



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Spemanns goldenes Buch der Musik

Spemann, Wilhelm

Berlin [u.a.], 1900

Klanglehre v. Dr. Karl Grunsky.

[urn:nbn:de:hbz:466:1-70163](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:466:1-70163)

Klanglehre.

237. Aufgabe der Klanglehre. Dem Künstler ist es in der Regel zuwider, mit dem, was Ausdruck seiner zartesten oder feurigsten Empfindungen ist, ein wissenschaftliches Spiel getrieben zu sehen, das die Unmittelbarkeit der künstlerischen Aeußerungen zu stören und keinen praktischen Wert zu gewinnen scheint. Von einer ästhetischen Analyse seiner Empfindungen selbst glaubt er mit einigem Recht sich gefährdet. Was ihn aber unmöglich heirren kann, ist die Einführung in die äußeren, physikalischen Bedingungen der Klangwelt: es muß ihn doch interessieren, die Zustände der Natur kennen zu lernen, die auf geheimnisvolle, aber streng gesetzmäßige Art die verschiedene Beschaffenheit der Töne, besonders deren größeren oder geringeren Wohlklang erregen. Die Aufschlüsse über jene natürlichen Zustände und Gesetze bietet die Akustik oder Klanglehre. Sie berührt ein neues Gebiet, die Harmonielehre, wenn es sich um künstlerische Verwertung des Tonmaterials handelt. Ein weiteres, das wir von der Klanglehre abtrennen, ist die Kunde der Instrumente, deren sich die heutige Musik bedient.

238. Ursache des Schalls. Mit Schall bezeichnen wir die Ursache der Hörbarkeit der Dinge und subjektiv eine bestimmte Art von Wahrnehmung, der als äußere Vorgänge Bewegungen entsprechen. Nicht jede Bewegung tritt als Schall in unser Bewußtsein; sie muß eine gewisse Geschwindigkeit erreicht haben (32 einfache Schwingungen in der Sekunde). Andererseits, sobald sie etwa 96 000 Pulse überschritten hat, ist sie nicht mehr als Schall vernehmlich. In

viel höheren Geschwindigkeitsgraden überseht sich Bewegung für uns in Wärme (65 Billionen) oder Licht (400—800 Billionen).

239. Pendelbewegung. Alle schallbildenden Bewegungen, sofern sie die Unregelmäßigkeit des Geräusches abgestreift haben, sind pendelförmig, d. h. sie wiederholen sich regelmäßig, periodisch. Innerhalb einer kleinen Grenze, wenn nämlich der Ausschlagswinkel nur bis zu sechs Graden des Kreisbogens beträgt, schwingt der Pendel nicht bloß regelmäßig, sondern auch „isochron“, zeitgleich, und da die größten „Amplituden“ (Schwingungsweiten) tönender Körper über diesen Winkel nicht hinausgehen, so sind die Schallbewegungen als zeitgleiche anzusehen. Man hat also nicht mit Verlangsamung oder Beschleunigung der Schwingungen, sondern nur mit deren Zahl und mit ihrer Amplitude zu rechnen, und da stoßen wir sofort auf das wichtige Gesetz, daß die Tonhöhe allein von der Schwingungszahl, die Tonstärke von der Schwingungsweite abhängt. Es sei dabei bemerkt, daß unter Schwingung die einen den Herz- und Rückgang, die andern Herz- oder Rückgang von einer äußersten Grenze zur andern verstehen; wir schließen uns letzteren an.

240. Wellenbewegung. Denken wir uns das horizontale Hin- und Herschwingen des Pendels übergegangen in eine vertikale Bewegung, so haben wir nichts anderes als die Welle. Schon die Bezeichnung Schallwelle deutet darauf, daß die Schallbewegung, ähnlich wie jene des Lichts, Wellenform hat. Die Welle besteht nicht, wie der täu-

schende Augenschein z. B. am Wasser-
spiegel zeigt, in der Fortbewegung
ganzer Massen, sondern in der fort-
schreitenden Bewegung der einzelnen
Teilchen, die an ihrer Stelle in
schwingender, oscillirender Bewe-
gung verharren; was sich fortpflanzt,
ist nur die Vibration der aus ihrem
Gleichgewicht gebrachten Einzeltheile.
Man stelle sich das unter dem Druck
eines leichten Windes wogende Aeh-
renfeld vor; die Halme neigen sich,
richten sich wieder auf, bleiben aber an
ihrer Stelle; nur die Woge wandert.

Alle Wellen haben nun folgende
Gesetze gemeinsam: Gleichzeitig er-
regte Wellen erreichen gleichzeitig
das Ende der Strecke (in dem-
selben Medium), gleichviel ob sie
kurz oder lang sind. Die Länge
hängt ab von der Dauer des Zeit-
verlaufes zwischen den einzelnen
Primitivbewegungen. Höhere Töne
bedürfen einer größeren Anzahl von
Schwingungsimpulsen und haben
kürzere Wellen; diese treffen aber
gleichzeitig mit den längeren Wellen
der tiefen Töne an unser Ohr,
wenn beiderlei Wellen gleichzeitig
hervorgebracht sind. An verschie-
denen Punkten erregte Wellen können
sich kreuzen, ohne sich an ihrer
Ausbreitung zu hindern: wir können
gleichzeitig erklingende Töne unter-
scheiden. Wäre auch nur eines
dieser Gesetze unwirksam, so wäre
die Menschheit um die ganze, reiche
Welt der Musik ärmer. Sehr gut
ist es auch eingerichtet, daß die
Wellen kleinere Widerstände durch
Beugung überwinden können;
hinter einem im Flusse liegenden
Felsblock vereinigen sich die Fluten
sofort wieder und ebenso die Schall-
wellen z. B. hinter einer Saule.
Fundamental ist das Gesetz der
Reflexion, wonach eine Welle,
die auf endgültigen Widerstand stößt,
nicht vernichtet wird, sondern ihren
Weg in umgekehrter Richtung fortsetzt.

241. Stehende Welle. Trifft
eine zurückkehrende auf eine direkte
Welle, so resultiert aus dem Kampfe
zwischen den sich begegnenden Teil-
chen eine neue Erscheinung, die so-
genannte stehende Welle. In ihr
hört die ungehindert fortschreitende
Bewegung auf, die Teile stauen sich
und machen nun die Bewegung um
ihre Ruhelage gleichzeitig, nur mit
verschiedenen Amplituden.

Die stehende Welle kann sich spalten
in beliebig viele Abschnitte, die durch
Punkte der kleinsten Bewegung
(Knoten) getrennt sind; die Aus-
buchtung zu den größten Entfer-
nungen nennt man Bäuche. Man
gewinnt eine Anschauung von der
stehenden Welle an einem zwischen
festen Grenzen schwingenden Seil
oder an der jedermann bekannten
Saite. Das Wasser kann keine
stehende Welle darstellen, weil es
nur nach der Luftseite frei auszu-
weichen vermag. Eine Saite schwingt
nicht so \sim , sondern so \circ , und
wenn ich ihre Mitte dämpfe und sie
dann zum Schwingen bringe, so ∞ .
Nur dadurch, daß die Saite ab-
gegrenzt ist, wird die stehende Welle
möglich, die sich aus Zurückwerfung
der fortschreitenden und ihrer Be-
gegnung mit der entgegenkommen-
den Welle bildet.

242. Quer- u. Längsschwingung.
Alle Schwingungen, fortschreitende
wie stehende, deren Richtung zur
Länge des tönenden Körpers einen
rechten Winkel bilden, sind Trans-
versal- oder Querschwingungen.
Eine Saite kann auch in der Rich-
tung ihrer Länge schwingen; man
erzeugt solche Longitudinal- oder
Längsschwingungen, wenn man z.
B. mit dem Violinbogen schräg
über die Saite streicht. Auch kann
bei Longitudinalschwingungen, je
nach der Abgrenzung, die Welle ent-
weder fortschreitend oder stehend sein.
Typen fortschreitender Transver-

salwellen geben Wasser und freie Seilwellen; stehender: die zwischen festen Grenzen sich bewegenden Seilwellen, die Saiten, Stäbe, Platten, Membranen. Typen fortschreitender Longitudinalwellen: gestoßene Stäbe oder Röhren; stehender: geriebene Stäbe und die abgegrenzten Luftmassen, die bei allen Blasinstrumenten in Betracht kommen.

Was endlich die Wahrnehmung des Schalls anbelangt, so sind Schwingungen, die Schall erzeugen, immer stehende (entweder transversale oder longitudinale) Schwingungen, die den Schall leiten, fortschreitende, longitudinale, und Schwingungen, die den Schall unserm Ohr wahrnehmbar machen, wiederum stehende.

243. Schall, Klang, Ton. Nicht alles, was wir hören, entstammt den beschriebenen, regelmäßigen Wellenbewegungen; unser Ohr wird durch viele dauerlose oder anhaltende Geräusche getroffen, die eine unregelmäßige Aufeinanderfolge von Erschütterungen zur Ursache haben. Außer den speziellen Benennungen dieser Geräusche (Rischen, Klirren, Rollen, Sausen u. s. w.) besitzt die deutsche Sprache das Wort „Schall“ dafür, das alles überhaupt Hörbare umfaßt. Ist das Gehörte nach Höhe und Tiefe meßbar, so reden wir vom Ton, und, um es von andern, gleich hohen Tönen zu unterscheiden, vom Klang. Unbestimmbare Schälle können auch durch eine Reihe meßbarer Töne hervorgebracht werden, wie sich jeder überzeugen kann, der etwa eine Reihe der untersten Klaviertasten zugleich anschlägt.

Ein Material von Schällen, an dem wir fortwährend den Uebergang vom unmeßbaren zum meßbaren Ton beobachten können, bildet die menschliche Sprache; je mehr das mit dem Sprechen verbundene Geräusch beseitigt wird, je mehr

sich das Schwankende der Betonung etwa in der Leidenschaft, festigt desto schöner und reiner gestaltet sich der bestimmte, meßbare Ton.

Nur eines wird auch der edle Gesangston, dem nichts Instrumentales an die Seite gestellt werden kann nie ablegen: die Klangfarbe, die durch die Teilschwingungen der Overtöne hervorgebracht wird (s. 41 u. 42). Absolut rein wäre nur ein Ton von absolut einfacher Schwingung; eine Stimmgabel vor gleichgestimmter Resonanzröhre giebt eine annähernde Vorstellung vom absolut reinen Ton. Es zeigt sich aber, daß ein solcher zugleich völlig stumpf, weich, charakter- und ausdruckslos sein müßte, und wiederum stehen wir in Bewunderung vor den Gesetzen der Natur, die an die Teilschwingungen den mannigfaltigsten Reichtum ausdrucksvoller Klangfarben gebunden hat.

244. Ausbreitung des Schalls. Da der Schall nach jeder Richtung und bei gleicher Entfernung überall gleich stark gehört wird, so folgt, daß er sich kugelschalenförmig verbreitet, wobei die Schallquelle stets den Mittelpunkt einnimmt.

Die Intensität der Bewegung oder die Amplitude der Schwingungen vermindert sich im Verhältnisse der größeren Masse, die sie durchschreitet; nun steht die Kugeloberfläche im quadratischen Verhältnisse zu ihrem Durchmesser, woraus folgt, daß die Stärke des Schalls im quadratischen Verhältnisse zur Entfernung vom Ausgangspunkt abnimmt.

Weiter trägt zur verminderten subjektiven Wahrnehmung des Schalls bei, daß unser Ohr z. B. bei 1 m Entfernung nur den 1/2568. Teil des Schallquantums auffaßt; ferner, daß die Luft zu den schlechtesten Schalleitern gehört. Würde unser Ohr von allen Schallwellen berührt und

eilten diese gar mit unverminderter Stärke durch den Raum, so wären wir in kürzester Frist taub.

245. Verstärkung des Schalls.

Um den Schall wo nötig zu verstärken, hat uns die Natur mannigfache Mittel zur Verfügung gestellt.

Abgesehen von der Selbstverständlichkeit, daß wir uns der Schallquelle nähern oder sie uns nahebringen, können wir durch Vergrößerung der Gehörsfläche (Hand am Ohr, Hörrohr) oder durch Verhinderung der seitlichen Ausweichung der Schallstrahlen den Eindruck vielfältigen (Leitungsrohr, Sprachrohr, z. B. auf Schiffen). Eine Schwächung des Eindrucks findet statt bei abgewandtem Ohr oder im sogenannten „Schallschatten“ hinter Pfeilern.

Das wichtigste Mittel aber, den Schall ungeschwächt zu erhalten, ist die Zuführung durch besser leitende Medien als die Luft. Hierauf beruht das unentbehrlich gewordene Telefon. Edisons Phonograph, der den eingeleiteten Schall jahrelang bewahrt und alsdann wie ursprünglich wiedergiebt, ist gleichsam ein Schallleiter durch die Zeit, wie das Telefon durch den Raum.

246. Schallstärke und Tonhöhe. Objektiv genommen hängt die Stärke des Schalls von der Amplitude der Schwingungen ab, indem die größere Ersturston die Energie der Verdichtungen und Verdünnungen der Schallphären steigert; die Schwingungszahl aber und damit die Tonhöhe ist von der Stärke der Impulse unabhängig. Wenn eine sehr starke angerissene Saite im ersten Augenblick einen tieferen Ton giebt, so ist dies keine Ausnahme von diesem Gesetz, sondern dadurch zu erklären, daß die Grenze der isochronen Amplitude überschritten wurde. Luftsäulen werden nur scheinbar durch stärkeres Blasen höher im Ton; in Wirklichkeit haben sich die Druck-

impulse zu Schwingungen von entsprechend höherer Zahl, nicht größerer Amplitude verdichtet, um den höheren Ton zu bilden.

247. Resonanz. Eine Klasse sonst tonärmster Schallquellen, die niemals eine Rolle in der Musik spielen könnten, wird schallkräftig gemacht durch Resonanz, und zwar mit dem Erfolg, daß sie nun in Bezug auf Wichtigkeit an erste Stelle rücken; es sind dies die Saiten (und alle der Fadenform sich nähernden Schallkörper). Die vier Saiten der Violine werden erst durch Uebertragung ihrer Schwingungen auf den Kasten, der bekanntermaßen die Hauptsache ist, klangergiebig, klangschön. Nun besitzt der mitschwingende Körper selbst wieder seinen Eigenton und man versteht unter Resonanz im eigentlichen und engsten Sinn das Antworten des Eigentons eines Körpers auf die entsprechende Schwingungszahl eines andern.

Es ist klar, daß diese Art von Resonanz viel stärker ist, als das Mitschwingen, das jeden beliebigen Ton wiedergiebt und nur eine Revi-
bration heißen sollte. Aus Mitschwingen und Mittönen entsteht natürlich die größte Schallverstärkung. Wollte man aber beim Bau von Streichinstrumenten für jeden Ton eine Eigenresonanz herstellen, so würden sie ganz monströs ausfallen! Die praktische Hauptaufgabe ist Uebertragung der Schwingungserschütterungen der Saiten auf möglichst große mitschwingende Flächen. Resonanzbedürftig sind außer Saiten: Membranen, Stäbe und Zungen. Wodagegen die tönende Luftsäule das Prinzip ist, fallen Ton- und Resonanzkörper zusammen.

Einfache Gesetze für die Resonanz sind noch nicht gefunden. Die Erfahrung lehrt, daß die Resonanzflächen sich dem tiefsten Ton anpassen müssen; die Resonanzplatte

soil möglichsle Elastizität und zugleich die nötige Widerstandsfähigkeit gegen die teilweise enorme Saitenspannung haben.

248. Spannungen. Diese Spannung selbst hat den gleichen Zweck wie die Resonanz: Verstärkung der Schallkraft. Nehme ich eine Saite doppelt so lang und belaste sie zugleich durch vervierfachtes spannen des Gewicht, so bleibt sie in der Tonhöhe gleich, verstärkt aber durch Erregung doppelt so großer Luftmassen und indem diese Erregung mit größerer Energie vor sich geht, den Schall ganz bedeutend.

Durch fortgesetzte Erhöhung der Spannungen hat man im Klavierbau eine riesige Vermehrung der Schallkraft erzielt.

249. Reflexion. Endlich ist noch eine Art von Schallverstärker anzuführen, die praktisch von der größten, leider bis jetzt zugleich unangenehmsten Wichtigkeit ist: die Reflexion in geschlossenen Räumen. Musik im Freien klingt viel weniger stark als im Theater oder Konzertsaal, weil dort der Schall von keiner senkrechten Fläche zurückgeworfen zu werden pflegt. Bei der Reflexion des Schalls ist wie beim Licht Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel; aber mit dieser Erkenntnis ist die Gesetzmäßigkeit der Schallverstärkungen bei komplizierter Reflexion noch nicht gewonnen und es ist ein noch ungelöstes Problem der architektonischen Akustik (oft Akustik schlechtweg genannt), einen Raum so herzustellen, daß der Klang der Musik die größtmögliche Verstärkung erhält. Fast alle Schallwellen, die im Geschlossenen unser Ohr berühren, sind reflektierte; aber man hat noch keine Gesetze für die formale Gestaltung oder materielle Beschaffenheit der reflektierenden Flächen, sondern ist nur auf allgemeinste Erfahrungen angewiesen, die in-

dessen nicht einmal vor schlimmen Mißerfolgen schützen. Wo ein Theater oder Konzertsaal „akustisch“ ist, da hat ein günstiger Zufall, nicht die Berechnung obgewaltet.

Es scheint, daß der Lösung des Problems vorderhand nur auf dem Wege praktischer Erfahrung beizukommen ist. Als ein wichtiger Beitrag zu dieser Lösungsart gilt Richard Wagners Festspielhaus in Bayreuth, dessen akustische Wohlverhältnisse anerkanntermaßen unerreicht sind.

250. Echo. Schallgeschwindigkeit. Dem Nachhall in Sälen, der unentbehrlich ist für die Tragkraft des Schalls, aber auch gefährlich für sie werden kann, entspricht im Freien die Erscheinung des Echos. Man kann aus seiner zeitlichen Entfernung die räumliche der reflektierenden Wand berechnen. Hierbei muß man die Geschwindigkeit des Schalls kennen. Sie beträgt in der Luft bei 0° C rund 330 m in der Sekunde. Bei jedem Wärmegrad nimmt die Geschwindigkeit um 0,6 m zu. Aus der Division der Schwingungszahl in die Geschwindigkeitszahl kann die Wellenlänge eines Tones berechnet werden; so findet man für a' mit 870 Schwingungen 39,3 cm Wellenlänge, also wird eine offene Röhre von 393 mm (vorbehältlich einer kleinen Korrektion) das Normal- a geben.

Während nun Temperatur und Schallgeschwindigkeit und andererseits Schwingungszahl und Wellenlänge sich bedingen, hat auf die Tonhöhe des gegebenen Schalls die Temperatur des Fortpflanzungsmittels, die schnellere oder langsamere Verbreitung keinen Einfluß, was für die Praxis überaus wohlthätig ist. Wir werden sehen, daß allerdings auf Entstehung des Schalls die Temperatur großen Einfluß hat; bei gewissen Schall-

quellen wirkt die Wärme erhöhend auf den Ton. Aber die fortschreitenden Wellen nehmen durch alle Fortpflanzungsmedien in unveränderter Schwingungszahl ihren Weg. Was großen Veränderungen unterliegt, ist die Geschwindigkeit selber, die im dichteren Mittel größer wird, in Metall und Holz größer als in Wasser, in Wasser größer als in Luft. Die Zahlen sind folgende: in Eisen 17, Messing 11, in Tannenholz 10, in Flüssigkeiten 4 (Wasser) bis 6mal so schnell als in Luft. Durch die Luft aber pflanzt sich der Schall schneller in dünner als in dichter fort, weil sich hier das Verhältnis der gleichbleibenden Elastizität zur Dichtigkeit verändert, während es bei festen Körpern, wo die Dichtigkeit nahezu konstant ist, kaum und beim Wasser unerheblich wechselt. Die Luft aber verliert durch Wärme an Dichtigkeit und bleibt fast gleich elastisch, woraus sich erklärt, daß in dem S. 13 angeführten Verhältnis die Geschwindigkeit des Schalls mit der Temperatur wächst. Durch den luftleeren Raum pflanzt sich kein Schall fort. Die „Harmonie der Sphären“ wird wohl nur ein schöner Traum bleiben. Der Aether trägt zwar die Wellen des Lichts entferntester Sterne, aber keinen Ton eines andern Weltkörpers zur Erde.

Die Geschwindigkeit des Schalls ist im Verhältnis zu der des Lichts (300000 km in der Sekunde) eine sehr kleine; viele alltägliche Erscheinungen veranschaulichen dies: das Aufblitzen einer entfernten Rakete kommt immer dem Schall zuvor. Die Soldaten eines ganzen Regiments können nicht gleichzeitig nach der Musik marschieren, weil die Töne zu den vorderen und hinteren Reihen nicht gleichzeitig gelangen.

251. Entstehung des Schalls. Ueberall, wo Massen sich bewegen,

erfolgt Schall, gleichviel, welchem Aggregatzustand sie angehören. Der Stein, der auf Stein oder ins Wasser fällt, die Peitsche, die durch die Luft fährt, die Regentropfen, der Springbrunnen, die Feuerpritze, die Wirkungen eines Orkans zu Land oder zur See, die Luftstöße in einer Pfeife — Beispiele der verschiedensten Beschaffenheit sich bewegender und bewegter Massen.

Auch die Hantierung mit scheinbar tonloseten Stoffen, wie Wachs, Wolle, Haar, Klebrigem, bringt Schalle hervor. Aus eigenem Antrieb tönt aber kein Körper: er antwortet nur auf einen Schlag oder Stoß, auf Reibung oder auf Zerrung. Dann erst tönt er. Genau genommen ist es aber keineswegs der Körper, welcher tönt, sondern die periodischen Luftstöße tönen, die der schwingende Körper hervorruft.

Ja, der Schall ist keineswegs an die Schwingung eines Körpers gebunden: die rotierende, nicht oszillierende Bewegung der sogenannten Scheiben- und Wasserföhre, des Savartschen Zahnrads erzeugen Schall, lediglich durch periodische Stöße. An den Riesentönen eines Bucheinbandes kann sich jeder von Schällen überzeugen, denen nicht einmal eine Schwingungsbewegung der Körper zu Grund liegt. Luftstöße müssen aber jedesmal da sein; denn die Luft wird durch bewegte Körper erschüttert, sodaß sie sich in kürzesten Abständen verdichtet und verdünnt. Auch die Reibungstöne z. B. eines durch die Luft geschwungenen Lineals und die Explosionsschälle jeder Art lassen sich auf Luftstöße zurückführen. Immerhin kann auch die wissenschaftliche Betrachtung der Einfachheit wegen den Schall als unmittelbares Produkt des Körpers ansehen und von „tönenden Körpern“ handeln.

252. **Arten der Klangerzeugung elastischer Körper.** Zu musikalischen Klängen bedarf es elastischer Körper, die ihrer Ruhelage entrissen, aus eigener Kraft wieder in dieselbe zurückzukehren bestrebt sind, wobei sie periodische meßbare Schwingungen vollführen. Zudem müssen die elastischen Körper eine für die Tonerzeugung günstige Form annehmen: dies ist der Fall, wenn eine oder zwei Dimensionen sehr klein sind, und besonders wenn die Länge überwiegt (bei Saiten, Stäben, Luftsäulen). Ihrer Beschaffenheit nach teilt man die tönenden Körper ein in solche, die durch Spannung elastisch werden — Saiten, Membranen; andere sind durch innere Steifigkeit oder Dichtigkeit elastisch, also nicht erst der Spannung bedürftig — Stäbe, Glocken, die Luftsäule. Die Arten der Klangerzeugung sind verschieden, auch in Bezug auf die einzelne Gattung von Körpern. Dem Stoß und der Zerrung folgt immer Abklingen, Verklingen des Tons. Damit der Ton fortklinge, muß er durch Reibung erregt sein. Jede Reibung geschieht periodisch und periodisch schwingt die erregte Schallquelle zurück: aus der Wechselwirkung zwischen Reibung und Schallbildung entsteht das für unsere Empfindung Ununterbrochene des Tons. Der Reibungston ist der wichtigste für die Musik, denn er gestattet dem seelischen Ausdruck viel reichere Aeußerung als der gestoßene oder gezupfte Ton, bei dem alles auf den einmaligen Anschlag oder Anstoß gestellt ist. Wie sich aber bei Reibungstönen aus dem Reibungsgeräusch die Primitivimpulse bilden, welche die zur Klangbildung erforderliche Periodizität von Luftstößen einleitet, ist noch nicht einheitlich aufgeklärt, am wenigsten bei Erregung von Luft-

säulen mittels handförmigen Luftstroms (Anblasen von Röhren: Flöten, Labialpfeifen, Signalpfeifen). Die Luftsäule ist jedenfalls der einzige musikalische Körper, dessen Klangbildung zum Prinzip die der Spannung entgegengesetzte Zusammendrückung hat, dessen Ton daher nur durch Reibung einzuleiten ist.

253. **Natürliche Klangquellen.** Die Musik hat für ihre Zwecke aus der unendlichen Mannigfaltigkeit natürlicher Klangquellen eine engbegrenzte Schar abgefordert und auch hinsichtlich der Art der Klangerzeugung nur wenige Möglichkeiten nachgeahmt. Alle in der Natur gegebenen Klänge und Schalle aufzuzählen und zu analysieren ist hier unmöglich. Nur einiger interessanter Klangquellen wollen wir noch gedenken, wenn sie auch die musikalische Praxis nicht benützt.

An einer früher geheimnisvollen Art von Klängen ist die Wärme beteiligt: wir erinnern an das Tönen der Memmonsäule, die Klänge der Fingalsgrotte. Sie sind hervorgerufen durch periodische Störungen und Wiederherstellungen des Gleichgewichts zwischen warmer und kalter Luft, die sich abwechselnd verdichtet und verdünnt. Wichtig für die Wissenschaft sind die Untersuchungen mit Flammen, die in Röhren tönen; die wichtigsten Gesetze der Akustik lassen sich dabei veranschaulichen. Zur Wärme als Tonerreger gesellt sich auch das Licht (intermittierende Beleuchtung der Lichtsäule), der Magnetismus und die Elektrizität (Töne in elektrischen Drähten u. a.).

254. **Die menschliche Stimme.** Gewissermaßen zu den natürlichen Klangquellen gehört die menschliche Stimme, die jedenfalls allen künstlichen Instrumenten gegenüber eine Ausnahme stellt einnimmt,

und zwar schon dadurch, daß ihr Apparat unbewußt funktioniert. Dieser selbst kann weder zu den Blasinstrumenten mit kesselartigem Mundstück, noch zu den Zungen gerechnet werden. Die Tonhöhe wird ja vom Bläse erst durchs Klangrohr gewonnen, während die Schwingungszahl der Stimmbänder selbst die Tonhöhe erzeugt, daher die Schwingungen der Lippen einen ungleich größeren Tonumfang als die der Stimmbänder darstellen können. Und künstliche, membranöse Zungen sind überhaupt bei keinem Instrumente verwendbar. Das Prinzip der Tonerzeugung bilden nun allerdings bei der Stimme periodische Luftstöße wie bei Lippen- und Zungenpfeifen oder Blasinstrumenten.

Um Luftstöße zu erzeugen, muß der aus den Lungen hervordringende Strom verdichteter Luft periodisch unterbrochen werden. Das ist die Aufgabe der Stimmbänder, die dem Luftstrom das Austreten abwechselnd gestatten und verwehren. Auch beim Einatmen sind Töne produzierbar, die jedoch mangels Resonanz der Mund-, Rachen- und Nasenhöhle erstickt klingen. Der Umfang der Stimme wird mittels zweierlei Veränderungen bewirkt: die Stimmbänder ändern ihre Stellung und ihre Spannung, und zwar die Stellung immer erst dann, wenn die Spannung keine brauchbaren Tonhöhen mehr erzielt. Es ist ähnlich wie bei einer Saite, deren Tonhöhe durch Spannung nur bis zu einer gewissen Grenze getrieben, von da aber durch Kürzung gesteigert wird.

Je nach den weiteren oder engeren Stellungen der Stimmbänder unterscheidet man ein tiefes, mittleres und hohes Register, bei den höchsten Tönen kommt als Neues die Herabsetzung der falschen Stimmbänder ins Spiel, wodurch vollends die Stimmbandmasse bis auf einen winzigen Rest von der Beteiligung an den Schwingungen ausgeschlossen wird. Man nennt den Uebergang von einer Stellung der Stimmbänder in die andere Registerwechsel. Der Stimmklang wird jedesmal ein anderer und die hohen Töne eines Registers, die durch Spannung (zwischen Grund- und Schildknorpel) entstehen, klingen vor gefangstechnischer Ausbildung der Stimme mühevoller als die tiefen des nächsten Registers.

Trotz des individuell unendlich abgestuften Klangcharakters giebt sich die menschliche Stimme durch die Vokale, ohne deren Geleite kein Ton den Mund des Menschen verlassen kann, als solche unzweideutig kund. Wir bringen die Vokale durch verschiedene Gestaltung des Mundraumes hervor; jeder Hohlraum hat seinen Eigenton, woraus folgt, daß die Vokale ihre Eigentöne haben (nach König u o a e i = b^0 bis b^4 , nach Helmholtz andere). Die Resonanz z. B. des Vokaltens A begünstigt am stärksten dis, fis, b, weniger c, d, f, a, noch weniger cis, e, g, h, am wenigsten gis; es ist dies immerhin interessant auch für Gesangskomponisten. Die charakteristische Verschiedenheit der Vokallänge ist optisch darstellbar durch Projizierung der tönenden Flammen, in die man Vokale hineinsingt.

255. Die Saite. Ihr Tongebiet und ihre Gesetze. Die Saite ist nicht bloß praktisch, sondern auch wissenschaftlich das fruchtbarste Tonerzeugungsmittel; von der einen Saite des Monochords nahm alle musikalische Erkenntnis ihren Anfang. Auf einer einzigen Saite ist das ganze Tongebiet darstellbar, was mit keinem andern Körper möglich ist. 32 einfache

Schwingungen gaben das Subcontra C an, unterhalb dessen sich die Töne kaum mehr musikalisch bestimmen lassen. Da auf der Orgel die unterste Oktave durch 32 Fuß lange Pfeifen vertreten ist, redet man auch vom 32füßigen C, D, E, und bei entsprechend aufsteigenden Oktaven vom 16-, 8-, 4füßigen. Die obere Grenze der musikalisch unterscheidbaren Töne ist mit $c^6 = 16384$ Schwingungen genügend hoch gegriffen. Die Orgel umfaßt über 9 Oktaven (Subcontra C—H, Contra C—H, große Oktave c_0 — h_0 oder C—H, kleine c^0 — h^0 oder c—h, ein- bis fünf gestrichenes c) u. s. w. Die Grenze der Tonwahrnehmung überhaupt reicht nach Savart bis 96 000 Schwingungen.

Daß eine Saite von verschiedener Länge verschiedene Töne giebt und zwar in bestimmten Verhältnissen (die wichtigsten: Oktave 1:2, Quinte 2:3) entdeckte schon Pythagoras. Erst Merzenne wies dann im 17. Jahrhundert die Schwingungszahl als das Bestimmende der Tonhöhe nach. Hat man die Schwingungszahl eines Tones gefunden, so lassen sich durch Verhältnissrechnung diejenigen aller weiteren Töne erkennen. Für die Saiten gelten nun in Betreff der Schwingungszahlen folgende Gesetze. 1) Die Längen der Saiten verhalten sich umgekehrt wie die Schwingungszahlen. 2) Die Spannungen (Belastungen) müssen im geraden quadratischen Verhältnis zu den Schwingungszahlen wachsen. Mit diesen beiden Gesetzen ließe sich in der Praxis nicht viel anfangen. Erst zwei andere Gesetze machen möglich, daß man eine Violine oder ein Klavier bauen kann. 3) Die Schwingungszahl ändert sich nämlich auch umgekehrt mit der Dicke der Saite und 4) die leichtere Saite schwingt schneller als die schwerere und zwar im um-

gekehrten Verhältnisse zur Quadratwurzel des Gewichtes dieser Saite (also Messing, das 4 mal so leicht als Platin ist, 2 mal so schnell). Wollte man etwa für die Violine nur gleich dicke und gleich gespannte Saiten wählen, so müßte z. B. die G-Saite um $3\frac{1}{2}$ fache der E-Saite verlängert werden; in Vergrößerung der Dichte hat man ein bequemes Mittel, die Schwingungszahl zu verlangsamen. Reicht dies auch nicht mehr, so schreitet man zur Gewichtserhöhung der Saite und überspannt sie mit Kupferdraht, beim Klavier auch mit solchem aus Messing oder Eisen.

256. Teiltöne. Versuchen wir die Schwingungszahl anstatt durch Verkürzung der Saite durch Zerlegung der Schwingungen der ganzen Saite zu erhöhen, so ergeben sich folgende Töne: nehmen wir $c_0 = 1$, so ist $\frac{1}{2}$ Länge = c^1 , $\frac{1}{3}$ = g^0 , $\frac{1}{4}$ = c^1 , $\frac{1}{5}$ = e^1 , $\frac{1}{6}$ = g^1 , $\frac{1}{7}$ = b^1 , $\frac{1}{8}$ = c^2 , $\frac{1}{9}$ = e^2 u. s. w. Dem Violinspieler sind diese Teiltöne, die von den Partialerschwingungen der Saiten herrühren, als Flageolettöne bekannt. Er bringt sie hervor, indem er den Finger leicht auf dem Teilpunkt der Saite setzt, der dem gewünschten Ton nach obigem Schema entspricht. Man kann die natürliche Saitenteilung soweit fortsetzen als man will, immer wird der nächsthöhere, auf diese Art hervorgerufene Ton einen „Schwingungsknoten“ und einen „Bauch“ mehr haben (siehe das über die Wellenbewegung Gesagte); die einzelnen Abteilungen der schwingenden Saiten sind unter sich immer gleich.

Die Schwingungszahlen der Teiltöne befolgen das Gesetz der natürlichen Zahlen, der zweite Teilton schwingt doppelt, der dritte dreimal so rasch u. s. w. als der Grundton, ein überaus

merkwürdiges Naturgesetz. (Ist die Anzahl der Teiltöne, Grundton als ersten gerechnet = m , so sind die Knoten = $m-1$, die Bäuche ebenfalls = m und die Schwingungszahlen = $m N$.) Saiten und auch die Luftsäulen begünstigen in dem Maße, als deren Länge ihren Querschnitt übertrifft, die Bildung höherer Obertöne, jedoch stets auf Kosten der Stärke und Klangfülle des Grundtons und seiner nächsten Obertöne. Ueberhaupt können kürzere Körper schwerer zum Tönen gebracht werden.

257. Gleichzeitigkeit der Obertöne. Die Teiltöne oder Obertöne einer Saite sind aber nicht bloß einzeln der Reihe nach zu entlocken, sondern ertönen insgesamt gleichzeitig mit dem Grundton und zwar ganz von selbst. Das gleichzeitige Beisammensein verschieden rascher Schwingungen kann sich unsere Vorstellungskraft nur schwer ausdenken; dazu kommt, daß die äußeren Formen der Schwingungen je nach der Art der Erregung und der Erregungsquelle die größte Mannigfaltigkeit aufweisen.

Wir stehen vor solchen Thatsachen mit staunender Bewunderung, besonders wenn wir bedenken, daß in allen wie immer hervorgebrachten oder gearteten musikalischen Klängen Obertöne enthalten sind, die nur auf künstlichem Weg beseitigt werden können.

Von dem Vorhandensein der Obertöne überzeugen folgende Versuche am Klavier: Hebt man den Dämpfer eines tieferen Saitenchors z. B. von C und schlägt kurz und kräftig die den Obertönen entsprechenden Tasten c^0 g^0 c^1 e^1 g^1 b^1 c^2 d^2 an (einzeln oder zugleich), so klingen diese Töne auch bei aufgelassenen Tasten fort; sie hören auf, sobald der C -Dämpfer wieder niederfällt. Oder hält man die Tasten der Obertöne niedergedrückt,

ohne daß ein Ton entsteht, und schlägt C kurz und kräftig an, so werden sie deutlich vernehmbar sein, nur c^2 und d^2 fehlen. Und das hat folgenden Grund.

258. Angriffsstelle der Saite. Wird eine Saite genau in der Mitte zum Klang erregt, so erstickt jeder Oberton, der seinen Knoten in der Mitte hat. Von großer Wichtigkeit ist also der Angriffspunkt. Er muß die ungehemmte Entwicklung einer möglichst vollständigen Reihe harmonischer Obertöne begünstigen, sonst erscheint der Klang statt gesättigt hohl, näselnd; das Angreifen nächst dem Ende bewirkt einen scharfen, klimpernden Ton. Die Klaviersaiten C werden vom Hammer an der Stelle getroffen, wo c^2 und d^2 ihre Schwingungsknoten haben; daher das Fehlen dieser Obertöne. Die richtige Angriffsstelle der Saite ist für den Klavierbauer ein entscheidendes Problem; die andern Saiteninstrumente überlassen dem Spieler die Wahl der Erregungsstelle.

Er wird finden, daß er die Klangfarbe wechselvoll gestalten kann, je nach den Punkten, an denen er die Saite zum Tönen bringt, ebenso aber auch je nach der Art der Erregung.

259. Klangfarbe. Die Aufklärung aller dieser Erscheinungen hat Helmholtz mit dem Nachweis geliefert, daß die Klangfarbe jedes Tons abhängt von der größeren oder geringeren Zahl der den Grundton begleitenden Obertöne. Es ist dies eine großartige Entdeckung, die mit einem Schlag ein großes Gebiet der Forschung aufhellt. Der gleich hohe Ton derselben Schwingungszahl, auf Geige, Flöte, Trompete, Orgelpfeife erklingend, ist nach der Klangfarbe genau unterscheidbar, weil jedesmal die Zahl, Höhe und Stärke der gleichzeitigen Obertöne eine andere ist.

Einfache, reine Klänge ohne Obertöne erzielt man durch kugelförmige Resonatoren; bei Klangkörpern, deren Formen das Auftreten von Obertönen begünstigen, weckt man den Eigenton ihres Luftraumes durch einen zweiten gleichgestimmten Körper (z. B. eine Stimmgabel), dessen Obertöne mit denen des resonierenden nicht zusammenfallen. Weite, gedeckte Pfeifen, bauchige Flaschen, der Brummkreisler u. s. f. geben auch obertonlose Klänge, leider durch Begleitungsgeräusche getrübt. Die Flageolettöne der Saiten, Kopftöne weicher Sopranstimmen, schwache Flöten- und unter den Vokalen das U zählen auch zu den annähernd reinen Tönen. Klänge, die außer dem Grundton keine oder nur schwache Obertöne haben, sind weich und kräftig, in der Höhe hell, in der Tiefe dumpf. Von niederen Obertönen in mäßiger Stärke begleitete Klänge, z. B. die des Waldhornes, sind voll, weich, wohlklingend. Klänge mit vielen hohen Obertönen (Saiten, Blechinstrumente) sind eindringlich, durchdringend, scharf. Der Grad ihrer Stärke bedingt die verschiedenen Nuancen zwischen kräftig, durchdringend, schmetternd. Klänge mit ungeradzahligen Obertönen (gedeckte Pfeifen, Klarinette) sind hohl, nasal. Je schwächer der Grundton gegenüber den Obertönen, um so leerer wird der Klang (z. B. Gemshornstimme der Orgel). Uebertragen die Teiltöne den Grundton an Stärke und Deutlichkeit, so gäbe es keinen Klang, keine Klangfarbe, sondern einen Akkord. Eine Klangfarbe besteht nur, solange als die Obertöne neben dem Grundtone undeutlich vernommen werden. Der Einfluß des Materials der tönenden Körper

auf die Klangfarbe ist noch nicht genügend erforscht. Die charakteristischen Begleitungsgeräusche der Klänge, aus denen man früher die Entstehung der Klangfarbe herleitete, ist für die Kennzeichnung entbehrlich: man hört die Klangfarbe unverändert aus einer Entfernung, welche die Geräusche unvernnehmbar macht.

260. Die Luftsäule und ihre Gesetze. Die schwingende Luftsäule ist das tönende Prinzip der Orgelpfeifen und Blasinstrumente. Neben der Form, noch das Material der Wandung, wenn sie nicht starr und glatt ist, übt Einfluß auf die Bildung der Tonhöhe der stehenden Tonwelle. Dagegen kommt es wesentlich an auf das Verhältnis zwischen Weite und Länge der Wände; die Länge der Luftsäule muß mindestens das 12fache ihres Querdurchschnittes betragen, wenn sich wie bei Saiten die Schwingungszahlen umgekehrt wie die Längen verhalten sollen. Das Verhältnis zwischen Länge und Schwingungszahl liegt bei Luftsäulen nicht so einfach wie bei Saiten, einmal weil jene nicht so fest abgrenzbar sind, vielmehr ihre Schwingungen ein Stück über die Enden der Röhre hinausragen; deshalb berechnet man beim Bau von Orgelpfeifen „reduzierte Längen“, vertieft durch „Stopfen“ der Töne deren Klang.

Zweitens ändert sich bei Verkürzung der Röhre das Verhältnis der Weite und Länge, so daß man durch Teilung der Röhre keine reine Oktave erhält. Dieser Umstand macht die Ventilinstrumente der Blechbläser so gefährlich für die Tonreinheit. Die einzig mögliche Schwingungsart ist bei Luftsäulen die Längsschwingung. Bei offenen Röhren geben, merkwür-

digerweise eine Knotenfläche in der Mitte; bei gedeckten Röhren bildet der Verschluss die Knotenfläche. Die Bäuche haben gleiche Dichtigkeit der Luftmassen wie die äußere Luft; anders die Knoten, welche Druckmaxima darstellen. Bewirkt man daher eine Oeffnung anstelle der Knoten, so wird der Bestand der Schwingungen gestört und man erhält den Teilton nach den Gesetzen, die wir bei den Saiten fanden. Wird die mittlere Knotenfläche geöffnet, so erhält man ungefähr die höhere Oktave u. s. w. Die Stellen der Tonlöcher und Klappen der Blasinstrumente und deren Applikatur fußen auf diesem Verhalten der Luftsäule.

Die durch die Knoten markierten Teilschwingungen, die theoretisch ebenso hoch hinaufgehen wie bei Saiten, finden nur in engen Grenzen musikalisch-praktische Verwertung. Bei der Orgel ist jede Pfeife überhaupt nur auf einen Ton gestimmt. Die Blasinstrumente, von denen jedes in einer Röhre eine Anzahl von Tönen produzieren muß, haben nur wenige Oktaven Umfang. Je enger die Röhre, desto leichter kommen die Obertöne. Noch sei bemerkt, daß in gedeckten Röhren nur ungeradezahlige Obertöne entstehen können, während in offenen Röhren sowohl die geradezahligen als die ungeradezahligen vorkommen.

261. Klangerzeugung in der Luftsäule. Eingeleitet wird die Schwingung der Luftsäule durch Luftdruck, der eine Reihe von Verdichtungen und Verdünnungen der im Hohlraum zusammengepreßten Luft bewirkt; hört der Druck auf, so gelangen die Luftteilchen sofort zur Ruhe und der Ton erlischt, im Gegensatz zu transversal schwingenden Tonquellen, die eine Zeitlang weiter tönen. Die Druckimpulse müssen ebenso rasch aufeinander

folgen, wie die Schwingungen des hervorzurufenden Tones. Die Art des Anblasens und der Vorrichtungen dazu sind fast bei jedem Instrument verschieden. Bei Labialpfeifen und bei den Flöten muß der Luftstrom erst an einer Schneide branden, um die Schwingungen im Hohlraum einzuleiten; ein in Richtung zur Axt hineingesandter Luftstrom würde keinen Ton wecken.

262. Zungen. Wenn bei diesen Körpern der bandförmige Luftstrom selbst eine Art stabförmiger „Zunge“ bildet, so werden andere Instrumente durch materielle Zungen aus Metall, Holz oder membranösen Gebilden angeblasen.

Durchschwingende oder durchschlagende Zungen sind solche, die frei, ohne Hemmung schwingen können, aufschlagende, die bei jeder Schwingung gegen einen festen Gegenstand anprellen, der beweglich oder unbeweglich sein kann. In den metallenen Zungenpfeifen der Orgel finden beide Arten Anwendung; im Harmonium die durchschlagende aus Metall, bei Klarinett, Oboe und Fagott die aufschlagende (bei Oboe und Fagott eine Doppelzunge) aus Holz, bei den Blechblasinstrumenten sind es menschliche Lippen, bei der Stimme die Stimmbänder des Kehlkopfes, welche die schwingende Doppelzunge bilden — immer hat die Zunge die Aufgabe, durch abwechselnde Stöße Verdichtungs- und Verdünnungswellen zu veranlassen. Ein wichtiger Unterschied ist aber der, daß die Luftzunge (nicht die Luftsäule) des Resonanzrohres bedarf, während materielle Zungen unter Umständen dieses Mittel entbehren können. Als selbständig tönende Körper betrachtet, gehören die Zungen zu den Stäben.

263. Stäbe. Wird ein kurzes Bruchstück einer Saite ohne Spannung zum Tönen gebracht, vermöge

seiner eigenen Steifigkeit, so ist der Draht zum Stabe geworden, der an einem Ende befestigt oder ganz frei eine neue Tonquelle bildet. Das akustische Verhalten von Stäben ist dadurch interessant, daß die Intervallfolge ihrer Obertöne eine andere ist als bei Saiten und Luftsäulen. Stäbe geben nie harmonische Obertöne. Die harmonischen Obertöne einer Stimmgabel sind nicht Partialtöne des schwingenden Körpers selbst, sondern direkte Folge der Lusterregung (Lufttöne, siehe Kombinationstöne). Die Tonhöhe der Stäbe wächst mit der Dichtigkeit, Dicke und Elastizität des Stoffes; die Schwingungszahlen nehmen im umgekehrten Verhältnis zu den Quadraten der Länge zu. Transversal schwingende gerade Stäbe finden in der Musik bloß bei einseitiger Befestigung, als Zunge, Verwertung (Rohrwerke in Orgeln, Harmonium, Zungen bei Oboe, Klarinette, Fagott; auch sogenannte Spielwerke). Das Harmonium ist der Orgel und dem Klavier gegenüber nur deshalb im Nachteil, weil die freie Zunge hohe und unharmonische Obertöne bildet und deshalb eine Klangquelle niedriger Ordnung ist. Transversal schwingungen gekrümmter Stäbe kann man an der Stimmgabel beobachten. Mit zunehmender Biegung eines Stabes rücken die Schwingungsknoten immer näher zur Mitte und der Ton wird tiefer; bringt man in die Mitte der Biegung einen Stiel, so überträgt dieser die Vibrationen der Gabel auf größere mit schwingende Flächen. Da der Stiel erst bei jeder zweiten Schwingung der Zinken einmal auf die Unterlage stößt, so muß der Unterton einer Oktave entstehen; wenn jeder dritte, vierte u. s. w. Stoß zur Geltung kommt, erhält man die verkehrte Reihe der Obertöne als Unter-

töne. Werden Stäbe in Form von offenen Dreiecken (Triangeln) und mit einem Metallstift zum Tönen gebracht, so haben die unharmonischen Obertöne so enge Lagen und bedeutende Kraft, daß eine bestimmte Tonhöhe nicht mehr erkennbar ist. Die Longitudinal schwingungen von Stäben, deren enge Obertonreihe None, Quarte, Sekunde u. s. w. bilden, haben ihren unangenehmen Klanges wegen außer für die Wissenschaft keine Bedeutung. Torsions töne, die gegenüber Longitudinaltönen ziemlich höher sind, eignen sich noch weniger zu musikalischen Zwecken; bei Saiten veranschaulicht man sich diese Schwingungsart durch Aufzwicken und Loslassen.

264. Platten. Mit schwingenden Platten (in der Musik Becken, Tamboram) sind wissenschaftliche Experimente mannigfachster Art ausführbar. Nur den Tönen runder Scheiben (bei zentraler Befestigung) hat man bis jetzt das Zahlengesetz der natürlich unharmonischen Intervallfolge der Obertöne abgelautet. Halb so große Platten klingen eine Oktave höher, ebenso erhöht Verdoppelung der Dicke den Ton um eine Oktave. Das Interessanteste ist die Beobachtung des Verhaltens von aufgestreutem Sand auf quadratischen Platten, der von den vibrierenden Partien abgeworfen wird, auf den Knotenlinien abzuliegen bleibt und die nach ihrem Entdecken sogenannten Chladnyschen Klangfiguren bildet; alle solche Linien gehören gekrümmten Symmetrien an, die sich nicht schneiden. Unter den krummen Flächen ist die Glocke die wichtigste; ihre Tonfolge entspricht im allgemeinen den Quadraten von 2, 3, 4 u. s. w. (von C ausgehend: $c^0 d^1 e^2 gis^2 a^2$).

265. Membranen. Lassen sich eine Platte immer dünner werden,

bis sie die Steifigkeit einbüßt und über einen Rahmen gespannt werden muß, um wieder elastisch zu werden, so haben wir eine Membrane. Für Schlaginstrumente werden nur gegerbte tierische Felle als Membrane verwendet (Trommel, Pauke, Tamburin). Für wissenschaftliche Untersuchungen wählt man garte Membranen und behandelt sie anders als durch Schlag, nämlich durch Zerrung, um die Eigentöne hervorzurufen; ferner bewirkt man die Uebertragung der Schwingungen fremder, tönender Körper, welche Erregungsart beim Hören stattfindet. Richtet man auf die Membranen Ströme verdichteter Luft, so ahmt man den Vorgang beim Singen und Sprechen nach. Die Ober-töne bei Membranen bilden in allen Fällen eine unharmonische Folge.

266. Das Ohr (Fig. 1). Ehe wir nun die musikalischen Klänge weiter analysieren, betrachten wir, da diese Analyse in wachsendem Maße die subjektive Seite der Klangempfindung zu betonen hat (Konsonanz, Dissonanz), jenes Organ, das unserem Bewußtsein den Schall überhaupt vermittelt: das Ohr.

Seine anatomische Beschaffenheit, die sehr kompliziert ist, soll nur in den Hauptumrissen beschrieben sein. Das äußere Ohr besteht aus der Ohrmuschel (M) und dem Gehörgang (G), der durch das ovalförmige Trommelfell (T), eine dünne, elastische Membrane (von 40—50 mm), schräg abgeschlossen wird. Dahinter befindet sich das mittlere Ohr, ein länglicher Hohlraum des Schläfenbeins, die Trommel- oder Paukenhöhle (Th), worin die drei eng miteinander verbundenen Gehörknöchelchen Hammer (H), Amboss (A) und Steigbügel (St) liegen.

Der Hammer bewirkt eine Spannung des Trommelfells einwärts, und zwar durch den Muskel Sp.;

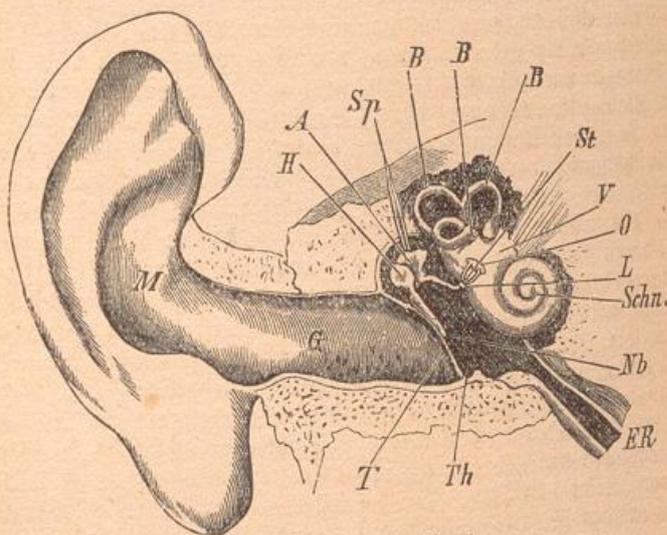
der nach innen gezogene Punkt heißt Nabel (NB). Die innere Wand der Paukenhöhle hat zwei Oeffnungen, das ovale und das runde Fenster, die häutig verschlossen sind. Das ovale Fenster (O), wird vom frei beweglichen, lose angewachsenen Steigbügel mehr oder weniger gedrückt. Das runde Fenster liegt unterhalb des ovalen (auf der Figur nicht sichtbar). Völlig offen ist die Paukenhöhle nur da, wo sie sich in die Ohrtrumpete oder Eustachische Röhre (ER) fortsetzt; letztere leitet zur Nasenhöhle, gleicht die Luft der Paukenhöhle mit der äußeren aus und verhindert einseitige Spannungen des Trommelfells (am erfolgreichsten, wenn der Mund geöffnet ist). Der innerste und wichtigste Teil des Ohrs ist das seiner zahllosen Windungen wegen sogenannte Labyrinth (L), schräg zum Gehörgang stehend; in dieses führen jene Fensterchen, und zwar das ovale in den Vorhof (V), das andere in die zu unterst liegende Schnecke (Schn).

Am entgegengesetzten Teil des Labyrinths krümmen sich C förmig drei Kanäle, die Bogengänge (B, B, B). Die Schnecke aber, die in $2\frac{1}{2}$ Windungen ansteigt, birgt als geheimnisvollsten Teil eine ebenfalls spiralförmig gewundene Spiralschnecke, wodurch sie in zwei Gänge oder Treppen geteilt wird. Dieses knöcherne Spiralschneckenblatt reicht aber nicht bis zur gegenüberstehenden Wand des Schnecken-gangs, sondern spaltet sich in zwei Membranen, von denen die eine, die Grundmembrane, jene Gebilde und elastischen Stäbchen trägt, die das Cortische Organ heißen. Dem Gehirn vermittelt die Schallempfindung der im Labyrinth endigende Gehörnerv.

267. Das Gehör. Ueber die Funktionen aller dieser Teile ist man sich noch nicht vollständig klar. Das äußere Ohr dient zur

Aufnahme des Schalls, der dem Trommelfell von der Ohrmuschel und dem Gehörgang schon in mannigfach verstärkender Brechung zugeführt wird. Das Trommelfell, die vollkommenste Membrane, schwingt mit allen Tönen im Einklang. Klar ist auch die molekuläre Fortpflanzung des Schalls durch die Gehörknöchelchen bis zum ovalen Fenster des Labyrinths. Das runde Fenster kann nur in geringstem Maße der Uebertragung des Schalls an das

grenzen vorkommende Schwingungszahl reagiere. Die gleichen Eigenschaften schrieb er später der Grundmembrane selbst zu. Das Cortische Organ hält man nun für einen Dämpfungsapparat. Doch liegen diese Fragen noch offen. Was die Theorie der Schallempfindung anlangt, so führt Helmholtz die Erscheinungen des Hörens auf solche des Mitschwingens zurück; das Ohr zerlegt jeden zusammengesetzten Klang in seine Bestandteile und



Das Innere des Ohres.

Labyrinth dienen; dafür dient es als Schutzapparat gegen allzu starke Stöße, indem es der Wassermasse des Labyrinths ein momentanes Ausweichen gestattet. Merkwürdig ist, daß so ziemlich der ganze Apparat vor den Fenstermembranen zerstört sein kann, ohne das Gehör ernstlich zu gefährden. Selbst die Bogengänge des Labyrinths scheinen für die Schallempfindung entbehrlich zu sein. Der Sitz derselben ist wohl die Schnecke; das Cortische Organ hielt Helmholtz früher für eine Sammlung resonierender Körper, von denen jeder auf eine im Bereich der Hör-

empfindet vermittelt verschieden Nervenfasern jeden derselben trennt; die einheitliche Auffassung der Klangfarbe wäre also einer widerum zusammensetzenden Thätigkeit des Ohres zuzuschreiben. Der Wahrnehmungsprozeß selber ist wie beim Sehen ein in letzter Hinsicht psychologischer Vorgang, ein Arphänomen, das nicht weiter analysierbar ist.

268. Subjektive Musik. — Interferenz. Wir wenden uns nun dem Hauptproblem der subjektiven Musik zu, nämlich der Konsonanz und Dissonanz und werden es im folgenden immer mit zwei Klängen oder Tönen zu thun haben.

nachdem wir zuvor nur die physikalischen Grundlagen des einzelnen Klangs oder Tons betrachteten.

Warum empfindet unser Ohr gewisse Intervalle der Musik als wohlklingender, andere als übellautend? Um auf diese Frage die ausschließende Antwort zu geben, ist es nötig, noch einmal etwas weiter auszuholen und auf die Wellenlehre zurückzugreifen. Man nennt in ihr Interferenz die gegenseitige Aufhebung zweier entgegenwirkender Wellenkräfte. Die resultierende Bewegung jedes Wasserteilchens ist die Summe der demselben mitgetheilten individuellen Bewegungen. Sind diese auf einer Seite positiv, auf der andern negativ, so ist die Summe = Null. Die Erscheinung der Interferenz führte in der Optik zur Wellentheorie des Lichts, deren Hauptbeweis darin liegt, daß wir Dunkelheit hervorbringen können, indem wir Licht zu Licht fügen. Ebenso können wir, wenn wir Schall zu Schall fügen, unter Umständen jede Wirkung aufs Ohr aufheben, sobald die Wiederkehr (Phase) des Schwingungsvorgangs in entgegengesetztem Sinn erfolgt. Treffen zwei Einklänge so aufeinander, daß Verdünnung gegen Verdichtung und umgekehrt ankämpft, so erlischt der Klang. Um dies zu erweisen, muß man mit Stimmgabel, tönenden Flammen u. s. w. experimentieren. Eine Wirkung der Interferenz kann jeder an einer Glocke beobachten, deren Klänge man auch bei ruhiger Luft abwechselnd deutlicher und undeutlicher hört, und zwar das letztere, wenn ihre Töne stärker werden.

269. Schwebungen. Die wechselweise Interferenz der Glocke macht sich dem Ohr bemerkbar durch Stöße oder Schwebungen, deren Zahl in einem bestimmten Verhältnis zu den Schwingungszahlen der Töne stehen, die Interferenz bewirken.

Nehmen wir an, ein Körper mache 32 Schwingungen in der Sekunde, der andere 33, und beide beginnen zugleich mit einer verdichtenden Schwingung: so wird die 32. Schwingung des einen als verdünnende mit der verdichtenden 33. des andern zusammenfallen, der Klang in diesem kurzen Augenblick also verschwinden.

Die Interferenz dauert in die zweite Sekunde hinein, in der die Phasen entgegengesetzt beginnen, dann setzen beide Wellen ihre Schwingungen mit gleicher Schwingungszahl fort, genau wie die Wasserwelle, die nicht einfach vernichtet wird, wenn sie mit einer zweiten interferiert, sondern ihren Weg nachher fortsetzt; am Ende der zweiten Sekunde sind die Schwingungen gleich, verstärken sich also. Wir haben eine Schwebung in zwei Sekunden; durch einfache, nachrechnende Zeichnung kann sich jeder veranschaulichen, daß, wenn die Schwingungszahl etwa um 2 oder 4 differiert, wir 1 oder 2 Schwebungen in der Sekunde empfinden. Wenn einzelne Körper wie eine Glocke, von denen eigentlich einzelne Klänge zu erwarten sind, Schwebungen hören lassen, so liegt der Grund darin, daß es kaum gelingt, die Dimensionen absolut symmetrisch herzustellen; demzufolge erzeugt der Körper mehrere Töne. Die Schwebungen der Menschenstimme und jene auf Streich- und Blasinstrumenten sind keine Interferenzresultate, sondern Pseudoschwebungen, die durch abwechselndes An- und Abschwollen der Tonstärke oder durch sehr enge Trillern entstehen.

Wenn eine Schwebung eintritt, sobald ein Ton dem andern zwei einfache Schwingungen in der Sekunde vorausseilt, so folgt, daß jeder Zusammenklang mehrerer Töne von Schwebungen begleitet ist. Es fragt sich nun,

wie die Schwankungen aufs Gehör wirken. Betragen sie nur 1—4 in der Sekunde, so machen sie den Eindruck ruhigen Bogens; betragen sie mehr, so empfindet das Ohr die ununterbrochenen Reize als unangenehm und die Rauigkeit steigert sich, bis die Schwebungen 32—33 erreichen, verliert sich aber allmählich wieder, je mehr die Eindrücke ineinander übergehen, und ist bei einer Schnelligkeit von 132 völlig verschwunden. Ueber die Grenze von 132 hinaus sind die Schwebungen für unser Ohr nicht mehr da. Vor allem ist mithin die Wirkung der Schwebungen aufs Gehör von ihrer absoluten Zahl abhängig. Ein Intervall, das vier Schwebungen macht, die nicht unangenehm sind, wird in der dritthöheren Oktave mit 32 Schwebungen als sehr rau empfunden.

Lassen wir umgekehrt die Schwebungen — etwa 32 — gleich, und suchen in verschiedenen Tonlagen das jeweilige Intervall dafür, so stoßen wir auf eine neue Erscheinung. Die Differenz der Schwingungen und damit auch der Schwebungen ist zwischen c^2 und h^1 , d^1 und c^1 , g^0 und e^0 , e^0 und c^0 , c^0 und G , endlich G und C überall gleich, nämlich 64 bzw. 32. Die gleiche Zahl von Schwebungen wird aber in höheren Tonlagen schärfer, deutlicher empfunden als in tieferen; der Klangfluß der Quinte wird nahezu als glatt empfunden, während c^2 und h^1 das Ohr schrill berührt. Darum sind auch Intervalle in hohen Lagen empfindlicher gegen gleich kleine Unreinheiten als in tiefen.

Endlich bemerken wir, daß der ganze Charakter der Schwebungen sich mit der Größe des Intervalls ändert. Je größer das Intervall, desto weniger empfindlich die Schwebungen. Man muß sich aber immer beides vergegen-

wärtigen: sowohl Größe als Lage des Intervalls bestimmen den Charakter der Schwebungen. Enge Akkorde klingen in tieferen Lagen schlüpfrig, während die gleich großen Intervalle weiter oben angenehm klingen.

Zu den Schwebungen zweier zusammenklingender Töne gesellen sich nun die Schwebungen der Obertöne jedes einzelnen Klangs. Diese Schwebungen sind bei weiten Intervallen in niederen Lagen glatt, voll und rein, in den höheren, wo sie eng zusammenrücken, scharf und rau, woraus sich erklärt, woher Klänge mit stark hervortretenden höheren Obertönen ihren scharfen Charakter haben. Kehren wir zum Zusammenhang mehrerer primären Klänge zurück, so wird derselbe natürlich außerordentlich kompliziert durch die Schwebungen der Obertöne jedes einzelnen. Es kann für Charakter und Wohlklang des Zusammenschlusses sehr wichtig sein, von welchen Tonquellen er dargestellt wird, was für die Orchesterkomposition von Bedeutung ist.

270. Erklärung von Konsonanz und Dissonanz. Wir werden nun dem Verständnisse des Lesers keine Schwierigkeiten bereiten, wenn wir in die Definition von Konsonanz und Dissonanz, die Helmholtz geliefert hat, alles bis jetzt über die Schwebungen Gesagte zusammenfassen: Ein Zusammenklang ist um so konsonanter, je unmerklicher, um so dissonanter, je merklicher seine Schwebungen sind. Obere Konsonanz ist eine ununterbrochene Tonempfindung. Streng genommen haben wir es bei aller Tonbildung mit ununterbrochenen Impulsen zu thun; schon der Name „Luftstöße“, den wir immer gebrauchten, deutet auf die wechselnde Folge von Verdichtungen und Verdünnungen hin. Doch gilt ein Ton

weder als Konsonant noch dissonant.

271. Konsonante und dissonante Intervalle. Prüfen wir nun die verschiedenen Intervalle auf ihren Wohlklang. Da in verschiedenen Lagen die Schwingungsdifferenz und damit die Schwebungen zweier Töne konstant sein können, so sollten wir eigentlich erwarten, daß die dabei erzeugten Intervalle, obwohl sie mit mathematischer Notwendigkeit verschieden sein müssen, nun gleichen Klangcharakter hätten. Thatsächlich unterscheiden wir aber jedes Intervall zusammenschlingender Töne aufs bestimmteste vom andern. Demnach kann der Klang der Intervalle nur durch die Schwebungen der Obertöne sein Gepräge bekommen und so ist es auch. Je mehr Obertöne bei einem Intervall zusammenfallen, desto weniger Schwebungen, desto konsonanter der Klang, und umgekehrt. Genau nach diesem Prinzip ordnen sich in der modernen Musik die Konsonanzen und Dissonanzen und haben sich wohl von jeher so geordnet. Konsonanzen erster Ordnung sind außer dem Einklang der Prime die Oktave mit 2, die Duodezime, die Quinte mit 3 und die Quarte mit 1 zusammenfallenden Oberton (Quarte wird hieher gerechnet nur wegen ihrer Beziehung zur Quinte in der Tonleiter). Als Konsonanzen zweiter Ordnung haben die große Sext, die große und kleine Terz einen, die kleine Sext keinen Oberton gemeinsam. Letztere verdankt ihre Einreihung in die Konsonanzen nur der Funktion im Tonleitersystem. Die Dissonanzen beginnen mit der kleinen Septime, obwohl sie günstigere Schwebungsverhältnisse als die kleine Sext hat. Große Sekunde, große Septime, kleine Sekunde, übermäßige Quarte (Tri-

tonus) sind die Dissonanzen. Ueber eine Oktave hinaus wiederholen sich die Erscheinungen nicht ganz in gleicher Weise; je größer das absolute Intervall, desto weiter entfernen sich die Obertöne des einen Klanges von jenen des andern, so daß die Schwebungen mehr und mehr verschwinden. Schon die Duodezime macht weniger Schwebungen als die Quinte. Dissonanzen, die nach dem Maß des Intervalls die schrecklichsten wären, verlieren in Abständen von wenigen Oktaven ihre Schärfe und werden, an die Grenzen des Tongebiets verlegt, kaum mehr übel empfunden. Interessant ist, daß wir bei Klängen, die keine oder schwache Obertöne haben, die Intervalle naturgemäß ganz anders, viel wohl lautender und ohne scharfe Abgrenzung empfinden. Gegen Verstimmung sind Konsonanzen viel empfindlicher als Dissonanzen und zwar ganz nach dem Grad ihrer Ordnung.

272. Schwingungsverhältnisse der Intervalle. Nachdem wir die Intervalle hinsichtlich ihres Wohlklanges geprüft haben, untersuchen wir nachträglich die Verhältnisse ihrer Schwingungszahlen.

Der Grundton verhält sich zur Oktave wie 1:2, zur Duodezime wie 1:3, zur Quinte wie 2:3, zur Quarte wie 3:4. Zur großen Sext wie 3:5, großen Terz 4:5, kleinen Terz 5:6, kleinen Sext 5:8. Zur großen Septime wie 5:9, großen Sekunde 8:9, kleinen Septime 8:15, kleinen Sekunde 15:16. Zur übermäßigen Quarte wie 32:45. Demnach verhält sich der Wohlklang zweier Intervalle umgekehrt wie die Reihe der natürlichen Zahlen. Ueber rascht von diesem wunderbaren Gesetze glaubte man vor alters (Pythagoras), daß diese Zahlenverhältnisse selbst der Grund des musikalischen Wohllauts seien. Noch Leibniz und

Euler schrieb das Wohlgefallen an Konsonanzen dem Vergnügen der Seele an leichtem Zählen einfacher Verhältnisse zu.

Helmholtz, dem die Akustik die fundamentalsten Erkenntnisse verdankt, hat definitiv nachgewiesen, daß die Beurteilung von Konsonanz und Dissonanz in erster Reihe eine physiologische Funktion des Ohrs, nicht eine psychologische der zählenden Seele ist. Nicht Zahlenverhältnisse, sondern Menge, Lage und Stärke der Schwebungen der Obertöne bestimmen den größeren oder geringeren Wohlklang verschiedener Zusammenklänge.

273. Kombinationstöne. Es wird den Leser interessieren, noch eine weitere Bedingung zu erfahren, von der Konsonanz und Dissonanz abhängt. Wiederum greifen wir auf die Wellentheorie zurück. Die Erscheinungen der Reflexion und nun auch der Interferenz kennen wir genügend. Wir wissen auch, daß die Wellen sich ohne Störung kreuzen, übereinander lagern, wodurch es einzig ermöglicht wird, daß die jedem Ton entsprechenden Wellensysteme unverändert an unser Ohr gelangen. Wenn aber die Luft durch einen tönenden Körper, dessen Schwingungsweite sehr groß ist, heftig erregt wird, so entstehen sekundäre Wellen, welche den harmonischen Tönen des Körpers entsprechen. Daher die harmonischen Töne der Stimmgabel (s. o.). Wenn zwei Klänge so intensiv sind, daß sie die Grenzen der ungestörten Nebereinanderlagerung überschreiten, so verbinden sich ihre sekundären Wellen, um Kombinationstöne zu bilden. Die einen derselben haben zur Schwingungszahl die Differenz der primären Töne, die andern die Summe. (Von d^3 und g^2 , oder g^3 und d^3

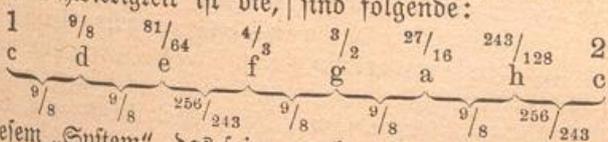
ist der Differenzton jedesmal = g . Man findet ihn am besten durch Subtraktion der Verhältniszahlen, umgekehrt durch deren Addition den Summationstön; z. B. $f^3 + c^1 = a^1$). Die Differenztöne (schon vor dem Organisten Sorge 1740, dann von Tartini beobachtet) klingen ziemlich deutlich, während die von Helmholtz zuerst mathematisch berechnet, nachträglich dann in der Wirklichkeit nachgewiesenen Summationstöne sehr schwach sind. Die Kombinationstöne, deren beide Arten zugleich mit den Primärtönen auftreten, bilden nun mit den konsonanten Intervallen erster Ordnung (ausgenommen die Quarte) harmonische Akkorde; mit Konsonanzen zweiter Ordnung liefern nur die Differenztöne konsonante, die Summationstöne aber, die zum Glück kaum gehört werden, dissonante Dreiklänge.

Was die Lage der Kombinationstöne betrifft, so fallen Differenztöne unter oder zwischen die Primärintervalle; Summationstöne sind stets höher, bewegen sich jedoch in viel engeren Grenzen. Das sogenannte akustische 32-füßige Orgelpedalregister beruht auf Anwendung der Differenztöne. Ähnlich wie die Existenz der Obertöne den Nachweis unter der Hörgrenze befindlicher „Töne“ erbringen, so dienen Differenztöne zur Berechnung der Schwingungszahl solcher „Töne“, die oberhalb der Unterscheidungsgrenze liegen.

Die Grade der sog. Verwandtschaft der Töne, die für die Harmonik wichtig ist, gründen sich, sowie Konsonanz und Dissonanz, auf die mehr oder weniger große Anzahl von Teiltönen, die 2 Töne gemeinsam haben.

274. Tonleiter, Tonsystem. Es ist nötig, nach bestimmten Intervallen fortzuschreiten, welcherlei Art die Musik sein soll, die man macht. In der That ist außer dem Rhythmus die Abmessung von Tonstufen

innerhalb des unendlich großen Tongebiets auch der primitivsten Musik eigen. Indem man Tonstufen in festgesetzter Höhe einander folgen läßt, entsteht die „Tonleiter“, die „Skala“. Sie umfaßt aber nicht die ganze Reihe brauchbarer Töne, sondern höchstens eine Oktave, da mit dieser der Ausgangston gleichsam wiedergewonnen ist, nur auf höherer Stufe; die Anzahl der Zwischenstufen kann verschieden groß sein, in der modernen Musik bekanntlich 12. Man hat nun bei der Tonleiter außer den Grenzen, innerhalb deren sie sich bewegt, noch zweierlei zu beachten: die Reihenfolge der Tonstufen, die verschieden gebildet werden kann, wie z. B. bei unseren jetzigen Tongeschlechtern von Dur und Moll, und die Gewinnung fester Tonverhältnisse, durch welche die Höhe der Tonstufen dargestellt wird. Letztere Aufgabe ist bei weitem wichtiger; denn sind die Tonstufen abgemessen, so ist die Art ihres Aufbaus eine leichte Frage. Allein gerade ihre genaue Abmessung ist etwas sehr Kompliziertes. Zwar die Verhältnisse der einzelnen Intervalle sind uns schwer zu finden, und wir haben gesehen, daß das Gesetz der Schwingungen durch seine Einfachheit beglückt. Die Schwierigkeit ist die,



Nach diesem „System“, das seine Aufgabe scharfsinnig löst und zu befriedigen scheint, wurde bis in die neue Zeit hinein musiziert. Es kennt nur zweierlei relative Abstände von Ton zu Ton, den Ganztonschritt ($\frac{9}{8}$) und den Halbtonschritt ($\frac{256}{243}$). Allein das System baut sich auf den reinen Quinten auf und wenn man Quinte zu Quinte fügt, so kommt man nie

alle Intervallverhältnisse unter sich so zu ordnen, daß wir möglichst einfache und gleiche Werte für die Abstände der einzelnen Töne innerhalb der Leiter finden. Warum ist diese Schwierigkeit so groß?

Die mathematischen Ausdrücke für die Intervalle z. B. des Ganz- und des Halbtons, mit denen wir heute praktizieren, sind viel komplizierter, als die Ausdrücke für größere Intervalle; Konsonanzen sind nicht Sekunde oder Septime, sondern erst Terz und Sext, Quart und Quint, zuletzt, als reinste, die Oktave. Nun sind es naturgemäß die Konsonanzen gewesen, die der Musiksinne zuerst entdeckte, und die Ganz- und Halbtonsnitte einer Tonleiter kamen erst dadurch zustande, daß man die Konsonanzen in höhere Oktaven führte und die gewonnenen neuen Tonwerte in die untere Oktave zurückversetzte. Die von der Sage Orpheus zugeschriebene Tonleiter c f g c bestand aus den Zwischenwerten der Ober- und Unterquinte. Terpander und Pythagoras fügten die weiteren Quinten aufwärts hinzu, bis alle Tonwerte der jetzigen Cdur-Skala eingetragen waren.

275. Pythagoreisches System.
Die absoluten und relativen Verhältnisse der pythagoreischen Skala sind folgende:

mehr zum Ausgangspunkt, ja zu keinem dagewesenen Tone überhaupt zurück. Hat man 12 Quinten addiert (man addiert Intervalle, indem man ihre Verhältnisse multipliziert), so erhält man als Ueberschuß zur 8. Oktave $\frac{74}{73}$ (zugleich Defizit von 12 Quartan zur 8. Oktave), das sogenannte pythagoreische oder ditonische Komma. Um dieses Komma differieren die

enharmonischen Ausdrücke des Systems; die aus Oberquinten entstandenen Töne sind im Vergleich zu den durch Vertiefung entstandenen die höheren. Der erhöhte Halbton = 1.067871 heißt Apotome, der vertiefte = 1.053498; Differenz = $\frac{74}{73}$.

276. Natürliches System. Das Pythagoreische oder griechische System wurde im Mittelalter beibehalten; die Kirchentonarten waren den griechischen nachgebildet. Da, als sich bereits die Polyphonie und die Instrumentalmusik entwickelt hatte, wurde Ende des 16. Jahrhunderts die sogenannte akustische Terz des Archytas wieder entdeckt; ihr Verhältnis: $\frac{5}{4}$ ist einfacher und wohllautender als das der Pythagoreischen Terz $\frac{81}{64}$; ihr Differenzton ist konsonant. Der Unterschied zwischen griechischer und natürlicher (kleinerer) Terz beträgt $\frac{81}{80} = \frac{11}{12}$ des pythagoreischen Kommas; man nennt dieses „Syn-tonisches Komma“, oft „Komma“ schlechthin. Auf die reine Terz baute man nun ein neues System, das mit Hilfe der „akustischen“ oder „harmonischen“ Reihe der Teiltöne zu einem sogenannten natürlichen Tonssystem gestempelt wurde. Da es heute noch Verfechter desselben giebt, so müssen wir es näher beleuchten. Die Reihe der Teiltöne führt, wie wir wissen, zu immer kleineren Intervallen: Oktav, Quint, Quart, Terz u. s. w. Nach der kleinen Terz des 7. Teiltons ist die große Sekunde nicht genau bestimmbar und man kann, je höher man steigt, umsomehr zwischen verschiedenen Ausdrücken wählen. Dem entspricht nun, daß die durch Transposition aus höheren Lagen gewonnenen Töne der natürliche Reihe vielfach zwischen mehreren Tonwerten schwanken; die Kombination einfacher Intervalle führt

ebenfalls zu Mehrdeutigkeiten. Ueberhaupt kehrt man auf dem Wege reiner Terzen ebensowenig zum Ausgangspunkt zurück, als mit Verfolgung des Quintenzirkels. Das Defizit dreier reiner großer Terzen ($\frac{5}{4}$) zur Oktave beträgt $\frac{125}{125} = \frac{21}{12}$ des pythagoreischen Kommas; die „kleine Diesis“. Der Ueber-schuß von vier reinen kleineren Terzen ($\frac{6}{5}$) zur Oktave beträgt $\frac{648}{625} = \frac{32}{12}$ des pythagoreischen Kommas; die „große Diesis“. Selbst wenn man die verschiedenen Tonwerte für ein und dasselbe Intervall vereinfacht, ergiebt das natürliche System dreierlei relative Abstände in der Tonleiter, nämlich für den Ganzton cd, fg, ah $\frac{9}{8}$, für de, ga $\frac{10}{9}$ (Differenz ein syntonisches Komma), für den Halbton ef, he $\frac{16}{15}$. Man vergleiche folgendes Schema mit dem pythagoreischen:

1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
c	d	e	f	g	a	h	c

Die vertieften Werte des, es zc. sind im natürlichen System (un-natürlicherweise) höher als eis, dis zc. Das System der „reinen Stimmung“ hat auf den ersten Blick etwas Bestehendes. Aber es leidet an mancherlei Mißständen. Da die große Sext im Verhältnis 5:3 steht, kommt in die Tonleiter eine Quinte, die um das synto-nische Komma von den übrigen Quinten verschieden ist. Es zeigt sich eben, daß die angedeutete Schwierigkeit, konstante Maße für die Intervallwerte zu gewinnen, ins- solang mathematisch unlösbar ist, als man innerhalb der Oktave die Quinte oder die Terz oder irgend ein anderes Intervall absolut rein berechnet.

277. Notwendigkeit der Tem-perierung. Nun ist es gewiß eine natürliche Forderung des Ohrs, den Wohlklang nicht bloß der Oktave,

sondern auch der ändern Konsonanzen unverfälscht zu genießen. Wer sich an absolute Reinheit der Zusammenklänge gewöhnt hat, wie Helmholz, wird jede kleine Abweichung als störend empfinden und bei großen Terzen zum Beispiel, die in höheren Lagen erklingen, den Konsonanten oder dissonanten Differenzton wirklich heraus hören. Allein das praktische Musizieren wechselt fortwährend den Zusammenklang der Intervalle; selbst die einfachsten Aufgaben vorausgesetzt, müßte der Sänger, um die Reinheit der Zusammenklänge zu wahren, in Bezug auf die Abmessung der Tonschritte und das Aushalten eines Tones auf und ab schwanken. Jede Stufe der Tonleiter müßte beweglich sein, und die absolute Gleichheit der Tonverhältnisse in allen Tonleitern und Akkorden wäre erst recht nicht erreicht. Dagegen sind die Quinten und Quartan des pythagoreischen Systems in allen Lagen rein konstant. Solange die den Griechen anscheinend fremd gebliebene Harmonie im wesentlichen nur spielend ausprobiert, nicht künstlerisch verwertet wurde, so lange konnte sich jenes Quintensystem halten. Allein die Kirchen-tonarten wichen zuletzt unseren modernen Tongeschlechtern von Dur und Moll mit ihren 24 sog. Tonarten, die darauf beruhen, daß man jede der 12 Stufen der chromatischen Skala zum Ausgangspunkt wählen kann. Waren mit der 12stufigen Skala die enharmonischen Unterschiede zwischen *cis* und *des* bereits praktisch aufgehoben und ihre Wahrnehmung dem schöpferisch-geistigen Verstehen überlassen, so drängte die Entwicklung der Instrumentalmusik vollends unaufhaltsam zur absoluten Ausgleichung der Tonverhältnisse. Nachdem man dem Terzensystem zu lieb

die reine Quintenstimmung ver-laffen hatte, gab man endlich auch die reine Terz auf und fing an zu temperieren, anfangs mit möglichster Aufrechterhaltung reiner Intervalle. Ungleichschwebende Temperierungen haben aber den Nachteil, daß entlegenere Tonarten zunehmend unreiner werden; in ihnen haust der „Wolf“. Erst Andreas Werkmeister löste (1691) das Problem durch die gleichschwebende Temperierung: die 12 in der Oktave enthaltenen Töne bilden eine geometrische Progression und dadurch sind alle Tonverhältnisse in jeder Lage, auf Kosten der absoluten Reinheit, absolut konstant gemacht. Die Oktave ist zu allen Zeiten unangetastet geblieben; ihre Schwingungszahlen fußen in der modernen Musik annähernd auf den Potenzen von 2. Häufig nimmt man fürs tiefste C 32, für *c'* also 512 Schwingungen an. (Genau: 32,3; 64,6; 129,3; 258,6; 517,2; 1034,5 u. s. w.) Für das neue Tonsystem trat Bach mit seinem „Wohltemperierten Klavier“, das seither trotz aller Anfeindung bestehen geblieben ist, obwohl es zahlreiche Anfeindungen bis auf heute erfuhr. Ohne die gleichschwebende Temperierung wäre die moderne Instrumentalmusik und damit die moderne Musik, die aufs engste das Vokale mit dem Instrumentalen verknüpft, undenkbar. Es ist das Verdienst der Tasteninstrumente, besonders des Klaviers, die Notwendigkeit der Temperierung aufs fühlbarste zum Bewußtsein gebracht zu haben. Der Singstimme stehen alle überhaupt möglichen Töne zu Gebot, die Streich- und Blasinstrumente haben Spuren der Intonationsfreiheit bewahrt (die Streicher in geringerem Maße als man gewöhnlich vermutet), aber die Tasteninstrumente sind an eine engbegrenzte, bestimmte Anzahl von

Tönen gebunden. Klaviere mit mehr als 12 Tasten für die Oktave sind zu Demonstrationen, nicht aber für die Praxis geeignet. (Helmholz konstruierte Harmoniums mit 24 bezw. 30 Stufen; Sauvour verlangt die Kleinigkeit von 3010 Stufen innerhalb der Oktave!)

278. Charakter der Tonarten. Mit der gleichschwebenden Temperierung ist die Verschiedenheit des Charakters der Tonarten, theoretisch betrachtet, vollständig verschwunden. Die oft lächerlich widerspruchsvollen Urteile früherer Autoren über die Wirkungen der Tonarten führt man darauf zurück, daß die ungleichschwebende Temperierung in der That durch die unterschiedliche Reinheit der Akkorde (auch zwischen einzelnen Instrumenten) zu psychologischen Deutungen Anlaß gegeben habe. Hierdurch ist aber der Gegenstand noch nicht abgethan. Es giebt immer noch Physiker, unter ihnen Helmholz selber, die einen Unterschied des Charakters unserer Tonarten zu erkennen glauben, namentlich auf dem Klavier.

279. Normalstimmton. Zu der Unveränderlichkeit der relativen Schwingungszahlen aller Töne kam 1885 die Unveränderlichkeit der absoluten Schwingungszahlen aller Töne. Sie wurde festgelegt auf der internationalen Stimmtonkonferenz in Wien und man einigte sich dahin, die Normalstimmung des a' auf 870 Schwingungen (435 Doppelschwingungen) zu berechnen. Dies war seit 1859 der sog. Pariser Kammerton, die „tiefe Stimmung“.

280. Tonleiter der Griechen. Die griechische Musik bietet in mehrfacher Hinsicht auch dem Ungelehrten Interesse. Die Griechen kannten keine absolute Tonhöhe; dagegen waren sie auf die reine Terz gekommen und Aristogenos hatte schon 200 Jahre vor Wert

meister die 12stufige gleichschwebende Temperierung erfunden. Die Theorie der Tonverhältnisse ist überhaupt von den Griechen sehr scharfsinnig bearbeitet worden. Die Ausdrücke „diatonisch“, „chromatisch“, „enharmonisch“ stammen von ihnen. Diatonisch ist ein Tongeschlecht, das überwiegend durch Ganztöne, chromatisch, das sich durch Halbtöne bewegt, und enharmonisch, das auch Vierteltonschritte kennt. Man sieht, daß die Schärfe des griechischen Gehörs in Bezug auf Tonfolgen sehr hoch ausgebildet war. Die Oktave zerfiel in zwei Tetrachorde; Prime und Quarte waren unveränderlich. Die Stellung des Halbtöns unter den Ganztönen unterscheidet die griechischen Tonleitern von einander.

1) Die dorische (nationale hellenische) war

e f g a h c d e

verwandt mit unserem abwärts diatonisch genommenen e moll.

2) Die phrygische, uns die fremdeste, etwa ein dmoll mit kleiner Septime

d e f g a h c d

3) Die lydische, unser Dur.

c d e f g a h c

4) Die hypodorische oder äolische

a h c d e f g a

5) Die hypophrygische oder ionische

g a h c d e f g

6) Die hypolydische

f g a h c d e f

7) Die mixolydische

h c d e f g a h

Auf diese Tonleitern, die mehr unserem Dur und Moll als unsern Transpositionstalen entsprechen,

gehen später die „Kirchentöne“ zurück. Jedoch ist zu bemerken, daß die mittelalterlichen Tonarten die griechischen Namen durch Mißverständnis auf andere Töne, bezw. Tonleitern als die griechischen, übertrugen. Der Irrtum entstand dadurch, daß von der Tonleiter a moll aus, die griechisch und kirchlich äolisch heißt, die Kirchentonarten die Reihenfolge abwärts statt aufwärts nahmen; so ging dorisch von d statt von e, phrygisch von e statt von d, lydisch von f statt von c, hypophrygisch von h statt von g, hypolydisch von c statt von f, mixolydisch von g statt von h aus. (Die „Hypo“-Tonleitern liegen also griechisch eine Unterquinte, mittelalterlich eine Unterquarte unter ihren Stammtonleitern.)

281. Dur und Moll. Es könnte scheinen, als ob wir mit Berücksichtigung der modernen Tongeschlechter das Gebiet der Akustik verlassen. Dem ist aber nicht so. Die Konsonanz des Durakkordes gründet sich auf die harmonische Reihe der Obertöne (sous harmoniques, Beiztöne); lange ehe man die Gleichzeitigkeit der Obertöne entdeckte, bezog man die Durkonsonanz auf die Naturfala der durch Saitenteilung gefundenen Teiltöne (Partial- oder Aliquotöne). Die eigentliche Gestalt des Durakkordes wäre also nicht die enge Lage des ceg , sondern die weite $cg^1 e^2$. Die Konsonanz des Mollakkordes ist aber aus der Obertonreihe zu erklären; dagegen wird er verständlich als Umkehrung des Durakkordes. Der Hauptton liegt oben, es folgt nach unten große Unterterz und die Unterquinte. Diese alte Betrachtung, die neuerdings durch Hauptmann, Dettingen und

Riemann mit Erfolg wieder aufgenommen wurde, führt das Mollgeschlecht auf eine Untertonreihe zurück, die in gleichen Intervallen nach umgekehrter Richtung wie die Obertöne laufe.

Die objektive Existenz der Untertonreihe ist allerdings nicht nachgewiesen; Riemann führte den Beweis indirekt, indem er zeigte, weshalb ein Ton die Untertonreihe durch Summierung seiner Schwingungen nicht hervorbringen kann: jeder Unterton wird seiner Ordnungszahl entsprechend 2, 3fach u. c. produziert, und zwar so, daß sich die Töne durch Interferenz aufheben.

282. Literatur. Die Werke über Akustik teilen sich in solche, die mathematisch-naturwissenschaftlich gehalten, und in andere, die im steten Hinblick auf die Musik verfaßt sind. Der Musikbesessene, falls er nicht zugleich für theoretische Physik Begehung besitzt, wird schwerlich zu einem Buch ersterer Gattung greifen. Dagegen wird er aus folgenden Büchern den größten Nutzen ziehen.

P. Blaserna, Die Theorie des Schalls in Beziehung zur Musik. 1876. Klare, gemeinverständliche Darstellung auf 232 S.

Lyn dall, Der Schall. 3. Aufl. 1897. Elegante, anschauliche Erörterung der akustischen Probleme. 534 S.

Zellner, Vorträge über Akustik. 2 Bände. 1892. Sehr ausführlich, mit Beschreibung aller Experimente. 746 S.

Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen. 4. Aufl. 1877. Dieses Werk muß unbedingt jeder gebildete Musiker studieren.

Melde, Akustik. 1883. 350 S. Hält die Mitte zwischen mathematischer und musikwissenschaftlicher Darstellung.

Wer sich für das schwierige Problem der reinen Stimmung interessiert, wird in Dr. Tanakas Schrift: „Studium im Gebiete der reinen Stimmung“, oder bei Steiner, „Grundzüge einer neuen Musiktheorie“ viel Interessantes finden.