfarbe ab. Denn die Schwingungsform nach Aufhören des Erregungsimpulses ergibt sich stets aus dem Zustand im Augenblick des Loslassens als Anfangsbedingung. Wird die Saite durch einen Metallstift gezupft, so ist die Ausbuchtung eckiger und daher an höheren Obertönen reicher, als wenn die Saite mit dem Finger gezupft wird; daraus erklärt sich der weichere Klang der durch Zupfen mit dem Finger erregten Saiten (Anm. 13). Fig. 16 zeigt einige für gezupfte Saiten typische Kurven.

Abgesehen von der die Klangfarbe stets in hohem Grade bestimmenden Anschlagstelle und der besonderen Beschaffenheit der Saite ist der Klang bei den geschlagenen oder gehämmerten Saiten, denen wir z. B. bei den Hammerklavieren begegnen, von der Weichheit und Breite des Hammers und der Dauer der Berührung (Kürze der Anschlagszeit) abhängig. Die Kürze der Berührungszeit

eines weichen Hammers ist im Gegensatz zu der von Helmholtz aufgestellten Theorie dieselbe, wie die eines gleich schwereren harten. Die Zurückweichung des Hammers wird in erster Linie durch die von der Saitenspannung herrührenden Kräfte bestimmt. Beim kurzen Anschlag mit einem spitzen Hammer weist die Schwingungsform im Augenblick des Herabfallens an der Anschlagstelle eine scharfe Ecke auf, also werden in dem Klang die hohen Obertöne vorherrschen. Durch die üblichen, weichen Filzhämmer der Hammerklaviere dagegen ist die Anfangsbedingung der Saitenschwingungsform infolge der schwachen Krümmung (Rundung) des Filzhammerkopfes eine für einen volleren Klang, in dem die höheren Obertöne zurücktreten, äußerst günstige. Je mehr der Filzhammer durch sehr häufiges Anschlagen an Weichheit einbüßt, desto mehr Diskontinuitäten und desto höhere Obertöne werden auftreten. Daraus erklärt sich der an höheren Obertönen reichere, schärfere und manchmal „blecherne" Klang vielgespielter Klaviere.

Was die Anschlagstelle betrifft, so war Helmholtz der Ansicht, daß sie nach den Erfahrungen der Klavierbauer am günstigsten in einem Siebentel oder einem Neuntel der Saitenlänge erfolge, um die mit dem Grundton dissonierenden niedrigsten Teiltöne, den siebenten und neunten Partialton, im Klange auszulöschen. Diese zunächst sehr einleuchtende, weit verbreitete Ansicht bestätigt sich aber nicht; denn durch einen weichen Hammer, der ja nicht nur einen Punkt, sondern ein merkliches Längsstück der Saite erregt, wird der Teilton, der an der Anschlagstelle einen Knoten hat, nicht ausgelöscht. Nur dann fällt der betreffende Partialton aus, wenn der Anschlag genau in einem seiner Knoten erfolgt; bei Erregung in der Nähe eines Knotens weist der betreffende Partialton sogar ein Maximum auf. Wenn die Anschlaggegend bei den Tasteninstrumenten in der Regel gerade zwischen einem Siebentel bis einem Zehntel gewählt wird, so liegt dies daran, daß der Wirkungsgrad des Anschlages bei diesem Anschlagsbereich am größten ist, der Grundton tritt am stärksten hervor, der Klang wird also am vollsten. Fig. 17 zeigt Kurven geschlagener Saiten.

Die Instrumente verschiedener Piano- und Flügelfabrikanten unterscheiden sich wesentlich durch ihren Klangcharakter, der

durch verschiedenartige Konstruktion und Beschaffenheit des zum Anschlag der Saite nötigen Spielwerks, der sogenannten „Mechanik", bedingt ist. Eine neuere, in verschiedenen Phasen dargestellte Mechanik zeigen die Fig. 42 α bis γ, wo auch der Vorgang des Anschlags beschrieben wird.

Gegenüber der momentanen Erregung bei den gezupften und geschlagenen Saiten handelt es sich bei den gestrichenen Saiten um eine Dauererregung. Der gestrichene Punkt der Saite klebt an den harzigen Bogenhaaren, wird mitgeführt, bis er sich infolge der immer größer werdenden Spannung losreißt und sehr rasch zurückschnellt, wird wieder von den Bogenhaaren erfaßt, und so wiederholt sich der Vorgang. Daraus erklärt sich die für die Schwingungen eines Punktes einer gestrichenen Saite typische Schwingungsform: die gradlinige Zackenkurve, wie sie Fig. 18 zeigt. Die Ecken weisen darauf hin, daß die Streichinstrumente reich an Obertönen sind. Die objektive und subjektive Analyse ergibt, daß neben dem alle an Stärke überwiegenden Grundtone alle Partialtöne bis zum sechsten und manchmal bis zum zehnten vorhanden sind. Wenn auch die oberen an Stärke mehr zurücktreten, so sind sie es doch, die dem Klange der Streichinstrumente eine gewisse Schärfe verleihen. Da alle die Schwingungen ausfallen, die an der Streichstelle einen Knoten haben, so kann schon durch verschiedene Wahl der Anstrichstelle die Klangfarbe in hohem Maße verändert werden. Weiterhin sind aber der Druck des Bogens, die Geschwindigkeit, mit welcher der Bogen geführt wird, die Klebkraft und der zwischen anstreichendem Bogen und Saite gebildete Winkel ausschlaggebend. Durch das Zusammenwirken aller dieser Faktoren sind die verschiedenen Formen der Zickzackkurven und somit die verschiedenen Klangfarben bei den Streichinstrumenten erklärbar. Je unregelmäßiger die Bogenführung, desto komplizierter, diskontinuierlicher die Zackenkurve. Das sogenannte „Kratzen" ist eine Folge der durch die Unregelmäßigkeit der Bogenführung bedingten größeren Diskontinuität der Schwingungsbewegung.

Da eine Saite, wie auch jeder andere schmale, feste Körper, wenig Schall an die umgebende Luft abgibt, so bedürfen Saitenschwingungen zu ausgiebiger Schallerzeugung der Verstärkung.

Dies wird durch die sogenannten Resonanzkörper (Resonanzkästen) oder Resonanzböden erreicht, deren Prinzip im folgenden erläutert wird: Bei Schwingungsbewegungen sehr schmaler Körper ist das Zustandekommen von Verdichtungs- und Verdünnungswellen schwer möglich, weil die Luft, die aus dem in der Bewegungsrichtung des schmalen Körpers vorwärts gelegenen Raum verdrängt wird, in den rückwärts freiwerdenden einströmt. Es findet also nur eine hin- und hergehende Bewegung der Luft um den schwingenden Körper statt, es entsteht aber keine Verdichtung und Verdünnung. Deshalb muß die schwingende Bewegung so schnell oder die schwingende Fläche so breit sein, daß die Luft zu dem Hin- und Herströmen keine Zeit mehr hat; erst dann treten Verdichtungs- und Verdünnungswellen auf. So werden bei den Saiteninstrumenten die Schwingungen der Saite einem Resonanzkörper oder Resonanzboden durch einen Steg, auf dem die Saite ruht, mitgeteilt. Zwar sind die Endpunkte der Saite, also auch der Punkt, wo die Saite auf dem Steg aufliegt, Knotenpunkte; aber in allen Befestigungs- und Aufliegepunkten ist eine — wenn auch sehr kleine — kaum meßbare Saitenbewegung vorhanden, deren Energie so groß ist, daß die Befestigungslager bzw. der Steg erzwungene Schwingungen im Rhythmus der Saite ausführen. Bei den Streichinstrumenten z. B. überträgt der Steg dann die Schwingungen auf die Decke des Resonanzkastens. Der auf dem Steg und somit auf dem Resonanzkasten lastende Druck der gespannten Saiten wird zum Teil von der die Decke und den Boden des Resonanzkastens verbindenden, ungefähr unter dem rechten Fuß des Steges stehenden Stimme (Stimmstock) getragen, die die Schwingungen der Decke dem Boden mitteilt und deren Stellung von Einfluß auf den Ton ist. Durch die Saitenschwingungen wird der Steg und der Resonanzkasten sowie die im Resonanzkasten eingeschlossene Luft, die durch die F-Löcher mit der Außenluft in Verbindung steht, in erzwungene Schwingungen versetzt. Das Stärkeverhältnis der Teiltöne des Saitenklanges soll durch die Resonanzkastenverstärkung nicht geändert werden. Je gleichmäßiger die im Saitenklang enthaltenen Partialtöne verstärkt werden, desto besser ist der Resonanzkasten. Wie der Klang von der Form,

Größe, Masse und Elastizität des Resonanzkastens abhängt, und in welchem Maße jeder einzelne Teil des Resonanzkastens mitschwingt — darüber ist viel geschrieben worden, ohne daß bisher Gesetze für die günstigste Beschaffenheit des Resonanzkastens gegeben werden konnten. Jede theoretische (mathematische) Behandlung hat sich bis jetzt nur auf Teilprobleme erstreckt. Die günstigste Form des Resonanzkastens hat sich nach und nach empirisch herausgebildet, jedoch ist sie nicht allein ausschlaggebend; denn man hat die alten italienischen und Tiroler Geigen bis ins kleinste genau nachgeahmt, ohne die gewünschte klangliche Übereinstimmung zu erzielen. Zweifellos liegt die Klangschönheit aller Geigen zum größten Teil daran, daß sich das Holz durch häufige Resonanz den Schwingungsbewegungen angepaßt hat: die Schwingungen der Saite versetzen die kleinsten Holzteilchen in Bewegung, und dieser Bewegung wird um so weniger Widerstand entgegengesetzt werden, je öfter die Teilchen gezwungen waren, die Schwingungsbewegung auszuführen. Deshalb kommt es darauf an, wie lange und wie das Instrument gespielt wurde. In neuerer Zeit hat A. Seiffert eine „Theorie der Geige auf mechanischer Grundlage" gegeben. Seine experimentelle Erforschung der Geigenschwingung führt zu bemerkenswerten Ergebnissen. Seiffert versucht, dem ganzen Problem mit unanfechtbaren Gesetzen der Mechanik beizukommen, und vermutet, daß die berühmten alten italienischen Meister des Geigenbaues den Antrieb zur Herausarbeitung ihrer klassischen Geigenform aus einer Anschauung gewonnen haben, die als „die mechanische Grundidee der Geige" bezeichnet wird.

2. Klänge der Lippenpfeifen

Bei den tönenden Luftsäulen, den stehenden Wellen der Blasinstrumente, handelt es sich immer um longitudinale Schwingungsbewegungen; denn wegen des fehlenden Gestaltwiderstandes ist die Luft, wie alle andern Gase, nur longitudinaler Schwingungen fähig. Die Teilchen schwingen in der Längsrichtung der Luftsäule, es bilden sich Verdichtungen und Verdünnungen. Da die schwingende Luftsäule nur von geringer Masse ist, so haben die freien

Schwingungen von Luftsäulen für die Musikinstrumente keine Bedeutung; denn der Ton einer durch einen kurzen Impuls erregten und dann sich selbst überlassenen Luftsäule klingt sehr rasch ab. Es muß daher dauernd eine periodische äußere Kraft wirken: die Luftsäule schwingt erzwungen.

Die stehende Welle weist an jedem offenen Ende einen Schwingungsbauch auf, weil hier infolge des freien Ausweichens keine Stauung eintreten, sich also keine Verdichtung und Verdünnung bilden kann. Es findet am offenen Ende größte Bewegung statt, und nur hier ist ja die Mitteilung der Schwingungsbewegung an die umgebende Luft möglich. Jede stehende Schwingung in einer beiderseits offenen Röhre hat also an jedem offenen Ende einen Schwingungsbauch. Da sich zwischen zwei Bäuchen immer ein Knoten befindet, zeigt die Grundschwingung in einer beiderseits offenen Röhre zwei Bäuche und in der Mitte einen Knoten, wie Fig. 19a andeutet.

Dasselbe gilt von der offenen Pfeife; denn das Anblaseende ist als offenes Ende zu betrachten, hier findet ja die Erregung statt, es kann deshalb am Anblaseende kein Knoten sein. Der Abstand zwischen zwei Bäuchen ist gleich der halben Wellenlänge $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$. Dem Grundtone einer offenen Pfeife entspricht somit eine Wellenlänge, die gleich der doppelten Pfeifenlänge ist. Die zweite mögliche Schwingungsbewegung weist zwei Knoten auf, wie Fig. 19b zeigt; die Wellenlänge ist halb so groß wie die der Grundschwingung (Fig. 19a), die Schwingungszahl also doppelt so groß, d. h. es erklingt die Oktave. Bilden sich drei Knoten, wie Fig. 19c zeigt, so ist die Wellenlänge ein Drittel der des Grundtones, die Schwingungszahl deshalb dreimal so groß. So kann die offene Pfeife — wie die Saite — Töne hervorbringen, deren Schwingungszahlen ganzzahlige Vielfache der Schwingungszahl des Grundtones sind, also der natürlich harmonischen Obertonreihe entsprechen. Während aber die Saite an den Enden infolge der Befestigung Knoten aufweist, zeigt die schwingende Luftsäule an den offenen Enden Bäuche. Der Bildung von Teilschwingungen ist nach oben hin eine Grenze gesetzt, indem sich diejenigen Wellen

nicht bilden können, deren Länge zu klein im Verhältnis zur Größe des Querschnittes der eingeschlossenen Luftsäule ist.

Schwingende Luftsäulen in Röhren, die nur ein offenes Ende aufweisen, haben am gedackten Ende stets einen Knoten; am Anblaseende muß sich, wie bei den offenen Pfeifen, immer ein Bauch befinden. Somit ist die einfachste Schwingungsart (Fig. 20a) einer gedackten Pfeife eine Viertelwelle $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$; denn dies ist der Abstand zwischen einem Knoten und der Mitte eines Schwingungsbauches. Eine gleichlange offene Pfeife (Fig. 19a) weist an beiden Seiten Bäuche auf, die Wellenlänge ist halb so groß wie die der gedackten Pfeifen, so daß eine offene Pfeife einen um eine Oktave höheren Ton als eine gleichlange gedackte liefert. Dackt man eine offene Pfeife allmählich, so vertieft sich der Ton immer mehr, bis er schließlich, kurz bevor die Pfeife ganz gedackt ist, in die tiefere Oktave umspringt.

Die zweite mögliche Schwingungsbewegung bei gedackten Pfeifen (Fig. 20b) muß wieder am offenen Ende einen Bauch, am gedackten einen Knoten zeigen, dazwischen bildet sich ein Knoten. Da der Abstand zwischen zwei Knoten gleich einer halben Wellenlänge $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ und zwischen einem Knoten und Bauch gleich einer Viertelwellenlänge ist, so zeigt die Schwingungsfigur drei Viertelwellen; die Wellenlänge ist dreimal so kurz wie die des Grundtones, woraus für den betreffenden Partialton die dreifache Schwingungszahl, also die der Duodezime des Grundtones folgt. Die nächste Schwingungsfigur zeigt fünf Viertelwellen, die folgende (Fig. 20d) sieben Viertelwellen usw. Allgemein: Die den Schwingungsfiguren entsprechenden Töne sind ungradzahlige Vielfache des Grundtones; eine gedackte Pfeife gibt also nur die ungradzahligen Partialtöne. Sie entsprechen denen eines an einem Ende eingeklemmten Stabes. Bei allen Blasinstrumenten lassen sich je nach der Art und Stärke des Anblasens entweder der Grundton oder einer der Obertöne hervorbringen. Man bezeichnet diesen Vorgang als Überblasen und die so hervorgebrachten Töne als die Naturtöne des betreffenden Instrumentes. Diese Überblastöne sind

selten Sinustöne, sondern fast immer musikalische Töne, also von einer für das Instrument typischen Gruppe von Obertönen begleitet. Je weiter die Mensur — das Verhältnis von Querschnitt zur Länge — ist, desto schwerer sprechen die Obertöne an.

Die stehende Schwingungsbewegung reicht noch über die offenen Enden des Pfeifenrohres hinaus. Bei der Berechnung der Schwingungszahl hat man diese überschüssige Strecke (s) zur Pfeifenlänge (l) zu addieren; $l+s$ nennt man die reduzierte Pfeifenlänge (Anm. 14).

Bei der Tonbildung in Lippen- oder Labialpfeifen hat man zu unterscheiden zwischen Schneidenton und Resonanzton. Erst Wachsmuth (1904) hat die Töne, die durch Anblasen der Schneide der Oberlippe (s. Fig. 22) unabhängig vom Resonanzkörper auftreten, exakt untersucht und aufgewiesen, wie sich die Erregung von Luftsäulen in Röhren durch luftförmige Systeme abspielt. Er mischte den anblasenden Luftstrom mit Pulver und photographierte (bei intermittierender Funkenbeleuchtung) die einzelnen Bewegungszustände des aus der Kernspalte tretenden bandförmigen Luftstromes.

Die Luftlamelle, wie der aus einer Ausströmungsöffnung (bei der Labialpfeife aus der Kernspalte d) tretende bandförmige Luftstrom genannt wird, trifft auf die Schneide, staut sich und biegt — wie eine senkrecht gegen eine Wand gestemmte Gerte — seitlich aus. Die Ausbuchtung wird infolge der nachdrängenden Luft immer stärker, bis die Luftlamelle schließlich bricht. Der aus der Ausströmungsöffnung kommende bandförmige Luftstrom nimmt jetzt seinen Weg wieder geradeaus auf die Schneide zu, staut sich an dieser, biegt diesmal nach der andern Seite aus, bricht usw. (Fig. 23). So pendelt die Luftlamelle periodisch um die Schneide, zugleich wird die Ausströmungsbewegung der Lamelle infolge der abwechselnden Hemmung (Stauung) und Befreiung (Brechen) selbst periodisch. Durch die Pendelung der Lamelle ist ein Ton bedingt, der Schneidenton genannt wird, und dessen Periode von der Weite der Ausströmungsöffnung, dem Schneidenabstand und der Geschwindigkeit des Luftstromes abhängt (Anm. 15). Bei der Labialpfeife ist der Schneidenabstand die Maulweite, das ist

der Abstand zwischen der Kernspalte und der scharfen Kante (Schneide) der Oberlippe.

Die transversalen Schwingungen der Luftlamelle um die Schneide, wobei die Luftlamelle abwechselnd auf die innere und äußere Seite der Oberlippe tritt, erzeugen periodische Verdichtungen und Verdünnungen und veranlassen stehende Schwingungen im Pfeifenrohr. Günstig für den Gesamtpfeifenklang ist die genaue Übereinstimmung des Schneidentones mit dem Tone, welchen das Pfeifenrohr für sich allein angeblasen geben würde. Für die Tonbildung in Lippenpfeifen ist also der Schneidenton maßgebend, während die im Pfeifenrohr eingeschlossene Luftsäule nur durch ihre Resonanz auf den Schneidenton, also sekundär wirkt (Anm. 16). Ebenso ist bei den Flöten die Tonbildung zu erklären (Anm. 17). Man rechnet sie deshalb im Gegensatz zu allen andern Holzblasinstrumenten des Orchesters zu den Labialpfeifen. Während die Kern- oder Schnabelflöte, die früher im Gebrauch war, wie die besprochenen Labialpfeifen der Orgel angeblasen wird, dient bei den jetzt üblichen Querflöten der dem anblasenden Munde gegenüberliegende scharfe Rand des Mundloches als Schneide, um den das — durch die entsprechende Lippenstellung des Bläsers — plattgeformte Luftband pendelt. Durch die Pendelungen der Luftlamelle wird die Luft im Pfeifenrohr in stehende Schwingung versetzt; am Mundloch und andern Ende der Pfeife befindet sich ein Schwingungsbauch. Die „akustische" Länge der Röhre und damit die Tonhöhe läßt sich durch Öffnen von Seitenlöchern verändern. Die höheren Töne werden durch Überblasen hervorgebracht. Auch ist die Länge der Röhre durch den am Kopfstück der Flöte befindlichen Stimmzug und die ebenfalls am Kopfstück angebrachte Kork- oder Pfropfenschraube veränderlich, so daß die Grundstimmung der Flöte der Stimmung anderer Instrumente angepaßt werden kann. —

Zur Erklärung der Tonbildung in Lippenpfeifen ist man erst ziemlich spät gekommen. Noch Chladni, der große Akustiker am Anfang des neunzehnten Jahrhunderts, wußte nicht mehr zu sagen, als daß durch das Vorbeistreichen der Luft an der oberen Öffnung einer eingeschlossenen Luftsäule die darin befindliche Luft in eine longitudinale, „zitternde" Bewegung gerät.

Erst Zamminer hat eine bestimmtere Vorstellung gehabt. Die aus der Kernspalte kommende Luftlamelle teilt sich nach Zamminer an der Schneide der Oberlippe in zwei Büschel, die periodische Schwingungen um die Schneide ausführen. Durch diese Periodizität sei ein Ton bedingt. Die stehenden Schwingungen im Resonanzkörper verstärken diesen Schneidenton und wirken regulierend auf die Pendelungen der in zwei Büschel gespaltenen Luftlamelle. Die Zamminersche Theorie ist — besonders was den Schneidenton betrifft — von Wachsmuth experimentell in hervorragender Weise ausgestaltet und verbessert worden. Durch die oben erwähnten Wachsmuthschen Ergebnisse wurde die Unhaltbarkeit der in vielen Lehrbüchern noch heute vertretenen Theorie des Kölner Orgelbaumeisters Sonreck (1876) dargetan, die eine große Rolle gespielt und weite Verbreitung gefunden hat.

Sonreck bestreitet das Vorhandensein eines Schneidentones, er schreibt die Schallwirkung allein der Schwingungsbewegung im Pfeifenkörper zu. Das aus der Kernspalte strömende Luftband streicht am Aufschnitt nach außen hin vorbei, reißt nach Sonreck Teilchen der im unteren Teil des Pfeifenrohres befindlichen Luft mit und evakuiert so den unteren Teil des Pfeifenrohres. Die äußere Luft hat nun das Bestreben, die im Pfeifenrohr entstandene Luftverdünnung auszugleichen, und drückt das Luftband am Aufschnitt in das Pfeifenrohr hinein, so daß im unteren Pfeifenrohr eine Verdichtung entsteht, die bewirkt, daß das Luftband wieder die alte Richtung einnimmt und nach außen am Aufschnitt vorbeistreicht. Der Evakuiervorgang beginnt nun von neuem, bis die Luftverdünnung im unteren Pfeifenrohrteil wieder so groß geworden ist, daß der äußere atmosphärische Druck das Luftband am Aufschnitt wieder in das Pfeifenrohr hineindrückt, und so wird zur Ausgleichung der Luftverdünnung jedesmal ein Teil des Luftstromes am Aufschnitt abgeschnitten. Indem die durch das Hineindrücken des Luftbandes entstehende Verdichtung sich im Pfeifenrohr nach oben hin fortpflanzt, trifft sie in der Mitte des Pfeifenrohres mit dem auf die Luftsäule von der oberen Öffnung her wirkenden Druck der äußeren Luft zusammen. Die in der Mitte des Pfeifenrohres so zustande gekommene Verdichtung, von Sonreck als „akustische Welle“

bezeichnet, schwingt nach beiden Pfeifenöffnungen zurück, so daß die Schwingungsbewegung der äußeren Luft mitgeteilt wird. Die Schallwirkung schreibt Sonreck nur der akustischen Welle zu.

Bei den gedackten Pfeifen erklärt Sonreck das Zustandekommen der akustischen Welle dadurch, daß die durch die zweite Abschneidung des Luftbandes entstandene Verdichtung in der Mitte des Pfeifenrohres mit dem inzwischen am oberen Ende reflektierten, durch die erste Abschneidung hervorgerufenen Verdichtungsimpuls zusammentrifft.

Die Sonrecksche Auslegung der Entstehung von stehenden Luftsäulenschwingungen wird in vielen Lehrbüchern auch mit der Zamminerschen Erklärung des Schneidentones in verschiedener Weise zu einer Theorie verknüpft. Aus diesem Grunde schien es angebracht, beide Theorien hier gegenüberzustellen. —

3. Klänge der Instrumente mit harten Zungen

Die harte Zunge, meist aus Metall (Messing oder Argentan) bestehend, schwingt, durch den anblasenden Luftstrom aus ihrer Ruhelage gebracht, vermöge ihrer Eigenelastizität wieder zurück, wird durch den Anblasestrom wieder abgebogen, und so wiederholt sich der Vorgang periodisch. Durch die Zunge wird das Ausströmen der Luft aus der Windkammer dauernd unterbrochen; der äußeren Luft werden so Bewegungsstöße mitgeteilt. Meist erfolgt diese Mitteilung nicht direkt, wie beim Harmonium, der Ziehharmonika und der Mundharmonika, sondern ein sogenannter Aufsatz (Schallbecher, Trichter) verstärkt erst den Ton der Zunge, indem die im Aufsatz befindliche Luftmasse durch die erwähnten Bewegungsstöße zum Mitschwingen veranlaßt und diese verstärkte Schallbewegung dann erst auf die umgebende Luft übertragen wird; so bei den Zungenpfeifen der Orgel (Fig. 28 und Anm. 18). Stimmt die Periode des Tones, den der Resonanzkasten, angeblasen, für sich geben würde, mit der des Zungentones überein, so erfährt dieser eine besonders günstige Verstärkung; die Schwingungszahl des Zungentones ist von der Elastizität, der Dicke und der Länge der Zunge abhängig. Während sich bei den Labialpfeifen mit dem

Druck auch die Tonhöhe ändert, bleibt trotz größeren Anblasedrucks die Schwingungszahl bei den Zungenpfeifen die gleiche, nur die Intensität wird größer. Ein weiterer Vorteil der Zungenpfeifen gegenüber den Labialpfeifen ist der, daß die Zungenpfeifen durch Temperaturänderungen nicht so verstimmt werden können — die Wärme dehnt ja feste Körper weniger aus als Gase —, daß die Abweichung für die Praxis in Frage kommt. Die Zungen gelten als unverstimmbar und finden deshalb Anwendung bei den Instrumenten für Versuche über reine Stimmung. (Vgl. die unter Abschnitt „Temperaturen" erwähnten Instrumente.)

Die Klangfarbe des Tones einer freischwingenden Zunge (ohne Aufsatz) hängt ab von der Form, der Masse, der Stellung zum Anblasestrom und zu der Platte, an der sie befestigt ist, ferner von der Dämpfung der Schwingungen und der Dichtigkeit, mit der die Zunge schließt. Man unterscheidet zwischen durchschlagenden und aufschlagenden Zungen. Durchschlagende durchschwingen den Spalt des Rahmens, auf dem sie befestigt sind; aufschlagende sind etwas größer als die Spaltfläche und schlagen daher gegen den Rahmen, wenn sie sich gegen diesen bewegen. Schon bei den Schwingungsbewegungen der Saiten wurde betont, daß die Zahl der Obertöne um so größer ist, je diskontinuierlicher die zu zerlegende Bewegung ist. Die den Zungenklängen entsprechenden Bewegungen weisen nun einen hohen Grad von Diskontinuität auf; denn die einzelnen Impulse müssen während der Zeiträume, wo der Spalt, in dem sich die Zunge bewegt, geschlossen ist, durch vollständige Pausen voneinander getrennt sein. Die sehr hohen, untereinander dissonierenden Obertöne der freischwingenden Zunge möglichst zu dämpfen, ist eine Hauptaufgabe der Harmoniumbauer.

Durch die Aufsätze (Resonanzkörper) werden die hohen Obertöne des Zungenklanges nicht verstärkt; denn nach Helmholtz geben die Röhren für Tonwellen, deren Länge die Weite der Öffnung nicht bedeutend übertrifft, keine Resonanz mehr. Die hohen Obertöne des Zungenklanges machen sich also im Gesamtklang neben den durch die Resonanzröhre verstärkten niederen Obertönen nicht bemerkbar.

4. Die Orgel

Die Stimmen oder Register der Orgel unterscheiden sich durch ihre Klangfarbe, die — was zunächst die Labialpfeifen betrifft — hauptsächlich von der Mensur, aber auch von der Größe des Aufschnittes und der Geschwindigkeit des Anblasestromes abhängt. Unter Mensur versteht man das Verhältnis von Querschnitt zur Länge der Pfeife. Bei den Orgelpfeifen ist die weiteste Mensur etwa $^1/_9$, das heißt die Pfeife ist neunmal so lang als breit. Etwa $^1/_{25}$ ist das Verhältnis für die engste Mensur.

Die Mensur des Hauptregisters der Orgel, der Prinzipalstimmen, beträgt $^1/_{10}$ bis $^1/_{14}$, sie haben durchschnittlich die weiteste Mensur. Die höheren Partialtöne können sich deshalb ebenso wie bei dicken Saiten nicht bilden; der Grundton herrscht vor, und nur die niederen Partialtöne, etwa bis zum dritten oder vierten, sind vertreten. Der Klang der Prinzipalstimmen ist deshalb voll und weich.

Sehr verschiedene Mensur weisen die Charakterstimmen auf, zu denen die Streicher und Flötenregister rechnen.

Die Streicher sind infolge der engeren Mensur — die Pfeifenlänge beträgt das 15—25fache des Durchmessers — und der geringen Maulweite sehr leicht zu überblasen; deshalb ist der Anblasedruck niedriger als bei den Prinzipalstimmen zu wählen. Durch die geringere Höhe des Aufschnittes ist das bei der Tonbildung in Lippenpfeifen beschriebene Biegen und Brechen der Luftlamelle erschwert. Die Hemmung und Befreiung und die dadurch bedingten Bewegungsstöße weisen einen plötzlicheren, diskontinuierlichen Charakter auf. Je diskontinuierlicher die Bewegung ist, desto höhere Partialtöne treten auf, wie schon bei den diskontinuierlichen Zackenkurven der gestrichenen Saiten erwähnt wurde. Die Bildung von stehenden Wellen, die höheren Partialtönen entsprechen, wird nun durch die enge Mensur der Streicher-Register begünstigt. Aus diesem Grunde sind die Stimmen der Streicher reicher an Obertönen als die Prinzipalstimmen. Bei den meisten sind etwa die ersten sechs Partialtöne vertreten — Geigenprinzipal, Viola, Violoncello, Aeoline —,

bei schärferen Registern treten die oberen Partialtöne bis zum siebenten mehr hervor, so z. B. bei Fugara und Gemshorn.

Gegenüber den Streichern sind die Flötenregister arm an Obertönen. Dies ist durch die größere Maulweite, die weitere Mensur und den schwächer als bei den Prinzipalstimmen gewählten Druck begründet. Die wenigen Obertöne treten im Vergleich zum Grundton sehr zurück, woraus sich die sehr weiche, manchmal dünne Klangfarbe erklärt. Eine Ausnahme macht die ziemlich helle Spitzflöte, die sich vom Anblaseende aus nach dem andern Ende zu kegelförmig verjüngt. Die auch bei andern Registern von manchen Orgelbauern angewendete Verjüngung bewirkt das Hervortreten des fünften bis siebenten Partialtones, die Klänge fallen dann schärfer aus.

Für zartere und dumpfere Stimmen und besonders für Baßstimmen werden gedackte Pfeifen verwendet, deren Klangfarbe je nach der Mensur und der Höhe des Anblasedrucks verschieden ausfällt; meist ist jedoch neben dem Grundton nur der dritte, nur selten noch der fünfte oder gar siebente vertreten. Der dumpfere, leere Klang gegenüber den Klängen offener Pfeifen ist durch das Fehlen der gradzahligen Partialtöne bedingt. Alle Oktavtöne des Grundtones fallen ja bei gedackten Pfeifen aus. Da die gedackten Pfeifen einen um eine Oktave tieferen Ton geben als gleichlange offene Pfeifen, finden sie der Material- und Raumersparnis wegen mit Vorliebe Anwendung als Baßstimmen: Subbaß, Bordun (Bourdon), Untersatz.

Bei den Füllstimmen handelt es sich um künstliche Verstärkung der natürlichen Obertöne. Sie werden nur zur Verbindung mit den Prinzipalen und Gedackten gebraucht. Die Quinte verstärkt den dritten und sechsten Partialton — hierher gehören Nasard und Rohrquinte —, die Terz den fünften und die Septime den siebenten Partialton.

Die sogenannten Mixturen oder gemischten Stimmen geben außer dem Grundton noch andere Partialtöne an. Die eigentlichen Mixturen, d. h. die mit „Mixtur“ bezeichneten Register, liefern neben dem Grundton noch Oktave und Quinte. Sehr scharf klingen die Cymbeln, die außer dem Grundton nur Oktaven geben, und zwar

gewöhnlich den zweiten und vierten Partialton. Während die gemischten Stimmen im allgemeinen nur bei vollem Werk, d. h. bei Benutzung aller oder fast aller Hauptregister, gebraucht werden, ist eine Mixtur in Verbindung mit weniger geeigneten Stimmen auch als Solostimme verwendbar: das Kornett, das neben dem Grundton die Quinte und Dezime gibt. Zu den Mixturen zählen auch Scharf, Sesquialtera, Rauschquinte, Tertian usw., deren Klangfarbe je nach dem Grade der künstlichen Verstärkung eines oder mehrerer Obertöne verschieden ist. Da die zur künstlichen Verstärkung der Obertöne benutzten Pfeifen möglichst obertonfrei sein müssen, damit Dissonanzen vermieden werden, sind sie weit mensuriert und oft gedackt.

Eine Mittelstellung zwischen offenen und gedackten Pfeifen nimmt die Rohrflöte ein. In den Deckel einer gedackten Pfeife ist ein an beiden Enden offenes Rohr eingesetzt, das — als offene Pfeife — allein angeblasen, den fünften Partialton des Grundtones der Hauptpfeife gibt. In dem Klang der Rohrflöte tritt daher der durch das Röhrchen verstärkte fünfte Partialton besonders hervor.

Etwa der siebente Teil sämtlicher Orgelstimmen sind Zungenstimmen (Rohrwerke, Schnarrwerke). Fig. 29 stellt einige Typen von Zungenpfeifen der Orgel dar; sie zeigen meist kegel- oder pyramidenförmige Gestalt. Scharfe Zungenregister sind Posaune (Trombone) und Trompete; sie haben ebenso wie das dem Trompetenregister verwandte, aber weichere Klarinett- und Fagottregister aufschlagende Zungen. Für Oboe und Klarinette werden durchschlagende, von manchen Orgelbauern auch aufschlagende Zungen verwandt. Vox humana, ein die menschliche Stimme nachahmendes Register, ist meist eine Zungenstimme. Tremolieren wird durch ein Ventil des Tremolo-Registers erreicht, das periodisch Änderungen des Anblasedrucks und somit periodische Stärkeänderungen des Tones veranlaßt. Auch werden die periodischen Stärkeänderungen bei manchen Orgeln dadurch hervorgerufen, daß jede Tremolostimme sich aus zwei, nahezu gleich hohen Stimmen zusammensetzt, die untereinander langsame Schwebungen bilden und so das Tremolieren der Streichinstrumente oder die Stärkeschwankungen der menschlichen Stimme nachahmen.

Durch den Jalousieschweller ist ein Crescendo und Decrescendo in gewissen Grenzen möglich. Ein Schwelltritt, der durch den Fuß des Spielers betätigt wird, kann die Jalousien oder Türen des Schwellkastens, in welchem eine Anzahl von Stimmen untergebracht ist, zum Teil oder ganz öffnen, so daß die Klänge der im Schallkasten befindlichen Stimmen mehr oder weniger stark hörbar sind. Durch den Rollschweller, der ebenfalls durch den Fuß betätigt wird, ist es möglich, beliebig viele der sonst mit den Händen eingeschalteten Register nacheinander ein- und ebenso wieder auszuschalten.

5. Klänge der Instrumente mit weichen Zungen

a) Holzblasinstrumente

Während die scharfe Zunge immer nur für die Erzeugung eines einzigen musikalischen Tones bestimmt ist, und die schwingende Luftsäule des Rohres keinen Einfluß*) auf die Höhe des betreffenden Zungentones hat, dient bei der Klarinette, der Oboe oder dem Fagott dieselbe weiche Zunge (aus leichtem, elastischem Rohrholz) zur Erzeugung einer über mehrere Oktaven sich erstreckenden musikalischen Tonreihe, und ferner wird die Bewegung der leichten weichen Zunge durch den wechselnden Druck der im Rohr schwingenden Luftmasse bestimmt (Anm. 19). Gegenüber den Instrumenten mit harten Zungen sind bei den Instrumenten mit weichen Zungen also die stehenden Luftschwingungen im Rohre für die Tonhöhe allein entscheidend. Durch verändertes Anblasen können zunächst die schon bei den Lippenpfeifen besprochenen Überblastöne hervorgerufen werden, außerdem läßt sich durch das Öffnen von Seitenlöchern die „akustische Länge" der Resonanzröhre verändern, so daß für die stehende Schwingung in der Hauptsache nur der zwischen dem Mundstück und dem obersten geöffneten Loch befindliche Teil der Luftsäule

*) Der nur sehr geringe Einfluß kann im Rahmen dieser Darstellung vernachlässigt werden.

in Frage kommt. So sind die zwischen dem Grundton und dem Überblaston sowie zwischen den einzelnen Überblastönen gelegenen Töne durch Öffnen von Seitenlöchern möglich. Die verschiedenen Töne desselben Holzblasinstruments, welche die Öffnung der Seitenlöcher erfordern, weisen verschiedene Klangfarbe auf. Wie durch Öffnung der Seitenlöcher die stehende Schwingung im Rohr verändert wird, ist im einzelnen genauer leider noch nicht untersucht worden. Schon Helmholtz weist darauf hin, daß die Öffnung von Seitenlöchern kein vollständiger Ersatz für die Verkürzung des Rohres sei und die Reflexion der Schallwellen dort nicht wie an einem freien, offenen Ende des Rohres geschehe.

Bei den Instrumenten mit harten Zungen weist die schwingende Luftsäule an der Stelle, wo ihr die Bewegungsstöße mitgeteilt werden, also am Anblaseende, genau wie die Labialpfeife, stets einen Schwingungsbauch auf. Anders dagegen bei den Instrumenten mit weicher Zunge. Die Röhren dieser Instrumente verhalten sich so, als ob das an der weichen Zunge gelegene Ende geschlossen wäre, gleichen also gedackten Pfeifen, bei denen sich am geschlossenen Ende immer ein Knoten befindet, so daß nur ungradzahlige Partialtöne möglich sind. Im Knoten sind ja die Druckschwankungen am höchsten, und diese Druckschwankungen sind für die Bewegung der den anblasenden Luftstrom periodisch unterbrechenden weichen Zunge ausschlaggebend. Der Eigenton der weichen Zunge findet bei keinem Holzblasinstrument Verwendung; immer zwingen die stehenden Luftschwingungen, die sich schon beim ersten Anblaseimpuls im Rohr ausbilden, ihre Periode der weichen Zunge auf.

Wenn nun bei den Instrumenten mit weicher Zunge die schwingende Luftsäule an der Zunge einen Knoten hat, so müßten alle diese Instrumente wie die gedackte Pfeife nur ungradzahlige Partialtöne geben. Dies gilt aber nur von den Instrumenten mit zylindrisch gebohrtem Rohr, z. B. von der Klarinette, die bei verändertem Anblasen den dritten oder fünften Partialton (Überblastöne) gibt, weil dem Rohr nur der dritte, fünfte, siebente usw. Eigenton des Grundtones entspricht. Im Klang der Klarinette sind deshalb auch nur ungradzahlige Partialtöne nachweisbar.

Oboe und Fagott haben aber ein kegelförmig gebohrtes Rohr.

Nach Helmholtz geben kegelförmige Röhren, die bis zur Spitze ihres Kegels hin geschlossen sind, alle Obertöne, verhalten sich also wie offene Pfeifen. Bei der Oboe und dem Fagott wirkt die Spitze der kegelförmig gebohrten Röhre infolge des dort an der weichen Zunge sich bildenden Knotens als geschlossen, so daß die Klänge der Oboe und des Fagott, wie die der offenen Pfeife, auch die geradzahligen Obertöne enthalten. Beim Überblasen dieser Instrumente erhält man also als ersten Oberton die Oktave des Grundtones, während die zylindrisch gebohrte Klarinette in den dritten Partialton (Duodezime) springt (Anm. 20).

b) Blechblasinstrumente

Die weichen Zungen der Holzblasinstrumente werden bei den Blechblasinstrumenten durch die Lippen des Bläsers ersetzt, die als weiche, membranöse Zungen wirken und sich leicht jeder in Frage kommenden Schwingungsbewegung anpassen.

Für die Tonhöhe ist in erster Linie die Länge des Rohres maßgebend, das außer dem Grundton die Reihe der natürlich harmonischen Obertöne geben kann. Die Glieder dieser Eigentonreihe des Rohres nennt man die Naturtöne des Instrumentes. Von der Stärke des Anblasens und dem „Ansatz" der Lippen, d. h. der Art des Anblasens, hängt es ab, welcher Ton der Naturtonreihe erklingt. Zur Hervorbringung hoher Töne werden die Lippen stärker gespannt, die Mundspalte ist enger.

Bei den Blasinstrumenten finden nun vornehmlich die Naturtöne Verwendung, weil sie sich durch besondere Fülle und typischen Glanz auszeichnen. In der Partialtonreihe liegen die niederen Glieder sehr weit auseinander, die Abstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Partialtönen derselben Reihe werden nach oben hin immer kleiner. Will man nun vornehmlich Naturtöne benutzen, so muß dafür gesorgt werden, daß das Instrument in den Lagen gut „anspricht", wo die Glieder der Naturtonreihe enger zusammen liegen. In der Höhe muß also die Bildung kleiner Teilschwingungen die den hohen Obertönen des Röhrengrundtones entsprechen, möglich sein. Dies wird durch eine enge Mensur erreicht.

Bereits bei den Lippenpfeifen und Holzblasinstrumenten wurde erwähnt, daß enge Röhren wie dünne Saiten für die Bildung von Teilschwingungen äußerst günstig sind. Sehr eng mensurierte Röhren liefern aber nicht mehr den Grundton und nur schwer die unteren Partialtöne. Deshalb ist bei den Blechblasinstrumenten der Grundton, wenn überhaupt, dann nur von sehr geübten Bläsern oder durch besondere Kunstgriffe hervorzubringen. Um Obertöne zu erhalten, die näher aneinander und in dem gewünschten Tonbereich liegen, muß der Grundton sehr tief und somit das kegelförmige Rohr sehr lang gewählt werden; so hat z. B. das Waldhorn eine Länge von etwa acht Metern, und die Baßtuba sogar eine solche von über zehn Metern. Wegen der großen Länge sieht man von der bei Holzblasinstrumenten üblichen geraden Gestalt des Rohres ab und windet das Rohr mehrfach.

Mit den Naturtönen begnügt man sich bei den sogenannten Naturhörnern (Signal-, Post- und gewöhnliches Waldhorn) und Naturtrompeten. Bei allen Blechblasinstrumenten des Orchesters füllt man die Lücken der Naturtonskala durch Töne aus, die durch Verlängern der Röhrenlänge und somit der Luftsäule möglich sind. Diese Verlängerung geschieht bei den Trompeten, Hörnern und Ventilposaunen durch Einschaltung von Nebenrohren (Seitenrohren). Das Einschalten dieser Rohrstücke wird durch Ventile besorgt, die gleichzeitig das Hauptrohr an der betreffenden Stelle absperren und so die Welle zwingen, ihren Weg auch durch das Nebenrohr zu nehmen. Durch die Verlängerung der Röhre vertieft sich der Ton, und zwar vertieft man durch das oberste Ventil die Grundstimmung um einen Ganzton, durch das zweite um einen Halbton und durch das dritte um drei Halbtöne. Weitere Vertiefungen sind durch verschiedene Kombinationen der drei Ventile möglich, indem die Luftsäule um zwei oder drei Rohrstücke verlängert wird. Bei der Zugposaune kann durch den u-förmigen Zug die Länge der Röhre und somit die Tonhöhe verändert werden.

Durch stärkeres und gepreßteres Anblasen lassen sich bei allen Blechblasinstrumenten die Töne etwas erhöhen („treiben"). Auch ist eine Erniedrigung des Tones um etwa einen Halbton durch das sogenannte Stopfen möglich, was einer teilweisen Dackung gleich-

kommt und wobei der Bläser die gewölbte Hand in den Schallbecher mehr oder weniger weit einführt. Diese Art der Tonerniedrigung spielte vor der Verwendung der Ventilvorrichtung durch Stölzel (1814)*) zur Ergänzung der fehlenden Töne der Skala eine große Rolle. Um ein allzu häufiges Stopfen zu vermeiden, änderte man durch sogenannten Aufsatz- oder Einsatzbogen die Grundstimmung des Instrumentes. Die Aufsatz- und Einsatzbogen werden trotz der Ventile auch heute noch benutzt, auch das Stopfen wird noch angewandt, aber nur, um eine besonders beabsichtigte, dumpfe Klangfarbe hervorzurufen.

6. Klänge der Vokale

Der menschliche Stimmapparat ist das komplizierteste und modulationsfähigste Instrument. Zur Tonbildung dient, von der Resonanz der Mund-, Nasen- und Rachenhöhlen zunächst abgesehen, der Kehlkopf, ein aus Knorpeln, Muskeln und Bändern bestehendes Gebilde. Der untere Teil des Kehlkopfes wird von dem Grund- oder Ringknorpel (Cartilago cricoidea, Fig. 30 und 31 *R*) gebildet, der vorn schmal, nach hinten bis zur vierfachen Höhe ansteigt und — als einziger im ganzen Stimmapparat — ganz ringförmig geschlossen ist. Er weist an den beiden Seiten außen zwei Gruben auf, in denen gleichsam wie in Gelenken der Spann- oder Schildknorpel *S* (Cartilago thyreoidea) mit zwei kleinen Zäpfchen, den unteren Hörnern (*h*), ruht, und um die als Drehpunkt er seine auf- und absteigende Bewegung ausführt. Er besteht aus zwei nach außen gewölbten Platten, die vorn unter einem Winkel von 90—120° zusammenstoßen und ihm die charakteristische Form des „Adamsapfels" geben, dessen Bewegung beim Schlucken, Sprechen und Singen vorn am Halse sichtbar wird. An den inneren Wandungen dieser beiden Hauptknorpel sind die sogenannten echten Stimmbänder oder besser Stimmlippen eingespannt — es sind häutige, faserige Wülste, keine Bänder im eigentlichen Sinne —, die in der Mitte vorgeschoben und dünn gespannt werden, aber auch an die

*) Gebaut wurde das erste Ventilhorn 1830 von C. A. Müller in Mainz.

Knorpelwand zurücktreten können. Bei ihrer Anspannung lassen sie doch noch eine schmale Spalte, von der Vorderwand des Schildknorpels bis zur Rückwand des Grundknorpels reichend, offen: die Stimmritze. Die membranartigen Ränder der Stimmritze werden durch die Bewegungen der beiden Hauptknorpel (*R* und *S*) zu- oder auseinander ihrer Länge nach gespannt, während die Verengung oder Erweiterung der Stimmritze (Fig. 32) durch zwei auf dem hinteren hohen Rande des Grundknorpels aufsitzende, kleinere, pyramidenförmige Knorpel veranlaßt wird, die Stell- oder Gießbeckenknorpel (Fig. 30 und 31 *G*). An der vorderen Partie des Schildknorpels angeheftet ist sodann der Kehlkopfdeckel (Epiglottis), der für die Stimmbildung gar keine Bedeutung hat, sondern nur den Stimmapparat vor dem Eindringen von Fremdkörpern vom Rachen her schützen soll. Durch die oberen beiden Hörner (*h*) des Schildknorpels steht der Kehlkopf mit dem Zungenbein in Zusammenhang.

In Wahrheit ist das Zusammenwirken der einzelnen Teile des Kehlkopfes so kompliziert, daß eine genaue Festlegung bisher noch nicht möglich war. Zum Verständnis der Funktionen des Kehlkopfes genügt es, zu wissen, daß jede Bewegung der einzelnen Teile dieses Knorpelgerüstes durch das Eingreifen besonderer Muskeln erfolgt, deren Tätigkeit teils willkürlich, teils unwillkürlich geregelt wird.

Der aus der Luftröhre drängende Luftstrom staut sich, wenn die Stimmlippen gespannt sind, unterhalb der Stimmritze, bis seine potentielle Energie größer ist als die Spannkraft der Stimmlippen. Diese werden dann auseinandergedrückt, der Druck läßt nach, so daß sich die Stimmritze wieder mehr oder weniger vollkommen schließt, weil die Spannkraft der Stimmlippen wieder überwiegt. Die Stimmbandschwingungen sind also diskontinuierlich, und daraus folgt, daß der Stimmklang reich an Obertönen sein muß. Helmholtz hat bei hellen, tief gesungenen Vokalen mit Resonatoren die Obertöne bis zum 16. gut herausgehört. Die Tonhöhe hängt besonders von der Spannung der Stimmlippen ab. Bei einem ausgeschnittenen menschlichen Kehlkopf konnte der Physiologe Joh. Müller durch verschiedene Spannung der angeblasenen Stimmbänder einen Tonumfang von über zwei Oktaven erzielen.

Je nach der Einstellung des Apparates zur Stimmgebung werden verschiedene Register unterschieden. Das Hinausgehen einer Stimme über die normale mittlere Lage erfordert größere Veränderungen in der Einstellung des Stimmapparates. Dies kann auf verschiedene Art erfolgen, jedoch ist es meist nur geschulten Sängern möglich, den Übergang zu verdecken und die Klangfarbe möglichst beizubehalten. So unterscheidet man als Hauptregister das Brust- und das Kopfregister (Bruststimme und Kopfstimme oder Falset). Weil dieser Klangfarbenwechsel beim Übergang von der mittleren zur höheren Stimmlage bei ungeübten Sängern recht auffällig ist, werden die Hauptregister ebenso wie weitere unterschiedene Register fälschlicherweise als Abschnitte des gesamten Stimmumfanges verstanden, obgleich für dieselbe Stimme in derselben Lage verschiedenartigste Klangfarben, d. h. verschiedene „Register", möglich sind. —

Die Frage nach der physikalischen Natur der Vokale hat Helmholtz dahin beantwortet, daß die Mundhöhle durch Resonanz einen bestimmten harmonischen Partialton oder bestimmte harmonische Partialtöne des Stimmbandklanges verstärkt. Für jeden Vokal ist nach Helmholtz eine absolute Tonhöhe und zwar ein bestimmter Teilton charakteristisch. Dieser stärkste Teilton des Vokales wird Formant genannt. Zur Auffindung des Formanten bedient man sich z. B. sowohl der Resonanz- als der Interferenzmethode. Mit Hilfe von Resonatoren stellt man fest, welcher Partialton am stärksten in dem betreffenden Vokalklang vertreten ist; die Interferenzmethode zeigt, welcher Ton bei seinem Wegfall den Vokal am meisten stört.

Während nun Helmholtz zu viel Gewicht auf einen einzelnen für die Bildung des Vokals charakteristischen Ton legt, weist Stumpf auf eine Gruppe von Tönen, eine Formantregion hin, in welcher der Formant Mitte und — hinsichtlich der Intensität — ein Maximum ist.

Das Zentrum der Formantregion ist für den Vokal

U . . . . . g^1
O . . . . . b^1
A . . . . . g^2

Alle übrigen Vokale haben Unterformanten:

$\ddot{O}$ . . . . . $b^1 + g^3$
$\ddot{A}$ . . . . . $g^2 + b^3$
$\ddot{U}$ . . . . . $U + b^3$
E . . . . . $b^1 + d^4$
I . . . . . $U + b^4$

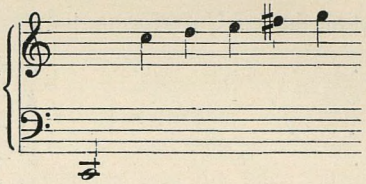
Ist also ein Vokal durch zwei Intensitätsmaxima charakterisiert, so liegen diese um so weiter aneinander, je heller der Vokal ist. Geflüsterte Vokale weisen die gleichen Formantenregionen wie die entsprechenden gesungenen Vokale auf. Auch den Konsonanten kann man bestimmte Gebiete im Tonreich zuweisen, wie Stumpf mit Hilfe der Interferenzmethode gezeigt hat. Die meisten reichen bis in die fünfgestrichene Oktave hinauf, wie überhaupt die wichtigsten Partialtöne der Konsonanten in der oberen Hälfte des Tonreiches liegen.

Werden die oberen Klangteile irgendeines Vokalklanges durch Interferenz abgetragen, so bleibt stets das *U* übrig, die Untermalung eines jeden Vokales ist also *U*. Baut man z. B. die Klangmasse des ä von oben ab, so verwandelt sich das *ä* allmählich in einen blökenden Laut, dann in ein *a*, dann in ein *o*, und schließlich bleibt ein *u* übrig.

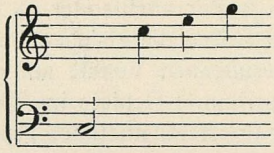
Während bei den einzelnen Klängen (der Mehrzahl) der Musikinstrumente das Verhältnis der einzelnen Obertöne zum Grundton konstant, d. h. die relative Intensität des Partialtones für eine bestimmte Klangfarbe immer dieselbe bleibt, hängt die Stärke des Partialtones bei den Vokalklängen vorherrschend von der absoluten Tonhöhe ab; denn die Formantregion liegt unabhängig von dem Tone, auf den der betreffende Vokal gesungen wird, immer in der gleichen Gegend des Tongebietes.

Je tiefer der Vokal gesungen wird, um so mehr Partialtöne fallen in die Formantregion, und desto deutlicher ist der betreffende Vokal. Angenommen, die Formantregion eines Vokales erstrecke sich von c^2 bis g^2:

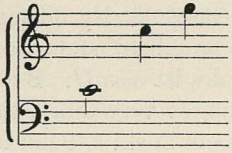
Wird der Vokal dann auf *C* gesungen, so fallen fünf Partialtöne in die Formantregion c^2 g^2.



Singt man ihn auf *c*, so liegen nur drei Partialtöne in der Formantregion:



Gibt man den Vokal auf c^1 an, so fallen nur zwei Partialtöne in die Formantregion:



Aus diesem Grunde ist z. B. ein Bassist besser zu verstehen als eine Sopranistin; beim c^3 ist es sehr schwer, überhaupt noch Vokalunterschiede zu erkennen.

Gegenüber Helmholtz und seiner Schule, die den Formanten als harmonischen Partialton des Stimmbandklanges ansprechen, glauben andere Forscher — unter ihnen besonders der Begründer dieser Anschauung: Hermann —, daß der Formant der Eigenton der für jeden Vokal verschieden weiten Mundhöhle und daß die Formantschwingung in der Regel unharmonisch zum Grundton ist. Der durch die Stimmbänderschwingungen periodisch gewordene Luftstrom bläst den Mundraum an, die so entstandenen Eigenschwingungen der Mundhöhle werden rasch gedämpft, durch die Stimmbandschwingungen aber periodisch aufgefrischt. Hermann und die von ihm ausgehenden

Forscher wenden zur Analyse der Vokalklänge objektive Methoden an. Man läßt den Vokalklang auf ein mechanisches System wirken, das den Vokalklängen entsprechende Kurven registriert. Hermann photographierte z. B. die Schwingungen einer Membran. Die so erhaltenen Kurven werden der Fourieranalyse und -anwendung unterworfen, um die einzelnen Partialtöne und ihre Intensität und so den Formanten zu erkennen; jedoch führen die verschiedenen objektiven Methoden bisher nicht zu übereinstimmenden Resultaten. So stehen sich in der Frage nach der Bildung der Vokale die mit dem Namen Helmholtz-Stumpf und Hermann verknüpften Theorien gegenüber.

Die künstliche Zusammensetzung der Vokale aus den bei der Analyse erkannten Klangteilen wurde von Helmholtz versucht, nachdem er Vokale als nur besondere Klänge erkannt hatte. Er benutzte elektrisch betriebene Stimmgabeln, denen Resonanzröhren gegenüberstanden. Durch Veränderung des Abstandes von Stimmgabel und Resonanzröhre war die Stärke regulierbar. Da aber Stimmgabeln nicht obertonfrei sind, gelang erst später die künstliche Zusammensetzung der Vokale, indem Stumpf (1917) nur einfache Töne (Sinustöne) benutzte. Von jeder der 28 im Zimmer I befindlichen Labialpfeifen geht eine Röhrenleitung durch Zimmer II zum Zimmer III, wo alle Leitungen zusammengeführt werden. Im Zimmer II sind in jede Röhrenleitung Interferenzeinrichtungen eingeschaltet, so daß jeder Pfeifenton obertonfrei gemacht werden kann und im Zimmer III als Sinuston hörbar ist. Bevor die Röhrenleitungen zusammengeführt werden, ist in Zimmer III ein Stück der sonst metallenen Leitung durch Schlauchstücke ersetzt. Diese sind mit Klemmschrauben zusammendrückbar, so daß die Intensität des Tones von dem am Trichter befindlichen Beobachter bis Null abgeschwächt werden kann. Mit Hilfe dieses Apparates sind beliebige Klangfarben zusammenstellbar. Die verschieden starken Sinustöne, die bei der Analyse als Bestandteile irgendeines Klanges erkannt und deren Höhe annähernd geschätzt wurde, können mit Hilfe dieses Apparates wieder zu dem betreffenden Klange zusammengesetzt werden. Es gelang die Synthese der Vokale in so vollkommener Weise, daß Versuchs-

personen einen ihnen durch dieselbe Leitung zugeführten Vokal nicht von dem künstlichen unterscheiden konnten.

Nur mit einem auf diesem Prinzip beruhenden, d. h. Sinustöne liefernden Apparat ist eine Feststellung der Hörlücken oder Hörinseln möglich. Die sonst in Ohrenkliniken benutzten Schallquellen sind nicht obertonfrei und daher für exakte Untersuchungen der Hörstörungen nicht brauchbar.

Es ist klar, daß mit dem beschriebenen Apparat auch die künstliche Zusammensetzung der Musikinstrumentenklänge möglich ist. Man stellt die Sinustöne, die sich bei der auf dem Resonanz- oder Interferenzwege vorgenommenen Analyse des Klanges als Elemente ergaben, zusammen, und zwar in den Stärken, wie sie bei der Analyse annähernd geschätzt wurden. So ist Stumpf auch schon die Synthese einiger Instrumentenklänge (Flöte und Trompete) gelungen.

7. Klänge der Stäbe, Platten und Membranen

Stäbe sind feste Körper, bei denen eine Dimension vorwiegend ausgebildet ist. Sie haben eigene Steifigkeit (d. h. Biegungselastizität) und sind transversaler, longitudinaler und gedrehter Schwingungen fähig. Während die gedrehten, so wie die longitudinalen (Anm. 21) hier vernachlässigt werden können, spielen die transversalen in der Musik eine Rolle. Fig. 33 zeigt die ersten drei Schwingungsformen eines an einem Ende befestigten und einem Ende freien geraden Stabes. Sie entsprechen den longitudinalen Schwingungen der Luftsäule einer gedackten Pfeife, die ja auch nur ungradzahlige Vielfache der Grundschwingung gibt. Bei der Stabharmonika (Stahlstäbe) und dem Xylophon (Holzstäbe) wird der Stab etwa im ersten und dritten Viertel seiner Länge unterstützt. Zwischen diesen beiden Knotenstellen weist die einfachste Art der möglichen Transversalschwingungen einen Bauch auf, ebenso an den freien Enden des Stabes (Fig. 34). Wird der Stab in der Mitte erregt, so tritt der dieser Schwingungsform entsprechende Ton neben den zahlreichen, meist unharmonischen Obertönen besonders hervor. Überhaupt haben die zusammengesetzten Transversaltöne eines Stabes schon mehr Geräuschcharakter.

Gekrümmte Stäbe werden als Gabeln, solche bestimmter Form als Stimmgabeln bezeichnet. Wird das Mittelstück eines geraden Stabes mehr und mehr gebogen (Fig. 35), so rücken die Knotenpunkte immer mehr zusammen, bis sie, wenn die gradlinig erhaltenen Gabelzinken parallel sind, in die Umbiegungsstellen zu liegen kommen. Die Schwingungszahl beträgt dann etwa zwei Drittel von der des geraden Stabes. Wegen der konstanten Schwingungszahl findet die Stimmgabel in der musikalischen Praxis und in der experimentellen Akustik ausgedehnte Anwendung; sie eignet sich sehr gut zur Klanganalyse; denn sie hat einen engen Resonanzbereich und ist fast obertonfrei. (Über eine Methode, die Übereinstimmung zweier Stimmgabeln zu prüfen, siehe Fig. 37.)

Beim Triangel, das durch einen Metallstift erregt wird, liegen die sehr zahlreichen unharmonischen Obertöne eng zusammen, so daß von einer bestimmten Tonhöhe nicht mehr gesprochen werden kann; der Geräuschcharakter herrscht vor.

Bei den in der Musik angewandten — oben erwähnten — geraden Stäben ist die eine Dimension nicht sehr stark vorherrschend, eine zweite ist meist so ausgebildet, daß die betreffenden tönenden Körper ebenso als breite Stäbe wie als schmale Platten betrachtet werden können (King, Xylophon, Glasharmonika).

Wirklich flächenhafte Körper geben nur dann brauchbare Töne, wenn sie vorsichtig und unter gewissen Umständen erregt werden. Aus diesem Grunde spielen derartige Körper (z. B. Becken, Tamtam) keine höhere musikalische Rolle; denn durch gewöhnlichen Anschlag wird nur ein Geräusch erzielt.

Die Schwingungsformen der Platten sind bereits von Chladni in sehr eingehender und sorgfältiger Weise untersucht worden. Zur Sichtbarmachung der Knotenlinien dient feiner Sand, der von den Schwingungsbäuchen fortgeschleudert wird, sich in den Knotenlinien aber häuft. Je nach der Befestigungs-, Berührungs- und Erregungsstelle ordnet sich der Sand in verschiedenen Figuren (Chladnische Klangfiguren). Immer bilden sich symmetrisch zur Streichstelle Schwingungsbäuche, symmetrisch zur Berührungs- und Befestigungsstelle Knoten und Knotenlinien, wie aus Fig. 36 ersichtlich ist. Bei quadratischen Platten sind die Knotenlinien

meist zu den Seiten parallele Linien oder Diagonalen, bei den runden dagegen nur Durchmesser und konzentrische Kreise. Eine bestimmte Figur bedingt immer denselben Ton, jedoch entsprechen demselben Tone im allgemeinen verschiedene Figuren.

Bei den gekrümmten Platten, z. B. den Glocken oder Schalen, die wie die runden Platten ebenfalls zweierlei Knotenlinien zeigen, ist zur Aufweisung der Schwingungsformen die Methode des aufgestreuten Sandes wegen der gekrümmten Flächen nicht anwendbar. Gegenüber den nicht zu beobachtenden, aber vorhandenen Knotenkreisen, d. h. den zum Grundkreis parallelen Knotenlinien, sind die wie Mantellinien von der Haubenspitze bis zum Grundkreis verlaufenden Knotenradien leicht sichtbar zu machen. Überstreicht man z. B. das Innere der Glocke mit dünner Kalkmilch und streut auf diese grobkörnigen Sand, so bewegt sich dieser, wenn die Glocke am Rande mit einem Bogen gestrichen wird, durch die Kalkmilch hindurch nach den Knotenlinien, wo er verbleibt. Die von den Sandkörnern durchlaufenen Bahnen und die Knotenlinien sind dann gut sichtbar. Die Grundschwingung zeigt vier Knoten, die um 90° voneinander abstehen. Immer bildet sich eine gerade Anzahl von Segmenten. Bei den Kirchenglocken, deren Formen und Dimensionen meist empirisch gefunden sind, ist der Mantel in seinem untersten Teile verdickt. Durch diesen, Schlagring genannten, Teil werden die kreisförmigen Knotenlinien veranlaßt, er ist in gewissem Grade bestimmend für den Grundton der Glocke. Indessen ist der Glockengrundton nicht der für die Glocke charakteristische Ton; die Tonhöhe der Glocke wird durch den „Schlagton" bestimmt, der merkwürdigerweise neben den Glockeneigentönen beim Anschlag auftritt und alle andern Töne an Intensität zunächst übertrifft. Er tritt bald nach dem Anschlag gegenüber den anderen Tönen zurück, jedoch hört man aus der Ferne und aus gewissen Stellungen dann immer noch den Schlagton als Hauptton der Glocke, während in der Nähe alle Teiltöne hörbar sind. Die Obertöne aller Glocken sind unharmonisch (Anm. 22). Wir haben es nicht mit rein transversalen Schwingungen, wie bei den geraden Platten, zu tun, sondern mit longitudinalen und transversalen, sogenannten gemischten Schwingungen, die durch die Krümmung des tönenden

Körpers bedingt sind. Daraus erklärt sich die Breite des Glockenklanges. Je nach der Erregungsstelle wird das System von Knoten und Bäuchen verschieden liegen. Da nun eine vollkommene Symmetrie der Form und des Materials nur annähernd erreicht werden kann, bilden sich zwei sogenannte Hauptschnitte. Jedem Hauptschnitt entspricht ein Ton, beide Töne sind aber etwas voneinander verschieden, so daß Schwebungen auftreten, wenn die Glocke nicht in dem einen oder dem anderen Hauptschnitt erregt wird.

Ähnlich wie bei den geraden Platten können die Schwingungsformen auch bei den Membranen durch aufgestreuten Sand sichtbar gemacht werden. Die Tonhöhe hängt — wie bei der Saite — von den Dimensionen, der Dicke und der Spannung ab. Auch darin besteht Übereinstimmung mit der Saite, daß die Obertöne harmonisch zum Grundton sind, jedoch hat die Membran im Gegensatz zur Saite mehrere zueinander unharmonische Grundtöne. Daraus erklärt sich der im allgemeinen unbestimmte, geräuschähnliche Klang (Trommel). Nur bei der Pauke, bei welcher der Luftraum des Kessels als Resonanzraum wirkt und die Erregungsart von Einfluß ist, kann von einer bestimmten Tonhöhe gesprochen werden.

Schon bei der Besprechung der einzelnen Musikinstrumente und der menschlichen Stimme ist gesagt worden, wie in dem betreffenden Falle die Klangfarbe von der Zusammensetzung des Klanges abhängt. Zusammenfassend hat Helmholtz über die Abhängigkeit Regeln angegeben, deren Grundzüge etwa folgende sind:

Für einen vollen Klang ist erforderlich, daß der Grundton gegenüber den Obertönen an Stärke überwiegt. Der Klang ist um so leerer, je mehr der Grundton zurücktritt. Sinustöne und Klänge, die neben dem Grundton nur sehr schwache und wenige Partialtöne haben, sind sehr weich und kräftig. Beispiele: Stimmgabeln, weite gedackte Orgelpfeifen, Flöten und schwach angeblasene Flötenregister der Orgel. [Stumpf führt außer der Tonhöhe und Stärke noch andere den Sinuston charakterisierende Attribute an und faßt

diese in den Begriff der Tonfarbe zusammen, durch die in gewisser Weise die Klangfarbe bestimmt wird (vgl. Anm. 23).]

Klänge, die außer dem Grundton nur die Partialtöne bis etwa zum sechsten in mäßiger Stärke enthalten, sind klangvoller und im Vergleich zu den einfachen Tönen reicher und prächtiger, aber doch wohllautend und frei von Rauhigkeit. So die Klänge des Klaviers, der offenen, nicht zu eng mensurierten Orgelpfeifen und die weicheren Klänge des menschlichen Stimmorgans und des Horns.

Sind nur die ungradzahligen Partialtöne vertreten, so haben die Klänge bei geringerer Anzahl von Partialtönen — wie bei den engen gedackten Orgelpfeifen, den in der Mitte angeschlagenen Klaviersaiten und der Klarinette — einen hohlen Charakter, bei größerer Anzahl von Partialtönen werden die Klänge näselnd.

Sind neben den niederen Partialtönen noch höhere (jenseits des sechsten oder siebenten sehr stark) vorhanden, so ist der Klang rauh, scharf und außerordentlich durchdringend (Blechblasinstrumente). Haben die oberen Partialtöne aber geringere Stärke, so sind sie für die Fülle und Ausdrucksfähigkeit des Klanges günstig (Streichinstrumente, die meisten Zungenpfeifen, Oboe, Fagott und menschliche Stimme).

ACHTER ABSCHNITT

Intensitätsprobleme

*

Während bei den Analysen und Synthesen hinsichtlich der Teiltonhöhen exakte Angaben gemacht werden können, stehen der Festlegung der Intensität der einzelnen Partialtöne die größten Schwierigkeiten entgegen. Man hat kein bestimmtes Maß für die Stärke eines Tones, man schätzt die Tonstärken und versteht darunter im allgemeinen die physiologischen (die gehörten) Stärken der objektiv vorhandenen Partialtöne.

Die physikalische Tonstärke hängt — wie schon Seite 10 erwähnt — von der Amplitude ab. Die Frage, wie die Energie der Schwingungsbewegung auszudrücken sei, ob nach Leibniz durch die lebendige Kraft (Produkt der Masse und des halben Quadrats der Geschwindigkeit), oder durch die Bewegungsgröße (Produkt der bewegten Masse und ihrer Geschwindigkeit), muß dahin beantwortet werden, daß jede dieser Meinungen über die Intensität, d. h. über den Wirkungswert einer Bewegung, berechtigt sein kann. Bei momentanen Wirkungen, den Impulswirkungen, ist die Bewegungsgröße für die Betrachtung heranzuziehen; bei Dauerwirkungen dagegen die kinetische Energie. Praktisch kommt aber ein Ton von ewiger oder wirklich momentaner Dauer nicht vor, er wäre jedoch als Impuls- und als Dauerwirkung je nach der Art der Erregung möglich. Versuche haben nun zu dem empirischen Gesetz der Tonstärke geführt, das beide angeführten, nur für die extremen Fälle geltenden Auslegungen berücksichtigt, also ungefähr die Mitte zwischen beiden hält. Es besagt, daß nicht nur die Amplitude, sondern auch die Masse und Geschwindigkeit die Intensität bestimmen. Weil bei dem höheren von

zwei Tönen mit gleicher Amplitude dieselbe Bewegung in der kürzeren Zeit zurückgelegt wird, ist die Geschwindigkeit beim höheren Tone eine größere, d. h. die oberen Töne sind unter sonst gleichen Umständen gegenüber den tieferen hinsichtlich der Intensität im Vorteil. Die Melodie liegt also nicht zufällig meist oben, und es hat seinen Grund, daß die tieferen Töne vornehmlich für die Begleitung in Frage kommen.

Für die wirkliche, die physiologische Hörstärke, kommt noch ein vierter Faktor hinzu, nämlich die Empfindlichkeit des Ohres. Bisher liegen nur wenige brauchbare Untersuchungen über die Abhängigkeitsbeziehungen zwischen der physikalischen Intensität, der Intensität eines Tonreizes, und der Intensität der durch diesen Reiz hervorgerufenen Tonempfindung vor; sie betreffen die Töne a^1, e^1 und g^2 und ergeben, daß für irgend zwei Stärkegrade eines Tones die Empfindungsunterschiede gegenüber den physikalischen Unterschieden sehr gering sind. Wie bei den meisten Phänomenen der Psychophysik kommt es darauf an, die das physikalische Geschehen und psychische Erleben charakterisierenden Begriffe als mathematische Größen festzulegen. Es müssen Reizquotienten der verschiedenen Tonregionen bestimmt werden, erst dann ist eine allgemein gültige Beziehung zwischen der objektiven und subjektiven Intensität möglich. Wenn nun die Messung der physikalischen Intensität gleichhoher Töne einigermaßen gelingt, so treten schon beim Vergleich der physikalischen Intensitäten zweier Töne ungleicher Höhe Schwierigkeiten auf. Noch schwieriger ist es, die relative physiologische Stärke zweier Töne aufzuweisen, so daß es bis jetzt noch nicht gelungen ist, die Funktion zwischen der nur auf physiologische oder psychologische Weise meßbaren subjektiven Ton- und Schallstärke und der entsprechenden objektiven Intensität allgemein anzugeben.

Schwebungen

*

Verstimmt man zwei unisone Töne gegeneinander, so treten periodische Stärkeschwankungen auf, die als Schwebungen bezeichnet werden und deren Anzahl in der Zeiteinheit (Sekunde) gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden schwebenden Töne ist. Demnach ist die sich stets auf die Zeiteinheit beziehende Schwebungszahl gleich $n - n_1$, wenn der höhere der beiden schwebenden Töne (Primärtöne) die Schwingungszahl n und der tiefere die Schwingungszahl n_1 hat; z. B. gibt ein Ton, dessen Schwingungszahl 400 ist, mit einem andern, der die Schwingungszahl 402 hat, in einer Sekunde zwei Schwebungen.

Sind die Schwingungszahlen der beiden Primärtöne nur wenig verschieden, so wirkt das Auf- und Abwogen nicht störend; beträgt aber der Unterschied der Schwingungszahlen der beiden Primärtöne und somit die Anzahl der Schwebungen mehr als etwa 5 bis 6, so nehmen die Schwebungen Stoßcharakter an, um bei zunehmender Schwebungszahl, etwa bei 30, in ein Rollen und schließlich in eine kontinuierliche Rauhigkeit überzugehen, die mit wachsender Verschiedenheit der beiden Primärtöne allmählich verschwindet. Die Grenze der Wahrnehmbarkeit schneller Schwebungen, die sogenannte Rauhigkeitsgrenze, hängt von der Höhe der schwebenden Töne ab. Für mittlere Tonlagen hat Helmholtz die Schwebungszahl 132 angegeben. Stumpf fand bei Versuchen mit Stimmgabeln der vier bis fünf gestrichenen Oktave, daß etwa 450 Schwebungen in der Sekunde noch wahrnehmbar sind. Die Grenze hängt also von der Höhe der schwebenden Töne ab, und zwar ist das Maximum der hörbaren Schwebungen um so kleiner, je kleiner die Schwingungszahlen der beiden Primärtöne sind.

Da die Schwingungszahlen eines und desselben Intervalls nach oben hin größer werden, muß auch die Differenz der Schwingungszahlen der Intervalltöne wachsen. Die Anzahl der Schwebungen ist also nicht nur für die verschiedenen Intervalle, sondern auch für die verschiedenen Lagen ein und desselben Intervalls verschieden. Jedoch ist die Schwebungszahl für ein bestimmtes Intervall in jeder Lage immer derselbe Bruchteil der Schwingungszahl des höheren oder tieferen der beiden Primärtöne.

Die Schwebungen erklären sich als Interferenzerscheinungen fortschreitender Wellen. Da die Wellenlängen der beiden Primärtöne nicht gleich sind, verschieben sich mit jeder Schwingung die Bewegungszustände, so daß alle Stadien der Interferenz nacheinander auftreten (Fig. 38). Die resultierende Kurve (Fig. 38 *c*), die Schwebungskurve genannt wird, läßt die zeitlich abwechselnde Verstärkung und Schwächung erkennen. (In Fig. 38 sind die Einzelschwingungen auf derselben Normalen gezeichnet; darunter ist das Ergebnis schematisch dargestellt.) Unterscheiden sich die beiden Primärtöne um eine Schwebung, so fallen innerhalb einer Sekunde nur einmal Berg und Tal zusammen, die Amplitude der resultierenden Kurve wird dann innerhalb der Zeiteinheit nur einmal vom größten Wert bis zum kleinsten sinken und wieder bis zum größten steigen. Sind die Primärtöne gleich stark, d. h. die ihnen entsprechenden Wellen von gleicher Amplitude, so tritt an den Stellen (Fig. 38 bei I und I_1), wo der Wellenberg des einen Tones genau mit dem Wellental des andern zusammenfällt, völlige Auslöschung ein.

Die Aufzeichnung der Schwebungskurve kann (dazu Fig. 39) mit Hilfe zweier Stimmgabeln wenig verschiedener Frequenz vorgenommen werden. Die (im Bild) linke Stimmgabel trägt an einem ihrer Zinken eine berußte Glastafel, die rechte an einem ihrer Zinken einen die Glasplatte berührenden Stift. Bewegt man die mittels Schlittenführung verschiebbare rechte Stimmgabel nach rechts, so wird, wenn beide Stimmgabeln schwingen, die resultierende Kurve aufgezeichnet*).

*) Über eine optische Methode der Sichtbarmachung von Schwebungen s. Fig. 40.

Maßgebend für den Eindruck der Schwebungen ist nun außer der Schwebungszahl noch die Größe des schwebenden Intervalls. Die Differenz der beiden Primärtöne ist z. B. bei dem Halbton $h_1 - c_2$, dem Ganzton $c_1 - d_1$ und der Quinte $C - G$ die gleiche, die Rauhigkeit des Zusammenklangs aber verschieden. Bei gleicher Schwebungszahl ist also die Wirkung für engere Intervalle störender. Zur Erklärung dieser Tatsache muß auf die Theorie des Hörens zurückgegriffen werden.

Wirken auf das Ohr zwei Töne, so wird nach der Helmholtzschen Theorie des Hörens die vom Trommelfell aufgenommene resultierende Schwingungsbewegung im Mittelohr in Komponenten zerlegt, indem auf jeden Sinuston nur ganz bestimmte Stellen der Basilarmembran reagieren. Wie schon hervorgehoben wurde, wird aber nicht nur ein Fäserchen der Basilarmembran durch einen Sinuston erregt, sondern eine Gruppe von Fäserchen; jedem Sinuston entspricht ein gewisser Resonanzbereich. Liegen nun die Töne nicht genügend weit auseinander, so findet eine Überdeckung der den beiden Tönen entsprechenden Resonanzbereiche statt. Die in diesen Überdeckungszonen liegenden Fäserchen werden dann von zwei Tönen erregt, es tritt eine Störung der Empfindung ein, indem die betreffenden Fäserchen die ganze Schwingungsbewegung aufnehmen; man hat dann die Empfindung von Schwebungen. Je näher die Primärtöne aneinander rücken, um so mehr Fäserchen werden von zwei Tönen erregt. Die gleiche Schwebungszahl wirkt daher bei engen Intervallen störender als bei weiten. Überdecken sich die den Resonanzbereichen entsprechenden Resonanzkurven nur teilweise (Fig. 41 *a*), so ist es noch leicht, die Primärtöne wahrzunehmen. Mit kleiner werdenden Höhenunterschieden der Primärtöne tritt aber die Schwebungserscheinung mehr hervor, die Überdeckungskurve ist — wie die Resonanzkurven Fig. 41 *b* zeigen — größer, und die beiden Primärtöne werden dann als sogenannter Schwebungston einheitlich erfaßt. (Zur Hervorbringung eines derartigen Schwebungstones sind nicht unbedingt zwei Töne erforderlich; da es sich nur um periodische Stärkeveränderungen handelt, kann die Erregung einer Schallquelle periodisch unterbrochen oder der Erregungsgrad in gewissen Grenzen

periodisch verändert werden; dadurch wird die Amplitude und somit die Intensität der Schwingungsbewegung periodisch beeinflußt. Auch sind zur Hervorbringung zweier schwebender Töne nicht immer zwei Schallquellen nötig; es kann dies auch von einem einzigen Körper, der aber dann mehrere Freiheitsgrade haben muß, geleistet werden; vgl. Glocken.) Im Augenblick des stärksten Tönens liegt die Tonhöhe eines derartigen Schwebungstones zwischen den beiden Primärtönen, und wenn diese gleich stark sind, genau zwischen ihnen (Zwischenton). Bei schwächstem Tönen dagegen liegt die Tonhöhe außerhalb des von den Primärtönen gebildeten Intervalls (Außenton).

Da die Größe des Intervalls, das noch Schwebungen hören läßt, nach unten hin zunimmt, so vermeidet man in tiefen Lagen im allgemeinen enge Zweiklänge und enge Akkorde. Auch sei auf den Einfluß der Schwebungen der Obertöne auf die Klangfarbe hingewiesen; die Rauhigkeit tiefer Töne erklärt sich daraus. Je tiefer der Grundton und je stärker die höheren, dichter nebeneinander liegenden Obertöne sind, desto rauher wird der Klang sein. Schwebungen, die ein Oberton eines musikalischen Tones mit dem Grundton eines andern musikalischen Tones macht, sind leicht zu beobachten. So schwebt z. B. bei zwei musikalischen Tönen, die nur wenig vom Oktavverhältnis abweichen, der erste Oberton des tieferen mit dem höheren der beiden musikalischen Töne. Überhaupt sind Schwebungen stets dann besonders gut bemerkbar, wenn das Schwingungszahlenverhältnis annähernd, aber nicht genau durch einfache Zahlen ausgedrückt werden kann. Helmholtz hat daher versucht — worauf im Abschnitt XI eingegangen wird —, die Konsonanz durch das Fehlen, die Dissonanz durch das Vorhandensein von Schwebungen zu erklären.

Ausgedehnte Anwendung finden die Schwebungen sowohl bei wissenschaftlichen Untersuchungen als in der musikalischen Praxis. Kennt man die Schwingungszahl einer zum Vergleich benutzten Schallquelle, so ist es mit Hilfe der Schwebungsmethode leicht möglich, die Schwingungszahl eines nahezu gleich hohen Tones festzustellen. So werden mit Hilfe der Schwebungen die irrationalen Intervalle, wie sie die Temperaturen erfordern, fest-
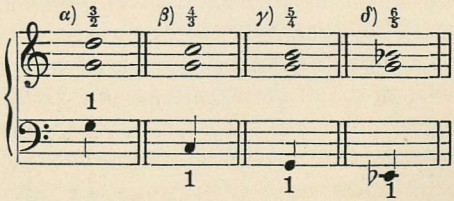
gelegt, und ebenso bewährt sich die Schwebungsmethode — besonders wegen ihrer Einfachheit — zum Nachweis der Teiltöne eines zu zergliedernden Klanges. Selbst wenn die Primärtöne so schwach sind, daß sie einzeln kaum wahrnehmbar sind, ist ihre Existenz durch Schwebungen nachweisbar. In der musikalischen Praxis spielen die Schwebungen besonders beim Stimmen von Instrumenten eine große Rolle. Dem Streichinstrumentalisten, dem Klavierstimmer, dem Orgelbauer usw. ist das Verschwinden der Schwebungen ein Beweis für die Reinheit der verglichenen Töne. Zwar ist die Entscheidung nicht immer ganz leicht, welcher von den verglichenen Tönen der höhere ist. Wohl besteht keine Schwierigkeit, zwei Primärtöne, deren Schwingungszahlenunterschied eine halbe Schwingung beträgt, die also alle zwei Sekunden eine Schwebung geben*), als verschieden zu erkennen: über die Richtung der Verschiedenheit vermag aber meist nur der Geübtere ein sicheres Urteil abzugeben. Langsame Schwebungen werden bei der Orgel und beim Harmonium angewandt, um das Tremulieren der Streichinstrumente und die periodischen kleinen Schwankungen der Tonhöhe der menschlichen Stimme nachzuahmen. Meist werden durch eine Taste zwei Stimmen ausgelöst, die nur sehr wenig gegeneinander verstimmt sind; oder das Intermittieren des Tones wird durch ein im Zuleitungsrohr befindliches, den Luftstrom periodisch unterbrechendes oder abschwächendes Ventil hervorgerufen.

*) Lord Rayleigh hat sogar eine 24 Sekunden dauernde Schwebung noch wahrgenommen.

Kombinationstöne

*

Bereits 1740 bemerkte der deutsche Organist Sorge, daß bei gleichzeitigem Erklingen zweier Orgeltöne ein tieferer, schwächerer Ton auftritt, ein sogenannter Kombinationston. Voraussetzung dabei ist, daß die beiden Primärtöne kräftig genug sind. Unabhängig von Sorge wies auch der berühmte Geiger Tartini (gest. 1770) auf diese beim Erklingen zweier Geigentöne beobachtete sekundäre Klangerscheinung hin; nach ihm werden sie oft Tartinische Töne genannt. Beim Erklingen einer Quinte, z. B. $g^1 — d^2$, ist die untere Oktave g des tieferen der beiden Primärtöne hörbar. Das Intervall der Quarte $g^1 — c^2$ gibt als Kombinationston die zweittiefere Oktave c des höheren der beiden angegebenen Töne. Wird die große Terz $g^1 — h^1$ angegeben, so klingt G mit, bei der kleinen Terz $g^1 — b^1$ dagegen der Ton Es. Für die angeführten Beispiele fällt der harmonische Zusammenhang sofort auf. Die Primärtöne lassen sich als Partialtöne eines Klanges auffassen, dessen Grundton der mitklingende, leisere Ton wäre, der in folgenden Beispielen durch Viertelnoten gekennzeichnet ist:



Im Beispiel α kann g^1 als zweiter und d^2 als dritter Partialton des als Grundton aufgefaßten Kombinationstones g gelten. Ebenso

könnten im Beispiel β die Primärtöne g^1 und c^2 als dritter und vierter Partialton eines Klanges auf c aufgefaßt werden; für Beispiel γ wäre g^1 vierter und h^1 fünfter Partialton in einem Klange auf dem Grundton G, und für Beispiel δ ist g^1 fünfter und b^1 sechster Partialton eines Klanges mit dem Grundton Es. Die relative Schwingungszahl 1 des mitschwingenden, leiseren Tones folgt stets als Unterschied der relativen Schwingungszahlen der beiden Primärtöne. Daraus ergibt sich, daß auch die absolute Schwingungszahl dieser Kombinationstöne gleich der Differenz der absoluten Schwingungszahl der beiden Primärtöne sein muß. Zwei Primärtöne mit den Schwingungszahlen 200 und 250 geben z. B. einen Kombinationston mit der Schwingungszahl 50. Solche Kombinationstöne werden deshalb Differenztöne genannt.

Wenn sich nun die Schwingungszahl des Differenztones aus der Differenz der Schwingungszahlen der beiden Primärtöne ergibt, und die Anzahl der Schwebungen in der Sekunde — wie im vorigen Abschnitt gezeigt wurde — ebenfalls gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden Primärtöne ist, so liegt die Vermutung nahe, daß die Schwebungen in Differenztöne übergehen, sobald die Anzahl der Schwebungen die Schwingungszahl des tiefsten hörbaren Tones erreicht hat. Diese von Thomas Young (1773—1823) aufgestellte Theorie mußte nach den eingehenden Untersuchungen Helmholtz' und Stumpfs verworfen werden. Helmholtz hatte erkannt, daß man die Schwebungen sehr weit hinauf — je nach der Höhe der schwebenden Töne bis über 100 in der Sekunde — verfolgen kann, obgleich inzwischen schon längst der Kombinationston aufgetreten ist. Da nur bei größerer Intensität der Primärtöne Differenztöne vorhanden sind, vermutete er, daß für größere Schwingungsweiten ein komplizierteres Kraftgesetz zur Anwendung komme; denn das Gesetz der Superposition hat nur Gültigkeit, so lange die Kräfte proportional der Entfernung aus der Ruhelage oder die Amplituden klein gegen die Wellenlänge sind. Auf mathematischem Wege gelangte Helmholtz dann zur Erklärung der Differenztöne und wurde ferner durch die Rechnung auf eine andere Art von Kombinationstönen geführt: die Summationstöne, deren Existenz nachzuweisen ihm

gelang. Die Schwingungszahl der sehr leisen Summationstöne ist gleich der Summe der Schwingungszahlen der beiden Primärtöne, also gleich $h + t$, wenn mit h der höhere und mit t der tiefere Primärton bezeichnet wird.

Außer den von den Primärtönen unter sich gebildeten Kombinationstönen (Differenzton $h - t$ und Summationston $h + t$) erzeugen nun aber die Kombinationstöne mit den Primärtönen und die Kombinationstöne unter sich wieder Kombinationstöne. Man unterscheidet daher neben den von den Partialtönen direkt erzeugten Kombinationstönen, die Kombinationstöne erster Ordnung genannt werden, noch Kombinationstöne zweiter, dritter und höherer Ordnung. Schon Hallström (1832) waren die Differenztöne höherer Ordnung bekannt. Eingehendere und einwandfreie Versuche über Zahl und Stärke der bei zwei Primärtönen auftretenden Kombinationstöne sind natürlich nur möglich, wenn als Primärtöne Sinustöne gewählt werden, wie das Stumpf getan hat. Er fand, daß zwei Primärtöne folgende Kombinationstöne geben:

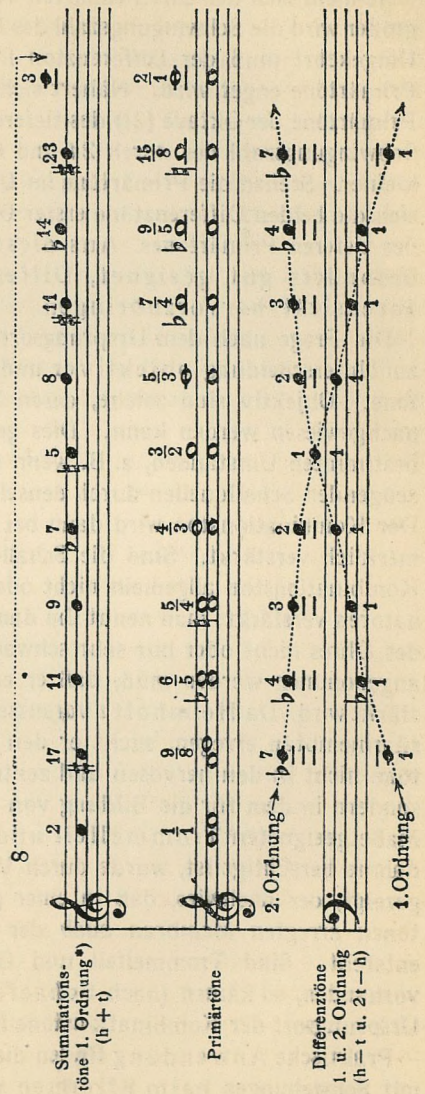
Differenztöne	Summationston
$h - t$	$h + t$
$2t - h$	
$2h - t$	
$3t - 2h$	
$3h - 2t$ und	
wahrscheinlich noch $4t - 3h$	
$4h - 3t$.	

Besonders treten hervor der Differenzton erster Ordnung $h - t$ (bei Intervallen innerhalb der Oktave) und der Differenzton zweiter Ordnung $2t - h$. Alle andern sind erheblich schwächer. Außer dem Summationston erster Ordnung $(h + t)$ sind zwar theoretisch noch solche höherer Ordnung möglich. Jedoch ist schon die Stärke der Summationstöne erster Ordnung im Vergleich zu der der Differenztöne äußerst gering, was für die Musikausübung insofern günstig ist, als die Summationstöne meist unharmonisch zu den

Primärtönen sind. Z. B. geben zwei eine Quarte bildende Primärtöne die natürliche Septime des höheren als Summationston. Von den Konsonanzen weisen nur die Oktave, Quinte und große Sexte harmonische Summationstöne auf.

Durch den Nachweis der Existenz der Summationstöne und aller Differenztöne außer denjenigen erster Ordnung ($h - t$) ist die Youngsche Theorie zu Fall gebracht; denn nur der Differenzton erster Ordnung wäre doch aus den Schwebungen herzuleiten.

Im nebenstehenden Notenbeispiel seien nun für einige Primärtonintervalle bis zu einer Oktave die Differenztöne erster und zweiter Ordnung sowie die schwächeren Summationstöne erster Ordnung dargestellt:



*) Die Höhenunterschiede zwischen den beiden d^3, sowie zwischen fis^3, ges^3 und dem anderen fis^3 können durch Noten nicht ausgedrückt werden. Der in diesem Beispiel (rechts) folgende Summationston ist stets der höhere.

Je mehr sich der eine Primärton von dem andern entfernt, desto größer wird die Schwingungszahl des Differenztones erster Ordnung. Umgekehrt muß der Differenzton fallen, wenn das Intervall der Primärtöne enger wird. Nähert sich also der höhere *h* der beiden Primärtöne der Oktave (2*t*) des tieferen Primärtones (*t*), so wird die Schwingungszahl des durch 2 *t* und *h* entstehenden Differenztones kleiner. Stehen die Primärtöne im Quintenverhältnis, so schneiden sich die beiden Differenztöne erster Ordnung in der unteren Oktave des tieferen Primärtones. Aus diesem Grunde ist die Quinte besonders gut geeignet, Differenztöne von namhafter Intensität hervorzubringen.

Die Frage nach dem Ursprungsort der Kombinationstöne führt zur Unterscheidung objektiver und subjektiver Kombinationstöne. Objektiv sind solche, deren Vorhandensein im Luftraume nachgewiesen werden kann. Dies gelingt (bisher) nur unter ganz bestimmten Umständen, z. B. wenn die beiden die Primärtöne erzeugenden Schallquellen durch denselben Windraum erregt werden. Der Kombinationston wird dann bei Anwendung von Resonatoren merklich verstärkt. Sind die Schallquellen getrennt, so wird der Kombinationston allgemein nicht oder nicht merklich durch Resonatoren verstärkt; man nennt ihn dann subjektiv, weil er außerhalb des Ohres nicht oder nur sehr schwach vorhanden ist und deshalb angenommen werden muß, daß er erst im Ohr erzeugt oder verstärkt wird. Da Helmholtz voraussetzt, daß nur Sinustöne die Basilarmembran erregen, sucht er den Ursprung der Kombinationstöne nicht in den nervösen und zentralen Teilen des Gehörorgans, sondern in dem für die Bildung von Kombinationstönen in hohem Maße geeigneten Trommelfell und Mittelohr. Daß diese Annahme berechtigt ist, wurde durch Versuche von K. L. Schaefer gezeigt, der nachwies, daß in einer gleichzeitig von zwei Primärtönen erregten Membran auch der zugehörige Kombinationston entsteht. Sind Trommelfell und Gehörknöchelchen nicht mehr vorhanden, so kämen (nach Schaefer) die Fenstermembranen als Ursprungsort der Kombinationstöne in Frage.

Praktische Anwendung finden die Differenztöne in Verbindung mit Schwebungen beim Stimmen von Streichinstrumenten. Ist

die von zwei benachbarten Saiten gebildete Quinte nicht ganz rein, so schwebt der Differenzton erster Ordnung $h - t$ mit dem Differenzton zweiter Ordnung $2t - h$. Die Schwingungszahlen der beiden Saitentöne seien 300 und 452 (sie müßten 300 und 450 sein, da das Verhältnis der Quinte 2 : 3 ist); dann folgt für $h - t = 152$ und für $2t - h = 148$, so daß in einer Sekunde vier Schwebungen auftreten. Erst wenn die höhere 450 Schwingungen in der Zeiteinheit macht, und somit $h - t = 150$ und auch $2t - h = 150$ wird, ist die Quinte rein gestimmt.

Die praktische Bedeutung der Tatsache, daß die Differenztöne besonders deutlich hervortreten, wenn die Primärtöne eine Quinte bilden, erkannte schon Abt Vogler (1749—1814); er ersetzte tiefe Orgelstimmen durch zwei im Quintverhältnis stehende höhere, deren Differenzton erster wie auch zweiter Ordnung die tiefe Stimme vertritt.

Dissonanz und Konsonanz

*

1. Gefühlsdefinition und die Theorien von Leibniz und Lipps

Die Frage, weshalb uns eine Tonverbindung konsonant oder dissonant erscheint, ist eine der umstrittensten der Akustik. Meist wird als entscheidendes Merkmal das Gefühl angeführt. Lehrbücher der Harmonie erklären so z. B. kurz: Konsonanz ist eine angenehme, Dissonanz eine unangenehme Tonverbindung. Je nach dem Zusammenhang kann aber der Gefühlseindruck einer und derselben Tonverbindung verschieden sein, auch haben — worauf Stumpf hinweist — die isolierten Intervalle ihren Gefühlswert seit dem Altertum stark verändert. Während bei den Griechen die Oktave als angenehmste Konsonanz bezeichnet wird, spricht das Mittelalter die Quinte als schönste Konsonanz an, später wird die Terz als angenehmster Zusammenklang empfunden, und in neuerer Zeit hat eine weitere Verschiebung des Lustgefühls nach den unvollkommensten Konsonanzen hin stattgefunden. Trotzdem ist aber auch für uns die Oktave noch immer die vollkommenste Konsonanz, also dürfen Annehmlichkeit und Konsonanz nicht verwechselt werden.

Der auffällige Zusammenhang zwischen den einfachen Zahlenverhältnissen und den Konsonanzerscheinungen veranlaßte Leibniz, die unbewußte Wahrnehmung einfacher Schwingungsverhältnisse als Grund der Konsonanz anzunehmen. Musik sei „unbewußte Übung der Seele in der Arithmetik". Nach Leibniz kann die Seele nur bis 5 zählen, denn die primären Konsonanzen

sind durch Zahlen bis zu 5 gegeben (kleine Terz und kleine Sexte als Umkehrungen der großen Sexte und großen Terz aufgefaßt). Weichen nun aber zwei Töne nur sehr wenig von der Reinheit ab, so bleibt die Verstimmung unbemerkt, trotzdem doch die Zahlenverhältnisse die kompliziertesten werden.

Derselbe Einwand kann gegen die Theorie von Lipps geltend gemacht werden, der die Konsonanz als abhängig von der unbewußten Wahrnehmung des Schwingungsrhythmus definiert. Die Maxima zweier gleichzeitiger Tonwellen fallen in unserem Ohr periodisch zusammen, und diese unbewußt empfundene Koinzidenz bedingt die Befriedigung bei Konsonanzen. Bei kleinen, unbemerkbar bleibenden Verstimmungen ist aber von einer periodischen Koinzidenz im Sinne von Lipps nicht die Rede, man erhält komplizierte rhythmische Verhältnisse, denn mit jeder Schwingung wächst der Phasenunterschied der beiden Tonwellen.
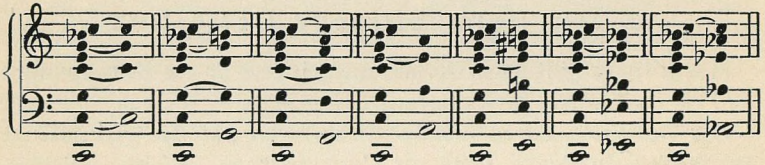
2. Die Helmholtzsche Definition

Helmholtz gibt zwei Definitionen, indem er die Schwebungen und die Partialtöne zur Erklärung heranzieht:

Die Definition durch die Schwebungen hat das gleichzeitige Vorhandensein zweier Töne zur Voraussetzung. Weil die Schwebungen bei Dissonanzen stark, bei Konsonanzen dagegen weniger stark auftreten oder ganz fehlen, ist nach Helmholtz der Grad der Konsonanz oder Dissonanz abhängig von dem Grad der Rauhigkeit, die auch durch Schwebungen der Obertöne bedingt sein kann. Sobald die Anzahl der Schwebungen 132 in der Sekunde übersteigt, wird die Tonempfindung glatt, kontinuierlich; dagegen sind die Schwebungen am schärfsten, wenn 33 in der Sekunde erfolgen (Rauhigkeitsmaximum). Die Dissonanz hat dann den höchsten Grad. Konsonanz wird als kontinuierliche und Dissonanz als intermittierende Tonempfindung definiert. Demnach wäre aber die große Terz *c* — *e*, da sie 33 Schwebungen gibt, eine Dissonanz; ferner wäre der Konsonanz- oder Dissonanzgrad bei ein und demselben Intervall in verschiedenen Oktaven verschieden, da sich ja mit den Schwingungszahlen der Intervalltöne

die Differenz der Schwingungszahlen und somit die Schwebungszahl verändert. Wohl muß zugegeben werden, daß die Schwebungen die Annehmlichkeit, bzw. Unannehmlichkeit des Zusammenklanges beeinflussen, jedoch kann die Rauhigkeit nicht den Grad der Konsonanz oder Dissonanz bestimmen.

Da für aufeinanderfolgende Töne die Schwebungstheorie nicht in Frage kommt, führt Helmholtz noch den Begriff der Klangverwandtschaft ein. Diese ist durch gemeinschaftliche Partialtöne gegeben. Folgende Beispiele, in denen die Töne des Intervalls, um dessen Konsonanzgrad es sich handelt, mit halben Noten dargestellt sind, lassen dies erkennen; die gemeinsamen Partialtöne sind durch Bogen verbunden. (Über *C* werden hier die ersten acht Partialtöne angegeben, von den Obertönen des höheren Intervalltones sind nur die berücksichtigt, die nicht über dem achten Partialton von C liegen):



Je niedriger die Ordnungszahlen der gemeinsamen Partialtöne sind, desto höher ist der Verwandtschaftsgrad und deshalb nach Helmholtz die Konsonanz. Wenn zwei Klänge mindestens einen Partialton gemeinsam haben, wie dies bei allen Konsonanzen der Fall ist, so sind sie im ersten Grade verwandt. Dabei ist zu bemerken, daß durch Versetzung des einen oder andern Tones um eine oder mehrere Oktaven die Verwandtschaft ersten Grades bestehen bleibt und daß das Zusammenfallen von Partialtönen, die dem 7., 9., 11., 13., 15. usw. entsprechen, nicht mehr als Verwandtschaft angesprochen wird.

Dissonante Töne können nur im zweiten Grade klangverwandt sein, worunter solche zu verstehen sind, die mit einem und demselben dritten Tone im ersten Grade verwandt sind. So besteht

z. B. zwischen *c* und *d* eine Klangverwandtschaft zweiten Grades, denn *c* ist mit *g* und auch *d* mit *g* im ersten Grade verwandt (Anm. 24).

So einleuchtend die Helmholtzsche Definition durch die gemeinschaftlichen Partialtöne zunächst ist, stehen ihr doch erhebliche Bedenken gegenüber. Werden z. B. zwei im ersten Grade verwandte Klänge obertonfrei gemacht, so bleibt der Konsonanzgrad des von den beiden Sinustönen gebildeten Intervalls derselbe, trotzdem die bindenden, gemeinsamen Partialtöne fehlen. Auch treten bei zwei konsonanten Klängen neben den zusammenfallenden Partialtönen doch Partialtonpaare auf, die nahe aneinander liegen und (besonders in der mittleren Tonlage) stark miteinander schweben. Und da für gleichzeitige Töne gerade die Schwebungen als entscheidend angeführt werden und bei manchen Konsonanzen die schwebenden Partialtöne sogar von kleinerer Ordnungszahl als die der zusammenfallenden Partialtöne sind (vgl. die Quarte, die Terzen und Sexten), so bleibt die Frage offen, weshalb den gemeinschaftlichen Obertönen eine größere Rolle als den schwebenden beigelegt wird. Indessen steht fest, daß bei aufeinanderfolgenden Tönen durch gemeinschaftliche Partialtöne eine Ähnlichkeit und so eine Verwandtschaft bedingt ist, die besonders bei der Oktave auffällt.

3. Klangvertretung und dualistische Theorien

Der alle Teiltöne enthaltende und somit ideale *C*-Klang kann nach Helmholtz durch eine charakteristische Gruppe von Partialtönen vertreten werden. Hören wir diese Gruppe, so fassen wir sie als Bestandteil des Gesamtklanges auf und beziehen sie auf diesen. So können c^1—e^1—g^1 als 4., 5. und 6. Partialton eines Klanges aufgefaßt werden, dessen erster Partialton *C* ist. Der angegebene Durdreiklang weist auch insofern auf den *C*-Klang hin, als die beiden Terzen c^1—e^1 und e^1—g^1 einen gemeinschaftlichen Differenzton haben, der dem ersten Partialton des *C*-Klanges entspricht.

Jedoch versagt dieses Klangvertretungsprinzip bei der Erklärung des Molldreiklanges. Dieser kann zwar auch als Bestandteil eines Grundklanges aufgefaßt werden — z. B. entsprechen die Töne

c^1, es^1 und g^1 dem 10., 12. und 15. Partialton des *As*-Klanges —, der Grundklang *As* spielt aber nicht die bindende Rolle wie *C* für den Durdreiklang $c^1—e^1—g^1$, er wirkt eher störend. Auch deuten die beiden Differenztöne erster und zweiter Ordnung der beiden Terzen $c^1—es^1$ und $es^1—g^1$ auf den Grundton *As* hin.

Um nun auch eine befriedigende Erklärung des Molldreiklanges zu geben und das duale (zweigeschlechtige) Wesen der Harmonie zu begründen, fassen A. v. Oettingen und H. Riemann (Anm. 25) Moll als Spiegelbild von Dur auf.

v. Oettingen bezieht den Durdreiklang $c^1—e^1—g^1$ wie Helmholtz auf einen gemeinschaftlichen Grundton *C*, dagegen den Molldreiklang $c^1—es^1—g^1$ auf einen allen Dreiklangstönen gemeinsamen Oberton g^3. Dieser Oberton ist ja 6. Partialton von c^1, 5. Partialton von es^1 und 4. Partialton von g^1. Die Töne des Durdreiklanges sind also Obertöne eines gemeinschaftlichen Grundtones, den v. Oettingen den tonischen Grundton oder die Tonika nennt, dagegen haben die Töne des Molldreiklanges einen gemeinsamen Oberton, der als phonischer Oberton oder Phonika bezeichnet wird. Während der Vereinigungspunkt für die Töne des Durdreiklanges in der Tiefe liegt, vereinigen sich die Töne des Molldreiklanges in einer genau so weit nach oben liegenden Zentrale.
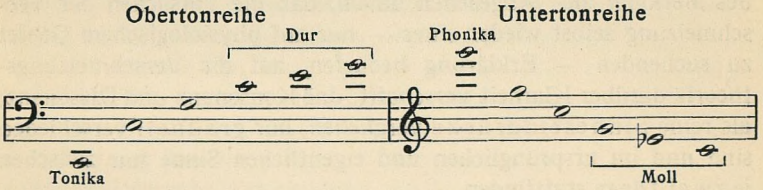
Unter Tonizität wird die Eigenschaft eines Intervalls oder Akkordes verstanden, als Bestandteil eines Grundtones aufgefaßt zu werden; Phonizität ist die Eigenschaft eines Intervalls oder Akkordes, einen allen Tönen gemeinsamen Oberton zu haben.

Verwandt im ersten Grade und konsonant sind nach v. Oettingen mehrere Töne nur dann, wenn sie sich auf einen gemeinschaftlichen Grundton oder Oberton beziehen lassen; und zwar je nachdem tonisch oder phonisch konsonant. Als Dissonanz definiert er dagegen das gleichzeitige Bestehen mehrerer Töne, die nicht auf einen gemeinsamen Grundton oder Oberton bezogen werden können.

Da nun Zweiklänge — wie z. B. $c^1—g^1$ — Obertöne eines gemeinschaftlichen Grundtones (*C*) sind und auch einen gemeinsamen Oberton (g^3) haben, also nie eindeutig konsonant oder dissonant zu nennen wären, wird der Begriff der Konsonanz und Dissonanz nur zusammen mit dem Begriff des Dreiklanges eingeführt.

Wie für Durklänge die Tonika, so gilt für Mollklänge die Phonika als Hauptton. Der höchste Ton des Molldreiklanges ist ein der Phonika äquivalenter Ton, g^1 ist also Hauptton des Molldreiklanges $c^1—es^1—g^1$. Da nun der Hauptton c^1 des Durdreiklanges Anfangston der Leiter ist und die Leiter nach oben geht, muß nach v. Oettingen der Hauptton des Molldreiklangs, die Quinte g^1, Anfangston der Leiter sein, und die Leiter muß von g^1 abwärts nach g führen. Wohl jeder Musiker wird sich aber dagegen sträuben, beim Mollgeschlecht die Dominante als Zentrum der Tonart aufzufassen. —

Riemann geht annähernd den gleichen Weg wie v. Oettingen, nur setzt er der Obertonreihe eine genau entsprechende Untertonreihe entgegen:



$c^1—e^1—g^1$ nennt Riemann Oberklang von C, $c^1—es^1—g^1$ dagegen Unterklang von g^3. Die Untertöne sind jedoch nur ausgedacht, sie existieren nicht. Daraus folgt, daß durch sie die Ähnlichkeit von Klängen nicht erklärt werden kann. Als allgemeines Erklärungsprinzip der Konsonanz sind sie erst recht unbrauchbar.

Muß daher die Riemannsche Lehre abgelehnt werden, so gilt dies auch für die Theorie v. Oettingens. Daß wegen der Mehrdeutigkeit bei Zweiklängen von Konsonanz nicht eigentlich gesprochen werden könnte, entspricht nicht den Aussagen des musikalischen Bewußtseins. Auch gründet v. Oettingen — wie Helmholtz — die Verwandtschaftstheorie auf die Obertöne, indem er noch hinzusetzt, daß es bei der Auffassung der Verwandtschaft auf die reelle Existenz der Obertöne nicht ankomme, weil wir imstande seien, uns an die Obertöne zu erinnern. Dies widerspricht aber, wie Stumpf einwendet, aller Psychologie; „damit etwas im Gedächtnis reproduziert werden kann, ist erforderlich, daß es seiner-

zeit im Gesamteindruck irgendwie bemerkbar war". — Wie viele Musiker gibt es, die von Obertönen nichts wissen, sich also auch nicht daran erinnern können; und trotzdem erkennen sie die Konsonanz wie jeder Akustiker.

4. Verschmelzungstheorie

C. Stumpf sucht den Unterschied konsonanter und dissonanter Töne weder in den Gefühlen, noch in unbewußten Funktionen, sondern in den Tonempfindungen als solchen, in den konsonanten oder dissonanten Tönen selbst, und zwar sieht er von den Begleiterscheinungen (Schwebungen, Obertöne) ab und führt — wie viele altgriechische Theoretiker — die Verschmelzung als entscheidendes Merkmal an. Abgesehen davon, daß die Tatsachen der Verschmelzung selbst wieder einer — nur auf physiologischem Gebiet zu suchenden — Erklärung bedürfen, hat die Verschmelzungstheorie darüber Klarheit verschafft, daß Konsonanz und Dissonanz, als reine Sinneseindrücke verglichen, nur graduell verschieden sind und im ursprünglichen und eigentlichen Sinne nur zwischen je zwei Tönen stattfinden.

Je mehr sich zwei Töne dem Eindruck eines einzigen Tones nähern, desto größer ist ihre Verschmelzung. So werden verschiedene auf Grund ausgedehnter Versuchsreihen (Anm. 26) gewonnene Stufen der Verschmelzung unterschieden; die höchste Verschmelzung zeigt die Oktave, dann folgen die Quinte, die Quarte, die Terzen- und Sextengruppe und schließlich alle übrigen Tonverbindungen, die alle den geringsten Grad der Verschmelzung zeigen. Zwischen den Terzen und Sexten ist kein Unterschied in der Einheitlichkeit des Eindrucks bemerkbar, sie gehören deshalb zu derselben Verschmelzungsstufe.

Konsonant werden alle zu den höheren Verschmelzungsstufen, dissonant dagegen alle zu der niedrigsten Verschmelzungsstufe gehörenden Tonverbindungen genannt. Zur Definition eines konsonanten musikalischen Intervalls reichen aber die Verschmelzungsstufen nicht aus; z. B. besteht zwischen Terzen und Sexten vom Verschmelzungsstandpunkt aus kein Unterschied. Daher wird

der Begriff des relativen Abstandes eingeführt, worunter der Abstand zweier Intervalltöne, bezogen auf einen bestimmten Ausgangston und eine bestimmte Richtung, verstanden wird. Demnach kann ein konsonantes Intervall im musikalischen Sinne als ein Tonverhältnis definiert werden, das „primär durch eine der höheren Verschmelzungsstufen, sekundär aber, d. h. bei gleicher Verschmelzung, durch den relativen Abstand der Intervalltöne" gegeben ist.

Während Helmholtz nur von Klangverwandtschaft spricht und die Konsonanz aus der Verwandtschaft herleitet, geht Stumpf von der Konsonanz aus und erklärt daraus die Tonverwandtschaft. Direkt oder im ersten Grade verwandt sind zwei Töne, die untereinander konsonieren, d. h. in höheren Graden verschmelzen. Dagegen sind zwei Töne, von denen jeder mit einem und demselben dritten Tone konsoniert, indirekt verwandt, und zwar verwandt im zweiten Grade; z. B. *f* und *g* durch *c*. Überhaupt sind zwei Töne stets dann indirekt verwandt, wenn sie durch einen oder mehrere Töne so verbunden werden können, daß jeder Ton der Reihe mit den ihm benachbarten Tönen konsoniert.

Wie Helmholtz unterscheidet auch Stumpf außer den Verwandtschaftsgraden noch verschiedene Arten der Verwandtschaft, und zwar je nach den die Verwandtschaft vermittelnden Intervallen: Quintenverwandtschaft, Terzenverwandtschaft, Quartenverwandtschaft, Sextenverwandtschaft usw. Jedoch erkennt man die Quinten- und Terzenverwandtschaft als die Hauptarten der direkten Verwandtschaftsarten; denn aus ihnen lassen sich alle andern direkten durch Umkehrung, alle indirekten durch Aneinanderreihung ableiten.

Mit Hilfe der Verwandtschaft werden von den unendlich vielen zur untersten Verschmelzungsstufe gehörenden Tonverbindungen solche Dissonanzen ausgeschieden, die musikalisch Verwendung finden. Die mit dem Grundton dissonierenden Töne unserer Leiter sind z. B. mit dem Grundton indirekt verwandt; denn sie konsonieren mit einem Ton, der seinerseits mit dem Grundton konsoniert. Allgemein kann gesagt werden, daß zu den musikalischen Intervallen (Anm. 27) neben den Tonverbindungen, deren Töne direkt

miteinander verwandt sind, noch solche Verbindungen rechnen, zwischen deren Tönen eine nicht zu entfernte indirekte Verwandtschaft besteht.

Die natürliche Septime 4 : 7 und auch die Intervalle 5 : 7, 6 : 7, 7 : 8 liegen ganz dicht neben Tönen, die bereits auf Grund stärkerer Konsonanz in unser Tonsystem eingeführt sind. Deshalb werden neben den vielen möglichen dissonanten Tonkombinationen auch die Siebener — Verhältnisse, deren eine Verhältniszahl durch 7 gegeben ist — ausgeschlossen. Vom Verschmelzungsstandpunkt aus ist die Siebenergruppe zwischen die beiden letzten Verschmelzungsstufen (zwischen der Terzen- und Sextengruppe und der niedrigsten Verschmelzungsstufe) einzuschalten.

Da nur gleichzeitige Töne verschmelzen können, findet auch Konsonanz und Dissonanz nur zwischen gleichzeitigen Tönen statt. Nun sind wir aber imstande, die Konsonanz oder Dissonanz aufeinanderfolgender Töne ebenso genau wie die gleichzeitiger zu beurteilen. Das ist nur möglich, weil die Verschmelzung auch in der Vorstellung erhalten und jeder Empfindungsinhalt noch eine Zeitlang nach Aufhören der Empfindung als Vorstellung im Bewußtsein bleibt; der zweite Ton, der empfunden wird, verschmilzt mit dem ersten noch vorgestellten, oder beide Töne verschmelzen nach Aufhören der Empfindung des zweiten Tones als Vorstellungen. Die aufeinanderfolgenden Töne müssen als gleichzeitig vorgestellt werden; ausschlaggebend ist also die Verwandlung der Aufeinanderfolge in eine Gleichzeitigkeit.

ZWÖLFTER ABSCHNITT

Konkordanz und Diskordanz

*

Die Konsonanz oder Dissonanz zweier Töne ist unabhängig von der Auffassung. Auf dem Klavier unterscheidet sich z. B. *c — es* nicht von *c — dis*, für beide Intervalle dient ein und dasselbe Tonpaar; dieses kann nicht — je nachdem es als *c — es* oder *c — dis* aufgefaßt wird — in verschiedenen Graden konsonieren, denn die Verschmelzung ist eine Funktion der beiden Sinnesempfindungen, bzw. ihrer physiologischen Unterlagen. Ändern kann sich nur die musikalische Bedeutung der Töne, sowie ihre Annehmlichkeit und ihre Gefühlswirkung.

Dies hat C. Stumpf zuerst klar erkannt, indem er den rein sinnlichen Eindruck der isolierten Intervalle von dem ästhetischen, durch das beziehende Denken vermittelten der Dreiklänge und ihrer Elemente, unterschied und deshalb neben den nur die direkte sinnliche Wahrnehmung angehenden Begriff der Konsonanz einen besonderen Begriff, die Konkordanz, stellt, womit das für die musikalische Auffassung und das beziehende Denken entscheidende Element gekennzeichnet werden soll. Zu diesem aus dem Konsonanzbegriff abgeleiteten Begriff der Konkordanz führt die Art und Weise, wie das Konsonanzprinzip in unserem Musiksystem zur Anwendung gelangt ist.

Unsere Musik wurzelt im Dreiklang, und zwar in seinen beiden Formen Dur und Moll. Wie bereits im Kapitel „Tonsysteme" ausgeführt, ist der Dreiklang aus der Durchführung des Konsonanzphänomens erwachsen: in *c e g c* und *c es g c* sind sämtliche höheren Verschmelzungsstufen repräsentiert. Nach Stumpf liegt folgendes Prinzip zugrunde: Es werde die größte Anzahl von Tönen inner-

halb der Oktave angegeben, die sämtlich unter sich konsonieren, und zwar indem wir in der Tonbewegung von unten nach oben und unter den Konsonanzen von den stärkeren zu den schwächeren Konsonanzgraden übergehen.

Von *c* ausgehend erhält man dann zunächst die obere Quinte *g*, und dann ist nur entweder *es* oder *e* noch möglich. Weshalb von den Siebenern abgesehen wird, ist bereits im vorigen Kapitel begründet worden. Die sogenannten weiten Lagen werden auf Grund der Äquivalenz der Oktavtöne als Modifikationen der engen aufgefaßt. Auch unsere Leiterbildung beruht — wie S. 21ff. gezeigt wurde — auf der Durchführung des Konsonanzphänomens. Die mit dem Grundton dissonierenden Töne sind durch das Entstehungsprinzip vollkommen bestimmt. Auch lassen sich sämtliche Akkordbildungen mit dissonierenden Tönen rationell aus den Hauptdreiklängen ableiten (Anm. 28).

Akkorde sind Mehrklänge, die sich auf Haupt- oder Nebendreiklänge eines bestimmten Grundtones zurückführen lassen. Sind die Umbildungen nicht mehr aus den ursprünglichen Dreiklängen verständlich, so kann der Mehrklang nicht mehr als Akkord bezeichnet werden.

Als konkordante Akkorde oder Konkorde werden alle Haupt- und Nebendreiklänge in Dur und Moll nebst ihren Um- und Weitlagerungen bezeichnet; ein Konkord muß also eine Quinte oder Quarte, sowie eine Terz oder Sexte enthalten. Diskordante Akkorde oder Diskorde sind alle übrigen Akkorde, also solche, die aus Dreiklängen durch Hinzufügung bestimmter rationell gerechtfertigter Töne oder durch bestimmte Alterationen der Dreiklangstöne selbst entstehen.

Die Abstrakta: Konkordanz nennen wir die Eigenschaft eines Mehrklanges, die ihn zum Konkord stempelt, also seinen Aufbau nach dem Prinzip der Maximalzahl mit dem Grundton konsonierender Töne innerhalb der Oktave in der Richtung von unten nach oben und nach der Rangfolge der Konsonanzgrade, sei es, daß der gegebene Mehrklang diese Anforderung ohne weiteres erfüllt oder durch Oktavversetzungen auf einen sie erfüllenden zurückgeführt werden kann.

Diskordanz ist die Eigenschaft eines Mehrklanges, die ihn zum Diskord stempelt, also eine Struktur, die aus Dreiklängen durch eine der genannten Operationen entsteht.

Besonders klar wird der Unterschied der Begriffe Konsonanz und Konkordanz durch Gegenüberstellung:

Konsonanz ist eine Sache der direkten sinnlichen Wahrnehmung, Konkordanz aber eine Sache der Auffassung und des beziehenden Denkens. Während Konsonanz im ursprünglichen und eigentlichen Sinne nur zwischen je zwei Tönen stattfinden kann, findet der Begriff der Konkordanz im ursprünglichen und eigentlichen Sinne nur auf Drei- bzw. Mehrklänge Anwendung. Ein Zweiklang wird nur dann als konkordant bezeichnet, wenn er als Teil eines Dreiklanges, also eines Konkords, aufgefaßt wird. Demnach ist ein Zweiklang nicht eindeutig konkordant oder diskordant; denn die Auffassung im Sinne eines diskordanten Klanges ist auch möglich. Z. B. kann *a — cis* als Teil des Konkordes *a cis e* (A dur) oder des Konkordes *fis a cis* (Fis moll), aber auch als Teil eines Diskordes, z. B. des übermäßigen Dreiklanges *f a cis*, aufgefaßt werden. Dagegen bleibt der Konsonanzgrad des Intervalls *a — cis* in jedem Falle derselbe. Während weiter der Konsonanzgrad zweier Töne durch Hinzutritt eines dritten Tones nicht verändert wird, kann die Konkordanz durch einen weiteren Ton in Diskordanz übergehen. Im Gegensatz zur Konsonanz und Dissonanz, die nur graduelle Unterschiede aufweisen, sind ferner Konkordanz und Diskordanz spezifisch verschieden. Es handelt sich hier um ein Entweder— Oder; einen allmählichen Übergang — wie bei der Konsonanz und Dissonanz — gibt es nicht.

Dieser spezifische Unterschied zwischen Konkordanz und Diskordanz erklärt auch den sich daran knüpfenden spezifischen Gefühlsunterschied. Die Gefühlswirkung ist aber Veränderungen unterworfen, jedoch wird der Unterschied von Konkordanz und Diskordanz durch die Gefühlswandlung nicht berührt; er bleibt bestehen, so lange das Beziehen auf Dreiklänge Mittelpunkt bleibt. Zwar spielt die Gefühlsseite in der Musik eine große, vielleicht die wichtigste Rolle, aber in den Grunddefinitionen der Musiktheorie kann sie keine Berücksichtigung finden.

ANMERKUNGEN

1. Durch die relative Bewegung von Schallquelle und Ohr wird die das Ohr treffende Anzahl von Schwingungen in der Sekunde geändert (Dopplereffekt; die Theorie wird auch als Dopplersches Prinzip bezeichnet). An dem Pfiff einer vorbeifahrenden Lokomotive ist z. B. das Steigen der Tonhöhe bei Annäherung und das Fallen bei Entfernung wahrzunehmen. Bei Annäherung liegt der Ausgangspunkt der Welle dem Ohre näher als der der vorhergehenden, die Wellenlänge wird also gewissermaßen verkürzt, d. h. der Ton erscheint dem Beobachter höher; umgekehrt, wenn die Entfernung zwischen Schallquelle und Hörer wächst.

2. Unter Brechung versteht man die Richtungsänderung der Schallstrahlen beim Übergang von einem Medium zu einem anderen. An der Grenzfläche erfährt der Strahl zum Teil eine Reflexion, zum Teil dringt er in das andere Medium ein. Dabei wird er, wenn er schräg auftrifft, gebrochen (akustische Linse von Sondhauß). Beugung ist die Abweichung der Strahlen von der gradlinigen Fortpflanzung; sie tritt ein, wenn die Wellenflächen durch Hindernisse zum Teil verstümmelt werden. Die seitliche Ablenkung des Schalles ist aber nur möglich, wenn die Wellenlängen nicht sehr klein sind. Sehr kleine Schallwellen verhalten sich hinsichtlich der Beugung wie Lichtwellen, d. h. sehr hohe Töne sind hinter Hindernissen nicht hörbar (Schallschatten).

3. Über den Einfluß rein mechanischer Prinzipien (z. B. die Saiten- oder Pfeifenteilungsart) auf die Leiterbildung vgl. den in dieser Sammlung erscheinenden Band „Musik des Orients" von R. Lachmann.

4. Die Aneinanderreihung von Intervallen geschieht in der Weise, daß die Verhältnisse multipliziert werden. Fügt man z. B. zu einer Quinte $\left(\frac{2}{3}\right)$ eine Quarte $\left(\frac{3}{4}\right)$ hinzu, so erhält man $\frac{2}{3} \cdot \frac{3}{4} = \frac{1}{2}$, also die Oktave. — Ist ein Intervall von einem anderen abzuziehen, so hat man das abzuziehende Intervallverhältnis umzukehren und mit dem andern zu multiplizieren. Sind z. B. Oktave $\left(\frac{1}{2}\right)$ und Quarte $\left(\frac{3}{4}\right)$ gegeben und ist die Quinte gesucht, so wird $\frac{1}{2}$ mit dem reziproken Wert der Quarte multipliziert: $\frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} = \frac{2}{3}$.

5. Der harmonischen Molltonleiter entspräche folgendes Bild:

$$\begin{matrix} & & & & h & \\ f & c & g & d & & \\ as & es & & & & \end{matrix} \left(\begin{matrix} c & d & es & f & g & as & h & c \\ 1 & \frac{8}{9} & \frac{5}{6} & \frac{3}{4} & \frac{2}{3} & \frac{5}{8} & \frac{8}{15} & 2 \end{matrix} \right),$$

der aufsteigend melodischen:

$$\begin{matrix} & a & & & h & \\ f & c & g & d & & \\ & es & & & & \end{matrix} \left(\begin{matrix} c & d & es & f & g & a & h & c \\ 1 & \frac{8}{9} & \frac{5}{6} & \frac{3}{4} & \frac{2}{3} & \frac{3}{5} & \frac{8}{15} & 2 \end{matrix} \right)$$

und der absteigend melodischen:

$$\begin{matrix} & & & & & \\ f & c & g & d & & \\ as & es & b & & & \end{matrix} \left(\begin{matrix} c & b & as & g & f & es & d & c \\ 2 & \frac{5}{9} & \frac{5}{8} & \frac{2}{3} & \frac{3}{4} & \frac{5}{6} & \frac{8}{9} & 1 \end{matrix} \right).$$

6. Hierher gehören auch:
ein 17stufiges System von Zarlino
c^0 cis^{-2} d^{-1} d^0 es^0 es^{+1} e^{-1} f^0 fis^{-2} fis^{-1} g^0 gis^{-2} a^{-1} b^{+1} b^0 h^{-1} c^0 (die Quinte gis^{-2}—es^{+1} war ein schlimmer „Wolf") und das 24stufige System von Mersenne (1636) mit den Tönen c^0 cis^{-2} des^{+1} d^{-1} d^0 dis^{-2} es^0 es^{+1} e^{-1} eis^{-3} f^0 fis^{-2} fis^{-1} ges^{+1} ges^{+2} g^{-1} g^0 gis^{-1} as^{+1} a^{-1} ais^{-3} ais^{-2} b^0 b^{+1} h^{-1} und his^{-3}.

7. Die Tonauswahl des von Helmholtz für akustische Untersuchungen gebauten Harmoniums beruht auf der „schismatischen Verwechslung". Der Unterschied zwischen der natürlichen Oberterz eines Tones und dessen 8. Unterquinte ist stets gleich der „Schisma" genannten Differenz zwischen dem pythagoräischen Komma und dem syntonischen Komma; z. B. unterscheidet sich e^{-1} von e^0 um ein syntonisches Komma, e^0 von fes^0 um ein pythagoräisches Komma, also e^{-1} von fes^0 um ein Schisma. Dieser Unterschied liegt an den Grenzen der Hörbarkeit, so daß $e^{-1} = fes^0$ gesetzt werden kann.

8. Vgl. dazu G. Engel „Das mathematische Harmonium" 1881, Shohé Tanaka „Studien im Gebiet der reinen Stimmung" 1890, und Eitz „Das mathematisch reine Tonsystem" 1891.

9. Resoniert ein Körper auch auf Töne, die zu seinem Eigenton im harmonischen Schwingungsverhältnis stehen, so nennt man diese Erscheinung multiple Resonanz. Ist der erregende Ton nicht ein Sinuston, so ist festzustellen, ob der Eigenton des resonierenden Körpers nicht schon als Partialton in dem erregenden musikalischen Ton enthalten ist, ob also nicht auswählende Resonanz in Frage kommt.

10. Man ist sogar imstande, aus dem Volumen eines Raumes und dem Dämpfungs- oder Absorptionsvermögen der Wände, Einrichtungen und Personen — mit Hilfe einer von Sabine angegebenen Formel — die Nachhalldauer für den betreffenden Raum zu berechnen, was von besonderer Wichtigkeit für die Prüfung eines Bauentwurfs in bezug auf die Ausstattung (Material der umschließenden Wände, Polstermöbel, Holzvertäfelungen usw.) ist.

$$\text{Nachhalldauer } t = k \cdot \frac{v}{a} \text{ Sekunden,}$$

worin v das Volumen des Raumes, a das Dämpfungs- oder Absorptionsvermögen der Wände und Einrichtungen, und der Faktor k eine Zahl bedeuten, die im Mittel etwa 0,16 anzusetzen ist und von der Tonhöhe, Klangfarbe und Nachhallstärke abhängt. Befinden sich in dem Raum Zuhörer, so tritt zu dem Wert a noch deren Absorptionsvermögen b; dann ist die

$$\text{Nachhalldauer } t^1 = k \cdot \frac{v}{a+b} \text{ Sekunden.}$$

Daraus ist zu ersehen, wie unmaßgeblich Proben im leeren Raum für die Wirkung im gefüllten sind.

11. $n = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{p}{q \cdot s}}$, worin n die Schwingungszahl, l die Länge der Saite, p die Spannung, q der Querschnitt und s das spezifische Gewicht bedeuten (Taylorsche Formel).

12. In diesen Fällen nimmt die ganze Saite an der Schwingungsbewegung teil. Auf diese Art werden die Flageolettöne der leeren Saite bis zum sechsten Oberton hervorgebracht. Will man andere nach der angegebenen Art sich nicht ergebende hohe Töne durch Flageolett hervorbringen, so ist ihre zweite Unteroktave fest zu greifen, so daß nur der Teil zwischen dem fest aufgesetzten Finger und dem Steg schwingt, und die Saite lose in einem Viertel dieses Saitenteiles zu berühren, d. h. es muß leise die Quarte des Tones gegriffen werden, den der zwischen festaufgesetztem Finger und Steg gelegene Saitenteil gibt.

13. Vgl. die Pizzicatoklänge der Streichinstrumente mit den Klängen, welche die durch die Rabenkiele gezupften Saiten des Klavizimbals geben. Weitere Beispiele bilden die durch den Finger angerissenen Saiten der Harfe und Gitarre, Laute usw. und die mit einem spitzeren (z. B. metallenen) Gegenstande erregten Saiten der Zither und Mandoline.

14. Die Schwingungszahl des Grundtones einer offenen Pfeife wäre also (weil $v = n \cdot \lambda$ und die Pfeifenlänge $1 = \frac{\lambda}{2}$) zunächst gleich $\frac{v}{2l}$. Für l die reduzierte Pfeifenlänge eingesetzt, gibt

$$n = \frac{v}{2(l+s)}.$$

Die Wellenflächen (Querschnitte, deren sämtliche Punkte gleiche Amplitude haben) sind auf der Pfeifenachse senkrecht stehende Ebenen, dagegen haben wir es im freien Raum mit sphärischen Wellen (Kugelwellen) zu tun; die Wellenflächen sind hier konzentrische Kugeln. Die ebene Welle muß sich in einen sphärischen Typus umwandeln. Diese Umwandlung kann nicht direkt erfolgen, wie Fig. 21 a andeutet, sondern sie wird sich allmählich vollziehen (Fig. 21 b). Die zum Übergang nötige Strecke (s) ist die zu berücksichtigende Korrektion.

15. Bei wachsendem Schneidenabstand (vgl. Fig. 24 und 25) oder verringertem Druck zerfällt die Luftlamelle in mehrere Teile, die sogenannten Bänder. Der untere, von der Ausströmungsöffnung bis a reichende

Teil heißt Blatt, *ab*, *bc*, *cd*, usw. sind die losgelösten Bänder. Beim Abbrechen des ersten Bandes tritt die Oktave, beim Abbrechen des zweiten die Duodezime, beim Abbrechen des dritten die Doppeloktave des Grundtones usw. auf; den Sprungstellen in der Tonhöhe entsprechen Bruchstellen der Luftlamelle (schematisch dargestellt in Fig. 25).

Fig. 26 zeigt eine Momentaufnahme der pendelnden Lamelle (Oktavton). Fig. 27 ist eine kinematographische Serienaufnahme (eine Periode, zwölf Phasen) des dem ersten Obertone entsprechenden Schwingungsvorganges an der Oberlippe einer gedackten Orgelpfeife.

16. Dafür sprechen besonders die Untersuchungen von R. Wachsmuth, K. L. Schäfer und P. Lutz, der auch eine Zusammenstellung der Haupttheorien gibt.

17. Zu den Lippenpfeifen zählt auch die Galtonpfeife, die sehr hohe Töne liefert und in der ohrenärztlichen Praxis als Untersuchungsmittel für die obere Hörgrenze benutzt wird. Maulweite und Länge dieser kleinen Pfeife, die durch ein Gummigebläse zum Tönen gebracht wird, sind veränderlich.

18. Fig. 28 zeigt eine Zungenpfeife der Orgel. Durch einen am unteren Ende umgebogenen Draht, die sogenannte Stimmkrücke, kann, wie aus der Figur ersichtlich, die Länge des für die Transversalschwingung in Frage kommenden Zungenstückes und somit die Höhe des Zungentones verändert werden.

19. Das Mundstück der Klarinette wird von dem sogenannten Schnabel gebildet, über dessen seitlich rechteckige Öffnung sich das aus leichtem Rohrholz bestehende elastische Blättchen legt. Bei der Oboe und dem Fagott bilden zwei aneinandergelegte Rohrholzblättchen das sogenannte Röhrchen.

20. Instrumente mit weicher Zunge, die auch zu den Holzblasinstrumenten zählen, obgleich sie aus Messing bestehen, sind die Saxophone (Erfinder A. Sax), Instrumente mit Klarinettenschnabel und konischem Messingrohr, und die Sarrusophone (Erfinder Sarrus), Instrumente mit Oboe- oder Fagottmundstück und konischem Messingrohr.

21. Wird ein Stab der Länge nach gerieben, so werden die Stabteilchen von dem Reibzeug etwas mitgeführt, schwingen dann aber zurück, so daß im Stab Verdichtungen und Verdünnungen entstehen, die sich in ihm fortpflanzen und an seinen Enden reflektiert werden. Die direkten und reflektierten Wellen setzen sich zu stehenden Wellen zusammen. Die im allgemeinen sehr hoch liegenden Longitudinaltöne eines Stabes dienen z. B. zur Erregung der Luftsäule in der Kundtschen Staubröhre. (An der einen Seite ist die Glasröhre durch einen verschiebbaren Stempel verschlossen, von der andern Seite her ragt ein Stab hinein, der an seinem in der Röhre befindlichen Ende eine den Querschnitt der Röhre ausfüllende Korkscheibe trägt. Wird der Stab in longitudinale Schwingungen versetzt, so bilden sich — bei geeigneter Stellung des verschiebbaren Stempels — in der Röhre stehende Wellen. Befindet sich in der Röhre feines Pulver — z. B. Korkstaub —, so sammelt sich dies in den Knotenstellen. Der Abstand zweier benachbarter Knoten ist gleich $\frac{\lambda}{2}$.

Ist somit die Wellenlänge λ gegeben, so kann, wenn v bekannt ist, aus $v = n \cdot \lambda$ die Schwingungszahl n oder umgekehrt, wenn n bekannt ist, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v bestimmt werden.)

22. Über die schwankende Höhe des Schlagtones, der auf dem Wege der Resonanz — im Gegensatz zu den anderen Teiltönen des Glockenklanges — nicht erregbar ist, vergleiche J. Biehle „Die Analyse des Glockenklanges", Leipzig 1918.

23. Tiefe Töne werden — besonders von Kindern — als dunkel, hohe als hell bezeichnet: jedem Tone kann also eine bestimmte Helligkeit zugeschrieben werden. Auch hat jeder Ton eine gewisse räumliche Größe, ein bestimmtes Tonvolumen. Ferner entspricht einem höheren Tone eine größere Empfindungsstärke bei gleicher physikalischer Intensität der verglichenen Töne. Stumpf faßt alle diese parallel zur Höhe sich verändernden Merkmale in den Begriff der Tonfarbe zusammen.

24. Alle Tonleitern, denen das harmonische Prinzip zugrunde liegt, lassen sich mit Hilfe der Verwandten ersten und zweiten Grades ableiten. Vgl. dazu die tonale Gruppe von *c* (Seite 26): alle im Bild um *c* gruppierten Töne sind mit *c* im ersten Grade verwandt, die durch Vermittlung von *g* gewonnenen (*d*, *h*, *b*) im zweiten Grade.

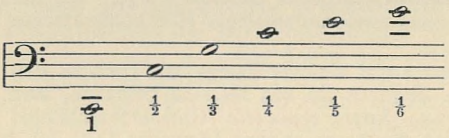
25. Sie verfolgen damit einen bereits von Zarlino ausgesprochenen, von Rameau, Tartini und Hauptmann aufgenommenen Gedanken.

Nach Zarlino sind alle Konsonanzen durch die Verhältnisse

$1 : {}^1/_2 : {}^1/_3 : {}^1/_4 : {}^1/_5 : {}^1/_6$ (Divisione armonica)

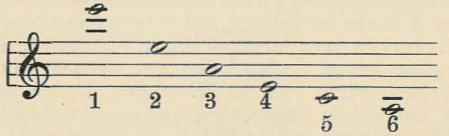
und $1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6$ („ aritmetica) bestimmt.

Beispiel:



Saitenlänge:

ergibt den Durakkord (Cdur)



Saitenlänge:

ergibt den Mollakkord (Amoll).

Zarlino betonte, daß bei Dur und Moll nicht die Größe, sondern nur die Lage der Terzen verschieden sei.

Rameau, der auch zum ersten Male auf die Klangvertretung hinwies, begründete durch die Obertöne die Zarlinosche Ableitung des Dur-Akkordes.

Tartini war dann bemüht, mit Hilfe der Untertonreihe eine Erklärung des Moll zu geben.

Später nahm dann Moritz Hauptmann (1792—1868) die dualistische Lehre wieder auf, indem er Dur und Moll in ästhetisch-philosophischer Weise zu erklären versuchte. Im Durdreiklang verhalten sich Grundton, Quinte und Terz wie „ein Gegebenes, ein zu diesem Gegebenen hinzutretendes Gegensätzliches und ein diesen Gegensatz Lösendes". Im Durdreiklang hat ein Ton (Grundton) eine Quinte und große Terz, dagegen ist im Molldreiklang ein Ton (Quinte) selbst Quinte und große Terz. „Das Haben ist ein aktiver, das Sein ein passiver Zustand." „Im Durdreiklang ist die Einheit das positiv Bestimmende, im Molldreiklang ist sie das positiv Bestimmte."

26. Den Versuchspersonen wurde die Frage vorgelegt, ob ihnen ein gegebener Zweiklang als einheitliches Ganzes erscheine oder ob sie darin zwei Töne unterscheiden könnten. Die Zahl der falschen Urteile bot einen Maßstab für den Verschmelzungsgrad. Die Prozentzahlen falscher Urteile (Einheitsurteile) waren:

	für Oktaven	Quinten	Quarten	Terzen	Tritonus	Sekunden
ungefähr	75%	50%	33%	25%	20%	10%

27. „Ein Intervall in musikalischem Sinne ist ein Verhältnis zweier Töne, welches gegeben ist primär durch ihre Verwandtschaft, sekundär aber, d. h. bei gleicher Verwandtschaft, durch den relativen Abstand der beiden Töne."

28. „Durch Analogie und Sequenz treten zu den drei Hauptdreiklängen Nebendreiklänge auf anderen Leitertönen, und mit der Weiterentwicklung der Kadenz werden dissonante Töne zu den Dreiklängen der Dominante und Subdominante gefügt, aber wieder nicht beliebige, sondern nur solche, die bereits durch die anderen Dreiklänge gegeben sind. Auch werden die Dreiklänge auf der Dominante und Subdominante durch chromatische Alteration einzelner Töne (des höchsten im ersten Falle, des tiefsten im zweiten) umgebildet. Diese Bildungen mit dissonierenden Tönen (d. h. mit Tönen, die mit wenigstens einem der übrigen dissonieren) entspringen sichtlich dem Bedürfnis, der Aufeinanderfolge der Hauptdreiklänge, die vom Grunddreiklang ausgeht und in ihn zurückläuft, durch dreiklangfremde Töne einen drängenderen und flüssigeren Charakter zu geben. So entstehen zunächst der Dominantseptimenakkord und der Quintsextakkord, aus diesen wieder durch Alteration, Addition, Elision eine Menge anderer Bildungen, die sich sämtlich rationell aus den Hauptdreiklängen ableiten lassen und ihre bestimmten Funktionen in der Aufeinanderfolge der Zusammenklänge erfüllen, indem sie zu einer „Auflösung", d. h. zum Übergang in bestimmte Dreiklangsformen drängen. Diese Bildungen haben auch besondere Namen erhalten: manche sind freilich in den Lehrbüchern unrationell abgeleitet und die Namen oft wenig bezeichnend."

LITERATURVERZEICHNIS

Auerbach, Artikel „Akustik" in Winkelmanns Handbuch der Physik. Bd. 2. Leipzig 1909.

— Die Grundlagen der Musik. Bd. 18 der Sammlung „Wissen u. Können". Leipzig 1911.

Biehle, J., Raum und Ton, Zeitschrift für Musikwissenschaft 1919, S. 129ff.

Blüthner u. Gretschel, Der Pianofortebau. 3. Aufl. (Hrsg. v. Hannemann.) Weimar 1909.

Chladni, Die Akustik. Leipzig 1802 u. 1830.

— Über die Longitudinalschwingungen der Saiten und Stäbe. Leipzig 1796.

— Kurze Übersicht der Schall- und Klanglehre. Mainz 1827.

Eichborn, Die Trompete in alter und neuer Zeit. Leipzig 1881.

— Die Dämpfung beim Horn oder die musikalische Natur des Horns. Leipzig 1897.

Eitz, Karl, Das mathematisch-reine Tonsystem. 1891.

Ellis, Alex. John, History of musical pitch (London 1877 u. 1881, Berichte der Royal Society of Arts). Siehe auch Übersetzung von Helmholtz' Lehre von den Tonempfindungen.

Engel, Gustav, Das mathematische Harmonium. 1881.

Ewald, Artikel „Die Physiologie des Kehlkopfes und der Luftröhre; Stimmbildung" in Heymanns Handbuch der Laryngologie und Rhinologie. Wien 1898.

Grützner, Artikel „Stimme und Sprache" in Ergebnisse der Physiologie, I. Jahrgang. Wiesbaden 1902.

Gutzmann, Physiologie der Stimme und Sprache. Heft 29 der Sammlung: Die Wissenschaft. Braunschweig 1909.

Hauptmann, Die Natur der Harmonik und Metrik. Leipzig 1873.

v. Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen. 6. Auflage. (Herausgegeben von Wachsmuth.) Braunschweig 1913.

— Mathematische Prinzipien der Akustik (hrsg. v. König u. Runge). 1888.

Jonquière, Grundriß der musikalischen Akustik. Leipzig 1898.

Kalähne, Grundzüge der mathematisch-physikalischen Akustik. Leipzig 1913.

Köhler, Wolfgang, Akustische Untersuchungen (Beitr. z. Akustik u. Mus.-Wiss. 1909 u. 1911).

Köhler, Wolfgang, Artikel „Tonpsychologie“ (i. „Hdbch. d. Neurologie d. Ohres“, hrsg. v. Alexander u. Marburg). 1923/24.

Freiherr von Lütgendorff, Die Geigen- und Lautenmacher vom Mittelalter bis zur Gegenwart. 2. Aufl. Frankfurt a. M. 1904.

Lutz, Paul, „Über die Tonbildung in Lippenpfeifen“. Diss. Berlin 1921.

Melde, Akustik. Band 56 der „Internationalen wissenschaftlichen Bibliothek“. Leipzig 1883.

Michel, Hörsamkeit großer Räume. Braunschweig 1921.

Nagel, Artikel „Physiologie der Stimmwerkzeuge“ in Nagels Handbuch der Physiologie, Band IV. Braunschweig 1909.

Opelt, Über die Natur der Musik. Leipzig 1834.

v. Oettingen, Das Harmoniesystem in dualer Entwicklung. Dorpat u. Leipzig 1866.

Preyer, Über die Grenzen der Tonwahrnehmung. Jena 1876.

— Akustische Untersuchungen. Jena 1879.

Rayleigh, Die Theorie des Schalles. Braunschweig 1881.

Riemann, Katechismus der Akustik. Leipzig 1918.

Sabine, English Record, Band 41, 1900.

Sachs, Curt, Musikinstrumente. Jedermanns Bücherei. Breslau 1923.

Schaefer, Artikel „Der Gehörsinn“ in Nagels Handbuch der Physiologie, Band 3. Braunschweig 1905.

— Musikalische Akustik, Sammlung Göschen, 1912.

v. Schaik, Wellenlehre und Schall. Braunschweig 1902.

Starke, Physikalische Musiklehre. Leipzig 1908.

Stumpf, Tonpsychologie, 2 Bände. Leipzig 1883 und 1890.

— Beiträge zur Akustik und Musikwissenschaft (9 Hefte) Heft I, Leipzig 1898, Heft IX, 1924.

— Struktur der Vokale. Berlin 1918.

— Die Anfänge der Musik. Leipzig 1911.

Stumpf u. Schaefer, Tontabellen (Stumpf, Beiträge zur Akustik u. Musikwissenschaft, Heft III, Leipzig 1901).

Tanaka, Shohé, Studien im Gebiete der reinen Stimmung. 1890.

Töpfer-Allihn, Die Theorie und Praxis des Orgelbaues. Weimar 1888.

Tyndall, Der Schall. 3. Aufl. Braunschweig 1897.

Wachsmuth, Labialpfeifen und Lamellentöne (Ann. d. Physik Bd. 14). 1904.

Weber, Ernst Heinrich u. Wilhelm, Wellenlehre. Leipzig 1825.

Weber, Max, Die rationalen und soziologischen Grundlagen der Musik. München 1921.

Zamminer, Die Musik und die musikalischen Instrumente. Gießen 1855.

Zellner, Vorträge über Akustik, 2 Bände. Wien und Leipzig 1892.

Absorption 41. 43. Anm. 10.
Akkomodationsfähigkeit des Ohres 35.
Akkorde 108.
Akustik der Gebäude 39—46.
Akustische Linse 110.
Aliquottöne 16.
Amplitude 9. 85.
Analyse d. Klänge durch Resonanz 38. 50.
— durch Interferenz 77. 79.
Analysierfähigkeit des Ohres 49 ff.
Auerbach 45. 114.
Aufsatz 65.
Aufsatzbogen 74.
Außenton 90.

Bach, Joh. Seb. 33.
— C. Ph. E. 33.
Basilarmembran 49.
Beugung 13. 43. 110.
Biehle 46. 116.
Blechblasinstrumente 72. 84.
Bohrung, kegelförmig, zylindrisch 71.
Bosanquet 34.
Brechung 13. 45. 110.

Charakterstimmen 67.
Chladni 63. 81. 116.
Chladnische Klangfiguren 81.
Chronographische Auflösung 15.
Cortisches Organ 49. 51.

Dämpfung 37. 41. 51.
Diesis, große, kleine 30.
Differenzton 92 ff.
Diskordanz 107.
Diskorde 108.
Dissonanz u. Konsonanz 98 ff.
Distanzprinzip 20.
Doppler 110.
Dreiklangsleiter 20 ff.
Dualistische Theorien 101 ff.

Echo 40 ff.
Einfache Schwingung 15.
Einsatzbogen 74.
Eitz 25. 111. 116.
Elongation 9.
Energie der Schwingungsbewegung 9.
Engel 111.
Enharmonische Verwechslung 33.
Euler 34.

Fagott 71. 84.
Flageolett 54. 112.
Flöten 63.
Flötenregister 68.
Formant 76.
Formantregion 76.
Fortpflanzungsgeschwindigkeit d. Schalles 13.
Fourier 18. 51. 79.
Freiheitsgrade 8.
Frequenz 10.
Füllstimmen 68.

Galtonpfeife 113.
Geschwindigkeitsgesetz 16.
Gitarre 112.
Glocken 82. 90. 114.
Griechische Systeme 22.

Hallström 94.
Harfe 112.
Harmonische Obertonreihe 16 ff.
Harmonium 66. 91.
Hauptmann 114.
Helmholtz 34. 38. 50. 51. 56. 66. 71. 72. 76. 79. 83. 87. 89. 90. 93. 96. 99 ff. 116.
Helmholtz, Dissonanz und Konsonanz 99.
Helmholtzsche Resonanzhypothese 49.
Hermann 78. 79.
Holzblasinstrumente 70.
Holzplatten 37.
Horn 73.
Hörsamkeit 39—46.
Hörzellen 52.

Instrumente reiner Stimmung 34.
Intensität 9. 38. 39. 85. 86.
Interferenz 13. 45. 88.
Interferenzapparat 79, 80.
Interferenzmethode 79. 80.
Intervalle, konsonante 104. 107.
— musikalische 115.
Intervallumkehrung 110.
Intervallverhältnisse, Rechnen mit 110.
Intonationsfreiheit 35.

Jalousieschweller (Orgel) 70.
Janko 34.
Javanisches Tonsystem 20.

Kehlkopf 74—76.
Kepler 33.
Kirchenglocken 82.
Kirnberger 33.
Klang 15.
Klanganalyse (durch Resonanz) 38.
Klangfarbe 15 ff.
Klangfarbe (Zusammenfassung) 83. 84.
Klangvertretung 101 ff.
Klangverwandtschaft 100.
Klarinette 70. 113.
Klavier 55. 56. 84.

Kombinationstöne 92 ff.
— Anwendung 96. 97.
— subj., obj. 97.
Komma, pythagoreisches 24; syntonisches 26.
Konkordanz 107.
Konkorde 108.
Konsonanten 77.
Konsonanzprinzip 20.
Konsonanz u. Dissonanz 98 ff.
Kugelwellen 112.
Kundt (Staubröhre) 113.

Laute 112.
Leibniz 85. 98.
Leiterbildung 19 ff.
Leiter, natürlich-harmonische 20.
— pythagoreische 22 ff.
— siamesische, javanische 20.
— temperierte 30 ff.
Lippenpfeifen 59. 67.
Lipps 99.
Lissajoux Fig. 37.
Lutz, P. 113. 117.

Mandoline 112.
Maulweite 62.
Membrane 83.
Mensur 67, 72.
Mercator 34.
Mersenne 111.
Michel 42. 43. 46. 117.
Mitschwingen 36—38.
Mitteltönige Temperatur 31.
Mixturen 68.
Monochord 22.
Müller, Joh. 75.
Mundharmonika 65.
Musikalische Akustik 7.
Musikalische Töne 15.

Nachhall 40 ff.
Nachhalldauer 112.
Naturhorn 73.
Natürlich-harmonisches Tonsystem 20.
Naturtöne 61. 63. 72.
Naturtrompete 73.
Nebentöne 16.
Neidhardt 31.

Oberklang 103.
Oberton 16 ff. 54. 83. 84. 100—103.
Obertonreihe 16.
Oboe 71. 84.
Oettingen, v. 102. 103.
Ohm 18.
Ohr 47 ff.
— Akkomodationsfähigkeit des 35.
— Analysierfähigkeit des 49 ff.
Ohrenklingen 51.
Orgel 65. 67 ff. 91. 97. 113.

Partialton 16.
Partielle reine Stimmung 30 ff.
Pauke 83.
Periode 10.
Pfeife, gedackte 61, (Orgel) 68.
— offene 60. 61. 68.
Pfeifenlänge, reduzierte 62. 112.
Phase 10. 51.
Phasendifferenz 10. 51. 99.
Phasenverschiebung 10. 51. 99.
Phonika 102. 103.
Phonizität 102.
Physikalische Akustik 6.
Physikalische Tonreihe 11.
Physiologische Akustik 6.
Physiologische Tonreihe 11.
Planck 30.
Platten, gerade, gebogene (Glocken) 81. 82.
Posaune 73.
Posthorn 73.
Prinzipalstimmen 67.
Psychologische Akustik 6.
Pythagoras 22.
Pythagoreisches Komma 24. 31.
Pythagoreisches Tonsystem 22 ff.

Rameau 114.
Rauhigkeit 87.
Rauhigkeitsgrenze 87.
Raumakustik 39—46.
Rayleigh 91. 117.
Resonanz 36 ff. 43. 44. 50. 51. 66.
— allg., auswählende, singuläre, bestimmte, unbestimmte 37. 44.
— multiple 111.
Resonanzbereich 53. 89.
Resonanzkörper, -boden, -kästen 58. 66.
Reflexion 14. 39. 40.
Register 67.
— der menschl. Stimme 76.
Reine Stimmung 34. 35.
Resonatoren 38.
Resultierende 17.
Riemann 102. 117.
Rohrflöte 69.
Rollschweller (Orgel) 70.
Rückwürfe 39.
Ruhelage 9.

Sabine 46. 111. 117.
Saiten 53, geschlagen, gehämmert, gerissen, gezupft 55; gestrichene 57.
Saitenspannung 53.
Sarrusophon 113.
Saxophon 113.
Schaefer, K. L. 96. 113. 117.
Schalen 82.
Schallbecher 65.
Schallerreger 8.
Schallschatten 110.
Schallstreuung 43.
Schalltücher 41.
Schisma 111.
Schismatische Verwechslung 111.
Schlick 31.
Schneidenton 62. 112.
Schütz 30.
Schwebungen 51. 83. 87. 99.
— Anwendung 90. 91.

Schwebungen, optische Methode der Sichtbarmachung Fig. 40.
Schwebungskurve, Aufzeichnung 88 und Fig. 39.
Schwebungston 89.
Schwellenwert 38.
Schwingung, allg. 8, transversal u. longitudinal 12.
— einfache Sinusschwingung 15.
— freie und erzwungene 36.
Schwingungsdauer 10.
Schwingungsform 15. 54.
Schwingungskurve 16.
Schwingungszahl 10.
Seiffert, A. 59.
Siamesisches Tonsystem 20.
Signalhorn 73.
Sinusschwingung 15.
Sonreck 64. 65.
Sorge 92.
Stäbe, allg., gekrümmte, gerade 80.
Stabharmonika 80.
Stärke des Schalles 9. 39. 85. 86.
Stehende Welle 14.
Stimmerzeugung 74 ff.
Stimmgabeln 81. 88.
Stimmkrücke 113.
Stimmstock 58.
Stimmung, reine 34. 35.
Stimmzug 63.
Stopfen 73.
Stötzel 74.
Streicher (Orgel) 67.
Stumpf 20. 76. 79. 85. 87. 93. 98. 103. 104 ff. 117.
Subjektive Tonempfindung 51.
Summationston 93. 94.
Superposition 14. 54.
Synchronismus 36.
Synthese der Instrumentenklänge 80.
— der Vokale 79.
Syntonisches Komma 26. 31.

Tanaka 111. 117.
Tartini 92. 114.
Temperaturen 30 ff.
— 12 stufige, gleichschwebende 31 ff.
— mitteltönige 31.
— 53 stufige, 41 stufige 34.
— 347 stufige 34.
Temperaturwölfe 31.
Theorie des Hörens 50. 89.
Timbre 15.
Tonbildung in Lippenpfeifen 62.
Tonempfindung, Zustandekommen einer 52.
Tonfarbe 84. 114.
Tongewebe (harmonisches) 26. 27.
Tonhöhe 10.
Tonika 102.
Tonizität 102.
Tonstärke 9. 38. 39. 85. 86.
Tonsysteme 19 ff.
Tonverwandtschaft 105.
Transponierbarkeit 32.
Transponiermechanismus 35.
Transversale Schwingung 12.
Tremoloregister 69.
Triangel 81.
Trommelfell 47.
Trompete 73.

Überblasen 61.
Unterklang 103.

Ventilposaune 73.
Verdichtung, Verdünnung 12.
Verschmelzungstheorie 104 ff. 115.
Verwandtschaft 100, 105.
Verwandtschaftsarten 105.
Vibrationsmikroskop Fig. 37.
Vogler 97.
Vokalanalyse 76 ff.
Vokale 74 ff.
— geflüsterte 77.
Vox humana 69.

Wachsmuth 62. 64. 113. 117.
Watson Fig. 11.
Welle, longitudinal, transversal 12.
— fortschreitende 12. 88.
— stehende 14.
Wellenberg, -tal, -länge 13.
Wellenflächen 112.
Wellenform 15. 17.
Werkmeister 31.
Widerhall 40.

Xylophon 80.

Young 93. 95.

Zamminer 64.
Zarlino 22. 111. 114.
Ziehharmonika 65.
Zither 112.
Zugposaune 73.
Zungen, aufschlagende, durchschlagende 66.
— harte 65.
— weiche 70.
Zungenpfeifen 65. 113.
Zwischenton 90.
Zylindrische Bohrung 71.

Druck von Breitkopf & Härtel in Leipzig.

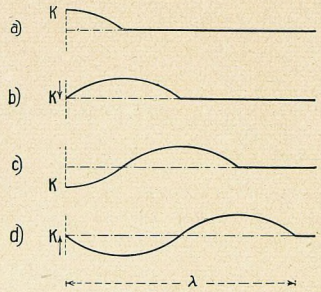


Fig. 1.

Entstehung der Sinuswelle vom Ende K aus.
a zeigt $^1/_4$, b $^1/_2$ und c $^3/_4$ der entstehenden Welle, die in d vollständig ausgebildet ist.

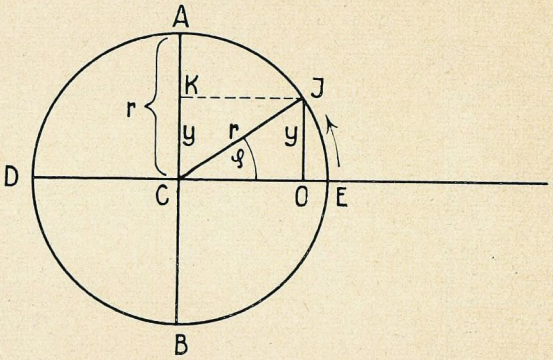


Fig. 2.

Auf der Peripherie des um den Punkt C mit der Amplitude r beschriebenen Kreises bewege sich gleichförmig ein Punkt. Für einen auf der Verlängerung von DE in größerer Entfernung Beobachtenden ist die Kreisfläche nicht sichtbar, er erkennt die Bewegung des die Peripherie des Kreises umlaufenden Punktes nur als auf- und absteigende Schwingung, die den Gesetzen der Pendelschwingung gehorcht. Auf dem Durchmesser AB kann ein Punkt angenommen werden, der zwischen A und B pendelt und immer die gleiche Entfernung von dem auf AB senkrechten Durchmesser DE hat wie der auf der Peripherie des Kreises sich bewegende Punkt. Die Elongationen der beiden Punkte sind also stets gleich; so ist z. B. CK, ebenso wie EJ, gleich y.

$$\sin \varphi = \frac{y}{r}, \text{ folglich } y = r \cdot \sin \varphi.$$

Der Winkel φ (Phasenwinkel) ist durch die Zeit ersetzbar, ihm entspricht die Zeit t, die der auf der Kreisbahn sich bewegende Punkt gebraucht hat, um von E nach J zu gelangen; dem Winkel 360° (= 2π) entspricht die zum vollständigen Umlauf nötige Zeit T (denn sie ist ja gleich der zur ganzen Schwingung des auf dem Durchmesser AB pendelnden Punktes gebrauchten Zeit, der Schwingungsdauer T).

$$\text{Also } \frac{t}{T} = \frac{\varphi}{2\pi}$$

$$\varphi = 2\pi \frac{t}{T} \text{ eingesetzt in } y = r \cdot \sin \varphi$$

$$\text{gibt } y = r \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

Die Elongation ist also proportional dem Sinus der Zeit.



Fig. 3



Fig. 4

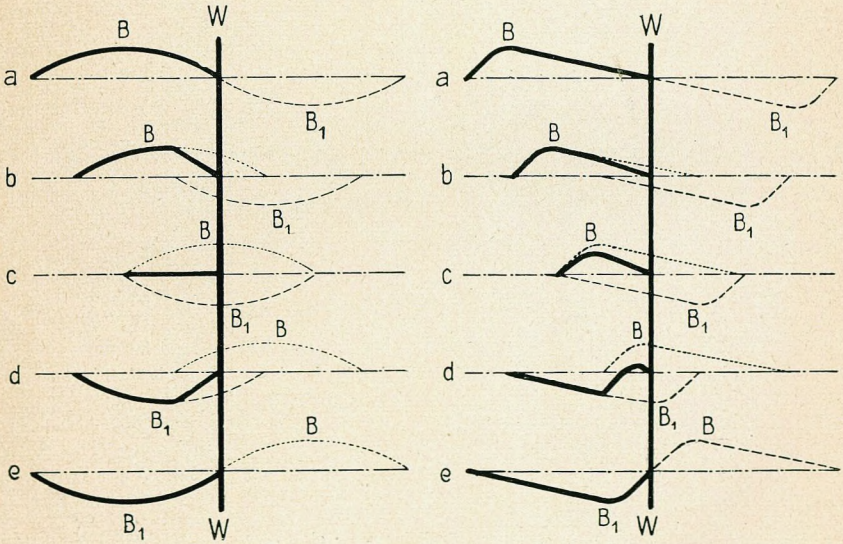


Fig. 5

Die an der Wand W eintreffenden transversalen Bewegungen des Seiles bewirken am Befestigungspunkt elastische Reaktionskräfte, die entgegengesetzte, gleich große Bewegungen in das Seil zurückschicken. Die Reflexion geht so vor sich, als ob für die in die Wand hineingeschickte Verbiegung B eine ihr genau entsprechende, nur umgekehrte Verbiegung B_1 aus der Wand herauskäme, so daß ehe die (in a beginnende) Reflexion (in e) vollendet ist, Superpositionen (b, c, d) eintreten.

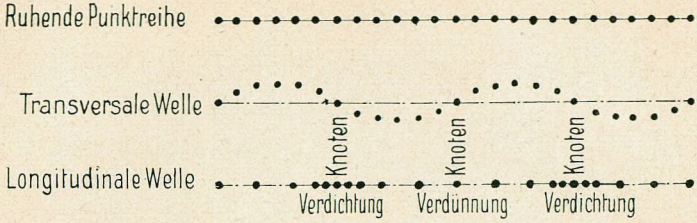


Fig. 6

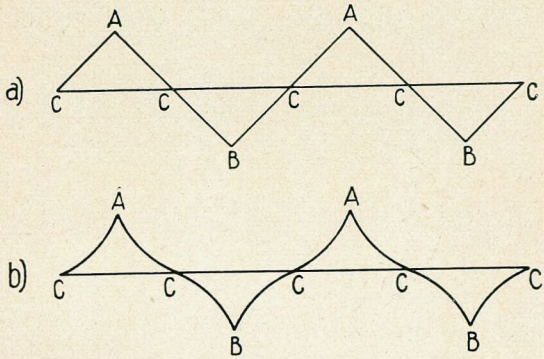


Fig. 7

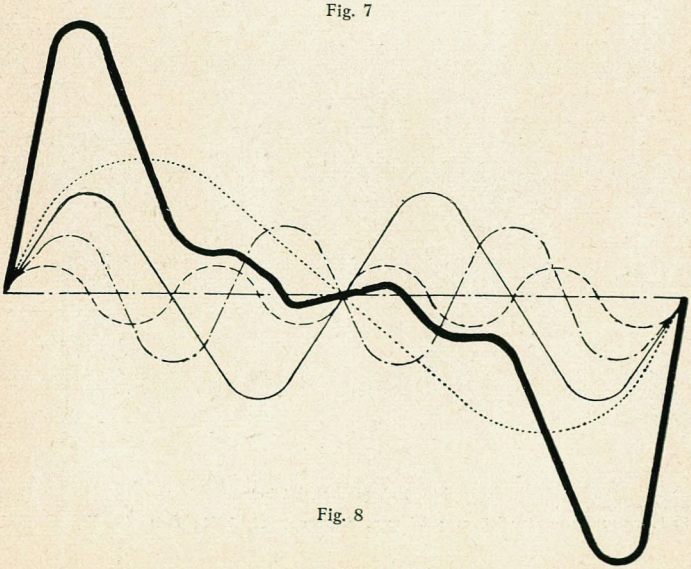


Fig. 8

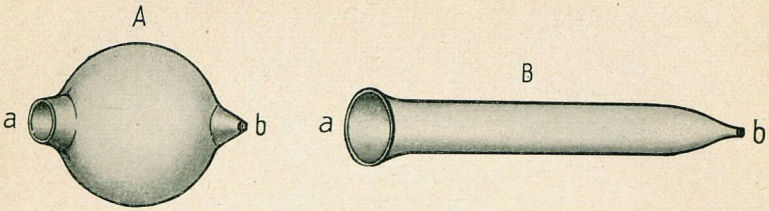


Fig. 9

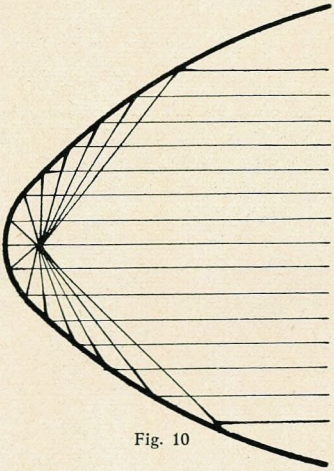


Fig. 10

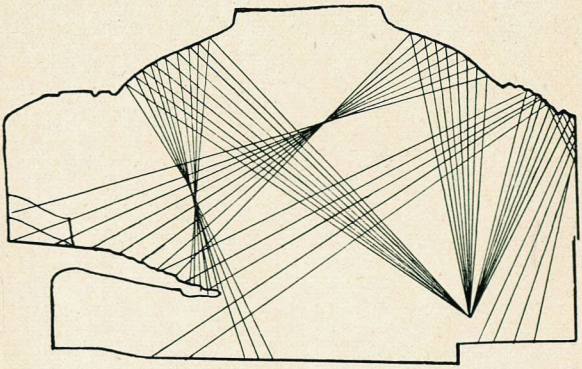
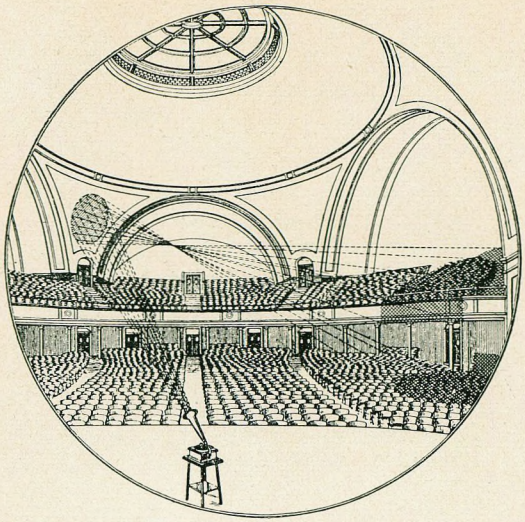


Fig. 11 A (aus E. Michel *)

*) Hörsamkeit großer Räume; Vieweg, Braunschweig 1921; Seite 45, Fig. 79 und 80.



Neuerdings von Watson für das Auditorium der Universität Illinois durchgeführt.
(University of Illinois Bulletin Nr. 73.)

Fig. 11 B (aus E. Michel)

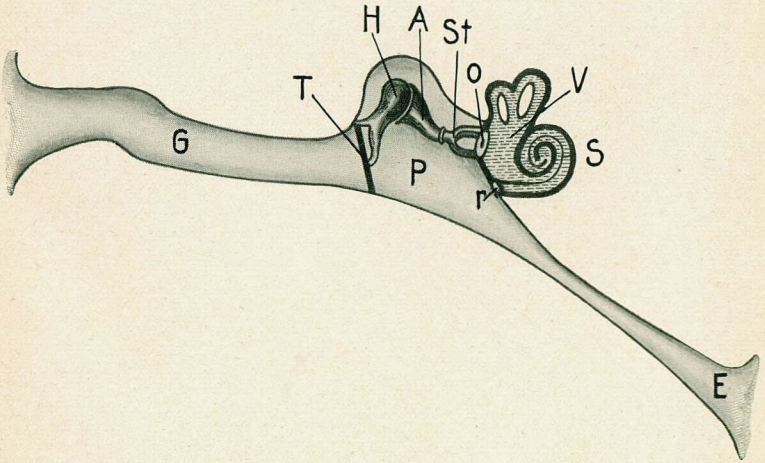


Fig. 12

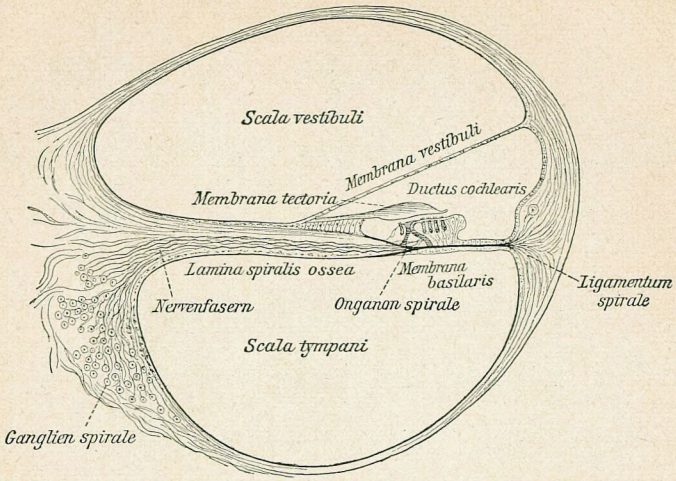


Fig. 13 (siehe Winkelmann, Handbuch der Physik, Band II (J. A. Barth, Leipzig 1909, Fig. 344, Seite 664).

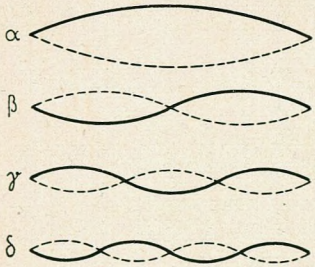


Fig. 14

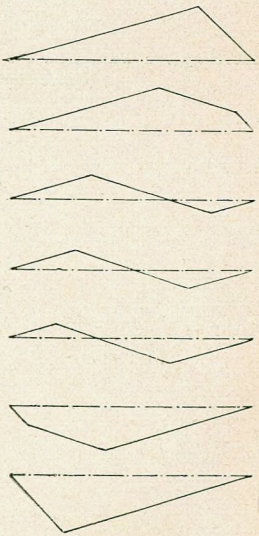


Fig. 15

Fig. 15 zeigt die Schwingungsformen einer Saite, die durch einen Metallstift in die erstgezeichnete Lage gebracht und dann sich selbst überlassen bleibt. Sie nimmt nacheinander die dargestellten Formen an, bis sie nach der halben Schwingungsdauer $\frac{T}{2}$ die letztgezeichnete einnimmt. Bis zur Vollendung der ganzen Schwingungsdauer (T) nimmt die Saite die dargestellten Formen in umgekehrter Reihenfolge an.

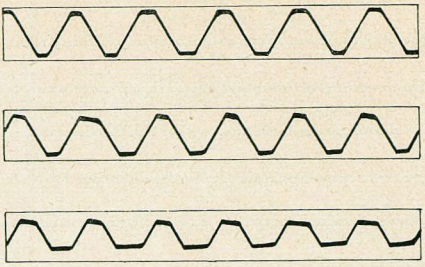


Fig. 16

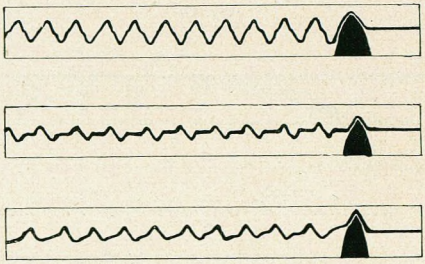


Fig. 17

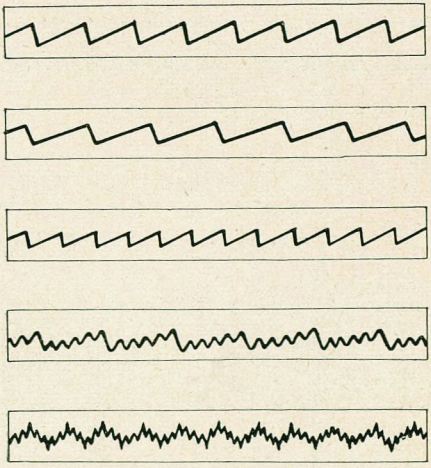


Fig. 18

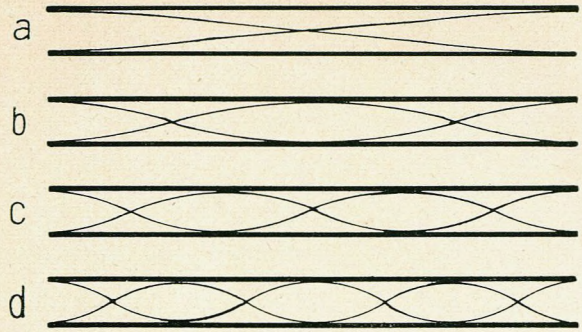


Fig. 19

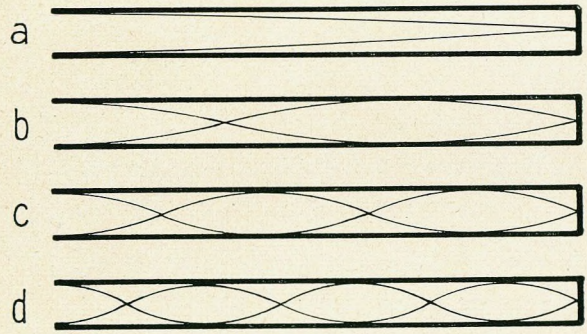


Fig. 20

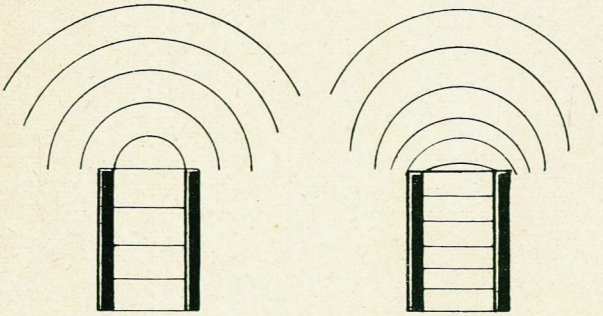


Fig. 21

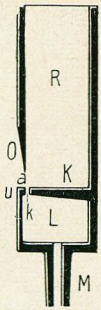


Fig. 22

M Mundstück
L Luftkammer
K Kern
k Kernspalte
u Unterlippe
a Maul, Aufschnitt
O Oberlippe mit der spitzen Schneide oder Schärfe
R Pfeifenrohr oder Resonanzkörper

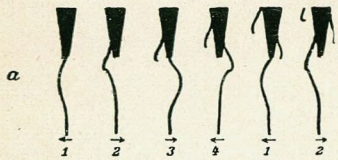


Fig. 23

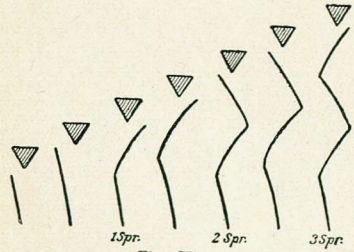


Fig. 25

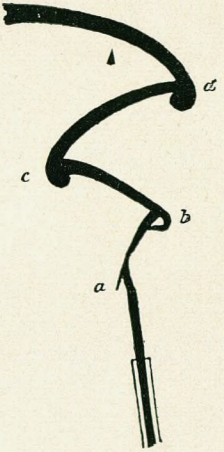


Fig. 24



Fig. 26



Fig. 27

Figur 23 bis 27 siehe Winkelmann, Handbuch der Physik, Band II (Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1909), Seite 442 u. 443

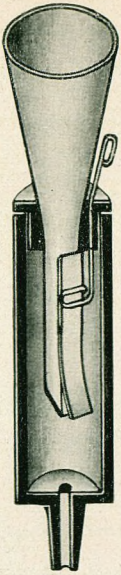


Fig. 28

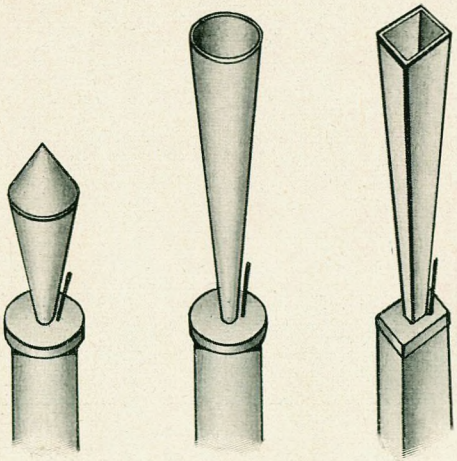


Fig. 29

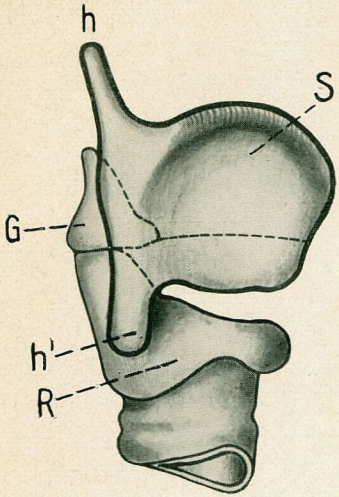


Fig. 30

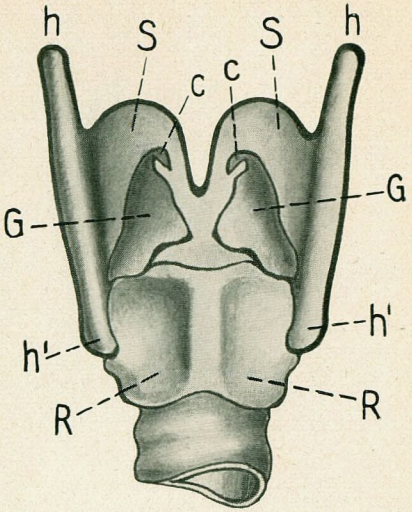


Fig. 31

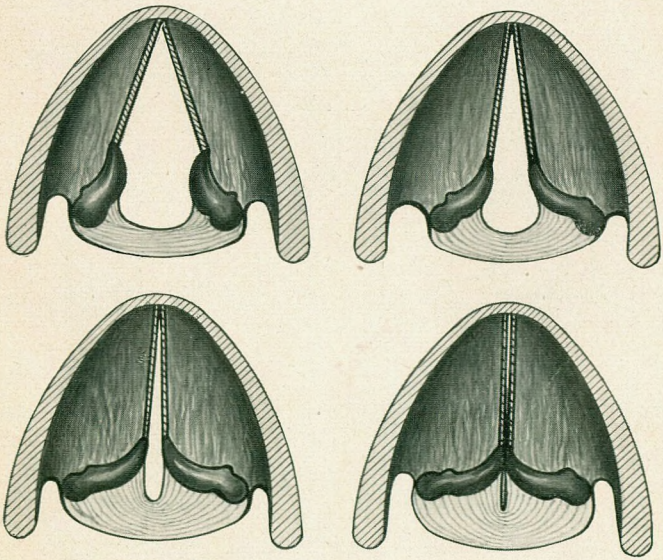


Fig. 32

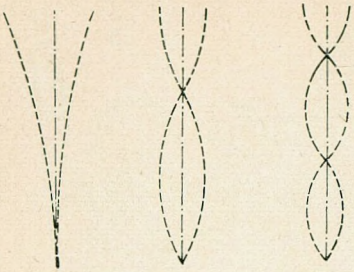


Fig. 33

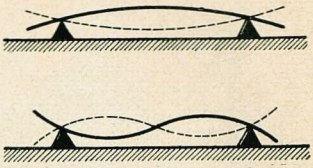


Fig. 34

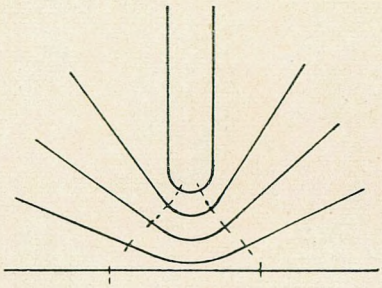


Fig. 35

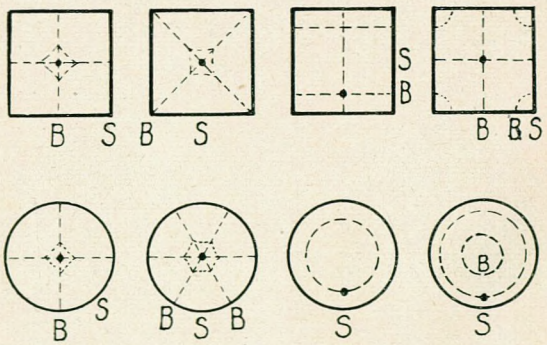


Fig. 36

• Befestigungsstelle B Berührungsstelle S Streichstelle

Die genaueste Methode, die Übereinstimmung zweier Stimmgabeln zu prüfen, wurde von Lissajous angegeben. Die Stimmgabeln G_1 und G_2 werden so aufgestellt, daß sie in zueinander senkrechten Ebenen schwingen. Der von O kommende Lichtstrahl trifft auf S_1 und wird von dort zum Spiegelchen S_2 und weiter zur Wand W geworfen. Schwingt nur G_1, so ist ein vertikaler, schwingt nur G_2, so ist ein horizontaler Strich an der Wand sichtbar. Schwingen beide, so durchläuft der Lichtpunkt eine Figur, die den superponierten Bewegungen der beiden Gabeln entspricht. Diese Figur bleibt konstant, wenn die Schwingungszahl der Gabeln genau die gleiche ist. Abhängig ist die Form der Figur nur von der Phasendifferenz φ und zwar entsteht bei $\varphi = 0^0$ oder 180^0 eine Gerade, bei $\varphi = 90^0$ oder 270^0 ein Kreis und in allen Zwischenstadien eine Ellipse. Bei nicht genau übereinstimmender Schwingungszahl muß sich die Phasendifferenz, also auch die Form der Figur ändern, so daß nacheinander die in der Figur (a beim Verhältnis 1 : 1; b beim Verhältnis 1 : 2) gegebenen Kurven ineinander übergehen. Auf demselben Prinzip beruht das Helmholtzsche Vibrationsmikroskop.

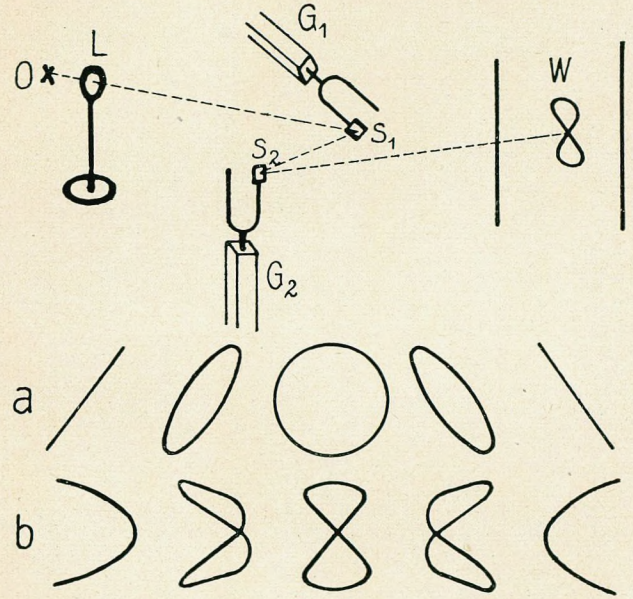


Fig. 37

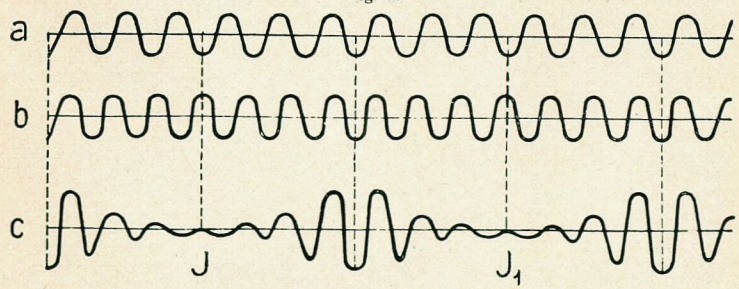


Fig. 38

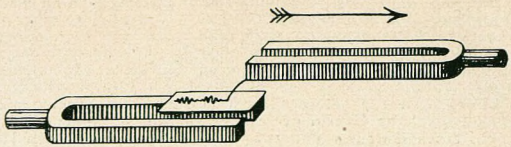


Fig. 39

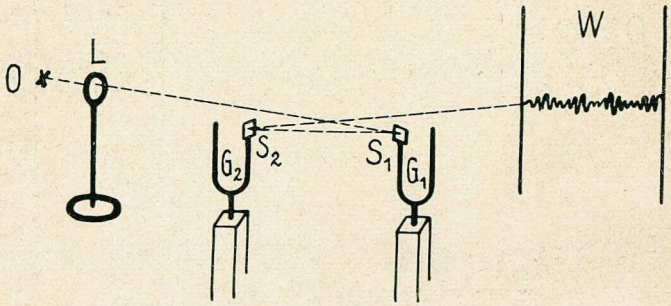


Fig. 40

Die in einer Ebene schwingenden Stimmgabeln G_1 und G_2 sind so aufgestellt, daß der von der Lichtquelle O kommende Lichtstrahl durch die Linse L auf den Spiegel S_1 der Stimmgabel G_1 und von diesem auf den Spiegel S_2 der Gabel G_2 und von hier nach einer Wand W reflektiert wird. Schwingt nur eine der beiden Gabeln, so durchläuft der sonst punktförmige Lichtfleck eine vertikale Linie, beim schnellen Drehen einer der beiden Stimmgabeln um ihre Achse eine Sinuskurve. Schwingen beide, und dreht man dabei die eine Gabel rasch, so erscheint die Schwebungskurve als Bild der superponierten Bewegung

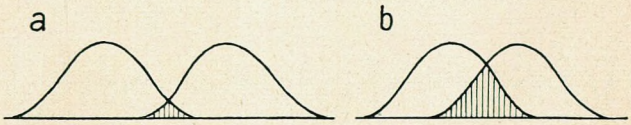
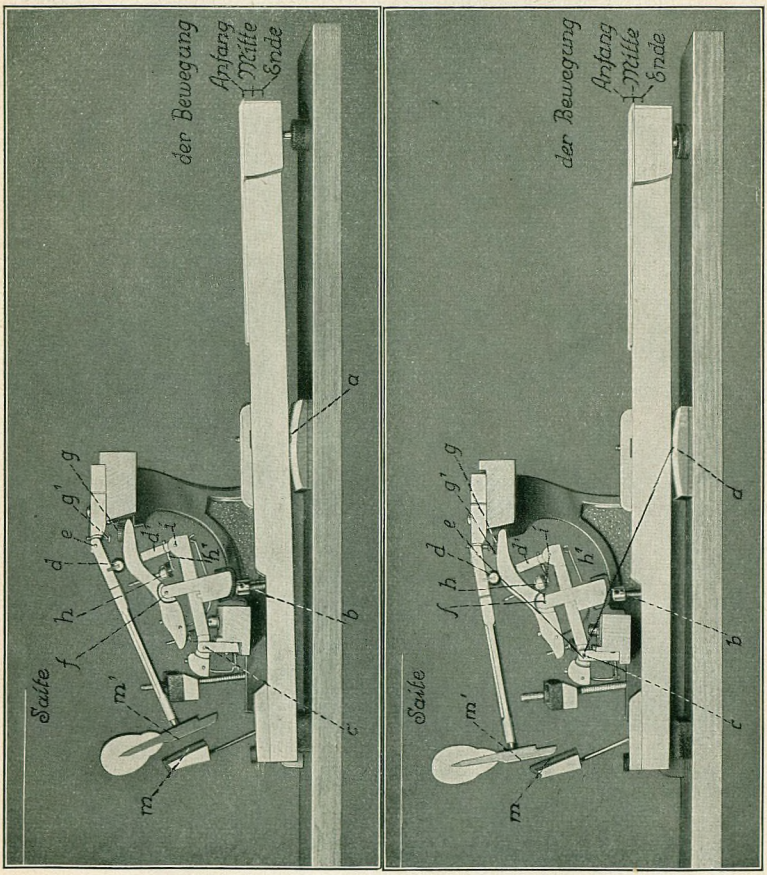


Fig. 41

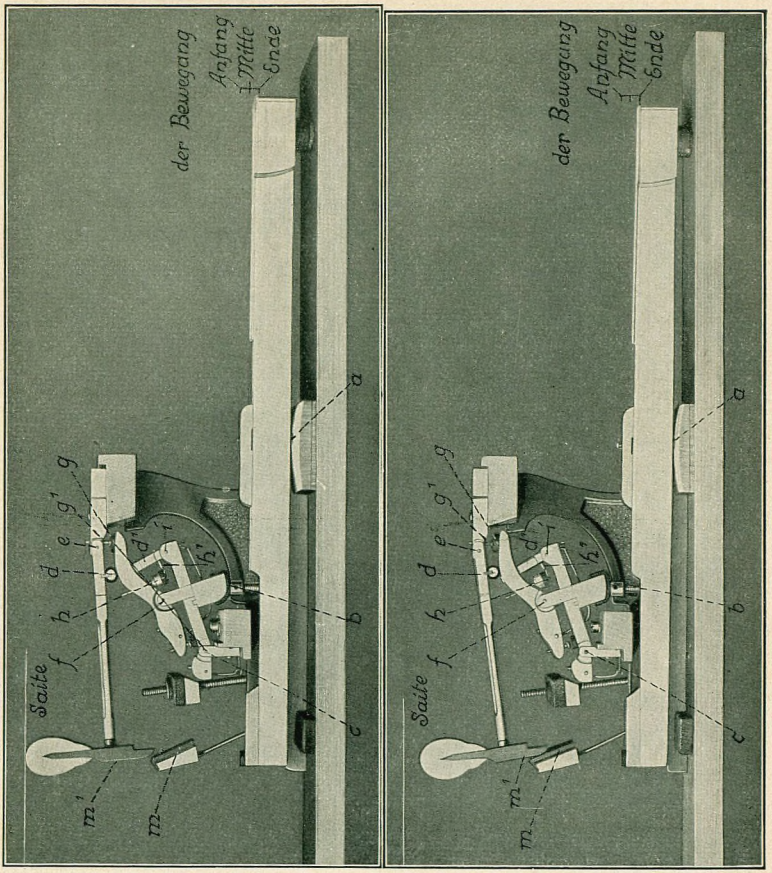
Eine Klaviermechanik, die den praktischen Anforderungen [Kürze der Berührungsdauer, Minimum der inneren Reibung, geeignete Materialelastizität, weglich geringe Auslösungstätigkeit innerhalb des Gesamtganges und Kürze des zum erneuten Anschlag (Repetition) nach dem vollständigen Niedergang der Taste nötigen Tastenweges] genügt, ist die hier in vier Bewegungsphasen dargestellte (Schröther'sche) Repetitionsmechanik:



α Fig. 42 β

Zu α) Spielwerk in Ruhe.

Zu β) Durch Druck auf die Taste dreht sich der Tastenhebel um a, dessen Pilote b (Stellschraube) den um die feste Achse bei c beweglichen mittleren Teil des Spielwerks hebt. Gleichzeitig wird auch der Filzhammerstiel durch das mittlere Spielwerk gehoben, das bei d durch den (in seinem oberen Teil nicht sichtbaren) Stößer d_1 den um die feste Achse e drehbaren Filzhammerstiel angreift. Durch weiteren Druck auf die Taste hebt sich das mittlere Spielwerk weiter, so daß sich das Polster g, das sich auf der um f befindlichen Brücke B befindet, der Stellschraube g_1 (Abnickschraube) nähert und mit dieser — wie Fig. γ zeigt — zusammenkommt.



γ Fig. 42 δ

Das zum Anschlag nötige Spielwerk (die sogen. „Mechanik") zerfällt in den Tastenhebel, den Filzhammer mit Stiel und das zwischen Filzhammerstiel und Tastenhebel befindliche sogen. mittlere Spielwerk.

Zu γ) Die Stellschraube g_1 drückt auf das Polster g und somit auf die Brücke B und dieser Druck veranlaßt, daß die Puppe h auf den Löffel h_1 des Stößers d_1 wirkt und sich so der Stößer d_1 (im Bilde) nach links bewegt (in Fig. δ ist das obere Ende des Stößers d_1 auch sichtbar).

Zu δ) Dadurch liegt der Filzhammerstiel bei d nicht mehr auf dem Stößer d_1 auf, der Filzhammerstiel wird also frei und der Filzhammerkopf berührt nicht mehr — wie in Fig. γ — die Saite. Wird die Saite durch den Filzhammerkopf beim Anschlag nach oben ausgebogen, so wird der Hammer durch eine der Größe der Ausbiegung proportionalen Kraft zurückgeworfen, der Filzhammer fällt aber auch schon durch seine eigene Schwere; abgefangen wird er bei m_1 durch den Fänger m, der fest mit dem Tastenhebel verbunden ist und sich mit dem links von a befindlichen Teil des Tastenhebels hebt.

[Die Figuren (außer 11, 13, 23 bis 27, 42) wurden von stud. ing. Karl Wolff, Berlin, gezeichnet.]

JEDERMANNS BÜCHEREI

ÜBERSICHT

RELIGIONSWISSENSCHAFT · PHILOSOPHIE
ERZIEHUNGSWESEN · GESCHICHTE . RECHTS- UND
STAATSWISSENSCHAFT · SOZIALWISSENSCHAFT
WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFT · LITERATUR-
GESCHICHTE · BILDENDE KUNST · MUSIK · ERDKUNDE
VÖLKERKUNDE · LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT
NATURWISSENSCHAFT · MEDIZIN · MATHEMATIK
TECHNIK

Jedermanns Bücherei wird, in 16 Abteilungen gegliedert, eine Gesamtdarstellung unseres Wissens, mit bewußter Beschränkung auf das Wesentliche, bringen.

Jedermanns Bücherei will nicht Bruchstücke aus verschiedenen Forschungsgebieten behandeln, sondern die Ergebnisse der Einzelforschungen in literarisch hochstehender Form zusammenfassen.

Jedermanns Bücherei zählt nur Sonderkenner jedes Faches zu Mitarbeitern; einheitliche Redaktionsführung jeder Abteilung bürgt für eine in bestem Sinne gemeinverständliche Darbietungsweise jedes Bandes.

Jedermanns Bücherei wird jedem die Möglichkeit bieten, nach und nach eine vollständige Darstellung seines Arbeits- oder Beschäftigungsgebietes zu erwerben. Mit Hilfe systematischer Gliederung, entwickelnder Behandlung, sowie länder- und volkskundlicher Einteilung werden alle Wissenszweige in den auf wissenschaftlicher Grundlage möglichen Formen erschlossen.

Jedermanns Bücherei soll dem Studierenden wie dem Lehrer ein zuverlässiges Hilfsmittel werden. Sie wird Bibliotheken jeder Art unentbehrlich sein.

Jedermanns Bücherei wendet sich an alle bildungsuchenden Teile unseres Volkes, sie trägt die Wissenschaft in jedes Haus, wo ein Strebender wohnt.

JEDERMANNS BÜCHEREI

Abteilung Erdkunde

Allgemeine Erdkunde

Herausgegeben von Professor **Dr. Rud. Reinhard,** Leipzig

Die Gestalt der Erde und ihre Darstellung
Oberflächengestaltung
Die Vulkane
Morphologie
Allgemeine Meereskunde und maritime Meteorologie
Fluß- und Seenkunde
Klimatologie
Die Landschaftsgürtel der Erde
Pflanzen- und Tiergeographie
Anthropogeographie
Wirtschaftsgeographie
Verkehrsgeographie
Politische Erdkunde

Länderkunde

Herausgegeben von **Dr. Kurt Krause,** Leipzig

Deutschland (2 Bände)
Finnland, Estland und Lettland, Litauen
Osteuropa (2 Bände)
Nordische Länder
Holland, Belgien, Luxemburg, Schweiz
Frankreich
Die britischen Inseln
Donauländer (2 Bände)
Griechisches Mittelmeergebiet
Italien
Iberische Halbinsel
Asien (4 Bände)
Japan
Nordamerika
Südamerika
Australien und die Südseeinseln
Afrika (2 Bände)
Die Polarwelt

Erschienen sind:

Die Vulkane. *Von Dr. Alfred Bergeat †, o. Professor an der Universität Kiel. Herausgegeben von Dr. Karl Sapper, o. Professor an der Universität Würzburg.*

Die Landschaftsgürtel der Erde, Natur und Kultur. *Von Dr. Siegfried Passarge, o. Prof. an der Hamburgischen Universität.*

Geographie der Welthandelsgüter in 2 Bänden. *Von Professor Dr. W. Schmidt, Oldenfelde.*

Politische Erdkunde. *Von Dr. Arth. Dix, Hauptschriftleiter, Berlin. 2. Auflage.*

Finnland, Estland und Lettland, Litauen. *Von Dr. M. Friederichsen, o. Professor an der Universität Breslau.*

Osteuropa in 2 Bänden. *Von Dr. Walter Tuckermann, o. Prof. der Geographie an der Handelshochschule Mannheim.*

Frankreich. *Von Dr. Erwin Scheu, Professor a. d. Univ. Leipzig.*

Griechisches Mittelmeergebiet. *Von Dr. Otto Maull, Professor an der Universität Frankfurt a. M.*

Italien. *Von Dr. Georg Greim, o. Professor an der Technischen Hochschule in München.*

JEDERMANNS BÜCHEREI

Japan. *Von Geh. Studien-Rat Dr. F. W. Paul Lehmann. Leipzig.*
Südamerika. *Von Dr. B. Brandt, Professor an der Univ. Prag.*
Die Polarwelt. *Von Dr. Hans Rudolphi, Privatdozent an der Universität Leipzig.*

In Vorbereitung:

Morphologie. *Von Dr. Siegfried Passarge, o. Professor an der Hamburgischen Universität.*
Allgemeine Meereskunde und maritime Meteorologie. *Von Dr. G. Wüst, Assistent am Institut für Meereskunde Berlin.*
Donauländer in 2 Bänden: Staatenkunde — Landschaftskunde. *Von Dr. Hans Rudolphi, Privatdozent an der Universität Leipzig.*
Iberische Halbinsel (Spanien, Portugal). *Von Dr. Hans Praesent, Bibliothekar an der Deutschen Bücherei Leipzig.*
U. S. A. *Von Dr. Bruno Dietrich, Professor an der Technischen Hochschule, Breslau.*
Kanada. *Von Dr. Bruno Dietrich, Professor an der Technischen Hochschule, Breslau.*
Nord- und Westasien. *Von Dr. Arved Schultz, o. Professor an der Universität Königsberg i. P.*
Afrika in 2 Bänden. Das tropische Afrika und Ägypten — Das subtropische Südafrika. *Von Dr. Siegfried Passarge, o. Professor an der Hamburgischen Universität.*

Abteilung Völkerkunde

Herausgegeben von **Dr. Fritz Krause,** Professor a. d. Universität Leipzig, Direktor des Museums für Völkerkunde, und **Dr. Georg Thilenius,** o. Prof. an der Hamburgischen Universität, Direktor des Museums für Völkerkunde

A. Allgemeine Völkerkunde

Probleme der Völkerkunde | **Das Wirtschaftsleben der Völker**
Grundzüge der menschlichen Gesellschaft
Formen des religiösen Lebens | **Die Kunst primitiver Völker**

B. Spezielle Völkerkunde

Weltgeschichtliche Kulturvorgänge
Europa einschließlich Nordafrika und Vorderasien
Afrika
Süd- und Zentralasien
Ostasien: 1. China 2. Korea, Japan
Indo-Ozeanien
Australien
Nordvölker: Lappen und Sibirier
Die Naturvölker Nordamerikas
Die Naturvölker Südamerikas
Die alten Kulturen Mittelamerikas (Azteken, Maya)
Die alten Kulturen Südamerikas

Erschienen ist:

Das Wirtschaftsleben der Völker. *Von Dr. Fritz Krause, Professor an der Universität Leipzig, Direktor des Museums für Völkerkunde.*

JEDERMANNS BÜCHEREI

Abteilung Naturwissenschaft

Herausgegeben von Professor **Dr. Walther Schoenichen,** Direktor der Staatlichen Stelle für Naturdenkmalpflege in Preußen, Berlin-Schöneberg.

Erschienen sind:

Pflanzenleben der Vorzeit. *Von Dr. Walter Gothan, Professor an der Geologischen Landesanstalt, Berlin.*

Das Leben im Süßwasser. Eine Einführung in die biologischen Probleme der Limnologie. *Von Professor Dr. August Thienemann, Direktor der Hydrobiologischen Anstalt der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft in Plön.*

Die Vererbung. *Von Dr. Günther Just, Privatdozent an der Universität Greifswald.*

Abteilung Geschichte

Erschienen ist:

Nordische Geschichte. *Von Dr. Johannes Paul, Privatdozent an der Universität Greifswald.*

In Vorbereitung:

Reformation und Gegenreformation. *Von Dr. Johannes Paul, Privatdozent an der Universität Greifswald.*

Die französische Revolution. *Von Dr. Herzfeld, Privatdozent an der Universität Halle.*

Die Geschichte Frankreichs. *Von Dr. Reincke-Bloch, o. Professor an der Universität Breslau.*

Abteilung Literaturgeschichte

Hrsgeg. von **Dr. Paul Merker,** o. Prof. a. d. Universität Greifswald

Einführung in das Verständnis literarischer Kunstwerke
Deutsche Literatur bis 1880
(3 Bände):
I. Mittelalter.
II. Reformation, Barock, Aufklärung
III. Sturm und Drang, Klassizismus, Romantik, Realismus
Deutsche Literatur vom Naturalismus bis zur Gegenwart
Deutsches Theater
Deutsche Sprachgeschichte
Deutsche Stilistik
Dänische Literatur
Norwegische Literatur
Schwedische Literatur
Flämisch-Holländische Literatur
Englische Literatur
Amerikanische Literatur
Französische Literatur
Italienische Literatur
Spanische und portugiesische Literatur
Russische Literatur

JEDERMANNS BÜCHEREI

Polnische Literatur
Südslavische Literatur
Ungarische und finnische Literatur
Altgriechische Literatur
Byzantinische und Neugriechische Literatur
Römische Literatur

Mittel- und Neulateinische Literatur
Indische Literatur
Persische und Türkische Literatur
Altsemitische Literatur
Arabische Literatur
Japanische Literatur
Chinesische Literatur

Erschienen sind:

Deutsche Literatur vom Naturalismus bis zur Gegenwart. *Von Dr. Wolfg. Stammler, o. Prof. a. d. Universität Greifswald. 2. Aufl.*

Deutsches Theater. *Von Dr. Friedrich Michael in Leipzig.*

Schwedische Literatur. *Von Dr. Helmut de Boor, o. Professor an der Universität Leipzig.*

Norwegische Literatur. *Von Dr. Harald Beyer, Lektor in Bergen (Norwegen).*

Russische Literatur. *Von Dr. Alexander Brückner, o. Professor an der Universität Berlin.*

Polnische Literatur. *Von Dr. Alexander Brückner, o. Professor an der Universität Berlin.*

Chinesische Literatur. *Von Dr. Eduard Erkes, Privatdozent an der Universität Leipzig.*

In Vorbereitung:

Deutsche Literatur bis 1880. I. Mittelalter. II. Reformation, Barock, Aufklärung. III. Sturm und Drang, Klassizismus, Romantik, Realismus. *Von Dr. Paul Merker, o. Professor an der Universität Greifswald.*

Deutsche Sprachgeschichte. *Von Dr. Walther Ziesemer, o. Professor an der Universität Königsberg.*

Dänische Literatur. *Von Dr. Georg Daub, Studiendirektor in Gandersheim a. H.*

Französische Literatur. *Von Dr. Walther Küchler, o. Professor an der Universität Wien.*

Italienische Literatur. *Von Dr. Viktor Klemperer, o. Professor an der Polytechnischen Hochschule in Dresden.*

Spanische und Portugiesische Literatur. *Von Dr. A. Hämel, Professor an der Universität Würzburg.*

Ungarische Literatur. *Von o. Hochschulprofessor Dr. Joh. Kosco in Budapest.* **Finnische Literatur.** *Von Dr. Hans Grellmann a. d. Universität Greifswald.* (In einem Bande.)

Byzantinische und Neugriechische Literatur. *Von Dr. Karl Dieterich, Professor an der Universität Leipzig.*

JEDERMANNS BÜCHEREI

Abteilung Bildende Kunst

Herausgegeben von Geh. Regierungsrat **Dr. Wilhelm Waetzoldt**, o. Professor, Generaldirektor der Staatlichen Museen zu Berlin.

Systematische Kunstgeschichte

Methodik der Kunstbetrachtung | **Technik der Künste Ikonographie** | **Denkmalpflege Museumskunde**

Geschichte der Kunst

Kunst der Naturvölker
Sumerische und Akkadische Kunst
Volkskunst
Babylonische u. Assyrische Kunst
Chinesische Kunst
Japanische Kunst
Persische Kunst
Indische Kunst
Ägyptische Kunst
Griechische Kunst
Hellenistische Kunst
Römische Kunst
Arabische Kunst
Altchristliche Kunst
Italienische Kunst (4 Bände)
Spanische Kunst
Französische Kunst
Englische Kunst
Altamerikanische Kunst
Holländische Kunst
Belgische Kunst
Russische Kunst
Skandinavische Kunst
Kunst der Balkanvölker
Deutsche Kunst
Die Kunst der Gegenwart

Erschienen sind:

Museumskunde. *Von Professor Dr. Otto Homburger, Konservator am Badischen Landesmuseum in Karlsruhe.*

Sumerische und Akkadische Kunst. *Von Dr. Eckhard Unger, Professor an der Universität Berlin.*

Assyrische und Babylonische Kunst. *Von Dr. Eckhard Unger, Professor an der Universität Berlin.*

Chinesische Kunst. *Von Dr. Ludwig Bachhofer in München.*

Indische Kunst. *Von Dr. Otto Höver in München.*

Ägyptische Kunst. *Von Dr. Hermann A. J. Kees, Professor an der Universität in Göttingen.*

Römische Kunst. *Von Dr. Herbert Koch, Professor an der Universität Jena.*

Arabische Kunst. *Von Dr. Elisabeth Ahlenstiel-Engel in Berlin.*

Italienische Kunst vom 15. bis 18. Jahrhundert. 1. Band: Die Kunst der Frührenaissance in Mittelitalien. *Von Dr. Hans Kiener in München.*

Schwedische und Norwegische Kunst seit der Renaissance. *Von Dr. A. Dresdner, Professor an der Technischen Hochschule in Berlin.*

Französische Maler des 19. Jahrhunderts. *Von Dr. Emil Waldmann, Direktor der Städtischen Kunsthalle, Bremen.*

Die englische Malerei. *Von Dr. Emil Waldmann, Direktor der Kunsthalle, Bremen.*

JEDERMANNS BÜCHEREI

In Vorbereitung:

Kunst der Naturvölker. *Von Dr. Otto Höver in München.*

Hellenistische Kunst. *Von Dr. Martin Schede, Kustos an den staatlichen Museen in Berlin.*

Italienische Kunst bis zur Renaissance. *In 2 Bänden. I. Band: Die altchristliche Kunst (von der Antike bis zum Mittelalter). II. Band: Die mittelalterliche Kunst in Italien (bis zur Frührenaissance). Von Dr. Hans Hildebrandt, Prof. a. d. Technischen Hochschule in Stuttgart.*

Italienische Kunst vom 15. bis 18. Jahrhundert. 2. und 3. Band. *Von Dr. Hans Kiener in München.*

Spanische Kunst. *Von Dr. Alfred Kuhn, Berlin.*

Altamerikanische Kunst. *Von Dr. Kurt Gerstenberg, Professor an der Universität Halle.*

Abteilung Musik

Herausgegeben von Prof. **Dr. Johannes Wolf,** Honorarprofessor an der Universität Berlin, Vorsteher der alten Musik-Sammlung der Preußischen Staatsbibliothek Berlin

1. Systematische Abteilung

Einführung i. d. Musikwissenschaft
Akustik
Musikpsychologie
Musikästhetik
Musikpolitik (Soziale und politische Bedeutung der Musik)

II. Historische Abteilung

Die Tonschriften
Musikinstrumente
Geschichte der Musiktheorie
Musik der Naturvölker
Musik des Altertums
Musik der germanischen Völker (3 Bände)
I. Bis zum Ende des 16. Jahrhunderts
II. Im 17. und 18. Jahrhundert
III. Im 19. und 20. Jahrhundert
Musik in England
Musik der romanischen Völker (3 Bände)
I. Musik in Frankreich
II. Musik in Italien
III. Musik in Spanien und Portugal
Musik der slavischen Völker
Byzantinische Musik
Musik des Orients
Das deutsche Volkslied
Kirchenmusik

Erschienen sind:

Akustik. *Von Dr. Erich Schumann in Charlottenburg.*

Die Tonschriften. *Von Professor Dr. Johannes Wolf, Honorarprofessor an der Universität Berlin.*

Die Musikinstrumente. *Von Professor Dr. Curt Sachs in Berlin.*

Musik des Altertums. *Von Professor Dr. Curt Sachs in Berlin.*

Musik der germanischen Völker im 19. und 20. Jahrhundert. *Von Dr. Hans Schnoor in Leipzig.*

Musik in Frankreich. *Von Professor Dr. Th. W. Werner i. Hannover.*

Byzantinische Musik. *Von Dr. Egon Wellesz, Privatdozent an der Universität in Wien.*

JEDERMANNS BÜCHEREI

In Vorbereitung:

Musik der Naturvölker. *Von Professor Dr. Erich von Hornbostel in Berlin.*

Musik der germanischen Völker bis zum Ende des 16. Jahrhunderts. *Von Professor Dr. Johannes Wolf, Honorarprofessor an der Universität Berlin.*

Musik des Orients. *Von Dr. Robert Lachmann, Berlin.*

Das deutsche Volkslied. *Von Dr. phil. Kurt Rotter, Bibliothekar an der Hochschule und Akademie für Musik und darstellende Kunst in Wien.*

Abteilung Philosophie

Herausgegeben von **Dr. Ernst Bergmann,**
Professor an der Universität Leipzig

Systematische Philosophie

Einführung in die Philosophie
(2 Bände)
Erkenntnistheorie
Logik
Metaphysik
Ethik
Naturphilosophie
Kulturphilosophie
Rechts- und Staatsphilosophie

Philosophie der Geschichte
(2 Bände)
Allgemeine Psychologie
Angewandte Psychologie
Religionspsychologie
Völkerpsychologie
Tierpsychologie
Psychotechnik

Geschichte der Philosophie

Chinesische Philosophie
Japanische Philosophie
Indische Philosophie
Arabische Philosophie
Griechische Philosophie
von Thales bis Platon
Hellenistische Philosophie
von Aristoteles bis Plotin
Patristische und scholastische Philosophie
Italienische Philosophie
Französische Philosophie

Englische Philosophie
Holländische Philosophie
Deutsche Philosophie
(5 Bände):
I. Deutsche Mystik
II. Deutsche Philosophie im Reformationszeitalter
III. Deutsche Aufklärung
IV. Deutscher Idealismus
V. Romantik
Russische Philosophie
Amerikanische Philosophie
Der Geist des 19. Jahrhunderts
Die Philosophie im 20. Jahrhundert

Erschienen sind:

Einführung in die Philosophie. In 2 Bänden. I. Teil: Erkenntnisproblem. II. Teil: Weltproblem. *Von Dr. Ernst Bergmann, Professor an der Universität Leipzig.*

Metaphysik. *Von Dr. Hans Driesch, o. Prof. a.d. Universität Leipzig.*

JEDERMANNS BÜCHEREI

Ethik. *Von D. Dr. Hermann Schwarz, Geh. Reg.-Rat, o. Professor an der Universität Greifswald.*

Naturphilosophie (Philosophie des Anorganischen). *Von Dr. Friedrich Lipsius, Professor an der Universität Leipzig.*

Naturphilosophie (Philosophie des Organischen). *Von Professor Dr. Karl Sapper in Graz.*

Philosophie der Geschichte in 2 Bänden. *Von Dr. Hermann Schneider, Professor an der Universität Leipzig.*

Religionspsychologie. *Von D. Dr. Werner Gruehn, Privatdozent in Dorpat.*

Psychotechnik. *Von Dr. Fritz Giese, Privatdozent an der Technischen Hochschule in Stuttgart.*

Griechische Philosophie von Thales bis Platon. *Von Dr. Hans Leisegang, Professor an der Universität Leipzig.*

Hellenistische Philosophie von Aristoteles bis Plotin. *Von Dr. Hans Leisegang, Professor an der Universität Leipzig.*

Patristische und scholastische Philosophie. *Von Dr. Johannes Hessen, Privatdozent an der Universität Köln.*

Italienische Philosophie. *Von Guido de Ruggiero, Professor an der königl. Universität Neapel. Ins Deutsche übertragen von Dr. Ph. Aug. Becker, o. Professor an der Universität Leipzig.*

Französische Philosophie. *Von Dr. Karl Vorländer, Professor an der Universität Münster.*

Holländische Philosophie. *Von Dr. Lucien Brulez, Lektor an der Universität Hamburg.*

Der Geist des 19. Jahrhunderts. *Von Dr. Ernst Bergmann, Professor an der Universität Leipzig. 2. Aufl.*

Geschichte der deutschen Philosophie: I. Deutsche Mystik bis 1530 einschließlich Paracelsus. *Von Dr. Ernst Bergmann, Prof. an der Universität Leipzig.*

Russische Philosophie. *Von Professor E. v. Radloff, St. Petersburg.*

Philosophie des 20. Jahrhunderts. *Von Dr. Hans Leisegang, Professor an der Universität Leipzig.*

In Vorbereitung:

Allgemeine Psychologie. *Von Dr. Wilhelm Wirth, Professor an der Universität Leipzig.*

Geschichte der deutschen Philosophie in 5 Bänden: II. Deutsche Philosophie im Reformationszeitalter bis 1680, einschließlich Jacob Böhme. III. Deutsche Aufklärung bis 1781. IV. Deutscher Idealismus, Kant bis Fichte, 1800. V. Romantik bis 1831: Hegels Tod. *Von Dr. Ernst Bergmann, Professor an der Universität Leipzig.*

JEDERMANNS BÜCHEREI

Chinesische Philosophie. *Von Dr. R. Wilhelm, Professor am China-Institut der Universität Frankfurt a. M.*

Kulturphilosophische Soziologie. *Von Dr. Hans Freyer, Prof. an der Universität Leipzig.*

Abteilung Rechts- und Staatswissenschaft

Herausgegeben von Regierungsassessor a. D. Dr. sc. pol., Dr. jur. **Friedrich Glum,** Privatdozent a. d. Univers. Berlin, Direktor der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften

Problem des Rechts — Rechtsphilosophie
Römische Rechtsgeschichte
Deutsche (Germanische) Rechtsgeschichte
Grundzüge des Bürgerlichen Rechts
Deutsches Strafrecht
Deutsches Industrie- und Handelsrecht
Landwirtschaftsrecht
Geistiges Urheberrecht
Patentrecht
Französisches Privatrecht
Englisches Privatrecht
Problem des Staats — Staatsphilosophie
Grundzüge der Politik
Verwaltungslehre
Die politischen Ideenkreise der Gegenwart
Deutsche Verfassungs- und Verwaltungsgeschichte
Deutsches Verfassungsrecht
Englische und nordamerikanische Verfassungs- und Verwaltungsgeschichte
Französische Verfassungs- und Verwaltungsgeschichte
Russische Verfassungs- und Verwaltungsgeschichte
Deutsches Staatsrecht
Deutsches Verwaltungsrecht
Beamtenrecht
Deutsches Arbeitsrecht
Deutsches Steuerrecht
Deutsches Kommunalrecht
Völkerrecht
Internationales Privatrecht
Das Privatrecht des Friedensvertrages
Kirchenrecht
Der Staat der Kalifen
Der französische Staat der Gegenwart
Der englische Staat der Gegenwart und das britische Weltreich
Das bolschewistische Rußland
Grundzüge der Politik
Monarchie
Demokratie u. Parlamentarismus
Demokratische Diktatur (Rätediktatur)
Die politischen Parteien im modernen Staate
Staat und Wirtschaft

Erschienen sind:

Patentrecht. *Von Justizrat Dr. Albert Osterrieth †, Professor an der Handelshochschule Berlin.*

Die politischen Ideenkreise der Gegenwart. *Von Dr. Hermann Heller, Leipzig.*

Deutsches Verfassungsrecht. *Von Dr. Ludwig Waldecker, Prof. an der Universität Königsberg i. Pr.*

JEDERMANNS BÜCHEREI

Grundzüge des Bürgerlichen Rechts. In 5 Bänden. *Von Dr. jur. Albert Baer, Rechtsanwalt in Berlin.*
I. Band: Vertrag, Erfüllung des Vertrages, Vertragsparteien, Willensmängel beim Vertragsschluß. II. Band: Abreden zum Vertrag, Mängel der Vertragserfüllung, Schadenersatz, Abtretung und Schuldübernahme. III. Band: Einzelne Schuldverhältnisse (Kauf, Miete, Dienstvertrag usw.). Ungerechtfertigte Bereicherung. Unerlaubte Handlung.

Landwirtschaftsrecht. *Von Dr. Franz Dochow, Professor an der Universität Heidelberg.*

Deutsches Arbeitsrecht. *Von Dr. Wilhelm Groh, Professor an der Universität Heidelberg.*

Deutsches Steuerrecht. *Von Dr. Ludwig Waldecker, o. Professor an der Universität Königsberg i. Pr.*

Völkerrecht. *Von Dr. Ernst Isay, Oberlandesgerichtsrat, Privatdozent an der Universität Münster.*

Das Privatrecht des Friedensvertrages. *Von Professor Dr. Erich Hans Kaden, Genf.*

Grundzüge der Politik. *Von Dr. phil. Hans v. Eckardt, Professor an der Universität Heidelberg.*

Die politischen Parteien im modernen Staate. *Von Oberverwaltungsgerichtsrat Dr. Otto Koellreutter, o. Professor an der Universität Jena.*

Das bolschewistische Rußland. *Von Kammergerichtsrat Dr. Martin Ludwig Schlesinger, Berlin.*

In Vorbereitung:

Geistiges Urheberrecht. Künstlerschutz, Schriftstellerschutz. *Von Geh. und Oberregierungsrat Johannes Neuberg in Berlin.*

Grundzüge des Bürgerlichen Rechts. In 5 Bänden. *Von Dr. jur. Albert Baer, Rechtsanwalt in Berlin.*
IV. Band: Sachenrecht (Besitz, Eigentum, Hypothek, Pfandrecht). V. Band: Familienrecht, Erbrecht (Ehe, Eltern und Kinder, Testament, Erbenhaftung).

Strafrecht. *Von Dr. Eberhard Schmidt, o. Professor der Rechte an der Universität Kiel.*

Industrie- und Handelsrecht. *Von Dr. Paul Gieseke, o. Professor an der Universität Rostock.*

Verwaltungsrecht. *Von Dr. Franz Dochow, Professor an der Universität Heidelberg.*

Beamtenrecht. *Von Oberverwaltungsgerichtsrat Dr. Otto Koellreutter, o. Professor a. d. Universität Jena.*

Internationales Privatrecht. *Von Dr. Max Gutzwiller, Prof. der Rechte an der Universität Heidelberg.*

JEDERMANNS BÜCHEREI

Deutsches Kommunalrecht. *Von Dr. Albert Hensel, Professor an der Universität Bonn.*

Staat der Kalifen. *Von Professor Dr. C. H. Becker, Preußischer Minister für Wissenschaft, Kunst und Volksbildung, Berlin.*

Der französische Staat der Gegenwart. *Von Dr. Ernst v. Hippel, Privatdozent an der Universität Heidelberg.*

Der englische Staat der Gegenwart. *Von Oberverwaltungsgerichtsrat Dr. Otto Koellreutter, o. Professor a. d. Universität Jena.*

Demokratie und Parlamentarismus. *Von Wirkl. Ministerialrat Prof. Dr. Leo Wittmayer, Wien.*

Staat und Wirtschaft. *Von Regierungsassessor a. D. Dr. sc. pol., Dr. jur. Friedrich Glum, Privatdozent an der Universität Berlin.*

Abteilung

Sozialwissenschaft und Wirtschaftswissenschaft

Herausgegeben von Regierungsassessor a. D. Dr. sc. pol., Dr. jur. **Friedrich Glum,** Privatdoz. a. d. Universität Berlin, Direktor der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften

Die nationalökonomische Theorie
Wirtschaftsverfassung
Sozialismus
Weltwirtschaft
Geschichte der deutschen Wirtschaft
Geschichte der englischen Wirtschaft und der Wirtschaft des britischen Imperiums
Geschichte der amerikanischen Wirtschaft
Geschichte der russischen Wirtschaft
Landwirtschaftspolitik
Industrie- und Gewerbepolitik
Handelspolitik
Verkehrswesen u. Verkehrspolitik
Geschichte d. sozialistischen Ideen
Sozialpolitik
Geld — Banken — Börsen
Kohlenwirtschaft
Eisenwirtschaft
Metallwirtschaft
Textilwirtschaft
Wirtschaft der Steine und Erden
Mineralölwirtschaft
Die chemische Industrie
Lederwirtschaft
Zeitungswesen
Der Unternehmer
Der Handwerker
Der Landarbeiter
Der Industriearbeiter
Der politische Führer
Die arbeitende Frau

Erschienen sind:

Die nationalökonomische Theorie. *Von Dr. Hans Gestrich in Berlin.*

Wirtschaftsverfassung. *Von Dr. Siegfried Tschierschky, Reichswirtschaftsgerichtsrat in Berlin.*

Geschichte der sozialistischen Ideen. *Von Dr. Karl Vorländer, Professor an der Universität Münster.*

JEDERMANNS BÜCHEREI

Textilwirtschaft. *Von Geheimen Regierungsrat Hagemann, Berlin.*

Mineralölwirtschaft. *Von o. Honorarprof. Dr. Robert Liefmann in Freiburg i. Br. und Dr. Franz Angelberger in Freiburg i. Br.*

Der Industriearbeiter. *Von Dr. Alfred Striemer in Berlin.*

Die arbeitende Frau. *Von Dr. Agnes von Zahn-Harnack, Berlin-Grunewald.*

In Vorbereitung:

Landwirtschaft. *Von Major Brauer, Berlin.*

Industrie- und Gewerbepolitik. *Von Dr. Ludwig Heyde, Prof. an der Universität Kiel. M. d. R. W. R. Berlin.*

Verkehrswesen und Verkehrspolitik. *Von Professor Dr. O. Th. L. Zschucke, Berlin, Volkswirt R.D.V.*

Eisenwirtschaft. *Von Dr ing. J. Ferfer in Düsseldorf.*

Die deutsche chemische Industrie in ihrer Entwicklung und weltwirtschaftlichen Bedeutung. *Von Professor Dr. H. Großmann in Berlin.*

Lederwirtschaft. *Von Kriegsgerichtsrat Dr. Kurtz, Referent im Reichswirtschaftsministerium Berlin.*

Zeitungswesen. *Von Dr. Karl d'Ester, Professor an der Universität München.*

Der Unternehmer. *Von Dr. Johannes Gerhardt in München.*

Der Landarbeiter. *Von Landrat Kogge, Greifswald.*

Abteilung Erziehungswesen

Herausgegeben von **Dr. August Messer,** o. Professor an der Universität Gießen

Philosophische Grundlegung der Pädagogik
Systematische Pädagogik
Geschichte der Pädagogik
I. Altertum und Mittelalter
II. Von Beginn der Neuzeit bis Anfang des 18. Jahrhunderts
III. Von Anfang des 18. Jahrhunderts bis zur Gegenwart
Schulpolitik
Methodik der Volksschule
Methodik des Unterrichts an höheren Schulen
I. Geisteswissenschaftliche Fächer
II. Mathematik, Naturwissenschaften, Geographie

Fortbildungs- und Fachschulwesen
Jugendfürsorge
Jugendpsychologie
Staatsbürgerliche Erziehung
Das österreichische Schulwesen der Gegenwart
Englisches und amerikanisches Bildungswesen
Asiatisches Bildungswesen
Pädagogische Probleme der Gegenwart
Körperliche Erziehung und Schulhygiene
Volkshochschulwesen

JEDERMANNS BÜCHEREI

Erschienen sind:

Philosophische Grundlegung der Pädagogik. *Von Dr. August Messer, o. Professor an der Universität Gießen.*

Geschichte der Pädagogik. In 3 Bänden. *Von Dr. August Messer, o. Professor an der Universität Gießen.*

I. Altertum und Mittelalter.

II. Von Beginn der Neuzeit bis Anfang des 18. Jahrhunderts.

III. Von Anfang des 18. Jahrhunderts bis zur Gegenwart.

Methodik des Unterrichts an höheren Schulen. In 2 Bänden.

I. Geisteswissenschaftliche Fächer: Deutschkunde, Philosophische Propädeutik. *Von Dr. Franz Schnaß in Hannover.* Geschichte, Alte Sprachen. *Von Dr. August Messer, o. Professor an der Universität Gießen.* Neuere Sprachen. *Von Dr. Albert Streuber in Darmstadt.*

II. Geographie. *Von Dr. Franz Schnaß in Hannover.* Mathematik, Naturwissenschaften. *Von Dr. G. Röver in Oldenburg.*

Jugendfürsorge. *Von Dr. E. v. Düring, Professor an der Universität Frankfurt a. M. und Dr. Erich Stern, Professor an der Universität Gießen.*

I. Band: Die Ursachen der Fürsorgebedürftigkeit. Die Jugend als Gegenstand der Fürsorge.

II. Band: Gesetzliche Regelung und Praxis.

Jugendpsychologie. *Von Dr. Erich Stern, Professor an der Universität Gießen.* 2. Aufl. 1927.

Das österreichische Schulwesen der Gegenwart. *Von Bezirksschulrat Johann Kober in Wiener-Neustadt.*

Körperliche Erziehung und Schulhygiene. *Von Dr. Otto Huntemüller, Professor an der Universität Gießen.*

In Vorbereitung:

Systematische Pädagogik. *Von Dr. Wilhelm Flitner, Privatdozent an der Universität Jena.*

Das Urteil der Presse:

Aus „Pädagogische Warte", 1925, Heft 1:

„. . . Durch diese großzügige Organisation ist ‚Jedermanns Bücherei' trotz ihrer popularisierenden Tendenz vor verwässerndem, verflachendem Feuilletonismus bewahrt. Sie nützt Studierenden, die nach dem unerläßlichen Sich-Verlieren in Einzelheiten und Sonderfragen nun die Haupttatsachen und Grundzüge einer Disziplin überschauen möchten. Sie dient dem Fachmann, der die vielen Grenzgebiete seines Forschungsfeldes nicht selbst durchackern kann. Lehrern aber, die zwischen Wissenschaft und Volk Brücken schlagen müssen, erleichtern diese Bände die Vorbereitung und Fortbildung in dankenswerter Weise. Durch besonnene Auswahl des Wesentlichen und gemeinfaßliche, klare, großlinig dichte Darstellung schaffen diese Bücher Einblick und Übersicht. Streng sichtende Literaturverzeichnisse, Zeittafeln, ausführliche Sach- und Namenregister verhelfen zu rascher Orientierung und Auswertung. Wo es möglich ist, erhöhen Bilderanhänge die Anschaulichkeit..."

Druck:
Günther, Kirstein & Wendler
Leipzig



Bibl. Gł. Akademii Muz. Katowice
nr inw.: A - 1326
1326 A
NIE WYPOŻYCZA SIĘ

ERZIEHUNGSWESEN
NATURWISSENSCHAFT
SOZIALWISSENSCHAFT
WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFT
LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT
RELIGIONSWISSENSCHAFT
STAATSWISSENSCHAFT
RECHTSWISSENSCHAFT
LITERATURGESCHICHTE
BILDENDE KUNST
PHILOSOPHIE
GESCHICHTE
MEDIZIN
MUSIK