

Zur Theorie der Combinationstöne.

Von

Felix Krueger.

Einleitung.

Im vorigen Bande dieser Zeitschrift (59, 307 ff., 568 ff.)¹⁾ berichtete ich über eine Reihe von Beobachtungen an Stimmgabelzweiklängen. Ich habe jetzt die historischen und theoretischen Zusammenhänge anzugeben, denen die beobachteten Thatsachen sich einfügen.

Die physiologische Akustik befindet sich gegenwärtig in einer lebhaften Bewegung. Am meisten umstritten ist die physiologische Entstehung der Combinationstöne; dieses Problem ist von entscheidender Bedeutung für die Theorie des Hörens überhaupt. Das ist der Gesichtspunkt, unter dem die vorliegende Studie steht. Es sollen zunächst von den bisher vorliegenden Angaben über die Combinationsercheinungen alle wichtigeren zusammengestellt und kritisch verglichen werden (Capitel I und II). Danach wird der Streit der Theorien zu erörtern sein. Wie verhalten sich die bisher versuchten Zusammenfassungen und Erklärungen zu den Thatsachen? Welche Konsequenzen ergeben sich aus den Beobachtungen über Combinationstöne und verwandte Erscheinungen für die physiologische Akustik?²⁾

1) Die eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf die Nummern des angehängten Litteraturverzeichnisses.

2) Die am Schlusse meiner vorigen Arbeit (59, S. 623; vgl. 311) angekündigte Untersuchung über das Consonanzproblem wird den Gegenstand einer besonderen, dritten Abhandlung bilden. Die Frage, welche Bedeutung die tatsächlich festgestellten Combinationsercheinungen für den psychologischen Eindruck der Klänge, besonders für die Consonanz und Dissonanz besitzen, ist unabhängig von der physiologischen Erklärung dieser Erscheinungen.

Erstes Capitel.

Die Thatsachen.

Zahlreiche irrthümliche Beschreibungen der Combinationserscheinungen und weiter reichende theoretische Differenzen erklären sich aus der Lückenhaftigkeit der Beobachtungen, die es hier im Zusammenhange zu begreifen galt. Viele Theoretiker waren selbst mit den thatsächlichen Ergebnissen ihrer Vorgänger nur ungenau vertraut; die meisten verzichteten, wie es scheint, von vornherein darauf, den Widerstreit der vorgefundenen Angaben kritisch zu schlichten. Ich konnte durch meine Versuche das Beobachtungsmaterial erheblich vermehren und ergänzen. Eben dadurch gelang es, auch in der älteren Litteratur werthvolle Angaben nachträglich besser zu würdigen, zweifelhafte historisch zu verstehen und nach Möglichkeit nutzbar zu machen.

a) Eigene Beobachtungen über die Combinationserscheinungen.

Um die Erörterung zu vereinfachen, und schon im Interesse einer eindeutigen Bezeichnungsweise, muss ich zunächst die Hauptergebnisse meiner eigenen Versuche noch einmal zusammenfassen.

Danach gilt Folgendes als Regel:

Aus dem Zusammenklange zweier annähernd gleich starker Töne von mittlerer Lage (200 bis 1500 Schwingungen) entstehen ein Summationston und 4 bis 5 Differenztöne. Die Tonhöhen dieser Differenztöne sind derart zu berechnen, dass man zunächst die Schwingungszahlen der primären Töne und dann fortgesetzt die beiden kleinsten Schwingungszahlen von einander subtrahirt. Zum Beispiel beim Zusammenklange der Töne 1024 [$n = c^3$] und 1328 [n']: $D_1 = n' - n = 304$; $D_2 = n - D_1 = 720$; $D_3 = D_2 - D_1 = 416$; $D_4 = D_3 - D_1 = 112$; $D_5 = D_1 - D_4 = 192$.

Diese Regel erleidet einige leicht erklärbare Einschränkungen. Vor allem durch die Thatsache der Verschmelzung nahe benachbarter Töne. Wie zwei primäre Töne, deren Höhenunterschied

weniger als einen halben Ton beträgt, gänzlich zu einem Zwischenton verschmelzen, so gibt es auch Zwischentöne aus Differenztönen. Sind zwei benachbarte Differenztöne noch zu weit von einander entfernt, um völlig zu verschmelzen, so hört man nicht selten einen Zwischenton und daneben einen der constituirenden Töne oder beide. Dadurch kann die Zahl der wahrnehmbaren Differenztöne bis auf sechs steigen (vgl. 59, S. 658, Mö⁵⁷ bei 512 + 944). Andererseits vermindert sich diese Zahl natürlich da, wo zwei oder mehr *D*-Töne mit einander oder mit dem Grundton ganz verschmelzen oder zusammenfallen. Man sieht schon theoretisch leicht ein, dass die Mehrzahl aller die Doppelloctave nicht wesentlich überschreitenden Intervalle mindestens einen Differenzton enthalten muss, der einem anderen zu nahe liegt, um gesondert hervortreten zu können. — Die meisten Intervalle, die innerhalb der angegebenen Grenzen bleiben, enthalten ferner (namentlich bei tieferer Lage der primären Töne) einen theoretischen Differenzton, der zu tief ist, um als Ton, oder um überhaupt wahrgenommen zu werden. Die untere Hörgrenze der Differenztöne liegt, mäßige Intensität des primären Klanges vorausgesetzt, bei etwa 44 Schwingungen; für *D*-Töne höherer Ordnung noch etwas höher. Der Differenzton 5. Ordnung wird hiervon wie auch von der Zwischentonverschmelzung am häufigsten betroffen (die anderen in abnehmendem Maße mit abnehmender Ordnungszahl). *D*₅ war denn auch kaum mit Sicherheit festzustellen, wenn beide Primärtöne tiefer als 512 lagen; im übrigen trat er nur sporadisch und fast nie anders als in Zwischentonverschmelzung auf. Meistens war sein Vorhandensein nur aus Schwebungen und aus der Verstärkung eines anderen *D* zu erkennen. Er ist durchschnittlich weitaus der leiseste und undeutlichste Differenzton. *D*-Töne 1. bis 4. Ordnung, deren Schwingungszahl über der Hörgrenze liegt, treten selten so weit zurück, dass sie auch bei wiederholter Untersuchung des Klanges unvernnehmlich bleiben; *D*₁ und *D*₂ nur dann zuweilen, wenn sie (bei Intervallen jenseits der Octave) höher als *n*, zwischen den Primärtönen liegen. (Vgl. hierzu außer dem eingangs citirten Experimentalberichte S. 208 ff. dieses Capitels). Bei einem einzelnen Versuche können natürlich zufällige Umstände zur Folge haben, dass bald der eine, bald der andere Combinationston unentdeckt bleibt. Erst durch genaue Analysen und durch Vergleichen zahlreicher Klänge ergab sich

die oben aufgestellte Regel als einfachste zusammenfassende Beschreibung der Thatsachen.

Die Intervalle von relativ einfachem Schwingungsverhältniss der Primärtöne sind dadurch ausgezeichnet, dass hier auch die Combinationstöne unter einander und zu den Primärtönen sämtlich harmonisch sind. Ferner fallen hier regelmäßig zwei oder mehr Differenztöne mit einander oder mit dem Grundtone zusammen. Und zwar treffen bei den vollkommensten Consonanzen die meisten, bei den unvollkommeneren weniger Differenztöne auf einander. Die Prime und die Octave können überhaupt keinen D hören lassen, weil hier einer mit 0, die andern alle mit dem Grundton zusammenfallen. Die

Quinte und die Duodecime haben nur je einen Differenzton ($=\frac{n}{2}$

bezw. $2n$); bei der Quarte, der großen Sexte, großen Decime und Doppeloctave ist die Zahl der D -Töne auf zwei beschränkt u. s. f.

Drückt man in der üblichen Weise das Schwingungsverhältniss der consonanten Klänge durch möglichst kleine Zahlen aus, so entspricht jeweils die Zahl 1 dem tiefsten möglichen Differenzton. Dieser tiefste Theilton von der Verhältnisszahl 1 ist es zugleich, auf den bei allen Consonanzen zwei oder mehr Differenztöne sich vereinigen. Das

Aufeinanderfallen mehrerer D -Töne hat zur Folge eine Verstärkung des betreffenden »charakteristischen« Tones (vgl. die Zusammenfassung unten Cap. II, 3) Diese Verstärkung ist bei den unvollkommensten

Consonanzen, wo D_5 mit einem andern D zusammenfällt, am geringsten und theilweise nicht sicher nachzuweisen; es gelang mir bisher nur in den Fällen, wo D_5 mit einem D_4 oder D_3 verschmilzt (kleine Terz und kleine Septime), oder wo der fragliche Ton relativ hoch

liegt (Tredecime und Quatuordecime: $D_{5=3}$ bezw. $D_{5=4} = \frac{n}{3}$); mit

Wahrscheinlichkeit noch für die None und kleine Decime. Dasselbe gilt für die Schwebungen, an denen D_5 nur mit einem anderen D theilhaftig ist.

Differenztöne verhalten sich nicht nur im Punkte der Zwischen-tonverschmelzung und der wechselseitigen Verstärkung ganz wie primäre Töne, sondern auch hinsichtlich der Schwebungen. Von den unbegrenzt vielen Intervallen, die zwischen Prime und Doppeloctave liegen, sind nur die consonanten als frei von Schwebungen

zu betrachten. Verstimmt man eines dieser Intervalle von relativ einfachen Schwingungsverhältnissen, so entstehen Schwebungen zwischen den jetzt von einander abrückenden (und zunächst zu einem Zwischenton verschmelzenden) Differenztönen. Diese Schwebungen werden mit fortschreitender Uebung immer sicherer gehört und den beteiligten *D*-Tönen zugeschrieben. Sie sind, unter sonst gleichen Umständen, mehr oder weniger aufdringlich je nach der Zahl und Stärke der einander benachbarten Theiltöne. Der theoretische Abstand dieser Theiltöne bedingt die Geschwindigkeit der Schwebungen.

b) Historisch vorliegende Angaben¹⁾.

Der deutsche Organist Sorge und der Geiger Tartini, die um 1740 bezw. 1754 die Differenztöne entdeckten, und ebenso deren Zeitgenossen scheinen bei Zweiklängen nie mehr als einen Differenzton beachtet zu haben.

Sorge hörte an der Orgel bei einigen consonanten Zusammenklängen aus zwei Tönen je einen »dritten Klang«, und zwar (2, Cap. 5), nach unsrer Bezeichnungsweise, bei der Quinte den $D_{1=2=4}$, bei der großen Terz den $D_{1=4}$, bei der großen Sexte den $D_{2=3}$. Die ersten Combinationstöne also, von denen uns berichtet wird, waren durch das Zusammenfallen mehrerer in einen verstärkt: es sind, neben dem charakteristischen Differenzton der Quarte, die stärksten Combinationstöne, die es überhaupt gibt.

Schon Tartini (3) stellte für die Tonhöhe »des« Combinationstones eine allgemeine Regel auf. Sie erstreckt sich ausschließlich auf die Intervalle, deren Schwingungsverhältniss durch zwei aufeinander folgende ganze Zahlen ausgedrückt werden kann (2:3, 3:4 u. s. w.), und behauptet, dass hier jederzeit der Ton 2 [also die Octave des D_1] neben den Primärtönen zu hören sei. Diese Angabe hat man später schlechtweg als irrthümlich bezeichnet. Aber bei den meisten Consonanzen — und solche hat auch Tartini vorzugsweise beobachtet — ergibt sich ja der Ton 2 als Differenzton höherer Ordnung; bei den von ihm angeführten Intervallen: der Quarte als

1) Beiträge zur Geschichte der Differenztöne finden sich bei Vieth (8, 266), Roeber (13), Helmholtz (17, 497) und neuerdings bei Meyer (46, 178).

D_2 , der großen Terz als D_3 , der kleinen Terz als D_4 . Es ist ferner zu beachten, dass Tartini an der obertonreichen Violine seine Bestimmungen machte: die beiden ersten Obertöne des primären Klanges ergeben jedesmal den von ihm geforderten Ton als ihren D_4 . Wenn er freilich den Ton 2 auch für die Quinte notirt, wo er mit dem Grundton zusammenfallen würde, so ist das wohl nur der Regel zu Liebe geschehen.

Dass die ersten Beobachter immer nur einen Differenzton fanden, daran ist ohne Zweifel die Bevorzugung der consonanten Intervalle hauptsächlich schuld. Die Zahl der Differenztöne ist bei den Consonanzen thatsächlich beschränkt. Alle gleichzeitig vorhandenen Theiltöne sind unter einander harmonisch und daher schwer zu unterscheiden. Endlich drängt hier jedesmal ein Differenzton, der tiefste, durch seine verstärkte Intensität die andern zurück.

Im Anfange unsres Jahrhunderts erweiterte Chladni (6, 207; 7, 73) die Sorge'sche Bestimmung dahin, dass überall, wo das Schwingungsverhältniss der Primärtöne durch zwei relative Primzahlen ausgedrückt werden kann, dem Combinationstone die Verhältnisszahl 1 entspreche. Doch scheint Chladni diese unzutreffende Regel nur durch rechnerische Ueberlegungen gefunden zu haben.

Wilhelm Weber (1829; 10, 216) berücksichtigte als erster auch irrationale Verhältnisse der Schwingungszahlen. Er corrigirt zunächst den Zahlenwerth des »Tartinischen Tones« im Sinne Sorge's. Des weiteren macht er die für viele Fälle richtige Bemerkung: auch solche Zweiklänge, deren Schwingungsverhältnisse nicht allzuweit von den »wahren Verhältnissen« abweichen, d. h. wenig verstimmte Consonanzen, ergäben den (abgeschwächten) D des nächstgelegenen consonanten Intervalls. Wobei zu bedenken ist, dass selbst für primäre Töne von geringem Höhenunterschied die Thatsache des Zwischenstones erst in unsern Tagen, von Stumpf festgestellt ist. Weber speculirt weiter: bei einem Intervall, das zwischen 4:5 und 5:6 liege, träten möglicherweise im Wechsel bald der D der großen, bald der der kleinen Terz sehr schwach hervor. Experimente seien erwünscht. Fürs erste entwickelt Weber die Schwingungsverhältnisse der fraglichen Intervalle in einem Kettenbruche und berechnet daraus eine Reihe von Näherungswerthen, deren jedem ein Combinationston entsprechen könne.

Wichtiger ist eine Reihe von Beobachtungen, die Weber seiner Abhandlung anfügt. Sie waren ihm von Alexander von Humboldt mitgetheilt worden und stammten von einem französischen Baron Blein (1827; 9).

Dieser ehemalige Genieoffizier untersuchte mit schwingenden Saiten eine Anzahl Zweiklänge, die den Grundton c' 256 gemein hatten und gleichmäßig über die eingestrichene Octave vertheilt waren. Es waren außer der reinen Prime und Octave 19 Intervalle, darunter alle in der Musik gebräuchlichen. Blein verzeichnet nun bei allen zwischen der Prime und der Quinte gelegenen Klängen einen Combinationston, der mit D_2 —, bei den übrigen einen solchen, der mit D_1 genau übereinstimmt. Der tiefste von Blein wahrgenommene Differenzton ist D_1 44. Für $256 + 300$ und drei andere, zwischen Quarte und Quinte stehende Intervalle notirt er je zwei Combinationstöne, nämlich unsere D_1 und D_2 1). Offenbar ist der größere Theil der von Blein angegebenen Zahlenwerthe nicht durch reine Erfahrung gewonnen, sondern durch Rechnung corrigirt. 25tel Schwingungen kann Blein nicht mit dem Ohre unterschieden haben. Er gelangte wahrscheinlich halb inductiv, halb intuitiv zu dem richtigen Princip der einfachen Differenzen. Weber weiß mit diesen Ergebnissen nicht viel anzufangen, er findet darin beträchtliche Abweichungen von seiner (Weber's) Theorie und bedauert, dass Blein die »Entstehungsart der Tartini'schen Töne nicht gekannt« habe. Thatsächlich wird die Entstehung der Combinationstöne noch heute sehr verschieden erklärt, und die Erfahrung bestätigt nur in den seltensten Fällen die Weber'sche Kettenbruchhypothese. Dagegen bedeuten Blein's Versuche einen entschiedenen Fortschritt auf dem einzigen Wege, der zu einem theoretischen Begreifen führen kann: dem der experimentellen Beobachtung.

Weber's Aufsatz veranlasste den schwedischen Akustiker G. G. Hällström (11, 438; 1832), auf eine Reihe von Versuchen zurückzukommen, deren Hauptergebnisse er schon im Jahre 1819 in einer

1) Schon Thomas Young (5, 130—133 bzw. 544 f.) hatte bemerkt, dass der Zusammenklang zweier Töne zuweilen zwei weitere Töne enthalte; z. B. bei der großen Terz $c' : e'$ neben $C[D_1=4]$ noch $g[D_2^1]$. — Die Young'schen Angaben wurden in England zunächst mehrfach bestritten; nach Gough beruhten sie lediglich auf Einbildung. Vergl. die Darstellung dieses Streites bei Vieth (8, 266).

Dissertation niedergelegt hatte. Angeregt durch den theoretischen Streit der englischen Physiker, analysirte Hällström mit hoher Voraussetzungslosigkeit eine große Anzahl Zweiklänge aus Violin- und Orgeltönen. Das Chladni'sche, seinerzeit von vielen angenommene Gesetz würde fordern, dass bei allmählicher Verstimmung eines Intervalls der Combinationston ebenso wie die Zahl der Schwebungen sich sprungweise änderte. Hällström überzeugte sich durch das Experiment, dass in diesem Falle die Natur einfacher sei als die herkömmliche Theorie.

An einer »vortrefflichen Orgel« zählte er in mehrfach wiederholten Versuchen die Schwebungen, die bei sämtlichen kleinen Secunden der Contraoctave ($C_1 = \text{ca. } 33$; $C_1 + \text{Cis}_1$, $\text{Cis}_1 + D_1$ u. s. f.) zu hören waren. Die Mittelwerthe schienen ihm jeweils fast genau der Differenz der Schwingungszahlen zu entsprechen¹⁾. Hällström stellte unzweideutig fest, dass mit zunehmendem Abstände zweier benachbarter Töne die Geschwindigkeit ihrer Schwebungen continuirlich zunimmt, dass also die Zahl der Schwebungen dem Schwingungsunterschiede der beteiligten Töne proportional ist.

Die Differenztöne verfolgte er an Zweiklängen der Violine. Seinem Experimentalberichte stellt er eine Uebersicht derjenigen Combinationstöne voran, die man nach seinen Erfahrungen bei Zweiklängen erwarten könne, wenn sie auch nicht immer stark genug seien, um wirklich zu Gehör zu kommen. Hier werden vier Arten Combinationstöne unterschieden: ein erster $= n' - n$ [identisch mit dem D_1 unsrer Bezeichnungsweise]; ein zweiter als Differenz des Grundtones und des ersten D zu berechnender $= 2n - n'$; [D_2 ; jenseits der Octave mit -1 zu multipliciren]; ein dritter gleich der Differenz des zweiten D und des höheren Primärtones $= 2(n' - n)$. Auf diesen dritten Combinationston Hällström's komme ich nach dem Berichte über seine Ergebnisse zurück. Er führt in seinem Schema endlich einen vierten Combinationston an, aus der Differenz des ersten und des zweiten $= 3n - 2n'$ [D_3 bei Intervallen innerhalb einer Octave; die Formel ist für die Intervalle zwischen Quinte und Octave mit entgegengesetzten Vorzeichen zu schreiben].

1) Thatsächlich gibt Hällström in seiner Arbeit durchgängig die doppelten Differenzen an; er hat das aber später (im 15. Jahresberichte von Berzelius) auf ein Versehen zurückgeführt und richtig gestellt.

Die thatsächlichen Beobachtungen erstrecken sich auf 29 durchweg in der Musik übliche Intervalle mit verschiedenen Grundtönen und innerhalb der Höhengrenzen c^1 256 bis e^3 1280. Zwei von diesen Klängen waren weiter als eine Octave, nämlich $h^1 + d^3$ und $h^1 + e^3$. — Die kleine Secunde $c^2 + cis^2$ war das einzige Intervall, bei dem Hällström keine Spur eines Combinationstones entdecken konnte. Bei der Quinte $c^2 + g^2$ [$D_{1=2=4=5} = c^1$; $D_3 = 0$] verzeichnet er c^1 als möglich; er sei aber »nicht leicht von c^2 [n] unterscheidbar«. Von den anderen 27 Intervallen enthielten 13 für Hällström's Ohr je zwei deutliche Combinationstöne, und zwar: die kleine Terz $h^1 + d^2$ [nach unsrer Nennweise]: D_4 etwas stärker als D_3 ; die kleine Terz $fis^2 + a^2$: $D_{1=5} > D_3$. Die große Terz $c^2 + e^2$: $D_2 > D_3$. Die Quarte $c^2 + f^2$: $D_2 > D_{1=3}$; die Quartan $d^2 + g^2$, $dis^2 + gis^2$ und $fis^2 + h^2$: $D_{1=3}$ und D_2 , gleich deutlich. Die kleinen Sexten $e^2 + c^3$, $fis^2 + d^3$, $h^1 + g^2$: D_4 und D_2 . Die große Sexte $d^2 + h^2$: D_4 deutlicher als $D_{2=3}$. Die kleine Decime $h^1 + d^3$: D_2 und D_3 . Die Undecime $h^1 + e^3$: $D_2 > D_{3=4}$.

Bei der kleinen Septime $c^2 + b^2$ verzeichnet Hällström: » g^1 [D_4] deutlich, wenn gleich wegen des murmelnden B [D_2 , schwebend mit D_5 ?] rauh«. Für die übrigen 14 Klänge notirt er nur je einen Combinationston, und zwar: für eine große Terz [$D_{1=4}$], eine verminderte Quinte ($e^2 + b^2$), eine kleine Sexte, zwei große Sexten und eine kleine Septime, also 6mal, den D_4 ; für eine große Secunde, eine verminderte kleine Terz ($c^2 + dis^2$), eine Quarte und eine verminderte Quinte ($c^2 + fis^2$), also 4mal, den D_2 ; für eine große Septime den D_3 ; für eine große Secunde und zwei kleine Terzen den D_4 .

Der bei der großen Secunde $c^2 + d^2$ hervorgetretene D_4 ist in Hällström's Schema nicht enthalten; ebensowenig der D_3 , den er bei der kleinen Decime und bei der Undecime hörte. Den dritten Combinationston seines Schemas hörte er thatsächlich nur bei (3 von 4) kleinen Terzen, wo der Zahlenwerth dieses Tones ausnahmsweise mit demjenigen unseres D_4 —, und einmal bei der großen Terz, wo er mit unserm D_3 zusammenfällt. Hällström gibt für seinen dritten Combinationston — wir wollen ihn D_{III} nennen — die Formel: $2(n^1 - n)$. Diese Formel führt naturgemäß überall auf die Octave des D_1 . Leitet man den D_{III} jedoch mit Hällström aus der Combination des höheren Primärtons mit dem zweiten Differenzton

ab ($n' - D_2$), so erhält man nur für die Intervalle der ersten Periode den Werth $2 \cdot D_1$; jenseits der Octave dagegen jederzeit die Octave des Grundtones, $2n$.

Für den $D_{II} = 2 \cdot D_1$ finden sich auch sonst in der Literatur nur ganz vereinzelte Angaben, wobei stets die Möglichkeit einer Octaventäuschung oder eines Differenztones aus $2n$ und $2n'$, also aus den beiden ersten Obertönen offen bleibt. In meinen Versuchen wurden (vgl. 59, 369) bei verstimmtten großen Terzen der dreigestrichenen Octave nicht selten die Schwebungen auch oder ausschließlich dem D_3 zugeschrieben, der hier die höhere Octave des charakteristischen ZD_{1+4} bildet und mit Hällström's D_{III} schweben könnte. Aber D_3 hätte dann regelmäßig seiner Höhe nach zu diesem Tone müssen hingezogen erscheinen, was nicht der Fall war; eine Octaventäuschung hinsichtlich des Trägers der Schwebungen begegnete zuweilen auch bei anderen verstimmtten Consonanzen, namentlich beim Tritonus derselben Octave (D_1 statt ZD_{3+4}), wo jene Deutung versagt. Die Höhenlage der Schwebungen zu bestimmen ist natürlich da besonders schwierig, wo sie leise und undeutlich sind, und wo über dem charakteristischen Schwebungston noch andere Theiltöne wahrgenommen werden, die mit jenem harmoniren¹⁾. Bei tieferer Tonlage des primären Klanges wird das Urtheil über den Träger von Terzenschwebungen dadurch leicht irre geführt, dass gleichzeitig an den höheren Differenztönen die der verstimmtten Prime charakteristischen Schwebungen, zum mindesten als feine Rauigkeit noch zu verspüren sind. Nur zweimal finde ich in allen meinen Protocollen die Angabe, dass ein gesonderter, mit anderen Differenztönen nicht zusammenfallender D_{III} zu hören sei. Erstens bei 512 + 600 (vgl. meine Tabelle III in 59, S. 630, Me^s), wo Hr. Me. neben D_1 und D_4 den Ton 164, »etwa die Octave des tieferen« notirte [D_1 88]; ich selbst glaubte unmittelbar an den Gabeln, wie am Ende der Leitung über dem deutlichen, brummenden D_1 undeutlich, aber sicher 172 zu vernehmen. Wie ich später ausrechnete, entspricht für dieses Intervall der Werth 160 dem D_5 ; wahrscheinlich handelt es sich also um eine subjective Angleichung dieses stets

1) Das ist z. B. bei der Würdigung der unten (S. 199) citirten Beobachtungen von Helmholtz zu berücksichtigen.

sehr leisen Differenztones an die Octave des D_1 . Der zweite Fall betrifft den nahezu reinen Tritonus ca. $250 + 350$. Hier bestimmte Hr. Mö. sehr genau einen ZD_{2+1} 138 und den $D_{3=1}$ 49 (Bestimmung durch die höhere Octave), sowie als leisesten Differenzton D_2 150; dazu, scheinbar etwas stärker als D_2 : 198. Ich konnte im Beobachterzimmer die ersten drei Angaben sehr annähernd bestätigen, hörte aber sowohl dort wie an den Gabeln nicht 198, sondern dessen tiefere Octave ca. 100 [D_1].

Hällström beschränkte, wie man sieht, seine Versuche auf eine ziemlich kleine Auswahl von Intervallen. Er selbst erkannte als erster meines Wissens, dass die Zahl der möglichen Differenztöne bei den verschiedenen Intervallen mehr oder weniger begrenzt ist, am engsten bei den vollkommensten Consonanzen. Hätte er die Dissonanzen stärker berücksichtigt, so wären seine Ergebnisse noch mannigfaltiger und zugleich einheitlicher geworden. Die Tonhöhen der gehörten Combinationstöne bestimmte er offenbar ohne Vergleichstöne, unmittelbar aus seinem Intervallgedächtniss. So erklärt es sich, dass er die gefundenen Töne einfach mit den Namen der musikalischen Leiter bezeichnet, und ferner, dass die wichtige Thatsache der Zwischentonverschmelzung nahe benachbarter Differenztöne ihm verborgen blieb. Bemerkenswerth ist endlich, dass nach Hällström's Befunden im Gegensatz zu den meinigen die charakteristischen (zusammenfallenden) Differenztöne der Consonanzen nicht immer die stärksten jeweils vorhandenen waren und zuweilen gar nicht festgestellt wurden. Abgesehen von der Verschiedenheit der Klangquellen kommt hier zunächst seine ungenaue Art der Tonbestimmung in Betracht, wobei Octaventäuschungen und andere Verwechslungen zwischen harmonischen Tönen unvermeidlich sind. Ferner kann auch der beste Geiger einen Zweiklang nicht mit mathematischer Genauigkeit und nicht immer gleich rein greifen. Nun treten aber, wie ich früher ausführlich beschrieben habe, bei jeder Verstimmung eines consonanten Intervalls die tiefen zusammenfallenden Theiltöne verhältnissmäßig weit auseinander, sodass aus dem starken und deutlichen Hauptcombinationston ein unklarer und abgeschwächter Zwischen-Differenzton wird. Die bei verstimmtten Consonanzen regelmäßig auftretenden Geräusche verstärkt der Geiger noch durch die Reibegeräusche des Bogens. Dergleichen Nebenempfindungen erschweren und beschränken

die Analyse. Gelegentlich der großen Septime $c^2 + h^2$ berichtet Hällström: »g' [D_3] unter dem Geräusch der übrigen hörbar«.

Die ältere Theorie hatte so ausschließlich die einfachsten Schwingungsverhältnisse im Auge, dass sie¹⁾ immer nur von dem »tiefen harmonischen Tone« redete. Auch die mathematische Construction Weber's beruht im Grunde auf einer theoretischen Bevorzugung der Consonanzen. Hällström überwand principiell diese Einseitigkeit. Er bewies durch das Experiment, dass oft auch äußerst dissonirende Differenztöne zu hören sind, und führte deshalb den (von Vieth vorgeschlagenen) Ausdruck »Combinationstöne« endgültig in den wissenschaftlichen Sprachgebrauch ein. Ebenso erkannte er die herkömmliche Meinung als ein Vorurtheil, wonach die Combinationstöne nothwendig tiefer wären, als beide Primärtöne. Sein theoretischer D_{III} müsste schon bei der Quinte den Grundton übersteigen, wie es D_1 jenseits der Octave, D_2 bei der Duodecime thut. Wenn Hällström trotz dieser allgemeinen Einsicht niemals einen zwischenliegenden D beobachtet hat, so beruht das z. Th. auf der relativen Schwäche und Undeutlichkeit dieser Töne (vgl. unten S. 210 und Cap. II, 3).

Hällström hatte gelegentlich bei der großen Septime $C_1 + H_1$ neben einem störenden Geräusche starke Octavenstöße bemerkt und diese Schwebungen auf die Interferenz des Grundtones mit dem ersten Combinationston zurückgeführt. Genauer wurden solche nicht unmittelbar durch die Primärtöne erzeugten Schwebungen von dem Krefelder Kaufmann H. Scheibler untersucht. Den ausführlichsten Bericht über diese Versuche lieferte der Bürgerschullehrer A. Roeber (1834; 12, 333—362 und 492—510). Getrieben von dem praktischen Bedürfniss nach einer exacten Methode des Stimmens, zählte Scheibler mit Hülfe eines verschiebbaren Pendels die Schwebungen zahlreicher Zusammenklänge von Stimmgabel-Resonanztönen. Zunächst stellte er endgültig fest, dass die Schwebungen der verstimmtten Prime an Zahl genau gleich sind der Differenz der Doppelschwingungen der erzeugenden Töne. Die Verschmelzungsgrenze der Schwebungen zu einer einheitlichen Empfindung bestimmte er auf nur 16 p. sec., ohne die Höhenlage zu berücksichtigen. Weiterhin entdeckte er in

1) Namentlich in England; vgl. jedoch schon Romieus »sons harmoniques graves« (1). Diese Abhandlung war mir im Original nicht zugänglich.

verstimmten Accorden Schwebungen »höheren Grades«, deren Geschwindigkeit auf die Betheiligung von Differenztönen schließen ließ. Die Differenztöne selbst und die Höhenlage der Schwebungen wurden nicht besonders untersucht. Scheibler stützte sich auf die Ergebnisse Hällström's und auf die Annahme, dass alle Schwebungen jenseits der Verschmelzungsgrenze einfach in einen Combinationston übergingen. Wiederholentlich hörte er Octavenstöße und erkannte das Gesetz ihrer Geschwindigkeit [$S_{VIII} = n - D_1$]. Die verstimmte Doppeloctave $n : 4n - 4$ ergab 4 Schwebungen p. sec., die auf das Zusammenwirken des Grundtones mit D_3 zurückgeführt wurden. Im übrigen handelte es sich stets um disharmonische Drei- und Vierklänge und um Schwebungen, für die man Differenztöne erster oder zweiter Ordnung verantwortlich machen konnte. Die messende Beobachtung ergab regelmäßig die theoretisch erwartete Geschwindigkeit der Schwebungen; d. h. die sorgfältig festgestellten Schwebungszahlen waren jedesmal sehr annähernd gleich dem Schwingungsunterschiede der beiden nächstbenachbarten, nach Hällström berechneten Combinationstöne. Die »Hörbarkeit« der beobachteten Schwebungen war im allgemeinen um so geringer, je höher die Ordnungszahl der als betheiligt angenommenen Differenztöne war. Scheibler entwickelte aus seinen Ergebnissen verschiedene Methoden, um Octaven und engere Intervalle mit Hülfe der Schwebungen rein abzustimmen, und er selbst verfuhr praktisch danach. Hinsichtlich der Differenztöne zieht Roeber aus alledem den Schluss, »dass die Combinationstöne, gleichwie die gewöhnlichen Töne, beim Zusammentreffen Stöße erzeugen, deren Zahl gleich der Differenz derjenigen Vibrationszahlen ist, durch welche die Combinationstöne auszudrücken sind«. In diesem Sinne formulirte er allgemein die Schwebungsgeschwindigkeit für die verstimmte Octave, Quinte, Quarte und die beiden Terzen.

Soweit die Versuche Scheibler's mit meinen Beobachtungen an Zweiklängen verglichen werden können, haben sich seine Ergebnisse mir in allem Wesentlichen bestätigt. Alle secundären Schwebungsarten, die Scheibler und Roeber anführen, sah auch ich auf Grund der Thatfachen mich genöthigt zu unterscheiden, und zwar noch ehe ich die Roeber'sche Arbeit kannte. Da ich eine erheblich größere Zahl von Zweiklängen untersuchte, konnte ich diese Schwebungen in verschiedenen Tonlagen genauer, namentlich auch bis an ihre

Verschmelzungsgrenzen verfolgen. In vollkommener Analogie zu Roeber's theoretischer Betrachtungsweise fand ich außer den genannten noch charakteristische Schwebungen um den Tritonus 5 : 7, die beiden Sexten, die natürliche Septime 4 : 7, die kleine Septime 5 : 9, und jenseits der Octave um die None, die verminderte Decime, die kleine und die große Decime, die Undecime, Duodecime, Treddecime, verminderte Quatuordecime 2 : 7 und Quatuordecime 3 : 11; Schwebungen, bei denen theilweise Differenztöne 4. und 5. Ordnung als theilhaftig nachzuweisen sind. Roeber hat in der theoretischen Discussion der Scheibler'schen Versuche nachträglich (13, 38 f.) erklärt, die Herleitung der Stöße aus Combinationstönen höherer Ordnung besage nicht nothwendig, dass solche Combinationstöne thatsächlich für jene Schwebungen verantwortlich zu machen seien; es handle sich zunächst nur um eine einfache Ausdrucksweise. Ich habe mich nun bei den verschiedenartigen Schwebungen nicht darauf beschränkt, ihre Geschwindigkeit, Stärke und Deutlichkeit zu beurtheilen, sondern habe überall auch die Höhenlage der Schwebungen d. h. die Schwingungszahlen der schwebenden und der an den Schwebungen unbetheiligten Töne untersucht. (Im dritten Abschnitt des folgenden Capitels muss diese Frage genauer erörtert werden). Die Ergebnisse rechtfertigen das Roeber'sche Verfahren der Beschreibung und Berechnung: es handelt sich thatsächlich um schwebende Differenztöne höherer Ordnung.

Helmholtz (1856; 17 und 18. Vgl. 21, S. 254; 325) gab den hier betrachteten Combinationstönen den Namen Differenztöne, um sie von den Summationstönen, die er entdeckt hat, zu unterscheiden. Auf seine theoretischen Anschauungen gehe ich erst in einem späteren Zusammenhange ein, wo ich auch von den theoretischen Erörterungen der Scheibler'schen und Hällström'schen Versuche das Wichtigste erwähnen werde. Was die von Helmholtz mitgetheilten thatsächlichen Beobachtungen betrifft, so konnte er beim Zusammenklänge zweier Stimmgabeln nur den ersten Differenzton ($= n^1 - n$) »deutlich« hören. An anderen Instrumenten (Orgelpfeifen, Violine) vernahm er unverkennbar auch den Differenzton 2. Ordnung; namentlich bei einer großen Terz, einen Tritonus 5 : 7, einer kleinen und einer großen Sexte aus Sirenenklängen; aber D_1 war bei weitem deutlicher. Bei einer schwach verstimmten Octave, Quinte, Quarte

und großen Terz constatirte er (mit abnehmender Stärke) die nach Scheibler zu erwartenden Schwebungen. Als schwebende Töne glaubte er hier stets die Differenztöne zu hören, »welche Scheibler's Theorie fordert«. Indessen seien Octaventäuschungen dabei nicht ausgeschlossen. Helmholtz bezeichnet als seinem Ohre besonders wahrscheinliche Träger der Schwebungen für die Quarte den D_2 und für die große Terz den D_3 . (Nach Roeber's Berechnung und nach meinen Beobachtungen schwebt im ersten Falle vielmehr $D_{1=3}$, die tiefere Octave des D_2 und im zweiten $D_{1=4}$, die tiefere Octave des D_3 . Helmholtz wird an Hällström's $D_{III} = n' - D_2 = 2D_1$ gedacht haben, der freilich bei der verstimzten Quarte mit D_2 , bei der großen Terz mit D_3 schweben müsste, und zwar genau in derselben Phase, wie D_1 mit D_3 bzw. mit D_4). Zuweilen erzielte Helmholtz durch Angeben dritter, tiefer als die primären Klänge gelegener Töne Schwebungen, die »nicht durch Combinationstöne erster Ordnung, sondern nur durch solche höherer Ordnung erklärt werden können«. Helmholtz scheint nur die (reinen und schwach verstimzten) Consonanzen der ersten Intervallperiode genauer auf Differenztöne hin analysirt zu haben, d. h. nur solche Klänge von relativ einfachem Schwingungsverhältniss, die nicht über die Octave hinausreichten.

Zusammenhängende Beobachtungen über die Combinationsercheinungen wurden seit Hällström und Scheibler erst wieder in den 70er Jahren von Rudolf Koenig angestellt (1876; 23, 177; 25, 87). Diese (nach Stumpf's Urtheil) vorzügliche experimentelle Studie ist die umfassendste von den vorliegenden Bearbeitungen unseres Gebietes. Koenig benutzte einen reichen Apparat von Stimmgabeln, deren Töne zwischen den Grenzen E_1 40 und c^5 4096 sich bewegten. Die Grundtöne der untersuchten Zweiklänge waren E_1 40, G_1 48, C 64, c 128, c^1 256, c^2 512, c^3 1024, c^4 2048. Koenig war der erste Akustiker, der systematisch auch solche Intervalle untersuchte, die weiter waren als eine Octave. Nur bei den Grundtönen 40, 48 und 2048 beschränkte er sich auf die erste Intervallperiode (1:1 bis 1:2). Im übrigen ging die Untersuchung regelmäßig über die Octave hinaus bei $n = 64$ und $= 128$ bis einschließlich zur 7. Periode (bis 1:8); bei $n = 256$ bis zur 5. Periode (1:6); bei $n = 512$ und $= 1024$ bis zur 3. Periode (1:4, Doppeloctave).

Die Ergebnisse sind am reichhaltigsten hinsichtlich der Schwebungen. Zunächst traten Schwebungen bei der Verstimmung aller derjenigen Intervalle hervor, bei denen die Schwingungszahl des höheren Primärtones $[n^1]$ ein ganzes Vielfaches der Schwingungszahl des Grundtones war, also bei der verstimmten Prime, Octave, Duodecime, Doppeloctave u. s. w. Mitunter konnte Koenig noch um $C + d^2$ und sogar um $C + e^2$ (1:9 und 1:10, wenig verstimmt) einige Stöße wahrnehmen. Diese Schwebungen waren jedoch sehr schwach und einem nicht besonders geübten Ohre unhörbar, während alle übrigen von ihm berichteten Erscheinungen für jedes normale Ohr gelten. Abgesehen von den Schwebungen der verstimmten Multipla waren noch innerhalb der vier ersten Perioden an verschiedenen Stellen Schwebungen zu hören, die Koenig aus theoretischen Gründen secundäre Stöße nennt. Am mannigfaltigsten in der ersten Periode. In den drei tiefsten Tonlagen waren nur bei verstimmten Quinten bis 2 (Grundton 40), 8—10 ($n = 48$) und 8 ($n = 64$) solche Stöße zu vernehmen; bei den Grundtönen 128 bis 2048: um die große Terz, die Quinte, Quarte, große Sexte und verminderte Septime 4:7. In der zweiten Periode ergaben sich Schwebungen der schwach verstimmten großen Decime in allen untersuchten Tonlagen ($n = 64$ bis $n = 1024$); Schwebungen der verstimmten Undecime 3:8 bei den Grundtönen c 128 und c^3 1024; Schwebungen um die verminderte Decime 3:7 bei $n = 128$ und (kaum hörbar) bei $n = 512$; nahe der None 4:9 beim Grundton 1024. Von den Intervallen der dritten Periode (Duodecime bis Doppeloctave) ließen nur die verminderte Quatuordecime 2:7 und die Quatuordecime 3:11 z. T. »secundäre Stöße« hören, jene bei den Grundtönen 64, 128, 256 und 1024, diese beim Grundton 128. Endlich waren innerhalb der vierten Periode bis 4 Schwebungen festzustellen in nächster Nähe der um 2 Octaven erweiterten großen Secunde $c + d^2$ (2:9).

Der Vergleich der Koenig'schen Schwebungsbeobachtungen mit den meinigen zeigt eine weitgehende Uebereinstimmung. Koenig's Versuche erstreckten sich über ein viel größeres Tongebiet und waren naturgemäß für einzelne Intervallperioden weniger zahlreich. In den höheren Tonlagen (jenseits c^2 512) beschränkte sich Koenig auf die Intervalle von einfacheren Schwingungsverhältnissen, also im

allgemeinen auf die Stufen der musikalischen Scala. So ist es zu erklären, dass Koenig die (relativ leisen und undeutlichen) Schwebungen um die kleine Terz, den Tritonus 5 : 7, die kleine Sexte, die kleine Septime, die kleine Decime und die Tredecime nicht bemerkt hat; dass er ferner die von ihm notirten »secundären Stöße« nirgends weiter verfolgt hat, als bis zu 16 p. sec. (Quintenstöße bei $n = 256$). Für die als »primäre Stöße« bezeichneten Schwebungen ergibt sich aus den Beobachtungen Koenig's, was jetzt allgemein bekannt und durch meine Versuche auch für die anderen Schwebungsarten festgestellt ist (vgl. die Tabellen auf S. 344, 360, 371, 574, 583 der »Beobachtungen«): dass Schwebungen gleicher Herkunft bis zu einer um so größeren Frequenz gesondert vernehmbar bleiben, d. h. um so später zu einem continuirlichen Eindruck verschmelzen, je höher die schwebenden Töne liegen¹⁾.

Weniger ergiebig waren Koenig's Beobachtungen über die Combinationstöne. Die Intervalle mit den drei tiefsten Grundtönen (40; 48; 64) ließen in keiner Periode und die Intervallperioden jenseits der dritten (also die Intervalle, die über die Doppeloctave hinausgingen) ließen in keiner Höhenlage einen Combinationston hören. Von den Klängen erster Periode mit dem Grundton 128 war nur bei der Quinte $c + g$ leise und undeutlich ein C wahrzunehmen. Dieser Ton ist identisch mit den Differenztönen 1. und 2. Ordnung, die bei der Quinte zusammenfallen. Im weiteren nehme ich mir die Freiheit, Koenig's »Stoßtöne« mit den früher eingeführten und definirten Differenztonbezeichnungen wiederzugeben, weil die Beobachtungen sich dadurch viel einfacher und übersichtlicher beschreiben lassen. Bei zehn Intervallen (cf. 23, 224; 25, 133 ff.), deren höherer Primärton c^4 2048 festlag, und deren Grundton zwischen h^3 1920 und 2012 sich bewegte, war jeweils D_1 laut zu hören; ebenso bei acht Klängen, die zwischen $3968 + c^5$ (4096) und $4070 + c^5$ lagen. Die Primärtöne waren hier ungewöhnlich stark. Auch die Differenztöne waren sehr laut und weithin hörbar; sie konnten, wie man sieht, bis zu einer Tiefe von 32 bezw. 26 Schwingungen (bei den beiden engsten Inter-

1) Koenig hat diesen für die Kritik seiner theoretischen Anschauungen nicht unwichtigen Thatbestand bei der Zusammenfassung seiner Ergebnisse stets übersehen; wie er denn auch hinsichtlich der die »multiplen« Schwebungen bedingenden Töne im Irrthum war (vgl. unten Cap. II, 3 und III, 2 a.

vallen) verfolgt werden. Für die gewöhnlich benutzten Stimmgabeln und bei tieferen Primärklängen betrug die Tiefengrenze der Differenz-töne etwa 36 Schwingungen.

Innerhalb der eingestrichenen Octave war zwischen der großen Terz $256 + 320$ und dem Intervall $256 + 440$ überall ein leiser D_1 und daneben ein D_2 zu constatiren, der jedoch »selbst mit Hilfs-gabeln kaum vernehmlich« wurde. In den höheren Tonlagen (Grund-töne 512 bis 2048) erstreckte sich die Analyse, wie erwähnt, nur auf relativ wenige Intervalle, aber die Differenz-töne waren hier stärker und deutlicher. In der ersten Periode notirt Koenig zwischen großer Secunde und natürlicher Septime für alle Klänge überall den D_1 ; zwischen großer Terz und großer Septime — in der höchsten Tonlage ($n = 2048$) zwischen Quarte und $2048 + 4032$ ($32 : 63$) — den D_2 . Bei $2048 + 2816$ ($8 : 11$) und $2048 + 3328$ ($8 : 13$) war neben D_1 (g^2 bzw. e^3) und D_2 (e^3 bzw. g^2) noch D_3 (e^2) zu hören. — Von den Intervallen der zweiten Periode enthielten: die None c^2 (512) + d^3 den $D_{2=5}$, die None c^3 (1024) + d^4 den $D_{2=5}$ laut und den D_3 schwach; die verminderte Decime $512 + 1194,6$ ($3 : 7$) den $D_{2=4}$ und seine höhere Octave D_3 ; die großen Decimen $c^2 + e^3$ und $c^3 + e^4$ den $D_{2=3}$, sehr laut bzw. laut; die Undecime $c^3 + f^4$ den D_2 stark und seine tiefere Octave $D_{3=4}$ schwächer; das Intervall 1024 (c^3) + 2816 ($4 : 11$) den D_2 schwach und den $D_{3=5}$ gut hör-bar. — Für die dritte Periode gibt Koenig nur bei den Inter-vallen mit dem Grundton c^3 Combinationstöne an, und zwar: bei $+ 3328$ ($4 : 13$) den D_3 ($= \frac{1}{2} \cdot D_5$); bei der Tredecime + a^4 den $D_{3=5}$ und — damit verschmelzend — die höhere Octave D_4 ; bei der verminderten Quatuordecime + 3584 ($2 : 7$) den $D_{3=4}$, laut und deut-lich; bei $c^3 + h^4$ ($4 : 15$) den D_1 , schwach aber deutlich; endlich bei + 3968 ($8 : 31$) den D_4 .

Immer wieder hebt Koenig die »außerordentlich große Inten-sität« (*»intensité formidable«*) seiner Stimmgabeln hervor. Dass er z. B. bei den Intervallen $8 : 11$ und $8 : 13$ der viergestrichenen Oc-tave neben D_1 und D_2 noch D_3 wahrnehmen konnte, führt er darauf zurück. Ich darf nach zahlreichen vergleichenden Beobachtungen umgekehrt behaupten: dass Koenig nur in diesen beiden Fällen drei Differenz-töne und niemals mehr wahrgenommen hat, beruht unter

anderem auf der übermäßigen Stärke der von ihm benutzten primären Töne.

Die zur Bildung von Combinationstönen nothwendige Intensität der Primärklänge wird noch heute — vorwiegend aus theoretischen Gründen — vielfach überschätzt; so auch von Koenig (vgl. 23, 219 oben). Diesem Vorurtheil ist meines Wissens zuerst Stumpf entgegengetreten. Er gibt an (32, 248), zu Zeiten, wo er viel darauf achtete, habe er »Differenztöne von der Violine, am Clavier, bei gedeckten Pfeifen u. s. f. hundertfach auch in Fällen gehört, wo die Tongebung die schwächste war, die überhaupt hergestellt werden konnte. Ja, bei solchem Pianissimo traten die Differenztöne . . . noch deutlicher hervor, als bei stärkerem Primärklang«. Aehnliches wurde von den besten neueren Beobachtern festgestellt, von Hermann (35), Meyer (46) u. a. Auf Grund derselben Erfahrung legte ich schon bei der Bestellung meiner Stimmgabeln kein Gewicht auf ungewöhnlich große Tonstärke, die bekanntlich meistens durch einen größeren Reichthum an Obertönen erkauft werden muss. Meine Gabeln tönnten bei gleich kräftigem Streichen nicht so laut, wie die Koenig'schen, die ich damit vergleichen konnte; sie waren, wie früher erwähnt, sämmtlich durch schwere Laufgewichte gedämpft. Trotzdem fand ich es nicht nur nicht nöthig, sondern sogar ungünstig, sie mit größtmöglicher Kraft zu streichen (vgl. 59, 317; 604). Maximale Stärke der primären Klänge erschwert ganz allgemein die Analyse und feinere Bestimmung der Theilerscheinungen; die leisesten darunter werden hierdurch meist ganz unter die Schwelle der Merklichkeit hinabgedrückt; am ehesten, wenn man, wie Koenig, im Tonerzeugungsraum selbst beobachtet, wo noch die starken sogenannten Erzeugungsgeräusche hinzukommen. Es ist mir in theilweisem Gegensatze zu Stumpf (a. a. O.) sogar wahrscheinlich, dass diesseits einer bestimmten Intensität, bei mittelstarken oder etwas über mittelstarken Primärtönen die leiseren Combinationserscheinungen nicht nur im Vergleich zum Primärklange, sondern absolut stärker sind als jenseits dieser Intensitätsgrenze. Wenn Koenig bei seinen allerlautesten Gabeln den einzigen Differenzton sehr enger Intervalle bis zu 26 Schwingungen nach der Tiefe verfolgen, und ebenso, wenn er zuweilen noch um das Intervall 1 : 10 Schwebungen feststellen konnte, so waren das gewiss Erfolge seiner ungewöhnlich starken Tongebung,

— im zweiten Falle offenbar durch die Mitwirkung von Obertönen erreicht. Aber dem steht der Nachtheil gegenüber, dass von den feineren Combinationerscheinungen ihm ein großer Theil entgangen ist. Auf dieselbe Weise erklärt sich auch bei anderen Akustikern manches negative Ergebniss.

Koenig theilt nichts darüber mit, wie er die herausgehörten Töne qualitativ bestimmte. Es hat den Anschein, als hätte er sich im allgemeinen darauf beschränkt, sie mit den Tönen der musikalischen Leiter zu vergleichen. Die notirten Tonhöhen entsprechen, analog wie bei v. Blein und Hällström, mathematisch genau den erwarteten Stoßtönen. In der näheren Umgebung aller consonanten Intervalle sind in Wirklichkeit nicht die von Koenig angegebenen Töne, sondern mehr oder weniger davon abweichende zu hören, nämlich Zwischentöne zwischen ihnen oder (in der Mehrzahl der Fälle) zwischen einem von ihnen und einem Differenzton höherer Ordnung.

Die von Koenig wahrgenommenen Differenztöne sind thatsächlich im allgemeinen, als »charakteristische« nach unsrer Bezeichnungsweise, lauter und deutlicher als die von ihm nicht bemerkten. Wo er die Stärkeverhältnisse der Töne angibt, stimmen seine Beobachtungen größtentheils mit den (früher eingehend beschriebenen) meinen überein; noch besser hinsichtlich der relativen Intensität der verschiedenen Schwebungsarten. Ich komme hierauf im folgenden Capitel (Abschn. 3) zurück, wo ich auch zu der principiellen Unterscheidung Koenig's zwischen Stoßtönen und Differenztönen Stellung zu nehmen habe.

Werthvolle Mittheilungen, die ich zum größten Theile bestätigen kann, macht Stumpf an zahlreichen Stellen seiner Tonpsychologie (32) über Schwebungen und Combinationstöne, namentlich über feinere Eigenthümlichkeiten ihrer Auffassung. Ich übergehe diese allgemein bekannten Angaben hier ebenso, wie die zusammenfassenden Sätze der neueren Lehrbücher — sie stützen sich sämmtlich auf die oben dargestellten Versuchsreihen; vielfach ist noch immer von »dem« Differenzton die Rede, worunter gewöhnlich der D_1 verstanden wird — und wende mich noch in Kürze zu den beiden ausführlichen Monographien Max Meyer's über unsern Gegenstand (46 und 47), weil dieser Akustiker aus seinen Beobachtungen theoretische Consequenzen von großer Tragweite zieht.

Die Zweiklänge, für die Meyer die Ergebnisse vollständiger Analysen angibt (46, 193 ff.), wurden von Stimmgabeln auf Resonanzkästen erzeugt und lagen alle innerhalb der ersten Intervallperiode. Darunter waren sieben, deren Verhältnisszahlen sich nur um eine Einheit unterscheiden, nämlich 4:5 (die Schwingungszahlen waren die entsprechenden Hunderter), 5:6 u. s. f. bis 9:10, und 16:17. Dazu kam die kleine Sexte 5:8 und die natürliche Septime 4:7. Bei allen diesen Klängen hörten Meyer und seine vier Beobachter je 3 bis 4 Differenztöne, von denen die überwiegende Mehrzahl den D -Tönen 1. bis 5. Ordnung entspricht. In zwei Fällen (4:5 u. 5:6) notirt Meyer noch den Ton $2n' - n$; ferner bei 400 + 700 neben D_1 und $D_{2=4}$ (stets gehört) noch für den Fall, dass n' stärker tönte, als n , 600 [$2n' - 2n = D_{III} = 2D_1$] und etwas schwächer 500 [= 600 - D_2 = oder $n' - D_3$ oder $\frac{1}{2}(2n' - n)$]. Da die Klänge ohne Fortleitung unmittelbar an den Gabeln beurtheilt wurden, bin ich geneigt, diese Töne [in der angedeuteten Weise] auf die Mitwirkung von Obertönen zurückzuführen. Meyer lässt sie in seiner sogleich zu erwähnenden Zusammenfassung außer Betracht. Ich selbst habe bei Stimmgabelzweiklängen der ersten Periode niemals solche zwischenliegenden Differenztöne beobachtet¹⁾. Bei 1600 + 1700 notirt Meyer neben D_1 , D_5 und einem Zwischenton der Primärtöne den Ton 1000 [$D_5 - 2D_1 (= 2n' - 2n)$?]. Diese letzte Beobachtung kann ich nach meinen Erfahrungen mir nur schwer erklären. Bei der Undeutlichkeit und geringen Stärke der Differenztöne so enger Intervalle ist die Möglichkeit einer Täuschung wohl nicht ausgeschlossen. — In einem anderen Zusammenhange (46, 188) erwähnt Meyer acht Stimmgabelzweiklänge mittlerer Tonlage (zwischen 387 und 813), die stets die beiden ersten Differenztöne hören ließen. Einige Versuche mit drei zusammenklingenden Tönen bestätigten die schon von Scheibler und Helmholtz gesicherte Thatsache, dass ein Differenzton mit einem (dritten) Primärtone sowie mit einem Differenztone anderen Ursprungs schweben und einen neuen Differenzton bilden kann.

1) Neuerdings hält Meyer es ganz allgemein für wahrscheinlich, dass subjective Differenztöne, die zwischen den Primärtönen lägen, überhaupt nicht vorkämen (51, 55).

In seiner zweiten Abhandlung über die Differenztöne (47, 2; 48, 26) fasst Meyer die Combinationerscheinungen der Zweiklänge in allgemeinen Regeln zusammen:

1. »Bei Halbton- oder noch kleineren Intervallen entsteht einzig und allein der direct der Differenz der Primärtöne entsprechende Differenzton $[D_1]$.

2a. »Bei größeren Intervallen bis zur Octave, von denen die Voraussetzung erfüllt wird, dass ihre Verhältnisszahlen sich um eine Einheit unterscheiden, entstehen außer $1[D_1]$, der am stärksten auftritt, noch einige derjenigen Töne, die den in der absteigenden Zahlenreihe auf die Primärtöne zunächst folgenden Zahlen entsprechen, z. B. beim Intervall 8:9 außer 1 noch die Töne $7[D_2]$, $6[D_3]$ und $5[D_4]$, bei 6:7 außer 1 die Töne $5[D_2]$ und $4[D_3]$.

2b. »Unterscheiden sich die Primärtöne um mehr als eine Einheit, so entstehen die Differenztöne $h - t$, $2t - h$ und $2h - 3t$, wobei h die Schwingungszahl des höheren, t die des tieferen Tones darstellt« $[D_1; D_2; D_3]$.

3. »Bei Intervallen, die über die Octave hinausgehen, entsteht derjenige Ton, dessen Verhältnisszahl gleich der kleinsten Differenz ist, die man erhält, wenn man h vom Doppelten oder Dreifachen von t (bezw. dieses von h) abzieht. So hört man beim Intervall 4:9 den Differenzton $1[D_2]$, da $9 - 2 \times 4 = 1$, bei 4:11 ebenfalls $1[D_3]$, da $3 \times 4 - 11 = 1$ ist«.

4. Sind die bezüglichen Differenzen klein, so hört man stets neben den Differenztönen (bei ganz kleinen Differenzen an ihrer Statt) »die entsprechende Anzahl Schwebungen«. — Meyer's Angaben über die Intensitätsverhältnisse stelle ich weiter unten (Cap. II, 3) mit anderen und meinen eigenen Beobachtungen zusammen.

Hinsichtlich der Differenztöne macht Meyer die Einschränkung, man dürfe sich nie auf eine Regel verlassen, sondern jeweils nur auf die Ergebnisse der Beobachtung. Danach muss ich die soeben citirten Sätze in folgenden Punkten ergänzen und dadurch zugleich vereinfachen.

Ad 1. Erweitert man den Abstand zweier Stimmgabeltöne mittlerer Stärke vom Einklang aus, so machen sich regelmäßig, ehe noch der tiefe D_1 hervortritt, die höheren Differenztöne geltend, zunächst dadurch, dass der tiefere Primärton später (d. h. erst bei größerem

Schwingungsunterschied) und weniger klar herausgehört wird, als der höhere; sobald der Grundton gesondert wahrzunehmen ist, hört man ihn merklich vertieft, nämlich in Zwischentonverschmelzung mit D_2 ; weiterhin, und zwar spätestens da, wo D_1 zum ersten Male als Ton auftritt, sind höhere Primärtöne (D_2 bis D_5) von rasch wachsender Anzahl unterhalb des Grundtones zu hören, vorerst paarweise zu Zwischentönen verschmolzen, allmählich sich sondernd nach ihren theoretischen Schwingungszahlen. Diese Thatsachen habe ich mit neun völlig unbefangenen Beobachtern sicher gestellt und in meiner ersten Mittheilung (59) für drei verschiedene Tonlagen ausführlich beschrieben. Uebrigens verzeichnet Meyer selbst in dem einzigen hierher gehörigen Beispiel seiner früheren Abhandlung, bei 1600 + 1700, neben D_1 einen D_5 als sicher, und mehrere andere hohe D -Töne, darunter D_2 , D_3 und D_4 als möglicherweise vorhanden. Dass Differenztöne mit anderen oder mit primären Tönen bei hinreichend geringem Abstände zu Zwischentönen verschmelzen, genau wie primäre Töne unter sich, scheint auch ihm entgangen zu sein; ebenso die hierauf beruhende Höhenänderung des Grundtones bei bestimmten Intervallen. Gelegentlich erwähnt Meyer ohne weiteren Zusatz, dass er und seine Mitarbeiter »bei den Differenztonbeobachtungen häufig den tiefsten Differenzton bis zu einem halben Tone zu hoch hörten«¹⁾. Dabei hat es sich wahrscheinlich meistens um einen Differenzton gehandelt, der mit einem benachbarten höheren verschmolz. Das begegnet naturgemäß den tiefsten Differenztönen weitaus am häufigsten, nämlich bei allen verstimmtten Consonanzen.

In den folgenden Meyer'schen Regeln [2a und b] werden die Intervalle, deren Verhältnisszahlen sich durch zwei aufeinander folgende ganze Zahlen ausdrücken lassen, von allen übrigen hinsichtlich ihrer Differenztöne abgetrennt. Diese Umständlichkeit wird durch die Thatsachen nicht gefordert und erinnert an die historische Bevorzugung jener Schwingungsverhältnisse. Meyer scheint der ersten (unter 2a fallenden) Gruppe von Klängen im allgemeinen mehr Differenztöne zuzuschreiben als der zweiten, für die er nur D_1 , D_2 und D_3 angibt. Eher wäre das Umgekehrte berechtigt. Wo das Ver-

1) Herr Professor Stumpf bestätigte mir persönlich diese Beobachtung, als noch der Erklärung bedürftig.

haltniss der primären Schwingungszahlen durch zwei um eine Einheit verschiedene kleine Zahlen auszudrücken ist (bis 6) und ebenso, wo diese Verhältnisszahlen größer sind als etwa 16, ist die Zahl der vernehmbaren Differenztöne relativ beschränkt. Im ersten Falle dadurch, dass jeweils zwei oder mehr Differenztöne zusammenfallen; aber dasselbe gilt von allen consonanten Intervallen, also auch von 3 : 5, 4 : 7, 5 : 7, 5 : 8, 1 : 3 u. s. w und von deren geringen Verstimmungen. Die engsten Intervalle andererseits, von der Prime bis etwa zur kleinen Secunde, können, gleichviel welche Zahlen ihr Schwingungsverhältniss ausdrücken mögen, deshalb nur wenige Differenztöne deutlich hören lassen, weil hier die höheren einander und dem Grundtone zu nahe liegen, während der tiefste die untere Hörgrenze entweder gar nicht oder nur wenig überschreitet. Aber dasselbe gilt genau von der verstimmtten Octave, annähernd von der Duodecime und Doppeloctave; und ein wegen zu geringer Tonhöhe unhorbarer oder undeutlicher Differenzton ergibt sich noch bei sehr vielen anderen Klängen. Dass man im allgemeinen die Zahl der Differenztöne nicht auf 3 beschränken darf, am wenigsten bei den Dissonanzen und unvollkommenen Consonanzen der ersten Periode, brauche ich nach den Berichten über meine Versuche nicht näher auszuführen.

Auch Meyer's dritte Regel, die über die Octave hinausgehenden Klänge betreffend, ist zu eng. Manche Intervalle der zweiten und dritten Periode lassen den dort allein geforderten *D*-Ton auf keine Weise hören; und die meisten enthalten, wie meine Versuche zeigen, mehr als einen.

Nach jener Regel gäbe es keine zwischen die Primärtöne fallenden Differenztöne. Diese vielfach und neuerdings wieder von Schaefer vertretene Ansicht ist von Meyer früher ausdrücklich bekämpft worden (46, 186). Er selbst hörte bei zwei Stimmgabeltonen vom Verhältniss 3 : 8 den D_1 (vgl. dagegen neuestens 51, 55) und Stumpf berichtete, er habe an der Geige mehrfach (z. B. ebenfalls bei der Undecime) zwischenliegende Differenztöne, auch solche, die nicht von Obertönen hergeleitet werden können, unzweifelhaft, wenn auch nur schwach gehört. Meyer's Mittheilung, dass auch Koenig bei 3 : 8 den D_1 gehört habe, muss freilich auf einem Versehen beruhen. Koenig versichert vielmehr (23, 216; cf. S. 194) bei $c^3 + f^4$ [3 : 8] »durchaus kein a^3 [5]« und auch bei einigen

anderen consonanten Intervallen, die über die Octave hinausreichten, »keine Spur« des D_1 bemerkt zu haben; nur durch Stöße mit Hilfsgabeln hat er ihn bei tieferer Lage der Primärtöne festgestellt. In seine Tabellen ist kein einziger zwischenliegender D aufgenommen. Koenig bezweifelte damals nicht die Realität zwischenliegender Differenztöne, hielt sie aber im allgemeinen für sehr schwach. Diese bisher wenig berücksichtigten Töne hat Schaefer in den Mittelpunkt einer neueren Untersuchung (56, vgl. 57) gestellt. Sie gewannen dadurch ein so starkes theoretisches Interesse, dass ich auf die That-sachenfrage hier etwas näher eingehen muss.

Schaefer suchte den ersten D -Ton in Zweiklängen aus Tönen von Stimmgabeln und Flaschen, des Claviers, des Harmoniums und des Appunn'schen Dreiklangapparates. Die zahlreichen (mehr als 50) Intervalle erstreckten sich über ein weites Tongebiet von 100 bis 7500 Schwingungen und standen in sehr verschiedenen Verhältnissen (etwa 30) zwischen 5:9 und 1:16, ungefähr zur Hälfte zwischen 1:2 und 1:4. Die Ergebnisse waren derart, dass Schaefer allen Grund hatte, aus den Versuchen »mit großer Wahrscheinlichkeit« zu folgern: »Es gibt sowohl objective als subjective zwischenliegende Differenztöne¹⁾ entweder überhaupt nicht, oder sie sind wenigstens im Gegensatz zu den übrigen Differenztönen zu schwach, um unter den üblichen Bedingungen des Hörens wahrgenommen zu werden«. Schon unterhalb der Octave, bei 6:11 verschwand der D_1 und blieb bei allen weiteren Intervallen völlig unhörbar. Ein einziges Mal, am Dreiklangapparat, hörten Schaefer und Stumpf bei $e + e'$ (2:5) sehr schwach aber bestimmt im Resonator $g (= 3)$; aber hier war $e^2 (= 4 \times 2)$ als 3. Oberton des Grundtones nachzuweisen, und mit Rücksicht auf alle übrigen Beobachtungen lag es natürlich am nächsten, jenen Differenzton auf das Zusammenwirken des Obertones 8 mit dem höheren Primärton 5 zurückzuführen.

Trotzdem die Bedingungen der Schaefer'schen Versuche mit denen der meinigen nicht ganz übereinstimmten, hat dieses völlig negative Ergebniss mich überrascht. Es bedeutet unter allen mir bekannt gewordenen exacten Feststellungen die größte Abweichung

1) Der Unterschied zwischen objectiven und subjectiven D -Tönen kann an dieser Stelle noch außer Betracht bleiben.

von meinen Beobachtungen. Meine hierher gehörigen Versuche waren innerhalb ihres engeren Rahmens zahlreicher als die von Schaefer mitgetheilten. Sie erstreckten sich, abgesehen von vielen nach unten verstimmtten Octaven dreier Tonlagen, durch die ganze zweite Periode mit den Grundtönen 256 und 512, die dritte Periode mit dem Grundton 256 und ein Stück weit über die Doppeloctave hinaus; demnach kann ich etwa die Hälfte der Schaefer'schen Versuche mit den meinigen unmittelbar vergleichen. Meine Beobachtungen (vgl. 59, 568 ff., 576 ff., 584 ff.) stimmten darin mit allen früheren überein, dass die zwischenliegenden Differenztöne im allgemeinen erheblich leiser und undeutlicher sind, als D -Töne derselben Ordnung bei Klängen innerhalb der Octave, — was in geringerem Grade auch von den übrigen, tiefer als der Grundton gelegenen Differenztönen gilt. Aber dass es zwischenliegende Differenztöne gibt, auch solche, die in keiner Weise von Obertönen abgeleitet werden können, steht nach den Versuchen unbestreitbar fest. In zahlreichen Fällen haben meine Mitarbeiter und ich, unabhängig von einander, Differenztöne oberhalb des Grundtones unzweifelhaft gehört und unwissentlich genau bestimmt. (Auf die trügerische Methode der schwebenden Hülfs gabeln ließ ich mich nirgends ein). Jeder einzelne bemerkte ferner selbständig die durch D_1 bezw. D_2 bezw. D_3 bedingte Erhöhung des Grundtones bei der nach oben verstimmtten Octave, Duodecime, Doppeloctave. Im Verlaufe der zweiten Periode (zwischen Octave und Duodecime) steigt D_1 von n bis $2n$; D_2 ebenso in der dritten Periode, wo die Tonhöhe des D_1 weiter bis $3n$ zunimmt. Diese Töne waren keineswegs immer die leisesten und undeutlichsten ihres Complexes. Nur von dem relativ höchsten, dem D_1 der dritten Periode kann gesagt werden, er stand mit wenigen Ausnahmen hinter allen gleichzeitig wahrnehmbaren D -Tönen zurück; er war auch, wie seinerzeit erwähnt, von ungewöhnlich kurzer Dauer. Octaventäuschungen und harmonische Angleichungen an andere Combinationstöne, namentlich an D_2 und den Summationston, waren für ihn besonders häufig zu berichten. Er war von den genannten zwischenliegenden Differenztönen der einzige, bei dem es oft vorkam, dass die Beobachter trotz der Absicht einer vollständigen Klanganalyse ihn nicht selbständig bemerkten, ja, etwa in der Hälfte aller hierher gehörigen Versuche konnte er, namentlich von den weniger Geübten, nicht sicher

constatirt werden, selbst wenn seine genaue oder ungefähre Tonlage ihnen bekannt war. Aber folgende Beispiele werden genügen, die Hörbarkeit und das wirksame Vorhandensein auch dieses Tones zu beweisen. Dabei beschränke ich mich auf solche Bestimmungen, die vollkommen unwissentlich am Tonmesser erfolgten. [Die Abkürzungen sind dieselben, wie in den Tabellen und im Texte meiner früheren Abhandlung]. **256 + 780** [D_1 524; D_2 268; D_4 244], Me^{24} [nach + 748]: Schwebungen deutlicher, sehr deutlich, langsamer. Grundton merklich erhöht im Zusammenklange, Hauptträger der S . Neben ihm, lauter als die D -Töne vorhin: 264 [Z aus n und D_2], schwebt auch. Zuletzt bemerkt: **524**, äußerst leise aber sicher, tritt erst auf, wenn n' ausklingt, besser bestimmbar als der (stärkere) 264. — **256 + 828** [DD 572; 316; 60; 196], $Mö^{24}$ [nach + 808]: Wahrscheinlich schwebt ein Ton um 300 [nach B : ca 312; D_2] mit dem Grundton; dieser jedenfalls nicht glatt. Zwischen c^2 und d^2 ein leiser Ton, schwer bestimmbar, vielleicht **542** [D_1]. — **256 + 860** [604; 348; 92; 164; D_5 72], $Mö^{64}$ [nach + 808]: Noch S vorhanden, aber nicht discret. Eine Menge von Tönen und Geräuschen; leise stechender Wirrwarr. Ca. **304**, Bestimmung unsicher. [Octaventäuschung für D_1 . — Gefragt, ob der Ton etwa eine Octave tiefer läge, um 160 (D_4): Eher eine Octave höher. 164 nicht vorhanden, aber 368 [D_2] neben dem anderen. — **256 + 868** [612; 356; 100; 156], Me^{35} [nach + 848]: Unklare Schwebungen. Deutlichster und stärkster D : 352 [D_2], stärker als vorhin 340. Viel leiser und undeutlicher, sehr leise: 108—110 [Z D_{3+4}]. Stärker als dieser, recht deutlich: ca **612**. — Zwischen diesem Intervall und + 896 [2:7] war der D_1 nur einmal unsicher festzustellen: bei + **888** [632]: **644**, »einmal einen Moment gehört«. — In der zweiten Hälfte der Periode war er noch etwas kräftiger und merklicher als diesseits + 868. Z. B. + **920** [664; 408; 152; 104] B^{78} : **332—336** [Octaventäuschung]. $Mö^{65}$: ca. **640** [unter anderen; $Mö$ bezeichnete dieses Intervall als besonders klar]. Me^{29} : **664**; etwas leiser ca. 412—420 [D_2]; sehr leise, am leisesten ca. 156 [D_3].

Von den übrigen zwischenliegenden Differenztönen der oben angegebenen Intervallgruppen [D_2 in der dritten, D_1 und D_2 in der 2. Periode] muss durchaus als Regel gelten, dass sie wahrgenommen und im Laufe einer eindringlichen Analyse sicher bestimmt werden

können. Für alles Weitere verweise ich auf die kurzen, aber ziemlich erschöpfenden Angaben meines zusammenhängenden Berichtes. Diese Beobachtungen auf Obertöne zurückzuführen geht aus mehr als einem Grunde nicht an.

Im nächsten Capitel werde ich für alle meine Versuche die Einflusslosigkeit der Obertöne nachweisen. Schaefer hat auch bei sehr obertonreichen Klängen niemals einen zwischenliegenden Differenzton entdecken können, und selbst seine Stimmgabeln und Flaschen waren, wie meine Interferenzversuche mir beweisen, jedenfalls nicht obertonreiner als meine Gabeln. Dazu kommt, dass gegen die vorzüglich in Frage stehenden zwischenliegenden Differenztöne erster Ordnung der Einwand der Obertöne fast durchweg überhaupt unmöglich ist. Man versuche z. B. für $256 + 920$ zwei Obertöne herauszurechnen, die den hier ganz zweifellos gehörten Ton 664 als Differenzton ergäben.

Wie kommt es aber, dass ein so erfahrener Akustiker wie Schaefer niemals einen zwischenliegenden Differenzton mit Sicherheit wahrgenommen hat? Hierüber kann ich nur Vermuthungen äußern. Instrumente mit vielen und starken Obertönen, wie das Klavier oder die Appunn'schen Zungenapparate sind nach meinen Erfahrungen zu feineren Klanganalysen ungeeignet. Die Obertöne selbst und ihre Combinationserscheinungen verdrängen da die leisesten Theiltöne und gestatten bei den Dissonanzen kaum die stärksten Differenztöne und Schwebungen genau festzustellen; bei den Consonanzen werden gewisse Differenztöne zu sehr auf Kosten der anderen verstärkt, mit denen keine Differenztöne aus Obertönen zusammenfallen. Wir müssen ja die physiologische und psychische Leistungsfähigkeit des Gehörs in jedem Momente als begrenzt annehmen. Sehr häufig fand ich bei meinen Versuchen bestätigt, was Stumpf (32, 319; vgl. meine »Beobachtungen«, 604) über die Unterschiedsempfindlichkeit bei gleichzeitigen Toncomplexen angibt. Das Heraushören leiser Theiltöne wird überall erschwert durch große Zahl und Intensität anderer Theiltöne, ganz besonders aber durch große Unterschiede in der Stärke des gleichzeitig Gegebenen. — Allgemein scheint Schaefer seine Beobachtungen unmittelbar neben den tönenden Instrumenten gemacht zu haben. Da mögen die bei der Tonerzeugung unvermeidlichen Geräusche: des Streichens, Anschlagens, oder Blasens schwache und

kurze Töne verschlungen haben. Bei meinen Versuchen wurden, wie früher geschildert, die Klänge durch eine lange Leitung dem Beobachter zugeführt, dessen Raum vom Tonerzeugungszimmer durch zwei starke Wände getrennt war. In dem Stadium der Versuche, dem die meisten Beobachtungen an Intervallen höherer Perioden angehören, war ich im gleichzeitigen Streichen der beiden Stimmgabeln schon so geübt, dass Reibegeräusche der Bögen und andere Ungleichmäßigkeiten nur recht wenig zu bemerken waren. Trotzdem machte ich auch hier vielfach die früher (59, 319) mitgetheilte Erfahrung, dass unmittelbar an den Gabeln weniger und weniger genau gehört wurde, als am Ende der Leitung; hier wurde die Analyse schon durch das Hören mit nur einem Ohre, besonders aber durch den gänzlichen Fortfall störender Nebenerscheinungen erleichtert. Hinsichtlich der leisesten und undeutlichsten zwischenliegenden Differenztöne (D_1 jenseits der Duodecime) finde ich in meinem Protocollen häufig den Vermerk, dass die im Beobachterzimmer genau gehörten direct neben den Gabeln nicht sicher festzustellen waren. — Ein erheblicher Bruchtheil der von Schaefer untersuchten Intervalle stand in ziemlich einfachen Schwingungsverhältnissen, sodass auch der gesuchte Differenzton zu anderen Theiltönen des Complexes harmonisch war. Die leisesten und höchsten Töne eines harmonischen Mehrklanges gehen aber am leichtesten völlig in dem Gesamteindruck auf. Nach meinen Ergebnissen waren, wie man sich erinnert, die Consonanzen und ihre nächste Umgebung am ungünstigsten für die Wahrnehmung der hohen zwischenliegenden Differenztöne. Bei geringen Verstimmungen tritt der Factor der harmonischen Verschmelzung zurück; aber hier kommen die deutlichen Schwebungen der tieferen Differenztöne oder des Grundtones erschwerend hinzu. — Endlich hat Schaefer, wie es scheint, in jedem einzelnen Falle seine Aufmerksamkeit auf einen einzigen Ton concentrirt, auf die bestimmte Tonhöhe, in der er eben den D_1 erwartete. Wo ich dieses wissenschaftliche Verfahren mit dem von mir regelmäßig angewendeten unwissenschaftlichen verglich, führte das letztere gewöhnlich zu mannigfaltigeren und sichereren Resultaten, vorausgesetzt, dass die zu der Analyse notwendige Zeit nicht beschränkt war. Im ersten Falle findet man häufig, auch abgesehen von Octaventäuschungen, einen thatsächlich vorhandenen Combinationston zunächst viel höher oder tiefer als

den gesuchten und zum Vergleich daneben gehaltenen; auch der Klangfarbenunterschied zwischen den Vergleichstönen und den Differenztönen ist hierbei störender. Hätte Schaefer sich nicht ausschließlich auf die Tonhöhe des D_1 eingestellt, so hätte er wahrscheinlich bei allen 5 nach unten verstimmtten Octaven, wo D_1 »unhörbar« war, eine Vertiefung des Grundtones constatirt; ebenso bei den 5 ersten Intervallen jenseits der Octave eine Erhöhung des Grundtones. Die Klänge $300 + 575$ (12 : 23) und $300 + 620$ (15 : 31:) können unmöglich den D_1 gesondert hören lassen, weil er dem Grundton zu nahe liegt; sein Dasein macht sich aber zweifellos dadurch geltend, dass er den Grundton zu sich herunter- bzw. heraufzieht. Auch bei den Intervallen, die der Octave schon etwas ferner liegen als die beiden genannten, würde ich keinen klaren Differenzton in der Tonhöhe des theoretischen D_1 , sondern vielmehr Zwischentöne aus diesem und dem Grundton (diesseits der Octave noch zwischen ihm und D_3) erwarten. Meine geübteren Beobachter fanden es sämmtlich am günstigsten (vgl. 59, 601), beim Heraushören der Differenztöne die Aufmerksamkeit wandern zu lassen und in jedem Falle den zuerst bemerkten D , der gewöhnlich der tiefste war, zuerst zu beachten. Dann pflegten die höheren nach und nach vernehmbar und deutlicher zu werden. Die höchsten Combinationstöne traten fast immer relativ am spätesten ins Bewusstsein (59, 374). Die Dauer der Analyse war in der überwiegenden Mehrzahl der Versuche nicht beschränkt, und betrug bei schwierigeren Klängen, wozu namentlich die über die Octave hinausreichenden gehörten, nicht selten $\frac{3}{4}$ bis 1 Stunde. In den Monaten, in denen ich Intervalle der höheren Perioden untersuchte, konnte keiner meiner Mitarbeiter den Versuchen so viel Zeit widmen, wie Herr Professor Me. So kam es, dass dieser gut musikalische Beobachter rasch eine sehr hohe Uebung gewann, wie schon die wenigen oben mitgetheilten Zahlen beweisen; aber selbst er äußerte bis zum Ende wiederholt einen gewissen Respect vor den weiten Intervallen. Vielleicht ist die Vermuthung gestattet, dass Schaefer, mit Rücksicht auf die zahlreichen negativen Ergebnisse seiner eigenen und früherer Analysen, zuweilen den Versuch zu früh aufgab, einen zwischenliegenden Differenzton zu entdecken.

Wo meine Beobachtungen von anderen, historisch vorliegenden abweichen, da handelt es sich beinahe überall um ein Mehr von je-

weils wahrgenommenen Erscheinungen auf meiner Seite. Auch die Abweichungen hinsichtlich der Intensitäten, worauf ich noch zu sprechen komme, lassen sich größtentheils darauf zurückführen. Die allermeisten vor mir über die Combinationserrscheinungen angestellten Versuche befolgten das wissentliche Verfahren und wurden durch völlig unbefangene Beobachter nicht controlirt. Nur bei Koenig waren die Klänge über ein größeres Gebiet gleichmäßig und so dicht vertheilt, wie in meinen Versuchen; Koenig hat aber die Tonhöhen der herausgehörten Differenztöne nicht genau bestimmt. Die historisch wohl begreifliche Beschränkung auf die musikalischen und namentlich die consonanten Intervalle war in ihren Consequenzen bereits mehrfach zu erwähnen. Niemals wurden bisher (abgesehen natürlich von Interferenzversuchen) die Töne übergeleitet, sondern unmittelbar an den Tonerzeugern beobachtet. Dazu kommen andere rein technische Unterschiede. Koenig z. B. brachte, wie ich aus einer gelegentlichen Bemerkung (23, 225) ersehe, seine Stimmgabeln nicht gleichzeitig, sondern nach einander zum Tönen, sodass die erste schon im Verklingen war, wenn die zweite zu schwingen anhub. Dabei sind in höherer Tonlage die leisesten und zuletzt auftretenden Theilerscheinungen schwer zu hören.

Was viele meiner Feststellungen erst ermöglichte, war die ungewöhnlich große und ununterbrochene Ausdauer meiner Hauptversuchspersonen. Stumpf hebt (32, 249) mit Recht den »außerordentlichen Einfluss der Uebung« auf die Wahrnehmung der Combinationstöne hervor. »Ist man gerade in der Uebung, so treten Einem Combinationstöne fast unvermeidlich . . . entgegen. Aber die Uebung schwindet auch sehr leicht.« In dieser Beziehung waren, wie ich nach dem früher Mitgetheilten nicht näher zu begründen brauche, meine täglichen Versuche ungemein günstig gestellt und sind mit gelegentlichen, durch größere Zeiträume getrennten Beobachtungen nicht unmittelbar zu vergleichen. Von der Mehrzahl meiner Mitarbeiter und von mir selbst darf ich annehmen, dass jeder nach ziemlich kurzer Zeit sein Maximum der Geübtheit erreichte und bis zum Abschluss der Untersuchung nicht wieder verlor. In seinen ersten Versuchsstunden entdeckte z. B. keiner einen Summationston ($n + n'$); nach und nach wurden diese leisen Töne von allen regelmäßig Mitarbeitenden bei der gewöhnlichen, mittelstarken Tongebung unwissentlich bemerkt.

Preyer (26, 138) und Meyer (46, 184) hörten Summationstöne bei Stimmgabeln nur, wenn diese sehr stark gestrichen wurden. Stumpf ist (32, 254) mit G. Appunn der Meinung, sie seien nur auf Instrumenten mit scharfer Klangfarbe zu hören. Der rühmlich bekannte Akustiker Hermann (35, 500) berichtet auch für diese Fälle, es sei ihm weder je gelungen sie zu hören, noch jemand zu finden, der sie hören konnte¹⁾.

Wenn ein Helmholtz, Koenig oder Stumpf eine positiv beobachtete Thatsache mittheilen, die man selbst nicht bestätigen kann, wird man eher die Zuverlässigkeit der eigenen Beobachtungen bezweifeln, als die Realität der angegebenen Erscheinung. Anders, wenn man unter sorgfältiger Controlle Thatsachen findet, die andere bisher nicht bemerkt oder sogar für unwahrscheinlich erklärt haben. Da darf man auch gegen die hervorragendsten Experimentatoren an den eigenen Beobachtungen festhalten. So betrachte ich die früher gegebene und im Eingange dieses Capitels kurz zusammengefasste Beschreibung der Combinationserscheinungen als den adäquaten und bis auf weiteres einfachsten Ausdruck der Thatsachen.

Zweites Capitel.

Vorfragen für die Erklärung der Combinationserscheinungen.

1. Objective und subjective Combinationstöne.

Bekanntlich sind die Combinationstöne gewisser Instrumente als pendelförmige Schwingungen in der Luft nachzuweisen. Helmholtz hat als erster mit Hülfe seiner Resonatoren und mitschwingender Membranen diesen Nachweis geführt, und zwar für Differenztöne verschiedener Ordnung und für Summationstöne bei Zweiklängen der Doppelsirene und des Harmoniums (17, 539; 21, 259). Im

1) Vgl. über die Summationstöne meine »Beobachtungen« (59, 334; 357; 368; 379; 572; 580; 589; 602); dazu im Folgenden Cap. III, 3.

Jahre 1886 berichtete Lummer in der Berliner physikalischen Gesellschaft (28, 67) in Helmholtzens Gegenwart über Versuche mit einem Mikrophonresonator. Der Apparat sprach auf die Summationstöne von Harmoniumklängen deutlich an, z. B. auf den Ton 11 der kl. Terz 5:6. Später wiesen Rücker und Edser (42, 341) an der Doppelsirene objective Differenzöne erster Ordnung und objective Summationstöne nach mit Hilfe eines empfindlichen Stimmgabelresonanzapparates. Schaefer fand (56 und 57) an dem von Helmholtz selbst benutzten Harmonium und an dem Appunn'schen Dreiklangapparat alle überhaupt hörbaren Combinationstöne, auch den D_2 durch Resonatoren verstärkt. Die Verstärkung war (57, 75) im Verhältniss zur Intensität dieser Töne nicht groß, aber unbezweifelbar. Helmholtz hat, was seine Gegner nicht immer genügend berücksichtigen, schon in seiner ersten Abhandlung über Combinationstöne hervorgehoben, dass nur unter ganz bestimmten »geeigneten Umständen« die den Combinationstönen entsprechenden Schwingungen außerhalb des Ohres vorkommen können, nämlich dann, wenn die beiden primären Tonbewegungen gleichzeitig dieselbe Luftmasse in starke Schwingungen versetzen. Diese Bedingung ist erfüllt, wo zwei Löcherreihen einer rotirenden Scheibe (Sirene) oder zwei durchschlagende Zungen (Harmonium, Dreiklangapparat) von einem gemeinsamen Windraum her angeblasen werden.

Sie ist nicht erfüllt bei getrennten Tonquellen. In der That bemerkte Helmholtz in diesem Falle niemals mit Sicherheit eine Resonanzwirkung der Combinationstöne. Erregte er am Harmonium nur eine Zunge von dem gewöhnlichen Blasebalg aus, eine andere durch einen isolirten Reservebalg, so waren die Combinationstöne für die Empfindung nicht merklich schwächer, ihre Verstärkung durch Resonatoren hingegen viel geringer (nach Schaefer's kürzlich vorgenommenen Controllversuchen: gleich Null; vgl. 57, 74). Helmholtz schloss aus diesem Experimente, dass auch bei den Combinationstönen des Harmoniums und der Sirene die objective, d. h. in der Luft nachweisbare Schwingungsbewegung nur einen kleinen Theil der Tonstärke bedinge, und dass in jedem Falle die Combinationserrscheinungen vorwiegend innerhalb des Ohres entständen.

Die weitere theoretische Gestaltung dieser Anschauungen wird am Ende des nächsten Capitels (Abschnitt 5) zu erörtern sein.

Was das rein Thatsächliche angeht, so haben sich die Angaben Helmholtzens auch in ihrem negativen Theile nur bestätigt. In anderen als den von ihm beschriebenen Ausnahmefällen hat meines Wissens bisher niemand »objective« Combinationstöne festgestellt. Vielmehr bemerkt schon Koenig (23, 221), dass die von ihm an Stimmgabeln wahrgenommenen Combinationstöne jeder Art durch Resonatoren nicht verstärkt wurden. Zu demselben negativen Ergebniss gelangte M. Wien (30, 853) bei Gelegenheit seiner noch unter Helmholtz' Leitung vorgenommenen sorgfältigen Tonstärkemessungen: ein höchst empfindlicher Resonator wurde durch den deutlichen Differenzton zweier Lippenpfeifen oder einer Pfeife und eines Telephons niemals merklich erregt. Hermann (35, 516) konnte durch die beiden telephonisch übertragenen Stimmgabeltöne a^1 und c^2 die dem ersten Differenzton entsprechende Gabel F niemals zu dem leisesten Mitschwingen bringen. Neuerdings führte die schon erwähnte Untersuchung von Rücker und Edser zu dem gleichen Resultat. Derselbe feine Resonanzapparat, der auf den ersten Differenzton und den Summationston von Sirenenklängen stets lebhaft reagirte, that dies in keiner Weise bei Primärklängen aus Stimmgabel- oder Orgelpfeifentönen.

Ich stimmte wiederholt eine Gabel genau auf den stärksten Differenzton zweier Stimmgabeln ab und stellte die Resonanzkästen dieser beiden dem der Hülfsgabel nahe gegenüber. Auch die lautesten Differenztöne, z. B. der der Quinte brachten, selbst bei stärkstem Streichen der primären Gabeln, die Resonanzgabel niemals zum Mitschwingen; deutliche Summationstöne ebensowenig. Ferner stellte ich mehrmals den sogleich näher zu beschreibenden, gut functionirenden Interferenzapparat auf einen Differenz- oder Summationston ein, ohne dadurch eine merkliche Abschwächung zu erzielen.

Es bleibt also dabei: die Combinationstöne zweier getrennter Tonquellen, d. h. weitaus die meisten in der Musik vorkommenden Differenz- und Summationstöne haben keine objective Existenz in dem Sinne, dass in der Luft, außerhalb des wahrnehmenden Ohres eine ihnen entsprechende pendelförmige Schwingungsbewegung nachweisbar wäre.

2. Die Combinationerscheinungen und die Obertöne. (Neue Interferenzversuche.)

Wichtiger als die soeben erörterte war für mich die Frage, inwieweit die beobachteten Combinationerscheinungen von Obertönen der primären Klänge abhängen. Die Möglichkeit einer Entstehung von Differenztönen aus Obertönen hat schon Ohm (1839; 15, 465) gegen Hällström betont. Der große Physiker fand es theoretisch unzulässig, mehr als einen Combinationston von zwei primären Tönen herzuleiten; vielmehr seien alle Differenztöne höherer als erster Ordnung einfach darauf zurückzuführen, dass harmonische Obertöne des primären Klanges paarweise ihre Combinationstöne (erster Ordnung) hören ließen. In der That kann man die theoretischen Werthe der Differenztöne jederzeit als Differenzen der Schwingungszahlen von Obertönen ausdrücken; z. B. beim Intervall 5:6, $D_2 4 = 2 \times 5 - 1 \times 6$; $D_3 3 = 3 \times 5 - 2 \times 6$; $D_4 2 = 4 \times 5 - 3 \times 6$; $D_5 = 1 = 5 \times 5 - 4 \times 6$. Nur beim D_1 ist diese Möglichkeit beschränkt (was für die Frage der zwischenliegenden Differenztöne wichtig ist), indem man mit abnehmender Einfachheit des primären Schwingungsverhältnisses immer höhere Multipla heranziehen muss; bei 2:5 z. B. 4×2 und 1×5 ; bei 3:7 bereits 6×3 und 2×7 .

Ohm, dem »die Natur ein musikalisches Ohr ganz und gar versagt« hatte, stützte sich lediglich auf mathematisch-physikalische Erwägungen und auf (fremde) Differenztonbeobachtungen an der Violine. Schwingende Stäbe könnten, wie er meinte, keine Combinationstöne höherer als erster Ordnung ergeben, weil sie von harmonischen Obertönen frei wären. Inzwischen sind mit immer feineren Methoden harmonische Obertöne bei allen überhaupt gebräuchlichen Klangerzeugern nachgewiesen worden. In einer gründlichen neueren Untersuchung über diesen Gegenstand (33, 660) berichtet Stumpf sogar von einigen Stimmgabeln, dass sie zahlreiche Obertöne enthielten; »es dürfte überhaupt keine Klangquelle geben, die nicht den ersten geradzahligen Theilton, die Octave, mit erzeugt«. So hat denn schon Helmholtz gefordert, dass man bei der Beobachtung von Combinationerscheinungen den Einfluss der Obertöne auch dann berücksichtige, wenn die primären Klänge durch Stimmgabeln erzeugt

werden, und seither ist diese Forderung besonders gegen die Koenig-schen Versuche vielfach angewendet worden.

Bei meinen Beobachtungen war ein wirksames Hervortreten der Obertöne schon durch die Anordnung der Versuche erschwert. Die ziemlich kurzen und dicken Stimmgabeln (vgl. das Nähere 59, 311 ff.) trugen sämmtlich schwere Laufgewichte, wodurch die Bildung von Knotenpunkten behindert wird. Alle ohne Laufgewichte schwingenden Gabeln, die ich damit verglich, ließen mit dem bloßen Ohre mindestens den zweiten oder ersten, tiefere Gabeln stets zwei Obertöne erkennen. Dagegen konnten bei meinen Primärgabeln auch die geübtesten Beobachter keinen Oberton mit Sicherheit unmittelbar entdecken. Versuche mit resonirenden Stimmgabeln hatten folgendes Ergebniss: die beiden tiefsten Gabeln c^1 brachten, auf ihrem Resonanzkasten stark gestrichen, ihre Octave ($2n$) und Duodezime ($3n$), nicht mehr die Doppeloctave, zu schwachem Mitschwingen, wenn auch diese Hülfs-gabeln auf ihren Resonanzkästen standen. Die vier höheren Gabeln bewirkten auch bei stärkstem Streichen nicht das geringste wahrnehmbare Mitschwingen von Gabeln mit doppelter oder dreifacher Schwingungszahl. Zur Beobachtung wurden die Töne, wie früher beschrieben, durch eine 8 m lange Leitung nach einem dritten Raum übergeführt, der vom Tonerzeugungszimmer durch zwei Wände getrennt war. Die Stimmgabeln wurden mit Violinbögen etwas über mittelstark gestrichen. Sie waren regelmäßig in Resonanzkästen eingeschraubt, und diese Kästen waren jeder in einen viereckigen, mit Filz umhüllten Aufnahmetrichter aus starker Pappe hineingeschoben. Alle Zwischenräume zwischen einem Resonanzkasten und seinem Schalltrichter waren mit Watte ausgefüllt; die Aufnahmekästen wie die mit Gummi umgebenen kurzen Füße der Resonanzkästen ruhten auf einer Schicht von Tuch und Watte. Das Leitungsrohr war an seinen Durchgangsstellen durch die beiden Wände dicht von Watte umgeben, die jederseits zu starken Bäuschen sich erweiterte. Wurde die Schallleitung irgendwo unterbrochen, so war der Ton drüben sehr erheblich geschwächt; wurden die Röhren an der Unterbrechungsstelle verstopft, so drang selbst bei starkem Streichen einer Gabel keine wahrnehmbare Schallbewegung in das Beobachterzimmer. Es gelangte also von jeder Gabel nur der Theil der gesammten Schwingungsbewegung in das Ohr des Beobachters, der durch den Reso-

nanzkasten verstärkt wurde. Am Ende der Leitung, im Beobachterzimmer war der Eindruck eines primären Tones noch reiner und einfacher als unmittelbar an der Gabel; seine Klangfarbe war dort nach dem Streichen von derjenigen eines Combinationstones gleicher Höhe kaum zu unterscheiden.

Dass Obertöne bei den Versuchen nicht in wirksamer Weise mitsprachen, wird zunächst durch folgende mittelbare Kriterien wahrscheinlich. Nach den soeben berichteten Resonanzversuchen bestand kein Zweifel, dass die beiden tiefsten Gabeln ursprünglich je zwei Obertöne enthielten, und dass die Obertöne der vier anderen Gabeln (deren Laufgewichte einen viel größeren Theil des Gesamtgewichts und der Schenkellänge ausmachten) zum mindesten erheblich schwächer waren. Aber die Combinationerscheinungen traten bei den Klängen der eingestrichenen Octave nicht in größerer Mannigfaltigkeit hervor, als bei Verwendung der höheren Gabeln, sondern eher umgekehrt.

Gelegentlich der Resonanzversuche bemerkte ich, dass die zweite Stimmgabel, wenn sie von c' aus höher gestimmt wurde, die entsprechenden Obertongabeln stellenweise schwächer, zum Theil gar nicht miterregte. Aus physikalischen Gründen muss man bei verstimmbaren Gabeln allgemein annehmen, dass gewisse Stellungen der Laufgewichte für die Entstehung von Knotenlinien weniger günstig sind als andere. Aber die Versuche ergaben in keiner Intervallperiode ein plötzliches Zurücktreten der Combinationerscheinungen bei bestimmten Klängen oder Klanggruppen.

Etwa vorhandene Obertöne müssen bei der angewendeten Methode, die Klänge unmittelbar von den Resonanzkästen aus überzuleiten, mindestens geschwächt am Ende der Leitung ankommen. Trotzdem war hier, wie mehrfach erwähnt, die Analyse im allgemeinen ergiebiger, als unmittelbar an den Gabeln auch nach dem Streichen.

Im Laufe der Zeit übten sich alle Beobachter im Heraushören auch solcher Theiltöne, die mit anderen, gleichzeitig wahrgenommenen harmonirten. Niemals wurde die Aufmerksamkeit auf ganz bestimmte Töne oder Tonlagen ausschließlich eingestellt. Die große Mehrzahl der Bestimmungen geschah ganz unwissentlich. Und doch war unter den vielen tausend Beobachtungen keine, die unmittelbar auf einen Oberton gedeutet werden dürfte. Die sehr vereinzelt

Fälle, in denen genau oder annähernd ein Vielfaches einer der primären Schwingungszahlen notirt worden war, controllirte ich dadurch, dass ich die betreffende Gabel allein kräftig strich: jedesmal verschwand dann der vermuthete »Oberton«; er ließ sich regelmäßig dadurch begreifen, dass ein (anderweitig festzustellender) Differenz- oder Summationston der angegebenen Tonhöhe oder einer harmonischen nahe kam.

Ein feines und sicheres Erkennungszeichen leiser Töne sind die Schwebungen. Bei einigen consonanten Intervallen fällt der Summationston oder der höhere Primärton oder ein Differenzton mit einem Multiplum des Grundtones zusammen; so ist der Summationston bei der Octave = $3n$, bei der Duodecime = $4n$, bei der Doppeloctave = $5n$; der höhere Primärton bei denselben Klängen bezw. = $2n$, $3n$, $4n$, der erste Differenzton bei der Duodecime = $2n$, bei der Doppeloctave = $3n$, während D_2 hier den Werth $2n$ erreicht. Wo bei schwachen Verstimmungen dieser Intervalle die kritischen Töne gehört wurden, fragte ich regelmäßig die Beobachter und mich selbst, ob sie Schwebungen trügen. Fast immer wurde diese Frage mit Bestimmtheit verneint, und niemals mit Sicherheit bejaht. Auf die Tonlage der Octavenschwebungen komme ich in diesem Capitel noch zurück (S. 240 ff.).

Alle verstimmtten Consonanzen obertonreicher Klänge lassen Schwebungen zwischen mindestens zwei Obertönen hören. Die Schwebungen, die auch ich in der Umgebung aller vorgekommenen Consonanzen fand und genau untersuchte, hafteten, mit Ausnahme der verstimmtten Prime, wo sie zunächst beiden Primärtönen angehören, niemals an einem Ton, der höher lag als der Grundton.

Im vorigen Capitel wurde berichtet, dass Tartini an der Geige in der Regel einen Combinationston zu hören glaubte, der die Octave des D_1 bildete (ich fand diese Angabe bei obertonreichen Instrumenten vielfach bestätigt), und ich erwähnte bereits, dass dieser auch von Hällström theoretisch geforderte Combinationston aus dem Zusammenwirken der beiden ersten Obertöne $2n'$ und $2n$ sich ergeben kann. Es ist nun im gegenwärtigen Zusammenhange wichtig, dass bei meinen Versuchen die Octave des D_1 niemals festgestellt wurde, wo nicht ausnahmsweise dieser Ton mit einem Differenzton höherer Ordnung des primären Klanges zusammenfiel.

Entscheidend waren die Versuche mit Ausschaltung von Overtönen durch Interferenz.

Die Interferenzversuche.

Der Interferenzapparat ist ein noch lange nicht genug gewürdigtes Hilfsmittel der experimentellen Akustik. Deshalb, und weil die Unentbehrlichkeit des Interferenzversuchs in Zukunft immer fühlbarer werden wird, theile ich meine technischen Erfahrungen ziemlich ausführlich mit.

Zunächst bediente ich mich des von Stumpf und Meyer angewendeten Verfahrens (Herschel, Quincke), die Leitung zu theilen und die beiden Zweigleitungen um eine halbe Wellenlänge des auszulöschenden Tones verschieden lang zu machen, so dass die beiden Theile der Schwingungsbewegung mit dem Phasenunterschiede einer halben Wellenlänge wieder aufeinanderstoßen. Allein auch wenn ich zwei solche Apparate hinter einander schaltete und dabei die beachtenswerthen Erfahrungen Meyer's (46, 190) genau berücksichtigte, blieb von starken Tönen ein deutlich hörbarer, wengleich relativ geringer Theil zurück. Drei oder mehr Apparate dieser Art mit allen Vorsichtsmaßregeln ständig zu benutzen, ist praktisch beinahe undurchführbar. Ich wandte mich daher zu dem anderen Interferenzprincip, das meines Wissens von Nörremberg zuerst beschrieben wurde. Dabei wird der nothwendige Gangunterschied durch senkrecht an die Hauptleitung angesetzte Röhren bewirkt, deren Länge eine viertel Wellenlänge des zu beseitigenden Tones beträgt. Eine solche Röhre kann nicht so viel leisten, wie ein Apparat der ersten Art, weil die ursprüngliche Schwingungsbewegung sich mit einer bloß reflectirten, also schwächeren vereinigt. Aber die Wirkung lässt sich leicht vervielfältigen, indem man mehrere Ansatzröhren benutzt. So verfuhr mit gutem Erfolge Sauberschwarz bei einer experimentellen Analyse von Vocalen. Es wurde zunächst ein Apparat genau nach dem Muster des seinigen (beschrieben 44, 11), nur etwas massiver angefertigt. Sechs Röhren von 50, 60, 70 bis 100 cm Länge standen um je 10 cm von einander ab. Die zu ihrem Verschluss, ihrer Verlängerung und Verkürzung dienenden, verschiebbaren Kolben waren aus Messing gearbeitet und setzten sich nach

oben in runde Messingstäbe fort, deren hölzerner Handgriff jederzeit aus der Röhre herausragte. Scalen gestatteten eine genaue Abmessung der Röhrenlängen. Der massive Stempel, der das untere Ende jedes Kolbens bildete, verschloss die Röhre hermetisch und war unten in concaver Krümmung so ausgehöhlt, dass bei der tiefsten Stellung sämtlicher Kolben (0 der Scala) das Innere der horizontalen Haupt- röhre sich von der übrigen Hauptleitung nicht unterschied. Alle Röhren des Apparates hatten gleich den anderen Theilen der Lei- tung einen Durchmesser von 1 cm.

Der Versuch mit Einstellung aller sechs Ansatzröhren auf $\frac{1}{4}$ Wel- lenlänge des auszulöschenden Tones zeigte zunächst, dass starke Töne nicht ganz verschwanden, hohe Töne in größerem Maße und auch sonst verschiedene Töne verschieden geschwächt wurden. Durch zeitrau- bende Versuche mit einer Interferenzröhre und Verschiebung der (ausziehbaren) Hauptleitung ergab sich des Näheren — worüber ich in der physikalischen Litteratur nirgends eine Andeutung fand — dass der Punkt nicht gleichgültig ist, an dem das Ansatzrohr von der Hauptröhre senkrecht abzweigt. Vielmehr ist die Interferenz- wirkung dann am größten, wenn dieser Punkt von der Rückwand des Stimmgabel-Resonanzkastens um ein ganzes Vielfaches einer halben Wellenlänge des abzuschwächenden Tones entfernt, also ein Knotenpunkt der Wellenbewegung ist, und am schwächsten in den Mittelpunkten der Schwingungsbäuche, also in allen Punkten, die vom geschlossenen Ende des Resonanzkastens um ungerade Vielfache einer Viertelwellenlänge abliegen. Diese für zahlreiche Wellenlängen sichergestellte Thatsache stimmt auf's beste mit Erfahrungen an op- tischen und elektrischen Wellen überein. Es ist physikalisch wohl begreiflich, dass an absoluten Wellenbäuchen die Bewegung gar keinen Anlass hat, in die Interferenzröhre einzutreten, während an den Punkten stärkster periodischer Luftverdichtung diese Abweichung von der Hauptrichtung bei geöffneter Ansatzröhre am energischsten stattfinden muss. Ich schlug nach diesen Beobachtungen dem Herrn Director des Institutes vor, entweder den Apparat auch in der Längsrichtung ausziehbar machen oder ihm ein für alle Mal solche Dimensionen geben zu lassen, wie sie für die Zwecke meiner Unter- suchung am häufigsten gebraucht würden. Im Interesse der Stabilität des ganzen Röhrensystems wurde der zweite Weg gewählt. Die

Hauptröhre wurde in der Mitte zwischen je zwei Ansatzröhren durchgeschnitten und mit verlängern den Zwischenstücken fest verlöthet. In anbetracht des beschränkten Raumes und mit Rücksicht auf die meist verwendeten Grundtöne ließ ich die vier längsten Interferenzröhren um je 33,2 cm ($= \frac{1}{2}$ Wellenlänge des $c^2 512$) von einander abrücken, die beiden kürzesten folgten darauf in Abständen von 16,6 cm ($= \frac{1}{2}$ Wellenlänge von $c^3 1024$), so dass der Apparat die auf S. 312 meiner vorigen Abhandlung dargestellte Form erhielt¹⁾. Demnach konnte ich durch Verschieben des Zuleitungsrohres für den Ton $c^1 256$ drei Interferenzröhren, für c^2 fünf, für c^3 (1024) und alle seine Multipla sechs Röhren in die günstigste Stellung bringen.

Die Abschwächung eines starken Primärtones war schon bei Verwendung einer sorgfältig eingestellten Röhre nicht gering; sie wurde durch Hinzufügen einer zweiten und dritten Röhre wesentlich vergrößert, durch die übrigen nur noch unerheblich. Der Erfolg war besser als mit zwei Apparaten der anderen Art. Schaltete ich einen dieser beiden zu dem neuen Apparate hinzu, so wurde dessen Wirkung nicht merklich gesteigert.

Wurde die Gabel 256 stark gestrichen, und der Apparat auf diesen Ton eingestellt, so blieb davon am Ende der Leitung ein leiser Rest übrig; bei schwachem Streichen nichts mit Sicherheit. 512 wurde auch bei mittelstarkem Streichen ganz ausgelöscht; 1024 konnte man noch stärker streichen; und den Primärton 2048 gelang es auch bei stärkster Tongebung gänzlich zu beseitigen. Sauberschwarz berichtet (44), er habe mit den sechs Röhren stets vollständige Interferenz erzielt. Er arbeitete durchweg mit ziemlich hohen und leiseren (gesungenen) Tönen; seine Leitung war länger als die meinige und mehrfach durch Kautschukschläuche unterbrochen. Ich vermuthete, der bei starken und tiefen Tönen übrig bleibende Rest beruhe auf Eigenschwingungen des Apparats. Daher umwickelte ich die ganze Leitung mit Watte und fügte an zwei Stellen, vor und hinter dem Apparat, kurze Stücke Gummischlauch ein. Dadurch wurde die Wirkung noch etwas verbessert.

1) Neuerdings wurde für das Kieler psychologische Laboratorium ein größerer, in der Längsrichtung verschiebbarer Interferenzapparat nach meinen Angaben angefertigt, dessen Einrichtung bei Gelegenheit beschrieben werden mag.

Dagegen konnte ich nicht finden, was Meyer fordert, dass das Ende der Leitung mit einem Schwingungsbauche zusammenfallen müsste. Das Endstück der Röhren im Beobachterzimmer war ausziehbar. Aber innerhalb der Grenzen einer ganzen Wellenlänge konnte niemand mit Sicherheit einen Unterschied der Wirkung feststellen. Bei ungestörten Tönen empfiehlt es sich ja das Ohr in einen Schwingungsbauch zu bringen, wenn man möglichst wenig hören will. Je vollkommener aber die Interferenz gelingt, um so gleichgültiger muss die Entfernung des Leitungsendes von den Interferenzpunkten sein.

Für alle häufiger in Frage kommenden Tonhöhen wurde die günstigste Länge der Ansatzröhren durch zahlreiche Versuche festgestellt. Da die Temperatur der Arbeitszimmer annähernd 16° betrug, konnten die Wellenlängen in der üblichen Weise für eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles von 340 m berechnet werden. Es ergab sich aber, dass die Interferenzröhren stets etwas (durchschnittlich um 6 %) länger gemacht werden mussten, als $\frac{1}{4}$ der so berechneten Wellenlänge. Diese in physikalischen Instituten wohlbekannte Erscheinung beruht wahrscheinlich in erster Linie auf Störungen der Wellenbewegung bei der Zurückwerfung.

Bemerkenswerth ist das Hervortreten einiger Obertöne bei der Interferenz des Grundtones. Die c^1 -Gabeln ließen in diesem Falle leise aber deutlich die beiden ersten Obertöne (512 u. 768) erkennen, einen dritten nicht mit Sicherheit. Die c^2 -Gabeln undeutlich und sehr leise den ersten, 1024; höhere Gabeln, namentlich auch die beiden für c^3 1024: keinen mit Sicherheit. Bei sorgfältiger Einstellung auf den Grundton blieb von 1024 und höheren Tönen stets nur ein unqualificirbares hauchartiges Geräusch zurück; ebenso von 512 bei mittelstarker, von 256 bei schwacher Tongebung. Während des Streichens der tieferen Gabeln waren die genannten leisen Obertöne allein zu hören; nach dem (starken) Streichen waren sie noch etwas vernehmlicher als der Rest des Grundtones. Herr Geh. Rath Wundt hatte die Freundlichkeit, im letzten Stadium dieser Versuche den Apparat selbst zu prüfen. Er rieth mir, mit der erreichten Interferenzwirkung mich zufrieden zu geben, und war der Meinung, dass Obertöne bei genauer Einstellung aller sechs Röhren mit Sicherheit als unwirksam zu betrachten seien.

Die Schwingungszahlen der Obertöne, für die der Apparat im Folgenden praktisch verwendet wurde, lagen niemals unter 512, es handelt sich dabei fast ausnahmslos um Multipla von 256.

Bei den Interferenzversuchen wurde ich regelmäßig durch einen Assistenten unterstützt, der auf einen kurzen Zuruf die Stempel der Ansatzröhren bis zu der vorher verabredeten Länge herauszog oder wieder auf 0 einstellte. Der Experimentator brauchte also seinen Platz an den Gabeln nicht zu verlassen, und Aenderungen am Apparat geschahen sehr rasch. Was hier, und ob überhaupt etwas geändert wurde, davon wusste der im dritten Zimmer befindliche Beobachter nichts. Er notirte schriftlich seine Wahrnehmungen bei »Stellung No. 1« »No. 2« u. s. f. Alle wirklich verschiedenen Stellungen des Apparats, darunter vor allem auch die Ausgangsstellung, wurden in bunter Reihenfolge mehrfach vorgelegt. Wo der Einfluss verschiedener Obertöne nach einander untersucht wurde, enthielt demnach das Protocoll über zehn und mehr mit einander verglichene »Stellungen«. Als Beobachter wirkten abwechselnd alle geübteren Theilnehmer an meinen Versuchen, die Herren A., B., F., Me., Mö. und St. (A. und F. seltener); ich selbst übernahm öfter als sonst die Rolle des unwissentlich Beobachtenden.

a. Obertöne und Schwebungen.

Bekanntlich können selbst sehr leise, ja unhörbare Töne noch Schwebungen verursachen. Für die bei allen verstimmten Consonanzen von mir festgestellten Schwebungen kann man Obertöne direct, ohne Rücksicht auf ihre Differenztöne verantwortlich machen. Bei allen consonanten Zweiklängen fallen ja theoretisch mindestens zwei Obertöne zusammen, deren Tonhöhe man erhält, wenn man die Schwingungszahl des einen Primärtons mit der Verhältnisszahl des anderen multiplicirt (z. B. für die Quarte 300:400, die Obertöne $3 \times 400 = 4 \times 300$). Man weiß, welche Bedeutung Helmholtz diesen Obertonschwebungen beimisst; und in der That kann man sie an obertonreichen Klängen gut beobachten. In meinen Fällen spricht schon die sichere, immer wiederkehrende Localisation der Schwebungen gegen diese Deutung. Immerhin war es nothwendig, sie experimentell zu prüfen.

Ich untersuchte 15 verschiedene Schwebungsarten hinsichtlich ihrer unmittelbaren Abhängigkeit von Obertönen. Es wurden nur solche Klänge ausgewählt, deren Schwebungen der Beobachter sicher und deutlich hörte; vorzugsweise diejenigen, bei denen nach früheren oder ad hoc eingeschobenen Versuchen die Schwebungen der betreffenden Art am merklichsten waren. In höherer Tonlage kamen demnach im Durchschnitt frequentere Schwebungen zur Beobachtung als in der Tiefe. Aus den dargelegten technischen Gründen beschränkte ich mich auf die Grundtöne 256, 512 und 1024. Die engeren Intervalle wurden sämtlich in diesen drei Tonlagen vorgelegt; die weiteren nur mit den beiden ersten oder nur mit dem tiefsten Grundton, soweit eben mein Material an Stimmgabeln reichte. Von den ex hypothesi beteiligten Obertönen wurde immer nur einer ausgeschaltet, nämlich der des Grundtones; auf ihn wurden alle sechs Röhren des Apparates abgestimmt. Dabei ist noch zu berücksichtigen, dass die Einstellung eines Interferenzsystems für einen Ton n gleichzeitig für dessen ungerade Multiplen, $3n$, $5n$ u. s. f. gilt. Die Töne, für die der Interferenzapparat unmittelbar eingestellt wurde, waren nach dem Gesagten, wenn n die Schwingungszahl des Grundtons ausdrückt: $2n$ bei den verstimmten Octaven, $3n$ bei der Quinte und Duodecime, $4n$ bei der Quarte und Doppeloctave, $5n$ bei der großen Terz, großen Sexte und großen Decime, $6n$ bei der kleinen Terz, $7n$ beim Tritonus, bei der verminderten Septime $4:7$, der verminderten Decime $3:7$ und der verminderten Quatuordecime $2:7$, $8n$ bei der kleinen Sexte und der Undecime $3:8$. Die vollkommeneren von diesen (verstimmten) Consonanzen, bei denen die kritischen Obertöne am tiefsten liegen, wurden am häufigsten und an den zahlreichsten Beispielen untersucht, namentlich die Octave, Doppeloctave, Quinte und Duodecime. Hier kamen auch solche (stark verstimmte) Intervalle zur Beobachtung, bei denen die Schwebungen der Verschmelzungsgrenze nahe lagen und daher leise waren. In den Fällen, wo nicht, wie bei der Octave, Duodecime und Doppeloctave, der höhere Primärton den zweiten hypothetischen Schwebungston bildet, sondern einer seiner Obertöne, schickte ich zur Controlle auch beide Primärtöne durch den Interferenzapparat, wodurch bei schwachen Verstimmungen zweifellos auch der zweite — dem ersten nahe benachbarte — der kritischen Obertöne ausgeschlossen wurde.

Wären nun bei meinen Versuchen die genannten Obertöne an den wahrgenommenen Schwebungen irgend wesentlich betheilig gewesen, so hätte die geschilderte Interferenzeinstellung die Schwebungen zum mindesten regelmäßig und merklich abschwächen müssen. Die Frage lautete daher: Sind die Schwebungen stärker oder schwächer, deutlicher oder undeutlicher als das vorige Mal, oder unverändert? Das Ergebniss war durchaus negativ. In der überwiegenden Mehrzahl der Fälle konnte auch die mehrfach wiederholte Beobachtung keinen Unterschied mit Sicherheit constatiren. Einige Beobachter, die nicht gern Gleichheit aussagten, gaben zuweilen unsicher eine geringe Verstärkung oder Abschwächung an, aber völlig unregelmäßig, beides etwa eben so oft bei Interferenz, wie ohne Interferenz, auch in derselben Versuchsstunde. Dabei ist zu beachten, dass die Stärke der Tongebung nicht immer ganz gleich gehalten werden konnte, eine Fehlerquelle, die ich wie früher dadurch zu umgehen suchte, dass ich den Klang in jedem Falle mehrmals (immer möglichst gleich, nämlich mittelstark) zu Gehör brachte. Ein kleiner Unterschied der Deutlichkeit wurde etwas öfter ausgesagt, aber fast immer zu Gunsten der Interferenzstellung. Das wird so zu erklären sein, dass ohne Interferenz ein minimales Quantum des betreffenden Obertons, vielleicht auch seines dreifachen, thatsächlich, vielleicht als physiologische Erregung mitwirkte und den Gesamteindruck trübte (die Obertöne entsprechen meistens nicht ganz genau ihren theoretischen Werthen), wie denn bei Einstellung der Interferenzröhren zuweilen der ganze Klang ein wenig klarer, durchsichtiger zu werden schien. Aber auch diese Unterschiede waren äußerst gering und wenig regelmäßig; nach immer wiederkehrenden Aussagen der für Schwebungen besonders geübten Herren Me. und St.: »wohl nur subjectiv«.

Aus diesen Ergebnissen, wodurch die früher mitgetheilten Beobachtungen über die Höhenlage der Schwebungen bestätigt werden, ist mit Sicherheit zu schließen: alle in meinen Versuchen hervorgetretenen Schwebungen waren nicht Schwebungen zwischen Obertönen, sondern (mit Ausnahme der verstimmten Prime, wo die beiden Primärtöne hauptsächlich betheilig sind) Schwebungen von Differenztönen, entweder unter sich oder mit dem Grundtone. Das bedeutet allgemein: auch solche Schwebungen, die nicht (Primenstöße)

unmittelbar zwischen zwei primären Tönen stattfinden, können unabhängig davon entstehen, ob der Klang benachbarte Obertöne von einer der Schwebungszahl entsprechenden Schwingungsdifferenz enthält.

Dass die fraglichen Schwebungen von Obertönen überhaupt unabhängig seien, darf hiernach noch nicht behauptet werden. Soviel ist gewiss: wir haben sie, in Uebereinstimmung mit den unmittelbaren Beobachtungen, auf Differenztöne zurückzuführen, und zwar in der Mehrzahl der Fälle auf Differenztöne höherer als erster Ordnung. Aber diese Differenztöne können, wie wir sahen, ihrerseits als durch Obertöne bedingt aufgefasst werden. Eine ähnliche Hypothese hinsichtlich der Summationstöne wird im dritten Abschnitt des nächsten Capitels erwähnt werden.

b. Obertöne und Differenztöne.

Es war freilich nach allen bisher dargestellten Erfahrungen unwahrscheinlich, dass die zu meinen Versuchen benutzten Klänge Obertöne von hinreichender Stärke enthalten sollten, um von sich aus Differenztöne zu erzeugen. Aber die in Frage stehende Hypothese setzt im allgemeinen tiefere Obertöne (niederer Ordnung) voraus, als die vorige. So kann der zweite Differenzton jederzeit auf das Zusammenwirken des höheren Primärtons (n^1) mit der Octave des tieferen ($2n$) zurückgeführt, der dritte bis zur Octave stets als Differenz von $3n$ und $2n^1$ berechnet werden; D_4 bis zur Quinte aus $4n$ und $3n^1$, zwischen Quinte und Octave aus $5n$ und $3n^1$ u. s. w.

Danach wäre, um zwei thatsächlich geprüfte Beispiele anzuführen, beim Intervalle $512 + 616$: D_2 408 bedingt durch 2×512 und 616; D_3 304 durch 3×512 und 2×616 ; D_4 200 durch 4×512 und 3×616 . Bei $512 + 1160$ wären die (ebenso sicher gehörten) Differenztöne D_2 136 abhängig von 1160 und 2×512 ; D_3 376 von 3×512 und 1160; D_4 240 von 5×512 und 2×1160 .

Die untersuchten Klänge waren wiederum auf die drei Grundtöne c^1 , c^2 und c^3 möglichst gleichmäßig vertheilt. Für die zweite Periode (Octave bis Duodecime) musste ich mich auf die beiden tieferen Grundtöne, für die dritte (Duodecime bis Doppeloctave) auf den Grundton c^1 beschränken. Hier lagen die geprüften Intervalle dichter bei einander als innerhalb der ersten Perioden. Es waren größten-

theils andere Intervalle als die der vorigen Versuchsreihe. Sie wurden zunächst so ausgewählt, dass jeweils ein Differenzton höherer als erster Ordnung besonders laut und deutlich war. Außerdem prüfte ich zahlreiche Fälle, in denen mehrere Differenztöne mit Sicherheit zu unterscheiden waren, wo ich dann zwischen allen in Betracht kommenden Interferenzeinstellungen unregelmäßig abwechselte. Zuweilen wurden auch drei Röhren des Apparats für einen, und die übrigen drei für einen anderen Oberton oder je zwei Röhren für drei verschiedene Obertöne eingestellt. Von den beiden an der Bildung eines Differenztones möglicherweise beteiligten Obertönen wurde gewöhnlich nur der eine ausgeschaltet, und zwar der des Grundtones. Einige von den untersuchten Differenztönen waren mit Schwebungen oder Rauigkeit behaftet. In diesem Falle ließ ich auch die Intensität und Deutlichkeit der Schwebungen beurtheilen und vergleichen. Die Hauptfrage war stets, ob der oder die Differenztöne an Stärke, Deutlichkeit und Qualität verändert seien oder nicht.

Die Ergebnisse stimmten so vollständig mit den vorhin wiedergegebenen überein, dass es unnöthig ist, sie im Einzelnen mitzutheilen. Meistens war alles unverändert. Zuweilen ergab sich eine geringe Abschwächung, zuweilen Verstärkung, ohne jede Regelmäßigkeit. Wo zwischen verschiedenen gleichzeitig wahrgenommenen Differenztönen Unterschiede der relativen Stärke und Deutlichkeit sicher behauptet wurden, ließ ich diese Unterschiede für jede »Stellung« von neuem beurtheilen. Nur selten wurde eine Aenderung dieser Reihenfolge angegeben, fast niemals zu Ungunsten des durch die Interferenz bedrohten Theiltones. Hinsichtlich der Deutlichkeit zeigte sich etwas Aehnliches, wie bei den Schwebungsbeobachtungen. In einigen Fällen nämlich, besonders bei Abstimmung dreier Röhren auf $2n$ und der übrigen auf $3n$ schienen im Falle der Interferenz alle Differenztöne, auch der erste, etwas deutlicher zu werden; danach bei Verschluss der Ansatzröhren: etwas unklarer, unreiner; in ihrer nächsten Umgebung schien etwas Ununterscheidbares hinzugekommen; die Zwischenräume zwischen zwei Tönen schienen »weniger kahl« (*St.* bei $1024 + 1168$). Es handelt sich dabei wohl wieder um unbestimmbare Wirkungen leiser Obertöne.

Nach alledem darf ich als gesichert annehmen, dass die bei meinen Versuchen hervorgetretenen Differenztöne und Schwe-

bungen von Obertönen unabhängig waren. Daraus folgt allgemein: der Zusammenklang zweier einfacher Töne ist hinreichende Bedingung für das Entstehen der Differenztöne erster bis fünfter Ordnung und ihrer Folgeerscheinungen.

Interferenzversuche mit der Fragestellung der oben beschriebenen wurden bisher nur von zwei Forschern angestellt, von Stumpf und von Meyer. Beide bedienten sich des zuerst erwähnten Verfahrens. Stumpf (33, 660) prüfte in erster Linie die Koenig'sche Behauptung, dass auch ein einfacher Ton mit jedem wenig verstimmtten Multipulum schwebte. Der tiefere Primärton wurde gewöhnlich von einer schwingenden Zunge gebildet, der höhere im Beobachterzimmer, am Ende der Leitung durch eine Stimmgabel. Stumpf bemerkte zunächst, es seien zwei verschiedene Arten Schwebungen zu unterscheiden, die das Ohr bei einiger Uebung sehr wohl auseinanderhalten könne: hohe Schwebungen des höheren Primärtones und tiefe, die an dem Grundtone hafteten. Diese Angaben kann ich für Grundtöne von Zungen, Saiten oder schlanken frei schwingenden Gabeln durchaus bestätigen. In zahlreichen Versuchen Stumpf's ergab sich nun regelmäßig Folgendes: Ohne Interferenz waren beide Schwebungsarten zu hören. Wurde dagegen der Interferenzapparat auf den dem höheren Primärton nächstgelegenen Oberton des Grundtons eingestellt, so verschwanden die hohen Schwebungen, während die tiefen unverändert erhalten blieben. Dasselbe zeigte sich bei Grundtönen von Stimmgabeln. Stumpf erklärt die hohen Schwebungen natürlich aus dem Zusammenwirken des höheren Primärtones mit dem nahegelegenen Oberton des Grundtones; die tiefen aber durch die Nachbarschaft des Grundtones und eines Differenztones. Für die verstimimte Octave zieht er ganz in Uebereinstimmung mit meinen Ergebnissen, den 2. Differenzton des primären Klanges heran. Für das weite Intervall $100 + 605$ recurirt er auf den ersten Differenzton aus dem Gabelton 605 und dem 4. Oberton 500 der Zunge 100.

Meyer hat dieses Ergebniss in einem Falle nachgeprüft — mit abweichendem Erfolge (47, 9; 48, 33). Ein milder, aber ziemlich starker Flaschenton klang mit seiner verstimmtten Octave zusammen. Es waren wie bei Stumpf sowohl die hohen als die tiefen Schwebungen zu hören. Wurde nun der Interferenzapparat auf den ersten Oberton des Grundtons eingestellt, so konnte Meyer »bei keinem

Intensitätsverhältniss und bei keiner Verstimmung (von 1 bis mehr als 10 Schwingungen) der höheren Octave Schwebungen hören, weder solche des tieferen noch solche des höheren Tones. Sobald jedoch der Oberton etwas zugelassen wurde, traten sie beide gleichzeitig auf. Stets waren beiderlei Schwebungen da oder gar keine. Die Feststellungen Stumpf's erklärt er dadurch, es müsse der betreffende Oberton nicht vollständig genug ausgeschlossen gewesen sein. Wenn der Oberton sehr schwach vorhanden ist, seien die tiefen Schwebungen bedeutend auffälliger. Diese Erklärung ist wenig einleuchtend. Nach seinen anderweitigen, werthvollen Beobachtungen wird Meyer am wenigsten etwa bestreiten, dass es möglich ist, gewisse Theiltöne eines Mehrklangs als schwebend und andere, gleichzeitige mit Sicherheit als glatt zu beurtheilen. Was hat aber dann bei der verstimmtten Octave der Oberton $2n$ mit den tiefen, am Grundton haftenden Schwebungen zu thun? Dass andererseits bei etwas weiterer Verstimmung der Octave der von Stumpf¹ und mir herangezogene D_1 deutlich für sich zu hören ist, folgt aus Meyer's eigenen Angaben. Bei wenig verstimmtten Octaven kann man sich von dem wirksamen Vorhandensein des D_1 jeden Augenblick dadurch überzeugen, dass man die Höhenänderung des ihm benachbarten Grundtones beachtet. Die Meyer'sche Beobachtung kann ich nicht mit Sicherheit erklären, weil die Versuchsbedingungen nicht genauer angegeben sind. Am nächsten liegt die Annahme, dass die primären Flaschentöne zu schwach waren, um den die tiefen Schwebungen bedingenden Differenzton auch dann noch mit hinreichender Stärke zu erzeugen, wenn der Grundton den Interferenzapparat passirte. Meyer hat gelegentlich selbst bemerkt (46, 190), dass die Töne durch seine Interferenz-Röhrenleitung »sehr geschwächt« wurden¹), was ich freilich von der meinigen nicht sagen kann. Vielleicht aber liegt ein Versehen vor, das auch mir bei der ersten Untersuchung von Octavenschwebungen mit Interferenz begegnete. Stumpf erzeugte den höheren Primärtönen am Ende der Leitung, im Beobachterzimmer. Meyer dagegen schickte bei seinen früheren Versuchen beide Primärtöne durch den Interferenzapparat. Verfuhr er bei dem Octavenversuch ebenso, dann

1) Nach einer neueren Angabe Meyer's (51, 59): um die Hälfte ihrer Intensität.

erklärt sich sein überraschendes Ergebniss sehr einfach. Nach meinen Erfahrungen schwächt nämlich ein für einen bestimmten Ton möglichst genau abgestimmter Interferenzapparat die diesem Tone bis zu etwa 25 Schwingungen nahegelegenen Töne ebenfalls erheblich ab; jede Einstellung war für einen Tonbezirk von ca. 15 Schwingungen gleich günstig. Lässt man nun beide Töne einer verstimzten Octave durch einen auf $2n$ eingestellten Interferenzapparat gehen, so wird regelmäßig der von $2n$ wenig abweichende höhere Primärton dermaßen geschwächt, dass auch die tiefen Octavenschwebungen viel leiser und undeutlicher oder ganz unhörbar werden.

Ich konnte in dieser Weise bei mäßigem Streichen Octavenstöße bis zu 20 p. sec. zum Verschwinden bringen. Auf Grund solcher Beobachtungen theilte ich die Schalleitung im Tonerzeugungszimmer und isolirte die beiden Tonquellen in der früher (312 f.; oben S. 220) beschriebenen Weise. Jede Stimmgabel bekam ihren besonderen Aufnahmekasten und nur von dem einen Kasten wurde der Schall durch den Interferenzapparat geleitet, während die den anderen Schalltrichter fortsetzende Röhre neben dem Interferenzapparat vorbeigeführt wurde. Die beiden Zweige der Leitung vereinigten sich mit sanfter Biegung erst kurz vor der Wand des ersten Zimmers¹⁾.

Meyer bemerkt bei der Schilderung des fraglichen Versuches, durch Einstellung des Apparates seien die Schwebungen verschwunden, »obwohl der tiefe Ton sehr gut hörbar war«. Aber der höhere Primärton, der sich bei der Octave so leicht der Aufmerksamkeit entzieht, — war der vielleicht versehentlich mit ausgelöscht?

Stumpf hatte aus seinen zahlreichen Beobachtungen an multiplen Intervallen geschlossen, die tiefen Schwebungen werde man immer vernehmen; er berichtet nicht einmal von einer Schwächung dieser

1) Natürlich sorgte ich dafür, dass der durch Interferenz zu reinigende Primärton nicht durch den zweiten Schalltrichter unmittelbar ins Ohr des Beobachters gelangen konnte, zunächst dadurch, dass seine Theilleitung etwas kürzer gemacht und der zugehörige Aufnahmekasten mit seiner Oeffnung von der des anderen möglichst weit abgerückt wurde. Ferner wurden alle Zwischenräume zwischen den Resonanzkästen und ihren Aufnahmetrichtern, ja auch der Raum zwischen diesen (von dickem Filz umgebenen) Pappkästen mit Watte ausgefüllt. Der auf S. 220 angegebene Controllversuch hatte den gleichen Erfolg, ob ich die gemeinsame Hauptleitung oder eine der Zweigleitungen vor ihrer Vereinigung mit der unbenutzten unterbrach und verstopfte.

Schwebungen durch den Ausschluss des kritischen Obertones. Ich kann dieses Ergebniss der »mit aller Sorgfalt durchgeführten Versuche« um so weniger bezweifeln, als ich es, wie gesagt, bei allen von mir untersuchten Octaven, Duodecimen und Doppeloctaven voll bestätigt fand.

Die Octavenschwebungen habe ich übrigens noch einem experimentum crucis unterworfen. Meyer und die anderen Vertreter der Obertontheorie könnten auch gegen mich einwenden, der Oberton $2n$ sei vielleicht nicht vollständig genug ausgeschlossen gewesen. Daher ging ich nun dem Grundton mit Interferenz zu Leibe. Die Einstellung des Apparates auf irgend einen Grundton beseitigt bekanntlich auch seine ungeraden Multiplen, nicht aber die geraden, also nicht den 2. Theilton. Werden die Octavenschwebungen vorwiegend oder ausschließlich durch $2n$ und den höheren Primärton n^1 bewirkt, so kann die Ausschaltung des Grundtones ihnen nichts anhaben. Thatsächlich machte sie regelmäßig die Schwebungen ganz oder nahezu verschwinden. Mit dem Grundton 512 war diese Wirkung auch bei mittelstarker Tongebung vollkommen. Aber selbst die Gabel 256, deren Ton ich ja nicht völlig beseitigen konnte, musste stark gestrichen werden, sollten in diesem Falle Schwebungen vernehmlich sein. Ihre Abschwächung war für alle Beobachter so groß, wie bei keinem der Versuche mit Interferenz von Obertönen. Wurde der Grundton wieder zugelassen, so traten die Octavenschwebungen sofort in voller Stärke und Deutlichkeit hervor, gleichviel ob die Interferenzröhren nun auf 0 oder alle sechs für den ersten Oberton eingestellt wurden.

Meyer hat noch eine zweite Schwebungsart hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von Obertönen geprüft, nämlich (47, 7; 48, 32) die Schwebungen der verstimmtten großen Terz $400 +$ (nahe) 500, anscheinend von Zungentönen.

Die Ausschaltung des Obertons 2000 beseitigte nicht die Schwebungen des tiefen Differenztones 100 — was in der ersten Reihe meiner Interferenzversuche sich bestätigt hat. Stellte Meyer jedoch den Apparat so ein, dass die Töne zwischen 1500 und 1600 verschwanden, so war der Differenzton zwar noch »recht laut« zu hören, aber vollständig »glatt und klar«. »Daneben hörte man den Ton 2000 sehr deutlich schweben.« Der Oberton 1500 ist derselbe,

den auch ich bei verstimmten großen Terzen ausschaltete, — mit negativem Erfolge. Ich bestreite keineswegs, dass die Obertöne 1600 und (nahe) 1500, wo sie kräftig genug sind, durch ihren Differenzton den von mir herangezogenen und genauer verfolgten, mit D_4 100 schwebenden Differenzton 4. Ordnung der Primärtöne verstärken. In dem Zungenklange Meyer's werden die Primärtöne im Vergleich zu den starken und zahlreichen Obertönen so schwach gewesen sein, dass sie einen D_4 von sich aus nicht mehr erzeugten, oder dass doch der Fortfall jener Verstärkung genügte, um den D_4 unwirksam zu machen.

Bei einigen anderen Intervallen, deren Verhältnisszahlen sich nur um eine Einheit unterschieden, gelangte Meyer mit der Ausschaltung von Obertönen bisher nicht »zu sicheren Ergebnissen«. Er vermuthet jedoch die Differenztonschwebungen allemal bedingt durch die Obertöne t^2 und h ($h - 2$), wo t die Verhältnisszahl des tieferen, h die des höheren Primärtons bedeutet. Die gleichen Obertöne (für die übrigen Consonanzen sind entsprechende Formeln leicht zu berechnen) machte ich, wie man sich erinnert, insoweit unwirksam, als sie einen Differenzton erzeugen könnten, der mit einem solchen der Primärtöne schwebte. Bei dieser Fassung der Hypothese, und eine andere wäre mir unverständlich, genügte es zu ihrer Prüfung, einen der beiden Obertöne zu beseitigen.

Ich erhielt aber auch dann ein gänzlich negatives Ergebniss, wenn beide Obertöne ausgeschlossen oder zum mindesten geschwächt waren.

Meyer hat das Verdienst, zum ersten (und meines Wissens bisher zum einzigen) Male die wichtige Frage experimentell untersucht zu haben, ob ein Differenzton höherer als erster Ordnung an das Dasein von Obertönen des primären Klanges gebunden sei. Zu diesem Zwecke wurde (46, 192 f.) der Flaschenklang 5 : 8 in zwei verschiedenen Tonlagen mit allen Vorsichtsmaßregeln daraufhin geprüft, ob der zweite Differenzton 2 nur aus dem Zusammenwirken des höheren Primärtones mit der Octave des tieferen entstehe; d. h. es wurde der Oberton 2×5 durch Interferenz vollständig beseitigt. Das Resultat¹⁾ stimmte genau mit dem meinigen überein: bei Vernichtung

1) Meyer hat es kürzlich — gegen Schaefer — von Neuem betont (51, 58 f.).

des Obertons war der Differenzton »nur sehr wenig schwächer«, und Meyer hielt es danach für »bewiesen, dass die Töne 5 und 8 auch ohne Obertöne den Differenzton 2 erzeugen«. Gilt aber diese Unabhängigkeit des D_2 vom Dasein des Obertons $2n$ auch im Gebiete der Quinte, so kann die angegebene Vermuthung Meyer's über die Schwebungen verstimpter Consonanzen hier jedenfalls nicht zutreffen; denn bei der verstimzten Quinte müssen D_1 und D_2 miteinander schweben, wie bei der verstimzten Octave D_1 , bei der Duodecime D_2 , bei der Doppeloctave D_3 mit dem Grundton.

Wegen der ausschlaggebenden Bedeutung, die nach der Obertontheorie der erste Oberton des Grundtones für den D_2 und mittelbar wohl auch für die Differenztöne höherer Ordnung besitzen müsste, ließ ich während meiner Versuche oft tagelang alle Interferenzröhren für diesen Oberton $2n$ eingestellt und kehrte nur vorübergehend zur Normalstellung der Röhren zurück. Von den zahlreichen Intervallen zweiter Periode, die ich mit dem Grundton c^2 512 untersuchte, ist die große Mehrzahl zuerst unter Ausschluss des Tones 1024 analysirt und dann ohne Interferenz nachgeprüft worden. Niemals zeigte sich ein irgend bemerkenswerther Unterschied.

3. Schwebungen, »Stoßtöne« und Differenztöne.

Die Intensitätsverhältnisse.

In Kürze müssen jetzt die Stärkeverhältnisse der verschiedenen Combinationerscheinungen betrachtet werden, soweit sie für die Theorie dieser Thatsachen von Bedeutung sind. Koenig hat zuerst aus Beobachtungen über diese Intensitätsverhältnisse theoretische Consequenzen gezogen. Wesentlich auf Grund solcher Beobachtungen glaubte er die Combinationerscheinungen anders beschreiben zu müssen, als es oben in der Zusammenfassung seiner, wie aller anderen Versuchsergebnisse geschah. Er statuirte, abgesehen von den Summationstönen, zwei wesentlich verschiedene Arten von Combinationstönen, nämlich Stoßtöne und Differenztöne. Für die Differenztöne acceptirte er die (im nächsten Abschnitt zu erörternde) Helmholtz'sche Theorie der subjectiven Combinationstöne. Die Stoßtöne dagegen

sollen unmittelbar aus Schwebungen der Primärtöne entstehen, wobei die schon erwähnte Annahme zu Grunde liegt, dass jeder primäre Ton nicht nur mit einem anderen von geringem Schwingungsunterschied (verstimmte Prime), sondern auch mit jedem seiner verstimmtten Multiplen direct, d. h. ohne Vermittelung von Combinations- und Obertönen, Schwebungen oder Stöße erzeuge. Diese letzte Annahme mag vorläufig auf sich beruhen. Soviel können wir auf Grund des früher Mitgetheilten bestätigen: es gibt solche »multiplen« Schwebungen zum mindesten bis jenseits der Doppeloctave, unabhängig von Obertönen. Ebenso braucht die vor Ohm und Helmholtz weitverbreitete Lehre hier noch nicht erörtert zu werden, wonach Schwebungen und Combinationstöne dieselben physikalischen und physiologischen Ursachen hätten. Die Frage lautet zunächst: Ist der Dualismus zwischen Stoßtönen und Differenztönen unmittelbar durch That-sachen gefordert?

Die Schwingungszahl der »primären Stoßtöne« Koenig's ist gleich der Zahl der primären Stöße, d. h. gleich dem Schwingungsunterschied der beiden Primärtöne (beim verstimmtten Einklang) oder gleich der Schwingungsdifferenz des höheren Primärtones von dem nach unten oder nach oben nächstgelegenen Multipulum des tieferen. Ist die Schwingungszahl des tieferen Tones n , die des höheren n' , so ist die Zahl der »unteren Stöße« allgemein $= n' - hn$, die der »oberen« $= (h + 1)n - n'$, wo h eine ganze Zahl ist und jeweils die Ordnung der Intervallperiode ausdrückt (Prime bis Octave 1, Octave bis Duodecime: 2 u. s. f.). Ueberall wo die Zahl der primären Stöße nicht viel kleiner ist als $\frac{n}{2}$, kann man gleichzeitig untere und obere Stöße, wie auch den unteren und oberen Stoßton hören. Beide Stoßtöne verhalten sich zu einander ebenso, wie zwei primäre Töne von derselben Intensität; d. h. (23, 195) »sind sie dem Einklang nahe, so lassen sie starke Stöße hören; bilden sie nahezu das Intervall der Octave, so geben sie ebenfalls Stöße, welche jedoch schwächer sind, und in gleicher Weise kann auch noch ihre gestörte Duodecime Stöße hören lassen«. Diese »secundären« Stöße gehen nach Koenig bei hinreichender Zahl ebenso wie die primären in (secundäre) Stoßtöne über.

Ueber die Stärkeverhältnisse der Stöße und der Stoßtöne be-

hauptet Koenig weiter: 1) die primären werden schwächer mit zunehmender Ordnungszahl der Intervallperioden; 2) von ihnen sind in jeder Periode die unteren stärker als die oberen; 3) innerhalb einer Intervallperiode sind die secundären Stöße schwächer als die primären. — Secundäre Stoßtöne konnte er nur in zwei Fällen beobachten: bei den früher erwähnten Intervallen 8:11 und 8:13 der viergestrichenen Octave (c^4) 2048 + 2816 und 2048 + 3328, wo sie mit einem D_3 zusammenfallen.

Was zunächst die primären Stöße angeht, so sind auch nach meinen Beobachtungen die Primenschwebungen stärker als die der Octave, diese durchschnittlich stärker als die der Duodecime, und wieder etwas schwächer sind die Schwebungen der verstimzten Doppeloctave. Das gilt aber nur für Schwebungen von subjectiv annähernd gleicher Frequenz. Bei sehr verschiedener Geschwindigkeit ist der Gesamteindruck zu verschieden, um eine Intensitätsverglei chung zu gestatten. Aber Schwebungen z. B. der verstimzten Doppeloctave von mittlerer Geschwindigkeit und noch ganz deutlich discontinuirlichem Charakter machen einen intensiveren Eindruck als etwas raschere Octavenstöße, die der Verschmelzungsgrenze näher liegen.

Dasselbe ist von den »secundären Stößen« im Vergleich mit den primären und mit einander zu sagen. Diese lassen sich überall viel weiter verfolgen, als Koenig angibt, aber im allgemeinen nicht so weit, wie die Schwebungen der verstimzten Multiplen, und weiter bei den vollkommenen als bei den unvollkommenen Consonanzen. Hiernach ist also der Satz Koenig's einzuschränken: »Die Hörbarkeit der Stöße hängt allein von ihrer Anzahl und von der Intensität der primären Töne ab, und ist unabhängig von der Weite des Intervalles.« Ferner verschmelzen Schwebungen gleicher Art um so eher zu einer continuirlichen Rauigkeit und verschwinden um so früher ganz, je tiefer der primäre Klang liegt. Bei »secundären« Schwebungen wirkt die Tonhöhe der schwebenden Differenz töne in demselben Sinne. Sie ist relativ am niedrigsten bei den unvollkommensten Consonanzen, deren Schwebungen Koenig nicht regelmäßig und zum Theil gar nicht bemerkt hat. Da er die Tonlage der Schwebungen unbeachtet ließ, ist es nicht ausgeschlossen, dass er stellenweise, namentlich bei den tieferen Klängen und in der ersten Intervallperiode, solche Schwebungen thatsächlich gehört, aber mit denen einer benachbarten Con-

sonanz verwechselt hat. Wo jedoch Koenig die Stärkeverhältnisse seiner secundären Schwebungen angibt, stimmen diese Beobachtungen durchaus mit den meinigen überein. Von den secundären Schwebungen der ersten Periode sind auch bei ihm die der Quinte am stärksten; in der zweiten Periode die der gr. Decime u. s. w. Die Schwebungsarten, die er nicht angibt, müssten auch nach seiner Theorie besonders leise sein. Danach würden bei der kleinen Terz und der kleinen Septime die beiden primären Stoßtöne mit einander schweben, die hier, mit den D_1 und D_2 zusammenfallend, im Verhältniss der Doppeloctave stehen; bei der Tredecime bildet Koenig's oberer primärer Stoßton (D_4) die Octave des unteren (D_3). Für den Tritonus, die kleine Sexte und die kleine Decime müsste die Theorie der multiplen Schwebungen einen secundären Stoßton zu Hülfe nehmen; denn die beiden primären Stoßtöne stehen hier überall im Verhältniss der Quinte.

Meine etwas eingehendere Untersuchung der Schwebungserscheinungen hatte, wie man sich erinnert, zu dem Resultat geführt, dass alle Schwebungen ohne Ausnahme auf dem Vorhandensein einer verstimmtten Prime beruhen. Abgesehen von den Schwebungen des primären verstimmtten Einklangs, die hier nicht in Betracht kommen, konnte ich für Koenig's primäre Stöße überall einen Differenzton nahe dem Grundtone, für die secundären zwei benachbarte Differenztöne nachweisen. Diese Auffassung stimmt zunächst allein mit dem bis jetzt unerschütterten Ergebniss der Stumpf'schen Versuche über Obertöne (33, 660), wonach ein einfacher primärer Ton mit einem anderen von annähernd multipler Schwingungszahl Schwebungen nur bilden kann durch Vermittelung mindestens eines Differenztones.

Meyer's oben zurückgewiesene Einschränkung dieses Satzes wäre der Koenig'schen Theorie ebenso ungünstig. Entscheidend sind die Beobachtungen über die Tonhöhe der Schwebungen. Koenig's Anschauung würde für alle schwebenden Zweiklänge mit Ausnahme der verstimmtten Primen fordern, dass zwei von einander weit entfernte Theiltöne als schwebend gehört würden, von denen der höhere die Octave, Duodecime oder ein anderes Multiplum des tieferen darstellte. Die Schwebungen z. B. der verstimmtten Octave, Duodecime und Doppeloctave müssten an beiden Primärtönen haften. Für

diese drei Fälle theilt Koenig gelegentlich (23, 188) mit, dass bei gleicher Stärke der beiden primären Töne und bei sehr geringen Verstimmungen die beiden Töne abwechselnd im Rhythmus der (langsamen) Schwebungen hervorträten. Sei der höhere Primärtön schwach oder der Schwebungsrhythmus einigermaßen schnell, so höre man nur den Grundton schweben. Später beschrieb König in einem Briefe an Stumpf (32, 493) die Erscheinungen ähnlich für höhere Multipla und gab zu, sie damals nicht hinreichend beachtet zu haben. Stumpf erklärt den von Koenig beobachteten Tonwechsel als eine durch den Intensitätswechsel des Grundtons bedingte Täuschung — beim Schwebungsmaximum werde der höhere Ton für die Wahrnehmung unterdrückt — und stellte ihr mehrere sichere Beobachtungen entgegen. Bosanquet und Thompson haben bei jedem Stärkeverhältniss der Primärtöne nur den tieferen schweben gehört. Und Stumpf selbst hat zu verschiedenen Zeiten, unabhängig von beiden, genau dasselbe beobachtet. Er lässt die theoretische Deutung dieser Thatsache offen und findet weitere Beobachtungen wünschenswerth, hält aber die mit der meinigen übereinstimmende Erklärung Bosanquet's für »sehr plausibel«. Mir war bis vor kurzem von der hierher gehörigen Litteratur nur die soeben mitgetheilte Angabe Koenig's bekannt. Meine Beobachtungen entscheiden die Frage allgemein im Sinne der Auffassung¹⁾, die für die verstimmten Multipla schon von Bosanquet verfochten, von den älteren Beobachtern (Hällström, Scheibler) als beinahe selbstverständlich vorausgesetzt wurde, von Koenig aber ausdrücklich bekämpft wird. Vor genauerer Analyse eines Schwebungen enthaltenden Klanges ist man stets geneigt, das Ganze als schwebend zu beurtheilen (vgl. meine »Beobachtungen« S. 340, 613). Aber mit zunehmender Uebung gelingt es immer sicherer, die an den Schwebungen unbetheiligten, glatten Theile eines Toncomplexes von den schwebenden zu unterscheiden. Ein rhythmisch abwechselndes Hervortreten der beiden Primärtöne wurde nur zuweilen bei der Octave von weniger geübten Beobachtern bemerkt und, wie von Koenig, nur bei sehr geringen Schwebungsfrequenzen. Bei genauem

1) Vgl. die Abschnitte über Schwebungen in meiner früheren Abhandlung (59) und den demnächst erscheinenden Bericht über den Pariser Psychologencongress vom August 1900. Die bei Stumpf citirten Aufsätze Bosanquet's konnte ich im Original noch nicht einsehen.

Hinhören ergab sich auch hier der höhere Primärton stets als glatt und stetig. Das wurde von meinen gänzlich unbefangenen Beobachtern hundertfach, am häufigsten für die verstimmte Octave festgestellt. Arbeitet man, wie Koenig, mit Stimmgabeln ohne Laufgewichte, und beobachtet unmittelbar im Tonerzeugungszimmer, so werden freilich die ersten Obertöne des Grundtones leicht stark genug sein, um selbständig mit dem höheren Primärton merkliche Schwebungen zu erzeugen. Bei obertonreinen Zweiklängen rücken selbst die Primenschwebungen mit zunehmender Geschwindigkeit mehr und mehr von dem höheren Primärton nach der Tiefe ab, wo neben dem Zwischenton und dem Grundton, wenig tiefer, die hohen Differenztöne hervortreten. Für die Schwebungen der unvollkommenen Consonanzen ergibt die genauere Untersuchung als Träger stets den tiefsten Theil des Klanges, nämlich zwei benachbarte Differenztöne, die bei geringer Verstimmung des Intervalls zu einem Zwischentone verschmelzen, bei stärkerer Verstimmung meist beide neben einander zu hören sind. Leise und undeutliche Schwebungen dieser Art scheinen zuweilen auch oder ausschließlich an dem starken Grundton oder einem höheren Differenzton zu haften, der die Octave des charakteristischen Schwebungstones bildet. Aber dieses Urtheil wird von geübteren Beobachtern regelmäßig zu Gunsten der in der Tiefe vernehmbaren verstimmten Prime corrigirt. Nach der Koenig'schen Theorie der multiplen Schwebungen müssten streng genommen stets alle Theiltöne eines schwebenden Zweiklanges Schwebungen tragen (gleichgültig, wie man sich die Combinationstöne entstanden denkt); denn z. B. bei der Quinte verhalten sich die Schwingungszahlen der thatsächlich vorhandenen Theiltöne wie 1 : 2 : 3, ebenso bei der Duodecime; bei der Doppeloctave und Quarte wie 1 : 2 : 3 : 4 u. s. f. Davon ist aber keine Rede.

Schon durch diese Thatsachen verliert Koenig's Classification der Combinationerscheinungen an innerer Berechtigung. Sie wird völlig unhaltbar, wenn man die Intensitätsverhältnisse der Combinationstöne genauer beachtet. Hierauf in erster Linie gründet Koenig seine Unterscheidung zwischen Stoßtönen und Differenztönen: diese seien stets »außerordentlich viel schwächer als die Stoßtöne« (23, 236).

Dabei sind auf Seiten der Stoßtöne nur die oben definirten

»primären« gemeint, ein anderer wurde ja nur in zwei Fällen bemerkt. Differenztöne, die nicht mit Stoßtönen zusammenfallen, hatte Koenig in seiner ersten Untersuchung durch schwebende Hilfsgabeln festzustellen geglaubt. Später (25, 130) fasste er diese — auch bei sehr schwacher Tongebung wahrgenommenen — Schwebungen der Hilfsgabel als multiple Stöße auf zwischen ihrem Tone und einem primären Stoßton oder einem Primärton. In zwei Fällen hervorgetretene Summationstöne führte er jetzt (als Stoßtöne) auf die Mitwirkung subjectiver Obertöne zurück. Der Satz der ersten Abhandlung (23, 236, III 6), wonach die Differenz- und Summationstöne viel schwächer seien als die Stoßtöne und eine von ihnen unabhängige Erscheinung darstellten, wird demnach in den Expériences dahin zugespitzt (25, 147, III 6): *L'existence de sons différentiels et de sons d'addition ne peut être démontrée jusqu'à présent avec quelque certitude par aucune expérience.*

Die Frage kann, wie Koenig selbst hervorhob, innerhalb der ersten Intervallperiode (zwischen Prime und Octave) nicht entschieden werden; denn hier fällt von den beiden primären Stoßtönen der untere mit dem ersten, der obere mit dem zweiten Differenzton zusammen. Jenseits der dritten Periode hat Koenig, wie früher berichtet wurde, nirgends einen Combinationston wahrgenommen. In der zweiten Periode ist der untere Stoßton mit unserm D_2 , der obere mit D_3 identisch; in der dritten Periode: der untere Stoßton mit D_3 , der obere mit D_4 . Es kann sich also nur um das Intensitätsverhältniss handeln: in der zweiten Periode des D_1 zu D_2 und D_3 , in der dritten Periode des D_1 und D_2 zu D_3 und D_4 . Durch diese Ueberlegung schrumpft der in Frage stehende Gegensatz zwischen Stoßtönen und Differenztönen von vorn herein erheblich zusammen. Man wird danach ohne weiteres gegen den (seither mehrfach citirten) Satz Bedenken tragen, den Koenig ans Ende seiner Abhandlung stellt (23, 236): »Die Stoßtöne lassen sich nicht durch die Ursache der Differenztöne . . . erklären, da ihre Schwingungszahlen in vielen Fällen andere sind, als diese Ursache erfordern würde«.

Zunächst fand ich (59, 568), dass bei den Intervallen jenseits der Octave alle Combinationstöne im Durchschnitt leiser und undeutlicher werden, als in der ersten Periode (ebenso innerhalb der Octave: zwischen Quinte und Octave leiser als diesseits der Quinte).

Diese Beobachtung hat auch Koenig gemacht. Die Thatsache findet sich in der Litteratur mehrfach angedeutet, z. B. bei Helmholtz (21, 255). Ferner sind nach meinen Ergebnissen jenseits der Octave die Stärkeunterschiede der gleichzeitig vernehmbaren Differenztöne im Vergleich zur ersten Periode geringer. Hier sind (59, 357) mit Ausnahme einiger enger Zwischendifferenztongebiete D_1 und D_2 durchschnittlich stärker und deutlicher als die D -Töne höherer Ordnung. Für die über eine Octave hinausgehenden Klänge ließ sich das nicht mehr allgemein behaupten. Namentlich ist in der dritten Periode (Duodecime bis Doppeloctave) der hohe, von $2n$ bis $3n$ aufsteigende D_1 vielfach der leiseste Differenzton und nicht überall mit Sicherheit nachzuweisen.

Alle nicht mit Stoßtönen zusammenfallenden, also alle hier zum Vergleich in Betracht kommenden Differenztöne liegen höher als der Grundton, zwischen den beiden Primärtönen. Solche zwischenliegenden Differenztöne hat Koenig in seiner Hauptversuchsreihe niemals bemerkt. In tieferer Tonlage hat er nur an Hülfs-gabeln von entsprechender Tonhöhe Schwebungen wahrgenommen. Dadurch kam er (23, 216) zu dem Schlusse, »dass die Differenztöne in jedem Falle ganz außerordentlich viel schwächer sein müssen, als die Stoßtöne sind«. Obwohl durch meine Beobachtungen die thatsächliche Grundlage dieses Ergebnisses stark eingeschränkt wird (vgl. oben S. 210), habe ich bereits angegeben, dass zwischenliegende Differenztöne im allgemeinen auch relativ leiser und undeutlicher sind als Differenztöne derselben Ordnung innerhalb der ersten Periode, im Vergleich mit solchen höherer Ordnung. Sie sind vor allem schwieriger zu bemerken, entziehen sich leichter der Aufmerksamkeit. Das hat mannigfache besondere Ursachen und scheint einer allgemeinen Gesetzmäßigkeit des Empfindungslebens zu entsprechen. Bei drei primären Tönen verhält es sich für mein Ohr ganz analog. Schlage ich auf dem Claviere einen über die Octave hinausreichenden Zweiklang stark an und gebe gleichzeitig möglichst leise einen dritten Ton, so erscheint mir regelmäßig dieser dritte, wenn er zwischen den starken Tönen liegt, leiser und weniger deutlich, ja er wird eher unmerklich, als wenn er, gleichweit von einem der starken Töne entfernt, unter oder über dem Hauptzweiklange gelegen ist. (Analoges scheint mir im Gebiete des Hautsinnes obzuwalten. Doch müssten

bezügliche Versuche mit besseren Hilfsmitteln angestellt werden, als sie mir gegenwärtig zur Verfügung stehen).

Dass Koenig keinen zwischenliegenden Differenzton mit Sicherheit hören konnte, beruht jedenfalls auf mehreren zum Theil rein technischen Umständen, wie sie im vorigen Capitel hervorgehoben sind. Ungewöhnlich große Intensität des primären Klanges z. B. raubt gerade den höchsten Differenztönen viel von ihrer Mercklichkeit. Bei den von ihm vorzugsweise berücksichtigten einfachen Schwingungsverhältnissen werden sie von der harmonischen Verschmelzung aller Theiltöne betroffen. In der näheren Umgebung der consonanten Klänge wird ihre Deutlichkeit durch Schwebungen ungünstig beeinflusst, namentlich dann, wenn man die Tonlage der Schwebungen unbeachtet lässt, d. h. den verworrenen Gesamteindruck in dieser Hinsicht nicht analysirt.

Thatsächlich sind die zwischenliegenden Differenztöne nicht überall leiser und weniger deutlich als die mit den Stoßtönen identischen. Und keineswegs sind diese immer am lautesten. Ich verweise auf meine zahlreichen Angaben über die Intervalle zwischen Octave und Doppeloctave (im Vorstehenden und 59, 568, 576, 584). In der dritten Periode tritt der hohe D_1 im allgemeinen sehr zurück; aber hier überwiegt D_2 , die Stoßtöne (D_3 und D_4) regelmäßig, wenn man von den Consonanzen und ihrer näheren Umgebung absieht.

Koenig scheint die Möglichkeit eines Differenztones höherer als erster Ordnung selten erwogen zu haben. Niemals stellte er einem seiner Stoßtöne einen anderen als D_1 zum Vergleich gegenüber. Niemals hat er die Ablenkung bemerkt, die die meisten von ihm notirten Hauptcombinationstöne thatsächlich dadurch erfahren, dass ein nahegelegener Differenzton ganz oder theilweise mit ihnen verschmilzt. Die dadurch zugleich entstehende Verstärkung hat er zwar fast immer wahrgenommen, nicht aber ihre Ursache erkannt. Von den beiden primären Stoßtönen überwiegt nach Koenig (in Uebereinstimmung mit der Theorie der multiplen Schwebungen) jeweils der tiefere, d. h. abgesehen von den drei Mittelzonen, um die Quinte, große Decime und verminderte Quatuordecime 2:7, wo die Stoßtöne dem Einklang nahe und annähernd gleich stark sind, dominiren nach Koenig oder ertönen allein: zwischen Prime und Quinte D_1 ; von der Quinte bis zur großen Decime D_2 ; von der

großen Decime bis zur verminderten Quatuordecime (Mitte der 3. Periode) D_3 ; von hier bis zur Doppeloctave D_4 . Nun verfolge man diese Differenztöne rechnerisch durch die drei Perioden, und man erkennt sofort, dass sie jeweils am häufigsten, ja fast allein in die Lage kommen, mit anderen, ihnen naheliegenden Differenztönen zu verschmelzen. Diese (von mir rein empirisch festgestellte und genauer verfolgte) Thatsache entzieht der Stoßtontheorie ihre wichtigste Stütze. Sie erklärt, warum die Mehrzahl der Koenig'schen Angaben über die Intensitätsverhältnisse richtig sind, und warum diese richtigen Beobachtungen doch nicht das Geringste für die dualistische Beschreibung der Combinationerscheinungen beweisen. D_4 fällt bei der kleinen Terz mit D_5 , bei der großen Terz mit D_4 , bei der Quarte mit D_3 , bei der Quinte mit D_2 , D_4 und D_5 zusammen. Zwischen Quinte und Octave begegnet D_2 denselben Differenztönen in umgekehrter Reihenfolge. Er kreuzt zwischen Octave und großer Decime die Bahnen des D_5 (None), D_4 (verminderte Decime), D_3 und D_5 (große Decime). D_3 trifft weiterhin, zwischen großer Decime und Duodecime mit denselben Differenztönen, zwischen Duodecime und verminderter Quatuordecime (2:7) mit D_5 , D_4 zusammen. Beim Intervall 3:11 ist $D_4 = D_5$. Ganz entsprechend hörte Koenig bei allen großen Terzen und Quarten den tieferen »Stoßton« ($D_{1=4}$ bzw. $D_{1=3}$) lauter als den höheren (D_2); ebenso bei der verminderten Septime $2048 + 3584$ ($D_{2=4} > D_1$); bei der None $c^3 + d^3$ ($D_{2=5} > D_3$). Eine Octave tiefer notirt er für dasselbe Intervall nur den $D_{2=5}$. Die stärksten Combinationstöne fand er, wie ich, bei der Quinte, der großen Decime und der verminderten Quatuordecime 2:7, wo alle unterhalb des Grundtones überhaupt möglichen Differenztöne auf dessen tiefere Octave sich vereinigen. Die in solcher Weise ausgezeichneten Klänge standen durchaus im Vordergrund der Koenig'schen Untersuchung. Nur in den tieferen Tonlagen berücksichtigte er auch ihre Verstimmungen. Aber seine schon erwähnte ungenaue Tonhöhenbestimmung ließ ihn auch hier den tiefen und lauten Differenzton überall mit dem unteren Stoßton identificiren, während er thatsächlich in der Mehrzahl dieser Fälle nur Zwischentöne zwischen zwei benachbarten Differenztönen gehört haben kann. In der näheren Umgebung der Consonanzen sind auch diese Zwischentöne relativ verstärkt. In der ersten und zweiten

Intervallperiode grenzen, wie man sich erinnert, die Zwischentongebiete der Differenztöne nahe aneinander. Ja, bei tieferer Tonlage der primären Klänge greifen sie theilweise in einander über, so dass hier die stärksten und aufdringlichsten Combinationstöne fast ohne Ausnahme durch Verschmelzung oder Zusammenfallen zweier oder mehrerer Differenztöne entstehen.

Die ausschlaggebende Bedeutung dieses Factors lässt sich selbst in der dritten Intervallperiode (Duodecime bis Doppeloctave), wo alle Stärkeunterschiede, auch für Koenig, geringer werden, mit Sicherheit nachweisen. Nach der Koenig'schen Theorie wäre in der ersten Hälfte dieser Periode D_3 , in der zweiten D_4 der lauteste Combinationston. Nahe um die Tredecime 3:10 (Grundton 256, vgl. 59, 584 ff.) konnte ich regelmäßig einen $Z D_{3+5}$ feststellen, der, mit seiner höheren Octave D_4 verschmelzend, den zwischenliegenden D_2 zurückdrängt. Bei dem wenig weiteren Intervall 256 + 868 waren D_3 und D_4 bereits verschmolzen. Bis + 908 war nirgends ein reiner D_3 oder D_4 , sondern überall ein $Z D_{3+4}$ zu verzeichnen, der zwischen + 888 und + 900 den stärksten und deutlichsten Differenzton darstellte. Der Klang + 896 [2:7] bildet die Mitte der Periode und enthält den lautesten und klarsten Differenzton, $D_{3=4}$. Zwischen + 928 und + 988 stand D_3 im Vordergrund, von dem bis + 960 ein $Z D_{4+5}$ als tiefere Octave schwer zu sondern war. Abgesehen von den beiden Zonen der Verschmelzung zweier tiefer Differenztöne überwiegen in der ersten Hälfte der Periode D_2 , in der zweiten D_2 und D_4 , stellenweise D_3 .

Das erste Beispiel, das Koenig anführt, um den Dualismus zwischen Stoßtönen und Differenztönen zu begründen (23, 216), ist der ersten Intervallperiode entnommen und betrifft das Stärkeverhältniss der beiden Stoßtöne bei der großen Septime $c^3 + h^3$. Hier konnte er nur den oberen Stoßton $c [D_2]$ und keine Spur des unteren $[D_1]$ wahrnehmen. Bei diesem Intervall konnte in der ein- und zweigestrichenen Octave auch ich keinen klar bestimmten Ton von der Schwingungszahl des D_1 feststellen; wohl aber einen Zwischenton aus ihm und dem nahe gelegenen D_3 , sowie eine (schon bei etwas engeren Intervallen beginnende) Vertiefung des Grundtones, die nur auf die Mitwirkung des D_1 zurückzuführen ist. Hier wie bei den benachbarten Intervallen ergeben die hohen, einander und dem

Grundtöne nahegelegenen Differenztöne ein unsauberes und schwer analysirbares Gemisch, von dem der tiefe und völlig isolirte D_2 sich deutlich abhebt; er ist bei der reinen großen Septime vielleicht noch durch seine unanalysirten Octaven (D_5 und D_6) verstärkt. In den expériences d'acoustique (1882; 25, 130) corrigirt sich Koenig übrigens dahin, dass bei der großen Septime $c^1 + h^1$ der D_4 durch Stöße mit der Hilfsgabel 220 nachzuweisen sei, und dass der untere Stoßton auf diese Weise allgemein sogar bis zum Intervall 14:15 sich verfolgen lasse. Der zweite von Koenig herangezogene Klang ist die große None $c^3 + d^4$, wo er nur den unteren Stoßton c^1 entdecken konnte. Dieser ist hier mit $D_{2=5}$ identisch und also verstärkt. Neben ihm beobachtete ich in beiden tieferen Tonlagen schwächer aber ganz deutlich und wiederholt den D_4 , obwohl auch Meyer und Schaefer diesen zwischenliegenden D nicht finden konnten. Verstimmt man die None nach oben um 4 bis 12 Schwingungen, so ist D_4 sogar vorübergehend der vernehmlichste Combinationston. Bei dem dritten Intervalle, auf das Koenig sich ausdrücklich beruft, bei der Undecime 3:8, hörte er seine beiden Stoßtöne [$D_{3=4}$ und dessen höhere Octave D_2], aber durchaus keinen D_1 . Meyer und ich haben auch diesen festgestellt.

Bei der Mehrzahl seiner Intervalle hat Koenig zwei Differenztöne unterschieden, von denen der tiefere ihm als der stärkere erschien. Wo er nur einen der beiden »Stoßtöne« notirt, ist es regelmäßig der tiefere. Hier erinnere ich an die übereinstimmenden Aussagen aller meiner Beobachter (59, 374, 602, 607 f.) über die relative Aufdringlichkeit des jeweils tiefsten Differenztones. Er klingt breit, massig und meistens brummend, ferner, namentlich wenn es ein Zwischenton ist, kurz und stoßartig; er ist am häufigsten mit Schwelungen oder Rauhigkeit behaftet; er fällt gewöhnlich zuerst ins Gehör, und dieses sein frühes Auftreten scheint von der willkürlichen Richtung der Aufmerksamkeit unabhängig zu sein. »Man ist zunächst immer geneigt, den tiefsten D wegen seines aufdringlichen Charakters für den lautesten zu halten, auch wenn er es für die genauere Beobachtung keineswegs ist«, ganz besonders aber dann, wenn dicht neben ihm noch ein zweiter, schwer zu isolirender Differenzton vorhanden ist; da glaubt man zunächst regelmäßig einen subjectiv verstärkten Ton zu hören. Hierbei ist Koenig in diesem

Fälle stets stehen geblieben. Alle jene Ursachen einer Ueberschätzung der Tonstärke fallen bei den hohen Differenztönen fort. Und ganz allgemein werden die höheren Theiltöne eines Mehrklanges durch gleichzeitige tiefe mehr geschwächt als umgekehrt.

Nach alledem müssen wir an der früher gegebenen Beschreibung der Combinationerscheinungen festhalten. Gleichviel wie diese Erscheinungen physiologisch weiter zu erklären sind: Der von Koenig eingeführte Dualismus zwischen Stoßtönen und Differenztönen ist durch die Thatsachen der unmittelbaren Erfahrung nicht gerechtfertigt. Zu diesem Ergebniss (das ich bereits gegen Ende des Jahres 1898 Herrn Geh. Rath Wundt mittheilte) gelangte ich durch eine genaue experimentelle Prüfung der Koenig'schen Angaben und der zu Grunde liegenden Thatsachen. Eine damit übereinstimmende Anschauung hat zum erstenmale und bis jetzt allein Schaefer ausgesprochen. Aus theoretischen Erwägungen zieht er (56, 508) den Schluss, »dass keine Veranlassung vorliegt, unter dem Namen der Stoßtöne eine besondere Kategorie von Tönen aufzustellen. Die Stoßtöne sind nichts anderes als die Differenztöne«¹⁾. Dabei ist bemerkenswerth, dass Schaefer diesen Standpunkt gewinnt, trotzdem er gerade solche Klänge in großer Zahl untersucht hat, die über die Octave hinausgehen, und trotzdem er die Stärke und Merklichkeit der zwischenliegenden Differenztöne zweifellos unterschätzt, ja sogar die Realität solcher Differenztöne, die nicht mit den Koenig'schen Stoßtönen zusammenfallen, bezweifelt.

Im Anschluss an diese Erörterungen, die insbesondere auf die Stärkeverhältnisse der Differenztöne sich bezogen, sei noch erwähnt, dass ein Vorzug der harmonischen Intervalle in dieser Hinsicht schon vielen Beobachtern aufgefallen ist, obwohl die meisten in jedem Zweiklange nur zwei, manche sogar nur einen Differenzton vermutheten. Jener Vorzug ist, namentlich bei nicht ganz vollständiger Analyse, so groß, dass er, wie wir früher mehrfach sahen, auf die Geschichte der Differenztöne von Einfluss gewesen ist. In voller Uebereinstimmung mit meinen Stimmgabelversuchen hat Stumpf (32, 245) besonders an Flötenpfeifen wiederholt beobachtet, dass, wenn man eine Quinte, eine große Terz oder kleine Terz nicht ganz

1) Herr Professor Stumpf theilte mir kürzlich mit, ihm sei der Gegensatz zwischen Differenz- und Stoßtönen stets zweifelhaft gewesen.

rein angibt und dann der Reinheit nähert, »der Differenzton, während er sich in seiner Höhe erheblich verändert, zugleich bis zum Punkt der Reinheit an Stärke zu wachsen« scheint. Gerade hiermit bringt Stumpf die historische Thatsache in Zusammenhang, dass der Geiger Tartini die Differenztöne selbständig gefunden und großes Gewicht darauf gelegt hat: »man kann eben auf der Geige rein spielen«. Stumpf citirt noch sechs ältere, gute Beobachter mit gelegentlichen verwandten Angaben. Einige waren sogar des Irrthums, man könne Differenztöne nur bei Consonanzen wahrnehmen. Chladni (Akustik) fordert, das Intervall, bei dem man einen Differenzton gehörig wahrnehmen wolle, müsse »entweder ganz rein sein oder nur wenig von der wahren Reinigkeit abweichen«. Stumpf begründet die Erscheinung, meines Wissens zum ersten Male, genau in derselben Weise wie ich: durch das Zusammenfallen mehrerer Differenztöne bei den reinen Consonanzen.

Der einzige Akustiker, der im Thatsächlichen hier widerspricht, ist Meyer (47, 10; 48, 34). Er führt die ihm wohlbekannten Angaben über die größere Stärke »des« Differenztones bei reinen Intervallen auf eine Täuschung zurück, die im wesentlichen auf den Schwebungen der verstimzten Consonanzen beruhe. Seine Erklärung ist so künstlich und hypothetisch, dass man nur in der größten theoretischen Noth sich ihr anschließen dürfte. Ueber die Thatsachenfrage kann natürlich nur das Experiment entscheiden. Meyer stellte einmal mit zwei Galtonpfeifen folgenden Versuch an. Die eine gab den constanten Ton 4800, die andere wurde »ganz langsam, continuirlich« verändert, von 4900 bis zur Quinte 7200; sie klang in allen diesen Tonhöhen gleich stark. Nun verfolgte Meyer den (ersten) Differenzton von 100 bis 2400, »hin und zurück, mehrermale, konnte aber an keinem Punkte feststellen, dass er auch nur die geringste Stärkeschwankung machte, obwohl die Primärtöne hier alle möglichen reinen und verstimzten Intervalle durchlaufen«. — Dieser Versuch beweist nichts; denn er stellt für die Beobachtung der fraglichen Erscheinungen die denkbar ungünstigsten Bedingungen dar. Bei ganz langsamer, continuirlicher Verstimzung des primären Klanges nimmt auch die Stärke des Differenztones langsam und ganz continuirlich ab und zu. Wollte man die Aenderung der Stärkeverhältnisse, die bei einigermaßen kräftigen Primärklängen und discon-

tinuirlicher Verstimmung ganz unverkennbar ist, einem Beobachter verheimlichen, so könnte man gar nichts Besseres thun, als in der Meyer'schen Weise verfahren. Das negative Ergebniss Meyer's ist um so verwunderlicher, als er Differenztöne zweiter bis fünfter Ordnung sehr wohl kennt, und als seine eigene Theorie des Hörens für die verschiedenen Intervalle Differenztöne von recht verschiedener Stärke fordert. Meyer kann auch die Stärkeverhältnisse gleichzeitiger Differenztöne zu einander nicht häufig genau beachtet haben. Seine für die erste Intervallperiode aufgestellten Regeln (47, 2; 48, 26) stimmen mit denen Koenig's überein. Danach sei zwischen Prime und Quinte D_1 , zwischen Quinte und Octave D_2 der stärkste Differenzton, — was wir oben als eine halbe Wahrheit erkannten.

Nach meinen zahlreichen Beobachtungen und Vergleichen sehr verschiedener Intervalle liegen die Dinge nicht so einfach, wie Koenig und Meyer sie darstellen, aber auch nicht so regellos, wie die meisten anderen Akustiker anzunehmen scheinen. Für den Zusammenklang zweier einfacher Töne von annähernd gleicher Intensität darf ich folgende Regelmäßigkeiten als gesichert betrachten:

1. Die Differenztöne werden im ganzen leiser mit Erweiterung des primären Intervalls, derart dass sie zwischen Prime und Quinte durchschnittlich am stärksten sind, schwächer zwischen Quinte und Octave, noch schwächer zwischen Octave und Duodecime u. s. f.

2. Innerhalb der ersten Periode (Prime bis Octave) sind, soweit nicht die folgenden Regeln modificirend eintreten, D_1 und D_2 lauter als D_3 und D_4 , diese lauter als D_5 .

3. Die zwischen den Primärtönen gelegenen Differenztöne der übrigen Perioden (D_1 in der zweiten, D_1 und D_2 in der dritten) sind abgeschwächt, um so mehr, je weiter sie sich von dem Grundton entfernen.

4. Relativ schwach sind ferner die einem anderen Theilton naheliegenden, eben noch für sich hörbaren, und ebenso

5. die allertiefsten, der unteren Hörgrenze sich nähernden Differenztöne.

6. Tiefe aber deutlich tonartige Differenztöne machen einen relativ starken Eindruck.

7. Die Intervalle mit zwei oder mehr zusammenfallenden

Differenztönen, d. h. die consonanten Klänge enthalten die stärksten Differenztöne.

8. Diese Verstärkung des charakteristischen tiefsten Theiltones erstreckt sich (in abnehmendem Maße) auch auf die wenig bestimmten Consonanzen, also auf die Zwischentöne nahe benachbarter Differenztöne.

9. Die Verstärkung ist um so größer, je mehr Differenztöne in einen zusammenfließen und je niederer Ordnung sie sind, je weniger Differenztöne also neben dem verstärkten tiefsten übrig bleiben. — Daher ergeben innerhalb jeder Periode die mittelsten Intervalle (Quinte — große Decime — verminderte Quatuordecime 2 : 7) den stärksten Differenzton. Die tiefen Differenztöne der Quarte und großen Sexte sind stärker als die der großen Terz und verminderten Septime 4 : 7, diese stärker als die der kleinen Sexte, der kleinen Terz u. s. f.

10. Wo ein oder mehrere Differenztöne mit dem Grundton zusammenfallen, also bei der Octave, Duodecime und Doppeloctave ist der Grundton im Zusammenklange verstärkt.

Drittes Capitel.

Die physiologischen Theorien.

1. Helmholtzens Theorie der subjectiven Combinationstöne.

Im Anfange des vorigen Capitels erinnerte ich an den Unterschied zwischen objectiven und subjectiven Combinationstönen. Solche der ersten Art kommen nur in gewissen Ausnahmefällen, bei einer ganz bestimmten Art der Klangerzeugung vor. Die große Mehrzahl der bisher beobachteten, so auch alle von mir festgestellten Combinationstöne sind subjectiv in dem Sinne, dass sie erst innerhalb des Ohres entstehen.

Diese subjectiven Combinationstöne waren seit jeher ein Stein

des Anstoßes für die Helmholtz-Hensen'sche Theorie des Hörens. Danach werden bekanntlich durch jede physikalische Schallbewegung unter Vermittelung der übertragenden Organe des Trommelfells und der Gehörknöchelchen ganz bestimmte elastische Gebilde des inneren Ohres in Mitschwingung versetzt. Diese Resonatorenhypothese ist eine Deutung des physiologischen Processes unmittelbar nach Analogie physikalischer Vorgänge. Die physikalische Erfahrung und Theorie zeigt aber, dass elastische Körper nur durch pendelförmige Schwingungen können zur Resonanz gebracht werden, während für die subjectiven Combinationstöne entsprechende Pendelschwingungen mit den feinsten physikalischen Methoden bisher in der Luft nicht nachzuweisen waren.

Um diese Schwierigkeit zu beseitigen, hat Helmholtz bekanntlich seine Theorie durch einen Zusatz erweitert, wonach unter gewissen Voraussetzungen die von der Resonatorenhypothese geforderten pendelförmigen Schwingungscomponenten im Mittelohre physikalisch entstehen können; nämlich dann, wenn 1) die Schwingungsweite der primären Töne so groß ist, dass sie, verglichen mit den Dimensionen der schwingenden Massen, nicht mehr als unendlich klein betrachtet werden darf. In diesem Falle sind die elastischen Bewegungskräfte, die durch die Entfernung der schwingenden Theilchen aus der Gleichgewichtslage entstehen, diesen Entfernungen nicht mehr einfach proportional; auch höhere Potenzen der Entfernungsgröße gewinnen Einfluss auf die Bewegungen: es findet keine einfache Superposition der primären Schwingungen mehr statt. Die bekannte lineare Schwingungsgleichung, die nur unter der Voraussetzung unendlich kleiner Amplituden gilt, ist nun zu einfach, um den mechanischen Vorgang auszudrücken. Es müssen neue, den höheren Potenzen der Elongationen entsprechende Glieder in sie eingeführt werden. Und durch Integration dieser complicirteren Gleichung ergeben sich theoretisch neben den Primärtönen noch Differenz- und Summationstöne verschiedener Ordnung, in erster Linie der erste Differenzton $n' - n$ und der einfache Summationston $n + n'$ (die Helmholtz im weiteren allein berücksichtigt). Die Rechnung führt indessen zu diesem Ergebniss nur unter zwei weiteren Voraussetzungen, von denen Helmholtz die eine ausdrücklich hervorhebt: es muss 2) der schwingende Körper asymmetrische Elasticität besitzen; seine Entfernungen aus der Gleich-

gewichtslage müssen nach der einen Seite hin mit größerer Beschleunigung erfolgen, als nach der anderen, wenn das Quadrat der Elongationen Einfluss auf die Bewegungen haben soll. Andernfalls, bei Annahme symmetrischer Elasticität, wären, wie Hermann nachgewiesen hat (35, 506), Combinationstöne nicht überhaupt unmöglich; aber die Beschleunigung müsste dann eine ungerade Function der Elongation sein, und es ergäben sich als Schwingungszahlen von Combinationstönen nur ungerade, also ternäre, quinäre u. s. f. Combinationen der primären Schwingungszahlen, also unter anderen nicht die (binären) Combinationen $n^1 - n$ und $n + n^1$.

Als unsymmetrisch schwingende Organe nimmt Helmholtz, wie man weiß, bestimmte Theile des Mittelohres in Anspruch, er weist auf den unsymmetrischen Bau des Trommelfells hin und für starke Töne besonders auf das lockere, sperrzahnartige wirkende Hammer-Amboßgelenk. Gegen diese specielle anatomisch-physiologische Vermuthung hat Dennert eingewendet (29, 173), Patienten ohne Trommelfell, ja, »auch solche ohne Trommelfell, Hammer und Amboß, mit nur erhaltenem Steigbügel« hätten Combinationstöne gehört. Diese kurz und beiläufig mitgetheilte Beobachtung ist leider niemals nachgeprüft worden. Sie wäre natürlich nur entscheidend, wo die fraglichen Organe beider Ohren functionsunfähig wären. Hermann berichtet — was ich bestätigen kann —, dass man auch mit gut verstopften Ohren Combinationstöne noch wohl vernimmt, und betont gegen Helmholtz andererseits, dass das Trommelfell ziemlich große Excursionen ausführen müsste, um den Bedingungen der Theorie zu genügen. Aber die ganze, von Helmholtz nur vermuthungsweise aufgestellte Trommelfellhypothese scheint mir von secundärer Bedeutung zu sein. Es bliebe die Möglichkeit offen, einem anderen, zwischen dem Trommelfell und den Nervenendigungen gelegenen Theile des Gehörapparates das geforderte unsymmetrische Verhalten zuzuschreiben. Dass z. B. der Steigbügel mit genau derselben Geschwindigkeit in das ovale Fenster eindringt, als mit der er zurückschwingt, ist mir aus mehr als einem Grunde unwahrscheinlich. Gegenwärtig wissen wir von der Mechanik des Trommelhöhlenapparates und vollends von den Bewegungsvorgängen innerhalb der Schnecke zu wenig, um eine symmetrische Elasticität aller in Betracht kommenden Theile behaupten zu dürfen.

Wichtiger als das Dennert'sche Argument ist ein gegen die Helmholtz'sche Theorie der subjectiven Combinationstöne mehrfach erhobener, von Hermann (35, 503) am ausführlichsten begründeter Einwand, der sich auf die Intensitätsverhältnisse stützt: alle Combinationstöne, namentlich aber die Differenztöne müssten nach der Theorie sehr viel schwächer sein, als sie es in Wirklichkeit sind. Dass der primäre Klang nicht sonderlich kräftig zu sein braucht, um Combinationstöne vernehmen zu lassen, ist seit Helmholtz von mehreren Experimentatoren, so auch von mir festgestellt worden. Hieraus erwächst der Theorie noch keine unüberwindliche Schwierigkeit. Wenn Voigt gegen Helmholtz betont (31), dass für Stimmgabeltöne auch bei beträchtlicher Stärke die lineare Schwingungsgleichung noch merklich erfüllt sei, so weist Hermann (49, 501) dieses Argument mit Recht zurück. Helmholtz nimmt durchaus nicht an, dass schon in der Luft die primären Töne sich nicht ungestört superponiren«. Aber Hermann legt an demselben Orte unwiderleglich dar, dass aus der Helmholtz'schen mathematischen Ableitung sich Combinationstöne überhaupt nur dann ergeben, wenn die den höheren Potenzen der Elongation entsprechenden Hilfsgrößen sehr klein sind im Vergleich mit den übrigen Gliedern der Gleichung, dass daher die theoretisch erwiesenen Differenztöne und noch mehr die Summationstöne stets von unvergleichlich kleinerer Amplitude wären, als die Primärtöne. Diesen mathematischen Zusammenhang hat Helmholtz wohl erkannt (19, 14 Anm.; 21, 262 Anm.), die darin liegende Schwierigkeit jedoch nirgends hervorgehoben. Er unterschätzte, wie wir früher sahen, die relative Stärke der Combinationstöne. Sie wird neuerdings nach meinen Beobachtungen meistens überschätzt. Wenn man von mehreren gleichzeitig vorhandenen Differenztönen nur einen — es ist gewöhnlich der stärkste und tiefste — bemerkt, so erscheint dieser erheblich stärker, als er ist. Bei genauer und vollständiger Analyse von Zweiklängen habe ich niemals, wie mehrere neuere Akustiker von sich angeben, einen Combinationston beobachtet, der an Stärke den Primärtönen gleich oder nahe gekommen wäre. Andererseits ist zu beachten, dass die (fast immer vorzugsweise untersuchten) consonanten Intervalle je einen durch Zusammenfallen von mindestens zweien verstärkten Differenzton enthalten, und dass auch die Helmholtz'sche Gleichung für

diesen Fall entsprechend viele identische Töne ergibt, deren Amplituden sich summieren. Indessen, nach derselben mathematischen Theorie nehmen die den höheren Combinationen entsprechenden Töne an Stärke noch gegen die niederen erheblich ab. Ein einfacher, ungestört für sich zur Geltung kommender Differenzton erster Ordnung dürfte nach Hermann's approximativer Berechnung auf Grund der fraglichen Theorie höchstens $\frac{1}{10}$ der Amplitude der Primärtöne, also nur $\frac{1}{100}$ ihrer Intensität besitzen. Das ist denn freilich mit den Thatsachen unvereinbar.

Am Ende dieses Capitels wird eine Möglichkeit zu erörtern sein, wie man die subjectiven Combinationstöne in anderer Weise, als es Helmholtz versuchte, mit der Resonanztheorie in Einklang bringen könnte.

Vorher jedoch erheben sich folgende Fragen: Erwachsen der Resonatorenhypothese aus den Thatsachen noch andere Schwierigkeiten als die der subjectiven Combinationstöne? Sind diese Schwierigkeiten unüberwindlich? Lassen sich die Erscheinungen vielleicht besser erklären durch eine von Helmholtz's Grundanschauung abweichende Theorie der Combinationstöne oder des Hörens überhaupt?

2. Erweiterungen der (Ohm-) Helmholtz'schen Theorie des Hörens.

a. Die Theorie der Schwebungstöne (Koenig). Die Unterbrechungs- und Variationstöne.

Koenig nimmt keinen Anstoß an der soeben besprochenen Theorie der subjectiven Combinationstöne und hält auch im allgemeinen an der Resonatorenhypothese fest. Soweit die Differenztöne nicht mit seinen Stoßtönen zusammenfallen, gelten sie ihm ja zum mindesten als außerordentlich leise. Zur physiologischen Erklärung der Stoßtöne aber greift er auf die alte Anschauung von Lagrange (4, 11) und Young (5, 106) zurück, wonach das Ohr jede beliebige Periodik von Luftverdichtungen und -verdünnungen innerhalb gewisser Frequenzgrenzen als Ton empfindet. Den ersten Theoretikern der Combinationstöne war diese Anschauung ganz geläufig. (So bezeichnet Roeber den Differenzton erster Ordnung gelegentlich als »Os-

cillationston«). Als allgemeine Theorie des Hörens ohne weitere Einschränkung hingestellt, begegnete sie schon frühe dem Widerspruch der Mathematiker und Physiker. Poggendorff antwortete auf die Ausführungen Roeber's sofort (14, 520) mit einem kritischen Zusatze, dessen wesentlicher Inhalt in Folgendem besteht: die Young'sche Theorie kann nicht erklären, 1) dass man neben einem Differenzton auch die Primärtöne vernimmt, 2) dass außer dem Differenzton erster Ordnung noch solche höherer Ordnung und durch sie bedingte Schwebungen entstehen. In der That, wenn jede periodische Luftbewegung nur den Ton ergibt, dessen Schwingungszahl der Zahl der periodischen Maxima und Minima entspricht, so ist schon die Grundthatsache der Klangwahrnehmung unbegreiflich, dass wir beim Zusammenklange zweier primären Töne diese beiden hören können. Die Möglichkeit der Klanganalyse wurde erst verständlich, als Ohm den Satz aufstellte, dass das Ohr jede periodische Luftbewegung in ihre pendelförmigen Componenten zerlege, und dass wir nur pendelförmige Schwingungen als Töne empfänden. Helmholtz hat diese Hypothese durch zahlreiche und verschiedenartige Beobachtungen gestützt, mathematisch und physikalisch eingehend begründet, anatomisch und physiologisch weiter ausgebaut. Sie bildete bis in die neueste Zeit die Grundanschauung aller akustischen Theorie.

Aber schon Seebeck versuchte die Ohm'sche Definition des Tones im Sinne der älteren Theorie zu erweitern. Er dachte die Klangfarbe zwar vorzugsweise von der Zahl und Art der in dem Klange enthaltenen Pendelschwingungen, theilweise aber auch unmittelbar von der Form der Gesamtwelle abhängig. Bekanntlich ist die Wellenform eines und desselben Mehrklanges sehr verschieden je nach dem Phasenverhältniss der Theiltöne. Helmholtz fand nun durch sein bekanntes synthetisches Verfahren (21, 194), dass beliebige Phasenunterschiede der Theiltöne die Klangfarbe von Mehrklängen nicht verändern. Koenig kam zu dem entgegengesetzten Ergebniss (24, 369; 25, 222) auf Grund von Versuchen mit seiner Wellensirene, wo zwei in Blech geschnittene und gegen einander beliebig verschiebbare Curven angeblasen werden. Aber thatsächlich entstehen beim Anblasen der Wellensirene ganz andere Schwingungsformen in der Luft, als die in Blech geschnittenen. Hermann, der dies am ausführlichsten theoretisch und experimentell nachgewiesen hat (37, 391;

hier ist die übrige Litteratur zu finden), widerlegt auch die anderen Argumente Koenig's für einen Einfluss der Phasenverschiebung auf die Klangfarbe und für die consequentermaßen von Koenig behauptete Fähigkeit des Ohres, Richtungsumkehrungen der Schallbewegung zu erkennen. Positiv entscheidend sind die Hermann'schen Versuche mit dem Edison-Phonographen, der eine vollständige Umkehrung aller Bewegungsrichtungen gestattet, dabei aber die Klangfarbe obertonreicher Klänge ganz unverändert lässt. Die Frage, ob Phasenverschiebung der Theiltöne für sich allein die Klangfarbe beeinflusse, scheint mir nunmehr endgültig negativ, d. h. im Sinne Helmholtzens beantwortet zu sein. Darin liegt zugleich ein wichtiges Argument für die reine Zerlegungstheorie, wonach ein zusammengesetzter Klang lediglich nach Maßgabe der in ihm enthaltenen Sinusschwingungen empfunden wird, unabhängig von der Form der Gesamtwelle.

Seebeck's scharfsinnige Einwände gegen die Ohm'sche Definition des Tones werden neuerdings wieder von Meyer (49; 50) gegen Ohm und Helmholtz verwerthet. Seebeck stützte sich bei seiner Behauptung, die Form der Gesamtwelle sei für die Klangwahrnehmung mitbestimmend, vor allem auf die Beobachtung, dass die an sich nur schwachen Obertöne eines zusammengesetzten Klanges den Grundton verstärken. Ohm erklärte dies (16, 15) für eine associativ bedingte »Gehörstäuschung«. Aber im Thatsächlichen hat Seebeck recht behalten. Bekanntlich pflegen wir jeden zusammengesetzten Klang nach der Tonhöhe seines Grundtones aufzufassen und zu benennen. Zur Erklärung verweist Helmholtz (17, 497; 21, 97) auf die überwiegende Stärke des Grundtones. Dem gegenüber betont Pipping (43, 535), dass »diejenigen Klänge, welche unser Ohr am häufigsten treffen, die Vocalklänge oft, ja bei männlichen Stimmen vielleicht in der Regel nur sehr schwache Grundtöne haben«. Pipping ersetzt deshalb die herkömmliche Theorie von der subjectiven Tonhöhe der Klänge durch folgende Hypothese: »Ein Klang von der Schwingungszahl n wird empfunden, sowie eine hinreichende Anzahl von Theiltönen vorhanden ist, deren Schwingungszahlen gerade Vielfache von n sind. Kein Theilton genügt an und für sich, um eine sichere Höhenempfindung hervorzurufen (Octaventäuschungen bei einfachen Tönen), und keiner, auch nicht der

Grundton, ist zu diesem Zweck unentbehrlich«. Die Obertöne verstärken nach Pipping nicht, wie Seebeck meinte, den Grundton, sondern den Gesamtklang. Diese neue Theorie der Klangauffassung wird ohne weitere Erklärung hingestellt und durch Pipping's Beispiele meines Erachtens nicht ausreichend unterstützt. Aber Pipping selbst weist einige Male, wiewohl zaghaft, auf den Factor hin, der mir der wesentliche und entscheidende zu sein scheint: selbst da, wo man aus einem zusammengesetzten Klange den Grundton objectiv beseitigt, ist dieser Ton jederzeit als Differenzton mehrfach vorhanden, denn alle aufeinander folgenden Obertöne stehen paarweise um seine Schwingungszahl von einander ab. Pipping unterscheidet zu wenig das Resultat der physikalischen Klanganalyse von der thatsächlich wahrgenommenen Empfindungsstärke der Theiltöne. Die dem Grundton entsprechende objective Schwingungscomponente kann eine sehr geringe Amplitude besitzen, ja vielleicht ganz fehlen, und doch der entsprechende (gleich hohe) Differenzton in Folge seiner Vervielfältigung und als tiefster Ton des Klanges für die Empfindung der stärkste Theilton sein.

Auf ähnliche Weise erklärt sich das Ergebniss des bekannten Versuches, den ein Freund Ohm's nach dessen Aufforderung anstellte (16, 16). Er strich auf der Violine einen Ton (n) und dessen Octave ($2n$) zugleich an und ließ danach plötzlich n oder $2n$ allein erklingen. Der höhere Ton schien, wenn er allein übrig blieb, stärker zu werden. Der tiefere dagegen war in diesem Falle »recht fühlbar geschwächt«. Ich habe das Experiment an verschiedenen Instrumenten mit dem gleichen Erfolge wiederholt. Das Stärkerwerden von $2n$ begreift man am einfachsten durch die gewöhnliche Erfahrung, dass im Zusammenklange jeder Theilton jedem anderen etwas von seiner physiologischen und psychologischen Energie raubt. Die viel deutlichere und erstaunliche Abschwächung des allein zurückbleibenden Grundtones aber beruht zweifellos darauf, dass im Zusammenklange mindestens ein Differenzton D_1 ($= D_3 = D_4$ etc.) verstärkend mit ihm zusammenfällt. Sie ist sofort geringer, ja bald unmerklich, wenn man die beiden Octaventöne unrein wählt. Auch dies hebt bereits Ohm hervor (16, 17); er lässt jedoch den völlig zureichenden Factor der Differenztöne außer Betracht und bricht die ganze Erörterung kurz ab, weil er hier »wie der Blinde von der Farbe« rede.

Die Unterbrechungs- und Variationstöne.

Koenig hat zu Gunsten der Young'schen Theorie die Unterbrechungstöne angeführt, die dann entstehen, wenn ein gegebener Ton innerhalb gewisser zeitlicher Grenzen regelmäßig abgeschnitten und wieder zugelassen oder abgeschwächt und wieder verstärkt wird; ihre Tonhöhe entspricht genau der Zahl der Unterbrechungen oder periodischen Stärkeschwankungen. Ohm und Helmholtz kannten solche Unterbrechungstöne sehr wohl; aber sie waren offenbar der Ueberzeugung, dass es dabei regelmäßig auch zur Entstehung einer pendelförmigen Componente von entsprechender Schwingungszahl komme. Diese nächstliegende Annahme müsste erst widerlegt werden, wenn man, wie das seit Koenig immer wieder geschieht, die Ohm'sche Definition des Tones und Helmholtzens Hörtheorie wegen der Unterbrechungstöne bekämpfen will.

Deutlicher als diese Töne sind bei ihrer Erzeugung gewöhnlich die sogenannten Variationstöne, $n + m$ und $n - m$, wo n die Schwingungszahl des unterbrochenen Tones, m die Zahl der Unterbrechungen darstellt. (Litteratur bei Stumpf 32, 343; dazu Meyer 46, 205). Auch solche Variationstöne hat Koenig beobachtet; ich selbst habe mich wie andere von ihrem Dasein überzeugt und sie, namentlich den tieferen, oft stärker gefunden als den Unterbrechungston. Helmholtz berichtet in der 16. Beilage der Lehre von den Tonempfindungen (21, 661) über einen hierher gehörigen Versuch mit Unterbrechung eines Stimmgabeltones durch die Doppelsirene. Er stellt die dabei aufgetretenen Töne $n + m$ und $n - m$ in eine Reihe mit den objectiven Combinationstönen, die er an der Doppelsirene beobachtet und deren mathematische Theorie er kurz zuvor entwickelt hat. Nun hebt neuerdings Schaefer (56, 510 f.) mit Recht hervor, dass die Rechnung in diesem Falle auch die Differenztöne $m = n - (n - m)$ und $2m = (n + m) - (n - m)$ ergibt. Danach wäre überall da, wo es zur Bildung der Variationstöne $n + m$ und $n - m$ kommt, der Unterbrechungston m als Differenzton 2. Ordnung begreiflich. Meyer's und meine gesicherten Beobachtungen über Differenztöne höherer Ordnung und ihre Unabhängigkeit von Obertönen unterstützen diese Auffassung.

Aber auch abgesehen von den Variationstönen, lassen sich die Unter-

brechungstöne in vielen Fällen als Differenztöne begreifen, nämlich überall da, wo durch die Art ihrer Erzeugung einige von den Tönen entstehen, deren Schwingungszahlen auf einander folgende Multipla der Schwingungszahl des Unterbrechungstones darstellen. Pipping (43, 538) erzeugte mit Hülfe einer Zahnradsirene voll zusammengesetzte Klänge mit periodisch wiederkehrender Unterbrechung. Als dominirend und sehr deutlich wurde die der Zahl der Unterbrechungen entsprechende Tonhöhe empfunden. Bei genauerer Analyse löste sich der Gesamtklang in eine Reihe harmonischer Theiltöne auf, deren Schwingungszahlen die auf einander folgenden Multiplen derjenigen des »Unterbrechungstones« darstellten. Besonders deutlich war darunter jeweils der Ton von der Schwingungszahl (was Pipping nicht hervorhebt) des tieferen Variationstones. Bei einer anderen Anordnung der Zähne entstanden Klänge mit einer geringeren Zahl harmonischer Theiltöne. Hier war der »Unterbrechungston« (43, 545) erheblich leiser und undeutlicher als bei den theiltonreichen Klängen. Daraus schließt Pipping, der sogenannte Unterbrechungston sei nichts als der Gesamtklang; denn wäre er mit dem Grundton identisch, so müsste er am undeutlichsten gehört werden, wo zahlreiche Obertöne vorhanden sind, am deutlichsten, wo die Obertöne spärlich sind. Dieser Schluss ist keineswegs stringent; die Thatsache der Differenztöne ist dabei übersehen. Aber auch wenn man Pipping's Theorie der Klanghöhe ablehnt, und selbst ohne Rücksicht auf die von Helmholtz theoretisch begründeten Variationstöne, begreift sich der »Unterbrechungston« als Differenzton seiner paarweise bennachbarten Multiplen, und zwar um so besser, je vollständiger die Reihe dieser Multiplen vorhanden ist.

Die neue Specialuntersuchung der Unterbrechungstöne von Zwaardemaker (58, 60) geht auf die beiden hier hervorgehobenen Möglichkeiten nicht ein, wonach diese Töne auch in solchen Fällen, in denen sie als Sinusschwingungen sich objectiv nicht sollten nachweisen lassen, als Differenztöne zu erklären sind. Trotzdem hält Zwaardemaker es nicht für erwiesen, dass durch sie der Resonatorenhypothese eine unüberwindliche Schwierigkeit erwüchse. Er bezeichnet mit Recht das Problem als ein vorzugsweise physikalisches und gibt selbst einige Andeutungen, wie man die Intermittenzöne im Sinne der Ohm-Helmholtz'schen Definition des Tones ableiten

könne. Aehnlich wie Pipping warnt Zwaardemaker davor, auf Grund noch umstrittener Thatsachen die mannigfach bewährte Resonatorenhypothese voreilig aufzugeben.

Die mathematische Theorie der complicirten Bewegungsvorgänge, die bei der periodischen Tonunterbrechung in der Luft entstehen, ist meines Wissens seit Helmholtz nicht weiter geführt worden. In keinem Falle wurde bisher der strenge Beweis geliefert, dass ein wahrgenommener »Unterbrechungston« weder als Differenzton erklärbar, noch auf eine in der Luft vorhandene pendelförmige Schwingungscomponente zurückführbar wäre. Diese Erscheinungen dürfen daher vorläufig gegen die Helmholtz'sche Theorie des Hörens nicht ins Feld geführt werden¹⁾.

Damit verliert aber auch die Hypothese Koenig's ihre wichtigste Stütze, wonach die multiplen Schwebungen unmittelbar durch die Maxima und Minima der Gesamtwelle entstünden. Nach der Helmholtz'schen Theorie des Hörens können Schwebungen nur entstehen, wo zwei benachbarte Töne zugleich gegeben sind. Thatsächlich konnte ich nicht nur die Schwebungen der verstimmten Multiplen, sondern alle überhaupt festgestellten Schwebungsarten in dieser Weise auf verstimmte Primen zurückführen, indem ich die beteiligten Töne ermittelte und weiter verfolgte. Koenig hat, wie früher erwähnt, die Tonhöhe der Schwebungen im allgemeinen nicht beachtet. Die Mehrzahl seiner Schwebungsbeobachtungen lässt sich nach Analogie der meinigen auf (theilweise unanalysirte) Differenztöne zurückführen; in einigen Fällen, nämlich bei den multiplen Schwebungen der weitesten Intervalle, wirkten höchstwahrscheinlich

1) Die vorliegende Arbeit war bereits abgeschlossen, als mir durch die Freundlichkeit des Herrn Schaefer dessen in Gemeinschaft mit Abraham angestellte »Studien über Unterbrechungstöne« bekannt wurden (inzwischen erschienen: 60, 207). Die Unterbrechungstöne wurden dabei auf die beiden bisher am häufigsten angewendeten Arten erzeugt: einmal in der Dennert'schen Weise mit angeblasenen rotirenden Scheiben, die in kreisförmiger Anordnung einen periodischen Wechsel von undurchschlagener Fläche und von gleich großen, gleich weit von einander entfernten Löchern boten; ferner nach dem Vorgange Koenig's mit Löchern von periodisch zu- und abnehmender Größe. In beiden Fällen wurde der »Unterbrechungston« durch einen auf ihn abgestimmten Resonator erheblich verstärkt und demnach als objective pendelförmige Componente in der gesammten Schwingungsbewegung nachgewiesen. Die Unterbrechungstöne der ersten Art waren von Obertönen begleitet.

Obertöne mit, die einander oder dem höheren Primärtone nahelagen oder mit anderen Theiltönen entsprechende Differenztöne bildeten.

Alle Schwebungen sollen nach Koenig bei bestimmten Frequenzen in Töne, die sogenannten Stoßtöne, »übergehen«. Diese alte Anschauungsweise erscheint ja sehr einfach und naheliegend angesichts der Thatsache, dass bei größerer Schwebungsfrequenz stets auch (zunächst neben den Schwebungen) ein Combinationston auftritt, dessen Schwingungszahl der Zahl der Schwebungen gleich ist; aber bei genauem Zusehen verliert sie erheblich an Bestimmtheit und einleuchtender Kraft. Hermann, der sich ihr eine Zeit lang zugeneigt hatte (35, 514), erklärt sie in einer seiner neuesten Abhandlungen (36, 493) für undurchführbar: »Koenig hat zwar die sehr glückliche Ausdrucksweise gefunden, dass das Ohr jede Art von Periodik innerhalb gewisser Frequenzgrenzen als Ton wahrnimmt. Aber worin soll die wahrgenommene Periodik beim Zusammenklingen mehrerer Töne bestehen? Es können doch nur die Durchgänge durch die Gleichgewichtslage oder die Gipfel der Curve, d. h. die Richtungswechsel der Bewegung gezählt werden. Aber schon beim Zusammenklingen eines Tones mit seiner Octave können, wenn letztere eine hinreichend große Amplitude hat, Durchgänge und Gipfel entstehen, deren Zeitabstand mit dem Amplituden- und Phasenverhältniss wechselt, und welche also zu einem wahren Gewirr von Tönen Anlass geben müssten. Schon dies zwingt uns, eine Zerlegung der Bewegung nach dem Resonanzprincip anzunehmen; nur so werden diese zufälligen Durchgänge und Gipfel ohne Einfluss bleiben und beide Primärtöne rein auf das Ohr wirken.« Dass Phasenverschiebung der Primärtöne die Zahl und Qualität der wirklich hörbaren Combinationstöne verändere, hat noch niemand behauptet, und es ist nach allen bisherigen Erfahrungen höchst unwahrscheinlich. Auch das Stärkeverhältniss der beiden Töne hat, wie ich aus Erfahrung sagen kann, keinen derartigen Einfluss. Nur wenn einer der Töne übermäßig laut ist, pflegen die leisesten und undeutlichsten Combinationserscheinungen unmerklich zu werden. Aber dieselbe Wirkung hat eine maximale Intensität beider Primärtöne. Auch ist es bekannt und aus allgemeinen psychologischen wie physiologischen Gründen wohl begreiflich, dass überall ein schwacher akustischer Theilinhalt von gleichzeitig erheblich stärkeren leicht unterdrückt wird. Eine Aenderung

der herausanalysirbaren Tonhöhen habe ich bei Aenderungen des primären Verhältnisses nie bemerkt.

Für »Stoßtöne« von höherer Schwingungszahl kann die Schwebungstheorie sich nicht mehr auf die Analogie wahrnehmbarer Tonstöße berufen. Da ist sie wiederum ausschließlich auf die Form der Gesamtwelle angewiesen; und dem steht eben vor allem die unbezweifelbare Einflusslosigkeit der Phasenänderung entgegen. Außerdem fragt Schaefer (56, 513) mit Recht, welche Theile der Curve denn für den Stoßton-Impuls sollen in Anspruch genommen werden. Die absolute Höhe und Breite des mittelsten Gipfels wechsele von Fall zu Fall, und das der Differenz der Schwingungszahlen entsprechende »periodische Wachsen und Kleinerwerden der einzelnen Gipfel, das freilich äußerlich an eine Sinuscurve erinnert«, ist (wie ich nach meinen Zeichnungen bestätigen kann) nicht einmal dann regelmäßig nachzuweisen, wenn man für die Primärtöne gleiche Amplituden und gleiche Anfangsphasen annimmt. Einen Differenzton höherer als erster Ordnung irgendwie aus der Curve herauszulesen, ist mir noch nie mit Sicherheit gelungen. Aber selbst wenn man sich zunächst auf den 1. Differenzton beschränkt, und die scheinbar einfache Annahme zulässt, dass die periodisch wiederkehrenden Maxima der Gesamtcurve einen ihrer Frequenz entsprechenden Ton erzeugten, muss noch willkürlich entschieden werden, — eine Frage, die erst Meyer (48, 39) aufgeworfen hat —, ob man die absoluten oder die positiven Maxima, d. h. die absolut oder die relativ größten Druckschwankungen zählen soll. In vielen Fällen ergibt nur die zweite, in anderen nur die erste Methode die gesuchte Schwebungs- und »Tonstoß«-frequenz.

Schließlich ist noch ein Bedenken beachtenswerth, das Pipping (43, 539) gegen die ganze Theorie vom Toncharakter jeder beliebigen Schwingungsperiodik erhoben hat. Jede Periode von der Schwingungszahl n stellt ja ohne weiteres auch Perioden von den Schwingungszahlen

$\frac{n}{2}$, $\frac{n}{3}$, $\frac{n}{4}$ u. s. w. dar. Es müsste also nach jener Theorie

neben jedem Tone die ganze Reihe seiner harmonischen Untertöne hörbar sein, was thatsächlich nirgends der Fall ist (vergl. unten S. 275).

Koenig hielt die Entstehung der Stoßtöne aus Schwebungen für sehr einfach und für vereinbar mit der Resonanzhypothese.

Helmholtz selbst war anderer Meinung. Gelegentlich der Discussion der Lummer'schen Versuche wies er auch aus physiologischen Gründen diese Annahme zurück. Dafür, dass »ein Wechsel starker und schwacher Nervenirregungen als Ton wirke«, sei »nicht die geringste Analogie in anderen Nerven zu finden«.

b. Voigt's Versuch einer mathematischen Ableitung der Combinationstöne.

Die Koenig'sche Anschauung, dass jede periodisch zu- und abnehmende Schwingungsbewegung der Luft einen Ton bedinge, hat W. Voigt einer mathematischen Theorie der Combinationerscheinungen zu Grunde gelegt (31, 652 f.), ohne die Resonatorenhypothese fallen zu lassen, aber mit ausdrücklicher Zustimmung zu der Theorie der Schwebungstöne. Die rein physikalische Betrachtung der Stimmgabelschwingungen, woraus, wie schon erwähnt wurde, weder für noch gegen Helmholtz etwas folgt, veranlasste ihn, die Störung der Superposition aufzugeben und an der linearen Schwingungsgleichung festzuhalten. Daraus leitete er rechnerisch sowohl Koenig'sche Stoßtöne ab (für den Fall, dass die lebendige Kraft des tieferen Primärtones die des höheren übertrifft), als auch Differenz- und Summationstöne (für den Fall annähernd gleicher lebendiger Kräfte). Aber die ganze Deduction beruht auf der alten, soeben zurückgewiesenen Voraussetzung, dass beliebige periodisch wiederkehrende Maxima der Gesamtcurve einen Ton entstehen ließen, womit Voigt, ohne es ausdrücklich zu bemerken, die Ohm-Helmholtz'sche Zerlegungstheorie aufgibt.

Uebrigens kommt Voigt auch so nur zu einem fragwürdigen Begreifen der Combinationstöne. Bezüglich der Summationstöne gibt er zu (31, 657): »Selbst bei den im Obigen gemachten, wie wir sehen werden günstigen Annahmen erscheint ihre Beobachtung, im Falle die primären Töne das Intervall der Quinte, Quarte und Terz besitzen, fast ausgeschlossen, bei großer Sexte und Duodecime sehr fraglich«.

c. Die Theorie der directen Erregbarkeit des Hörnerven (Wundt).

Gestützt auf die mathematischen Erörterungen Voigt's und auf verschiedene Beobachtungen, schlug Wundt (39, 641; 38, 477) folgende Erweiterung der Helmholtz'schen Hörtheorie vor. Die Wahrnehmung primärer Töne und der leisen Combinationstöne sei nach der ursprünglichen Resonatorenhypothese zu erklären. Aber der vor seiner Endausbreitung unmittelbar von harten, knöchigen Wänden umschlossene Hörnerv sei auch ohne Vermittelung des Corti'schen Organes direct durch Kopfknochenleitung erregbar. So entstünden die Koenig'schen Stöße und bei genügender Frequenz die Stoßtöne durch directe intermittirende Reizung des Nerven. Die gleichzeitige, gesonderte und bestimmte Wahrnehmung einer Tonmehrheit sei auch hier nicht ausgeschlossen: da (38, 477) »die Tonempfindung, die eine Hörnervenfaser vermittelt, nicht nur von der Zahl der sie in der Zeiteinheit treffenden Impulse, sondern auch davon abhängen wird, ob sie durch einen Ton mehr oder weniger leicht angesprochen werden kann, so wird selbst dann, wenn eine diffuse Tonmasse direct auf den Hörnerven einwirkt, bis zu einem gewissen Grade eine Sondernung der Tonempfindungen entstehen können, indem jede Faser durch diejenigen Oscillationen vorzugsweise erregbar ist, die in Folge des Zusammenhangs ihrer Endigungen mit bestimmten resonanzgebenden Theilen der Schnecke ihre gewöhnlichen Erreger sind.«

Ueber die physiologisch-anatomische Seite dieser Hypothese wage ich auf Grund des bis jetzt vorliegenden Thatsachenmaterials kein bestimmtes Urtheil. Wundt verweist in erster Linie auf die sogenannten centralen Schwebungen, ferner auf die Ewald'schen und seine eigenen (40, 496) Schallversuche an labyrinthlosen Tauben. Indessen sind über diese beiden Fragen die Acten noch nicht geschlossen, und Wundt selbst hält weitere Experimente für dringend wünschenswerth. Bei der Untersuchung der anscheinend binauralen Schwebungen ist es bekanntlich sehr schwierig, Knochenleitung von einem Ohr zum anderen auszuschließen. Gegen die Versuche, an operirten Thieren den bloßgelegten Hörnerven direct zu reizen, wird immer wieder eingewendet, dass die beobachteten Reactionen der

Thiere auf unvermeidliche Tastreize hin erfolgten (Litteratur bei Meyer 46, 215); sind aber auch, was sich nicht mit Sicherheit bestreiten lässt, in einigen Versuchen Ewald's und Wundt's die Reactionen von Schallreizen als solchen ausgelöst worden, so bleibt naturgemäß jedes genauere Verhältniss der erschlossenen sensiblen Vorgänge zu den Reizen problematisch. Die Schwierigkeit, welche Theile der Gesamtcurve für die in Frage stehenden Töne als maßgebend gelten sollen, erhebt sich auch gegen die Wundt'sche Theorie. Zählt man alle Schwingungsmaxima, so ergeben sich, wie Hermann wiederum einwendet, oft zu viele und thatsächlich nicht vorhandene Töne. Sucht man eine sinusähnliche Ab- und Zunahme der Gipfel in der Curve, so findet man, abgesehen von der Unbestimmtheit dieser Vorstellungsweise, meist zu wenig Töne, nicht einmal in jedem Falle die primären Stoßtöne Koenig's.

Der Hauptgrund, weshalb Koenig die Schwebungstheorie theilweise wiedereinführte, lag für ihn in seiner fundamentalen Unterscheidung zwischen Stoßtönen und Differenztönen. Auch Wundt hebt diesen Gegensatz stark hervor; ihm war es vorzugsweise darum zu thun, die Koenig'schen Beobachtungen physiologisch begreiflich zu machen, einschließlich des behaupteten Phaseneinflusses auf die Klangfarbe. Ich konnte nun (vgl. oben S. 237 ff.; 249) auf Grund vollständigerer Analysen die Beobachtungen Koenig's mit den meinigen einfacher zusammenfassen und den Unterschied zwischen Stoßtönen und Differenztönen, zwischen multiplen Stößen und Differenztonschwebungen, soweit er unmittelbar auf Thatsachen der Wahrnehmung bezogen wurde, aufheben. Als ich Herrn Geh. Rath Wundt hierüber berichtete, erkannte er mein Ergebniss als eine wichtige Vereinfachung in der Beschreibung der Erscheinungen an. Man darf zweifeln, ob er danach und nach den neuesten negativen Befunden Hermann's hinsichtlich der Phasenfrage seine physiologische Hülfs-hypothese zum Verständniss der sogenannten Stoßtöne noch für nothwendig halten wird.

In verschiedenen Zusammenhängen hat Wundt gegen die beinahe mystische Anwendung opponirt, die Helmholtz von dem Princip der specifischen Sinnesenergien für die Physiologie des Hörens macht. Nach Wundt ist das Entscheidende bei der Tonwahrnehmung nicht eine ein für alle Mal gegebene Prädisposition jedes peripheren Ner-

venelementes, noch weniger sein anatomischer Ort, sondern die Form des Reizungsvorgangs und im Ohre dessen Aufnahme von bestimmten Resonatoren. Jede Nervenendigung hat sich erst allmählich an die ihr besonders häufig zugeleiteten Reize physiologisch angepasst. Die Consequenz ist eine gewisse Breite der Erregbarkeit jeder nervösen Endfaser, wie sie, abgesehen von allgemeinen Gründen der Empfindungs- und Entwicklungslehre, durch die Thatsachen des Hörens gefordert wird. Diese Auffassung des Verhältnisses zwischen Reiz und Nervenprocess bleibt auch dann nothwendig, wenn man die Entstehung aller Combinationerscheinungen oder jede akustische Erregung des Hörnerven überhaupt als durch das Labyrinth vermittelt annimmt.

Das Resonanzprincip kommt bei Wundt, wie die vorhin citirten Sätze zeigen, mittelbar auch für die Combinationstöne zur Geltung, die er durch directe Reizung des Acusticusstammes erklärt.

Die Koenig'sche Unterscheidung zwischen Stoßtönen und Differenztönen und ihre scheinbare mathematische Begründung durch Voigt ist in zahlreiche neuere Darstellungen unseres Gegenstandes ohne Kritik übergegangen, so z. B. in die werthvolle Akustik von Melde in Winckelmann's Handbuch der Physik. Selbst Hermann, der auf die Inconsequenz der Voigt'schen Theorie zuerst hingewiesen hat, misst in demselben Zusammenhange der fraglichen Unterscheidung eine große theoretische Bedeutung bei (35, 500).

d. Hermann's Theorie des phasenwechselnden Mitteltones.

Hermann verwirft vorzüglich auf Grund der Intensitätsverhältnisse die Helmholtz'sche Erklärung der subjectiven Differenztöne. Er findet eine Lösung dieser und anderer Schwierigkeiten in folgender, experimentell gestützter Ueberlegung (36, 485 f.). Die combinirte Curve, die der Interferenz zweier einfacher Töne n und n' von gleicher Amplitude entspricht, zeigt in gleichen Zeiträumen Durchgänge durch die Gleichgewichtslage und stellt eine annähernde Sinuscurve dar für die Schwingungszahl $\frac{n + n'}{2}$, gleich dem arithmetischen Mittel der beiden primären Schwingungszahlen (vgl. schon Koenig's

»son moyen« 25, 143). Dieser Mittelton kann seinerseits nicht leicht zur Wahrnehmung gelangen, vor allem deshalb, weil er an der Grenze je zweier Perioden seine Phase wechselt. Hier treffen regelmäßig zwei Thäler zusammen, die Mitteltoncurve wiederholt sich in genau symmetrischer Weise, aber mit entgegengesetzter Folge von Berg und Thal, und der auf den Mittelton abgestimmte Resonator würde in jeder Periode mit entgegengesetzter Phase erregt werden; wobei zu beachten ist, dass zwischen zwei Phasenumkehrungen relativ sehr wenige Schwingungen des Mitteltons erfolgen, namentlich bei weiterem Abstände der Primärtöne (beim Ganzton $8\frac{1}{2}$, bei der großen Terz $4\frac{1}{2}$, der Quinte $2\frac{1}{2}$, der Octave $1\frac{1}{2}$; allgemein $\frac{n + n^1}{2(n^1 - n)}$ Schwingungen).

Einige musikalische Mitarbeiter Hermann's haben trotzdem »in vielen Fällen« einen Ton von der erwarteten, ihnen zuvor meistens unbekannt gewesenen Schwingungszahl zu hören angegeben; Hermann selbst glaubte nur in einigen wenigen Fällen ihn zu hören. Durch Resonatoren wurde er nicht verstärkt. In der Regel wird aus den angeführten Gründen der Mittelton seinen Resonator im Labyrinth nicht hinreichend erregen, um selbst zur Empfindung zu kommen. Aber er ist — nach Hermann — nicht völlig wirkungslos. Durch seinen periodischen Phasenwechsel und das gleichzeitige Auf- und Niederschwanken seiner Amplitude werde vielmehr ein tieferer, auf diese Periodicität abgestimmter Resonator erregt. Jeder Resonator wirke auf seine Acusticusfaser nicht direct, sondern durch Vermittelung einer Nervenzelle, und jede dieser »Zählzellen« sei mit allen Resonatoren functionell verbunden.

An der Zahnradsirene stellte Hermann durch verschiedene Anordnung der Zähne fest, 1) dass ein Ton noch gehört werden kann, wenn regelmäßig nach etlichen Schwingungen (bis zu 4 im Minimum) seine Phase sich umkehrt; und 2), dass dabei, ähnlich wie bei periodischen Intermittenzen, ein Ton entstehen kann, dessen Schwingungszahl gleich der Zahl der Phasenumkehrungen ist. Demnach erklärt Hermann jeden Differenzton durch den regelmäßigen Amplituden- und Phasenwechsel des Mitteltons derjenigen Primärtöne, als deren einfache Differenz der Differenzton aufzufassen ist. »Der Tartini'sche Ton ist der Intermittenzton des Mitteltones.«

Das Resultat der Hermann'schen Sirenenversuche fand Meyer

(46, 199) in allem Wesentlichen bestätigt, als er an derselben Zahnradsirene die Versuche wiederholte, als er ferner durch eine Lochsirene mit entsprechend angeordneten, gleich großen Löchern phasenwechselnde Töne erzeugte, und ebenso bei langsamer Rotation einer Löcherscheibe, durch die eines continuirlichen Pfeifentones Phase und Amplitude periodisch geändert wurde. Aber Meyer macht auf den wichtigen Umstand aufmerksam, dass im ersten Falle die Größe der Luftstöße jeweils dieselbe blieb, und dass auch bei der zweiten Methode, langsame Rotation der Scheibe vorausgesetzt, die mittleren Schwingungen jeder Periode gleiche Amplitude besaßen, während erst nahe an den Stellen des Phasenwechsels die Amplitude abnahm. Auch die phasenwechselnden Töne, die Hermann durch die Zahnradsirene erhielt, waren von gleich bleibender Amplitude. Der Mittelton seiner Theorie müsste dagegen von der Mitte bis zu den Grenzen jeder Periode stetig zwischen einem Maximum der Amplitude und Null schwanken. Bei schnellerer Umdrehung der Scheibe nähert sich das zweite Meyer'sche Verfahren mehr und mehr diesen Bedingungen. Dann aber treten die beiden Variationstöne immer mehr gegen den phasenwechselnden Ton hervor und bleiben schließlich allein übrig, während dieser verschwindet. Schon vor Meyer hat Pipping (43, 524; oben S. 261; cfr. dazu Hermann, Pflüg. Arch. Bd. 61, S. 198, 1895) mit einer von der Hermann'schen etwas abweichenden Zahnradsirene phasenwechselnde Schwingungen hergestellt: er hörte unter anderen die beiden Variationstöne, aber nicht mit Sicherheit den phasenwechselnden Ton. Hermann kann zwar gegenüber den zuletzt erwähnten Meyer'schen Versuchen sich darauf berufen, dass mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit der Löcherscheibe immer weniger Schwingungen des phasenwechselnden Tones auf eine Periode kommen; die Beobachtungen müssten in dieser Richtung noch fortgesetzt werden. Indessen bleibt es ein schwerwiegender Einwand gegen die Mitteltontheorie, dass die Existenz des phasenwechselnden Tones um so unsicherer wird, je genauer die experimentellen Bedingungen mit denen der Theorie übereinstimmen.

Was die Wahrnehmung des Mitteltons selbst angeht, so weist Meyer (46, 197) darauf hin, dass Octavenverwechselungen mit Obertönen dabei sehr nahe liegen. Von anderen Akustikern sind niemals

Beobachtungen mitgetheilt werden, die die Annahme eines wahrnehmbaren Mitteltones nothwendig machten. Der von Stumpf zuerst beschriebene, von mir genauer untersuchte Zwischenton findet sich nur bei engen Intervallen, höchstens bis zur kleinen Terz. Er wird von Stumpf völlig zureichend nach der reinen Zerlegungstheorie und Resonanzhypothese erklärt (32, 484; cf. die folgenden Seiten 272 ff.). Diese Erklärung stützt sich auf die wohlbegründete Annahme, dass jeder einfache physikalische Ton eine ganze Anzahl benachbarter Nerven-elemente erregt (wobei man den Begriff der Nachbarschaft sich beliebig ins Functionelle umdenken kann), und dass die beiden Erregungszonen der primären Töne theilweise übereinander greifen; die mehr oder weniger sinusähnliche Mitteltoncurve kommt dabei als solche gar nicht in Betracht.

Die theoretische Deduction Hermann's geht von dem Ausnahmefalle gleicher Amplituden der Primärtöne aus. In allen anderen Fällen weicht, wie Hermann selbst hervorhebt, die Schwingungszahl des Mitteltones vom arithmetischen Mittel der primären Schwingungszahlen ab, und was bedenklicher ist: die Gipfel seiner Welle fallen dann nicht mehr in die Mitte zwischen zwei Durchgängen durch die Gleichgewichtslage, die Curve entfernt sich mehr und mehr von der Sinusform. Hermann deutet zwar an (36, 497), bei den von Helmholtz vorausgesetzten Resonatoren des inneren Ohres brauche man nicht nothwendig nur an mechanische Elasticität zu denken; er erinnert an den wellenförmigen Ablauf der Nerven-erregung und an die elektrischen Vorgänge, die den Gesetzen der linearen Elasticität analog verlaufen; er denkt an complementäre Schwankungen um einen nervösen Gleichgewichtszustand, an einen periodischen Wechsel zwischen einem Spaltungs- und einem synthetischen Restitutionsprocess (Dissimilation und Assimilation nach Hering). Auch mir ist es wegen der Kleinheit der in Frage kommenden anatomischen Gebilde höchst wahrscheinlich, dass die Resonatorenhypothese, falls sie alle übrigen Angriffe überleben wird, in diesem Sinne über die rein mechanische Auffassung hinaus entwickelt werden muss. Allein an der Zerlegung der combinirten Schwingungen genau nach dem Ohm'schen Principe muss so lange wie möglich festgehalten werden. Denkt man sich den einer einfachen Tonempfindung entsprechenden physiologischen Vorgang auch durch solche Schwingungen ausgelöst,

die erheblich von der Pendelform abweichen, so gibt man das Wesentliche der Helmholtz'schen Hörtheorie auf und damit das Verständniss zahlreicher Grundthatsachen der Klangwahrnehmung.

e. Ebbinghaus' Erweiterung der Resonatorenhypothese.
Zwischenton; Untertöne.

Der bis jetzt vorliegende Theil der Psychologie von Ebbinghaus (52) bricht leider gerade in der Darstellung seiner Theorie des Hörens ab, von der nur die Grundlinien bisher gegeben sind. Ebbinghaus hält im allgemeinen an der Helmholtz'schen Resonatorenhypothese fest, findet aber Schwierigkeiten 1) darin, dass man beim verstimmten Einklang Schwebungen auch dann noch wahrnehme, wenn die beiden Töne schon zu weit von einander entfernt seien, um einen Zwischenton zu erzeugen; 2) in der oben besprochenen Helmholtz'schen Erklärung der subjectiven Differenztöne (wegen der Intensitätsverhältnisse und, weil die Entstehung der Differenztöne dort nicht aus demselben Princip abgeleitet und nicht an denselben anatomischen Ort verlegt werde wie die der Schwebungen); 3) in der Thatsache der Unterbrechungstöne.

Der letzte Einwand ist, wie wir früher sahen, nicht zwingend; auch hat Ebbinghaus selbst vorläufig nur im allgemeinen die Tonunterbrechungen mit den Schwebungen in Parallele gesetzt.

Was den ersten Punkt angeht, die schnelleren Schwebungen, so ist zunächst zur Sache zu constatiren, dass die bisher vorliegenden spärlichen Angaben über den Zwischenton, selbst die ausführlichsten von Stumpf, den Thatbestand nicht ganz erschöpfen. Ich habe zahlreiche Versuche dieser Frage besonders gewidmet und das Wesentliche, sicher Festgestellte seinerzeit mitgetheilt (59, 323; 347; 365 f.). Danach ist in allen drei von mir untersuchten Tonlagen ein Zwischenton noch bei erheblich weiteren Intervallen zu vernehmen, als bis zu einer Schwingungsdifferenz der Primärtöne um einen Halbton (Stumpf, Ebbinghaus). Bei den engsten Intervallen, bis etwa 8 Schwingungen Distanz, hört man nur den Zwischenton (dem Grundton näher liegend). Weiterhin tritt zunächst der höhere, dann auch der tiefere Primärton neben ihm hervor. Aber bis etwa zur kleinen Secunde dominirt der Zwischenton. Er tritt im weiteren

mehr und mehr hinter die Primärtöne zurück, wird leiser und undeutlicher, auch in seiner relativen Lage zu den primären Tönen unbestimmter, ist aber stets bis jenseits der großen Secunde sicher nachzuweisen. Er verschwindet definitiv erst ganz nahe unterhalb der kleinen Terz. Auch die Schwebungen werden mit zunehmender Zahl, also mit zunehmender Erweiterung des Klanges immer leiser und undeutlicher. Die Grenze des Zwischentones liegt in der eingestrichenen Octave etwa bei $256 + 304$, in der zweigestrichenen bei $512 + 612$, in der dreigestrichenen Octave bei $1024 + 1216$; die entsprechenden Grenzen der Primenschwebungen: ca. bei $+ 308$, $+ 608$, $+ 1200$. Zwischen der kleinen und großen Secunde überwiegen die beiden primären Töne mehr und mehr, sodass man den auch in seinem Charakter unklaren, verschwommenen Zwischenton leicht überhört und die Schwebungen dann ausschließlich den benachbarten deutlich wahrgenommenen Theiltönen zuschreibt. Geübte Beobachter sagen an der Grenze des Zwischentongebietes nicht selten aus, ein Zwischenton sei als Ton nicht sicher zu behaupten, aber die Schwebungen lägen doch vorzugsweise zwischen den beiden Primärtönen.

Das alles erklärt sich aufs beste aus der von Stumpf in engem Anschluss an die Helmholtz'schen Anschauungen entwickelten physiologischen Theorie des Zwischentons. Jeder Ton erregt nicht eine isolirte Faser der Basilarmembran, sondern mit abnehmender Stärke auch eine gewisse Anzahl der zu beiden Seiten benachbarten. Die Breite dieser Erregungszonen konnte bis jetzt (auch von Helmholtz) nur vermuthungsweise abgeschätzt werden. Durch psychologische Beobachtung ist sie deshalb nicht exact zu begrenzen, weil den schwächsten physiologischen Erregungen keine Empfindungen mehr entsprechen, und weil ferner, wie die physikalische Erfahrung und die akustische Beobachtung lehren, alle von einer einfachen Tonwelle getroffenen Fasern im Rhythmus dieser Welle, der, wie wir annehmen, der mittelsten Faser am adäquatesten ist, mitschwingen. Beim ganz wenig verstimmten Einklang ist die von beiden Tönen gemeinsam erregte Zone breiter und stärker afficirt, als die von einem der Primärtöne allein getroffenen. Bei weiterer Entfernung der Primärtöne, also auch ihrer Erregungcentra, wird die gemeinsame Erregungszone immer schmaler, und die Intensität ihrer Erregung immer geringer. Es muss bald eine Grenze

erreicht werden, wo jeder der beiden Primärtöne für sich stärker zur Geltung kommt, als der Zwischenton. (Der tiefere Primärton tritt deshalb später deutlich für sich hervor, weil dicht unter ihm die hohen Differenztöne entstehen). Es muss weiterhin eine Grenze geben, wo die beiden Primärtöne zwar noch eine schmale Zone gemeinsam erregen, aber nur mehr so schwach, dass der Zwischenton zunächst in seiner Qualität unbestimmt wird und schließlich für die Empfindung verschwindet. Ich hebe noch hervor, dass sicherlich jenseits der kleinen Secunde die Stärke und Deutlichkeit des Zwischentones rascher abnimmt, als die der Schwebungen. Aber es ist ja bekannt, dass man oft leise Schwebungen noch wahrnimmt, während die schwebenden Töne bereits theilweise oder ganz unmerklich sind. Dazu kommt, was bisher niemand beachtet zu haben scheint, dass bei der verstimten Prime unterhalb des Grundtons sofort die hohen Differenztöne D_2, D_3, D_4 bis D_x hervortreten, die mit einander und dem Grundtone sämmtlich paarweise die gleichen Schwebungen ausführen, wodurch deren Stärke und Deutlichkeit natürlich gesteigert ist, während die der Theiltöne schon durch ihre Mehrheit, die Deutlichkeit jedes einzelnen auch durch die Nachbarschaft der anderen vermindert wird.

Am schwersten wiegt unter den von Ebbinghaus gegen Helmholtz erhobenen Einwänden offenbar der (oben bereits als berechtigt anerkannte) Widerspruch gegen Helmholtzens Erklärung der subjectiven Differenztöne: sie müssten danach viel leiser sein und dürften nur bei viel stärkeren Primärtönen auftreten, als der Fall ist.

Ebbinghaus fordert zunächst, wie Wundt, eine Erweiterung des Principis der specifischen Energien. Er lehrt ferner: nicht nur, dass jeder Resonator, in abnehmendem Maße, auch auf die seiner Eigenschwingung nahekommenden Schwingungsrhythmen anspricht; jeder Resonator schwingt — und hierin liegt der Kern der Theorie — auch dann, unter Bildung von Knotenpunkten, mit, wenn solche Tonwellen ihn treffen, deren Schwingungszahl ein ganzes Vielfaches seiner Eigenperiode beträgt; und die zugehörigen Nerven-elemente reagiren auch auf diese Rhythmik als auf eine Tonerregung. Umgekehrt also: jede einfache Tonwelle erregt außer dem auf sie als Grundton abgestimmten Resonator auch, in abnehmendem Maße und bis zu einer gewissen Grenze, die Resonatoren der harmonischen Untertöne ($\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}$ u. s. f. der Schwingungszahl des objectiven Tones).

Helmholtz hat in der XI. Beilage seiner Tonlehre (21, 650) die theoretische Möglichkeit angedeutet, dass eine Quersäule der Basilarmembran unter Bildung von Knotenpunkten und mit rasch viel kleiner werdender Amplitude auch auf die multiplen Töne mitschwingt. Er verweist dabei ausdrücklich auf die Riemann'sche Theorie der Untertöne, betont jedoch zugleich, dass beim Erklingen eines Tones seine harmonischen Untertöne thatsächlich nicht wahrzunehmen sind, und erklärt das durch die geringe Amplitude dieser Schwingungen, sowie vor allem durch die starke Dämpfung der Resonatoren, wodurch die Bildung von Knotenlinien sehr erschwert werde. Die Riemann'sche Theorie ist später von Stumpf (32, 264) unter Widerlegung der von Riemann angeführten physikalischen Analogien zurückgewiesen worden. Aus meinen Versuchen ergibt sich mit Sicherheit, dass die harmonischen Untertöne für die Empfindung nicht existiren; sonst hätten sie bei den eindringlichen Analysen und der großen Geübtheit der Beobachter unzweideutig müssen festgestellt werden. Statt dessen traten die der Untertonreihe eines der Primärtöne angehörigen Töne nie anders als im Zusammenklange auf und nur in den Ausnahmefällen, wo Differenztöne mit ihrem theoretischen Werthe zusammenfielen. Die von Stumpf gelegentlich zweifelnd geäußerte Möglichkeit (32, 218), es könnten die entsprechenden Nervenregungen unmerklich vorhanden sein, ist vorläufig nicht völlig zu widerlegen; aber sie wird unter anderem dadurch sehr unwahrscheinlich, dass in diesem Falle wenigstens Schwebungen eines benachbarten Differenztones häufig auch da zu erwarten wären, wo nach meinen Untersuchungen keine Spur davon zu hören ist (Untertöne des höheren Primärtones!).

Ich würde die Untertontheorie völlig übergangen haben, hätte nicht Meyer in einer Kritik der Ebbinghaus'schen Hypothese (47, 13; 48, 37) sie auch in diesem Sinne verstanden, und Ebbinghaus in seiner Replik (53, 152) das unwidersprochen gelassen. Wollte man mit Riemann die Differenztöne unmittelbar als Untertöne der Primärtöne auffassen, so gewänne man dadurch allenfalls eine Erklärung einiger Differenztöne von consonanten Intervallen (zusammenfallende und dadurch verstärkte Untertöne beider Primärtöne); um so räthselhafter blieben alle die Differenztöne, d. h. die

große Mehrzahl der thatsächlich vorhandenen, die in keiner Weise als Untertöne zu berechnen sind.

Hinsichtlich der Resonatoren erklärt jedoch Ebbinghaus ausdrücklich (52, 320), was ja allein den physikalischen Erfahrungen über Resonanz elastischer Körper auf einen anderen als ihren Eigenton entspricht, die Untertonresonatoren führten sämtlich nichts anderes als die erregende (zu ihrer Eigenperiode multiple) Schwingung aus. Meyer hat hiergegen eingewendet, die Thatsache der Tonlücken würde dadurch unverständlich, denn für einen zerstörten Resonator oder eine außer Function gesetzte Nervenzelle müsste dann jederzeit eine ganze Anzahl weit abliegender Untertonresonatoren mit ihren Adnexen eintreten. Dem gegenüber weist Ebbinghaus mit Recht darauf hin, dass fast ohne Ausnahme bei den solcher Art Erkrankten die allgemeine Hörfähigkeit stark herabgesetzt ist, es könne sehr wohl die relativ schwache Erregung der Untertonresonatoren in diesem Falle unermöglich sein, für sich allein den erregenden Ton zur Empfindung zu bringen.

Aber was wird durch die Annahme von Ebbinghaus theoretisch gewonnen? Bei allen verstimmten Consonanzen kann man benachbarte Untertöne, also auch benachbarte Untertonresonatoren herausrechnen. Ließen sich von hier aus vielleicht die Schwebungen der über die Secunde hinausreichenden Dissonanzen erklären? Ebbinghaus hat zwar die Helmholtz'sche Anschauung fallen gelassen, wonach Schwebungen überall nur durch das Zusammenwirken nahe benachbarter Töne entstehen. Er leitet die Schwebungen mit Koenig unmittelbar aus der Form der combinirten Welle ab. Diese Ableitung würde, wie mir scheint, die hier in Frage stehende Annahme unnöthig machen, sie ist aber noch niemandem einwandfrei gelungen und von mir durch Thatsachen (Tonlage der Schwebungen u. a.) weiter erschwert worden. Dagegen könnte man versuchen, nach der Ebbinghaus'schen Theorie alle Schwebungen aus dem einfachen Princip von Helmholtz zu begreifen. Dasselbe Princip habe ich überall bestätigt gefunden, wo es überhaupt Schwebungen gab, aber in anderer Weise. Ich konnte ja, wie erwähnt, in jedem Falle zwei oder mehr einander oder dem Grundton benachbarte Differenztöne und die Schwebungen als ausschließlich ihnen zugehörig nachweisen. Diese Differenztöne weichen mit zunehmender Verstimmung der

Consonanzen immer weiter von den benachbarten Untertönen ab, die nur bei den reinen Consonanzen mit ihnen, wie mit einander, zusammenfallen. Die Untertonresonatoren sollen im Rhythmus des erregenden Multipulum schwingen; aber sie könnten vielleicht eine der Schwingungsdifferenz ihrer Eigentöne entsprechende Anzahl Schwebungen mit einander bilden. Unter dieser Voraussetzung erhält man für die sogenannten multiplen Schwebungen, der Octave, Duodecime, Doppeloctave, die richtigen Frequenzzahlen, die sich auch aus meiner Theorie der schwebenden Differenztöne ergeben. Für alle übrigen Schwebungsarten dagegen ergibt die Rechnung erheblich zu kleine Schwebungsfrequenzen. Die um drei Schwingungen verstimmte Quinte zum Beispiel, $200 + 303$, lässt zweifellos sechs Schwebungen hören, die ich auf Grund der Beobachtung stärker verstimmter Quinten und in Analogie zu allen übrigen Erfahrungen auf die um je sechs Schwingungen von einander entfernten Differenztöne D_1 , D_2 und D_4 zurückführe. Die hier vorausgesetzte Theorie der schwebenden Untertonresonatoren könnte nur auf die Untertöne 100 und 101 recurriren, wonach bei jenem Intervall nur eine Schwebung, bei jeder beliebigen Verstimmung eine 6fach zu kleine Schwebungszahl zu erwarten wäre. Bei der Quarte wird die nach nächstbenachbarten Untertönen berechnete Zahl von der Wirklichkeit regelmäßig um das 12fache, bei der großen Terz um das 20fache, bei der kleinen Sexte um das 40fache übertroffen u. s. w. Sie ist den Thatsachen gemäß bei allen Dissonanzen mit dem Producte aus den Verhältnisszahlen der nächstgelegenen Consonanz zu multipliciren; bei der verstimmten kleinen Terz mit $5 \times 6 = 30$, bei der großen Sexte mit $3 \times 5 = 15$ u. s. f.

Der Versuch, aus solchen Untertonerschwebungen Combinationstöne entstanden zu denken, wäre zwecklos; denn man käme dabei durchweg auf Töne, die thatsächlich nicht vorhanden sind, und die wirklich entstehenden Differenztöne blieben unerklärt.

Macht man für die Schwebungen der Untertonresonatoren die andere, näher liegende Annahme, dass ihre Zahl der Schwingungsdifferenz der erregenden Töne entspreche, so ergibt sich höchstens eine Verdoppelung des Problems und des Erklärungsprincipes. Wo Schwebungen von einer der Schwingungsdifferenz der Primärtöne entsprechenden Geschwindigkeit wirklich vorhanden sind, erklären sie sich zwanglos aus der Interferenz der primären Töne.

In seiner Beschreibung des rein Thatsächlichen schließt sich Ebbinghaus für die Schwebungen wie für die Differenztöne naturgemäß (1897) an die Beobachtungen Koenig's an. Er erklärt daher diejenigen Differenztöne, die thatsächlich die sogenannten multiplen Schwebungen bedingen, und allgemein die mit Koenig's Stoßtönen nicht zusammenfallenden Differenztöne für unerwiesen. Auf diese oben ausführlich widerlegten Annahmen brauchen wir nicht mehr einzugehen.

Gesetzt es gelänge, alle Arten Schwebungen ohne Berücksichtigung der Differenztöne zu erklären, so wäre die Theorie der Combinationerscheinungen noch keineswegs vollendet. Die »Entstehung der Differenztöne aus Schwebungen« wird durch Hinweis auf die Unterbrechungstöne nicht erklärt. Man kann ja ohne Zweifel jeden beliebigen Differenzton durch Veränderung des primären Klanges so lange vertiefen, bis zunächst neben ihm, dann statt seiner die dem theoretischen Werthe des Differenztones gleiche Zahl Schwebungen (an einem höheren Theile des Klanges) hervortritt. Aber diese zeitliche und numerische Uebereinstimmung beweist keinen directen Causalzusammenhang der Differenztöne mit den Schwebungen, sondern weist nur auf gesetzmäßig zusammenhängende Entstehungsbedingungen beider Erscheinungsreihen hin. Die Primenschwebungen erklären sich zureichend aus der Helmholtz'schen Theorie, und alle übrigen Schwebungsarten lassen sich auf eine in dem Klange enthaltene verstimmte Prime zurückführen. Besäßen wir eine befriedigende Theorie der Entstehung von Combinationstönen, so würden damit zugleich alle Schwebungen als nothwendig begriffen. Eine solche Theorie müsste womöglich, wie es immer Helmholtzens Tendenz war, die Summationstöne mit den Differenztönen zugleich umfassen.

3. Die Summationstöne und die subjectiven Obertöne.

Die von Koenig wieder eingeführte Lagrange-Young'sche Theorie der Schwebungstöne weist Helmholtz besonders auch aus dem Grunde zurück, weil sie über die Entstehung der Summationstöne keinen Aufschluss gibt. Diese früher unbekanntes Töne waren für ihn ein wesentlicher Grund, jene alte Theorie durch zwei neue

zu ersetzen, von denen die eine alle objectiven, die andere alle subjectiven Combinationstöne erklären soll. Seine Ableitung der subjectiven Combinationstöne stimmte noch darin mit den Thatsachen überein, dass sie für die Summationstöne erheblich geringere Amplituden ergab, als für die Differenztöne. Aber sie scheidert, wie wir sahen, an den Intensitätsverhältnissen der Differenztöne.

Die Anhänger der Schwebungstheorie haben verschiedentlich versucht, die Existenz besonderer Summationstöne aus der Welt zu schaffen, indem sie mit Heranziehung von Obertönen sie als Differenztöne erklärten; aber, wie auch Ebbinghaus (52, 309) zugibt, ohne überzeugenden Erfolg. Um einen Summationston als Differenz der Schwingungszahlen zweier Obertöne herauszurechnen, muss man im allgemeinen sehr hohe Obertöne in Anspruch nehmen; bei Zweiklängen, deren primäre Verhältnisszahlen sich um eine Einheit unterscheiden, muss man diese beiden mit der Verhältnisszahl des Summationstones multipliciren; z. B. bei der Quinte 2:3 [Su. 5] ist $5 \times 3 - 5 \times 2 = 5$, bei der großen Secunde [Su. $8 + 9 = 17$] $17 \times 9 - 17 \times 8 = 17$. Trotzdem diese Ableitung bei der großen Mehrzahl der an meinen Stimmgabeln sicher nachgewiesenen Summationstöne geradezu phantastisch ist, prüfte ich sie in der früher beschriebenen Weise bei mehreren Intervallen, wo ausnahmsweise tiefer liegende Obertöne in Betracht kommen könnten. Die Beseitigung eines der fraglichen Obertöne durch Interferenz bewirkte niemals auch nur eine Abschwächung des Summationstones. Rücker und Edser untersuchten die gleiche Frage für die von ihnen festgestellten objectiven Summationstöne bei Sirenenklängen (42, V), indem sie den Resonanzapparat auf die in Betracht kommenden Obertöne selbst und auf tiefer gelegene Obertöne einstellten: mit dem gleichen negativen Erfolge. Sie hoben mit Recht hervor, dass nach jener Theorie stets eine große Anzahl Differenztöne von Obertönen zu erwarten wären. Ihr empfindlicher Apparat reagirte indessen regelmäßig nur auf den 1. Differenzton und den Summationston der Primärtöne.

Mehrere Akustiker sind geneigt, nach dem Vorgange Roeber's (1856. Historisches bei Stumpf 32, 254; vergl. noch Preyer, 26 und 27), den Summationston in anderer Weise abzuleiten, nämlich als Differenzton 2. Ordnung aus dem Zusammenwirken des D_1 mit dem ersten Oberton des höheren Primärtones, $= 2n' -$

($n^1 - n$). Leider versäumte ich seinerzeit, auch auf diese näherliegende Hypothese die Interferenzprobe zu machen. Sie ist mir aber nach den zahlreichen übereinstimmenden Erfahrungen über die Unwirksamkeit der Obertöne bei meinen Stimmgabelversuchen, nach Interferenzversuchen Meyer's und auch nach den Feststellungen Rücker's und Edser's über objective Combinationstöne sehr unwahrscheinlich. Preyer, der jene Herleitung des Summationstones selbständig ermittelte und als seine Entdeckung in Anspruch nahm, gelangte durch wiederholte Versuche mit gedämpften Stimmgabeln schließlich (27, 135 f.) zu dem Ergebniss, dass der Ton auch dann zu hören ist, wenn alle Obertöne als ausgeschlossen gelten können, dass es also Summationstöne als eine selbständige Classe von Erscheinungen neben den Differenztönen gibt. Denselben Erfolg hatten gründlichere Versuche Meyer's mit Interferenz (46, 184). Der Summationston blieb sehr gut hörbar, wenn $2n$ ganz beseitigt war, und er übertraf nicht selten den ersten Differenzton, $n^1 - n$, erheblich an Stärke.

Stumpf sucht die Auffassung des Summationstones als eines secundären Differenztones im Sinne Roeber's durch folgende Beispiele zu unterstützen: »Müssten wir doch sonst bei dem Accord $e^1 e^1 g^1 e^2$, der durch die Zahlen 4 : 5 : 6 : 8 dargestellt ist, die Töne hören 9, 10, 11, 12, 13, 14, das heißt d^2, e^2 , ca. fis^2, g^2 , ca. as^2 , ca. ais^2 . Was sollte daraus werden, wenn z. B. in der Zauberflöte die Priester den herrlichen dreifachen B-dur-Accord in die Hörner stoßen?«

Diese Argumentation scheint mir nur die mit der Erfahrung übereinstimmende geringe Stärke und Deutlichkeit der Summationstöne zu bestätigen. Denn thatsächlich enthalten ja alle musikalischen Instrumente die von jener Theorie in Anspruch genommenen ersten Obertöne in beträchtlicher Stärke. Dass Summationstöne in gewissen Fällen wirklich störend werden können, ist nach meinen Beobachtungen nicht zu bestreiten. Bei meinen mittelstarken Stimmgabelzweiklängen empfanden die musikalischen Beobachter nicht selten einen Summationston als unangenehm dissonant, wenn er zu anderen gleichzeitigen Theiltönen in irrationalen Verhältnissen stand. Aber im allgemeinen war bei meinen, wie bei vielen früheren Versuchen der Summationston der leiseste der Theiltöne und nicht so regelmäßig zu hören, wie die Differenztöne erster bis vierter Ordnung.

Die meisten Beobachter konnten ihn nicht entdecken, wenn die Stimmgabeln sehr stark gestrichen wurden; einige Male schien er bei schwächster Tongebung am deutlichsten zu sein (anders Meyer, 46, 184). In den vollen Mehrklängen der Musik werden die Summationstöne von den zahlreichen Primär-, Ober- und Differenztönen, von denen die meisten durch vielfaches Zusammenfallen sich noch verstärken, wohl in der Regel für die Wahrnehmung ganz verdrängt. Immerhin wären weitere Versuche im Sinne der zuletzt erwähnten (Roerber'schen) Theorie erwünscht. Mit Hülfe der Interferenz lässt sich die physiologisch wichtige Frage endgültig lösen.

Das gilt freilich nur unter einer bisher stillschweigend angenommenen Voraussetzung: dass jeder physikalisch einfache Ton nur die seiner Schwingungszahl entsprechende Tonempfindung auslöst, nicht etwa zugleich einen größeren oder geringeren Theil seiner harmonischen Obertöne. Die entgegengesetzte Annahme wäre, wie ich nicht näher auszuführen brauche, für die Theorie der Combinationserscheinungen von erheblicher Bedeutung.

Die Möglichkeit subjectiver Obertöne ist vom Standpunkte der Resonanzhypothese principiell nicht zu bestreiten. Nach Helmholtz (21, 263) entstehen sie theoretisch dann, wenn die durch eine Sinusschwingung ausgelösten elastischen Kräfte zu den Entfernungen der schwingenden Theilchen aus der Gleichgewichtslage merklich unproportional werden, also nur bei großer Schwingungsweite. Einige Akustiker, darunter Koenig (vergl. oben S. 243), haben subjective Obertöne zur Erklärung von Combinationstönen herangezogen, aber ohne rechte Consequenz. Die theoretische Ableitung der entsprechenden Schwingungen ist ja unanfechtbar. Aber dadurch ist natürlich ihre psychologische oder auch nur physiologische Wirksamkeit noch nicht bewiesen. Helmholtz weist schon darauf hin, dass in jedem Falle die durch Störung der einfachen Superposition bedingten Obertonschwingungen lange vor dem Grundtone verschwinden müssen. Ferner sind hierbei viel einfachere physikalische Bedingungen vorausgesetzt, als das Ohr sie bietet. Stumpf hebt (32, 262) mit Recht hervor, es könnten leicht im Bau der mitschwingenden Organe Hindernisse für die Bildung multipler Schwingungen gegeben sein, wie Helmholtz sie für die Untertöne statuirt. Thatsachen, die die Annahme subjectiver Obertöne nothwendig machten, sind bisher nicht

festgestellt worden. Aus meinen Beobachtungen zu schließen, ist ihre Existenz ebenso unwahrscheinlich, wie die der Untertöne und Mitteltöne.

4. Neue Theorien des Hörens.

Die zahlreichen Schwierigkeiten, die man auf Grund der That- sachen in der Helmholtz'schen Hörtheorie fand oder zu finden vermeinte, legten den Gedanken nahe, statt mit Erweiterungen und Zusatzhypothesen, es mit einer völlig anderen Auffassung des physio- logischen Vorganges zu versuchen. Selbst Stumpf, dessen Ton- psychologie im allgemeinen auf dem Boden jener Theorie stand, und der alle dagegen erhobenen Einwände mit vorsichtiger Zurückhaltung behandelte, erklärt in einer seiner neuesten Veröffentlichungen ge- legentlich (34, 18 Anm.), die Resonanzhypothese werde »nicht wohl mehr zu halten sein«.

a. Meyer's Theorie der Wellenzerlegung.

Meyer gelangte unmittelbar durch das Studium der Differenz- töne (46) zu dem Versuche, die Physiologie des Hörens über Helmholtz hinaus weiterzubilden. Die Helmholtz'sche Erklärung der subjectiven Combinationstöne konnten auch wir nicht als befriedigend anerkennen. Von allen gegen die Resonatoretheorie erhobenen Einwänden bleibt dieser allein bei genauerem Zusehen übrig. Das gilt auch von den kritischen Ausführungen Meyer's. Sein Versuch (47, 19; 48, 43) »die Unmöglichkeit der Existenz von Resonatoren im Ohre« allgemein darzuthun, ist keineswegs überzeugend gelungen.

Die von Helmholtz als Resonatoren in Anspruch genommenen Fasern der Grundmembran sind im Vergleich zu ihren vorausgesetzten Eigentönen so klein, dass von vorn herein eine starke Belastung jedes dieser mitschwingenden Theilchen angenommen wurde, und schon Helmholtz hat diese nothwendige Annahme durch ana- tomische Thatfachen gestützt. Meyer findet die Längenver- schiedenheiten der Membranfasern im Vergleich zu dem Umfang der Tonwahrnehmung so gering und die dadurch geforderten Unter- schiede der Belastung so »colossal«, dass die Resonatoretheorie schon an ihren anatomischen Voraussetzungen scheitere. Thatsächlich

wächst die Breite der Membran von ihrem Anfange bis zum Ende nach Meyer selbst (48, 61) auf etwa das Sechsfache, nach Hensen's Messungen beim Neugeborenen (vergl. Helmholtz 21, 239) auf mehr als das Zwölffache. Die feinere Anatomie der Schnecke ist noch heute ziemlich dunkel. Physikalische und mathematische Untersuchungen über die Resonanz so kleiner und complicirter Gebilde, wie sie hier in Betracht kommen, fehlen bisher. Und andererseits ist eine rein mechanische Betrachtungsweise hier wie auf allen Gebieten der Nervenphysiologie zweifellos unzureichend, sind functionelle Verschiedenheiten der nervösen Elemente höchst wahrscheinlich.

Die gründlichen Untersuchungen Bezold's über Toninseln und circumscribte Taubheit (45) bildeten für Bezold selbst und wohl für viele andere ein wichtiges Argument zu Gunsten der Helmholtz'schen Hörtheorie. Meyer findet ganz im Gegentheil die »Unmöglichkeit der Existenz von Resonatoren im Ohre« dadurch bewiesen. Sonst hätten die Kranken, wo ein Grundton für sie in eine Hörlücke fiel, regelmäßig irgendwelche Obertöne hören müssen (vgl. oben S. 276). Nun hat aber Bezold festgestellt, dass die an partieller Taubheit Leidenden regelmäßig auch allgemein schwerhörig sind. Es ist also sehr wohl möglich, dass die schwachen Obertöne von Stimmgabeln ihnen auch dann unmerklich bleiben, wenn ihre Hörfähigkeit für die betreffenden Töne noch nicht völlig erloschen ist.

Endlich hält Meyer die Octavenschwebungen für unvereinbar mit der Resonanzhypothese, genauer: die Thatsache, dass bei der verstimmtten Octave der tiefere Primärton zu schweben scheint. Ich musste hier im Thatsächlichen widersprechen (oben S. 232 ff.), insofern Meyer diese Schwebungen an das Vorhandensein des Obertones $2n$ gebunden glaubt. Aber die Existenz des ersten Differenztones bei verstimmtten Octaven wird von ihm nicht bestritten. Thatsache ist, dass in allen diesen Fällen Differenztöne an den Schwebungen betheilig sind, und dass (wie Meyer selbst an anderem Orte hervorhebt) ein Differenzton mit jedem nahe benachbarten Tone genau wie ein primärer Ton schwebt. Meyer will eine Erklärung der Octavenstöße durch Differenztöne »nicht gelten lassen, so lange letztere nicht selbst erklärt sind«. Sein Einwand dürfte also ausschließlich dahin lauten: die Differenztöne sind mit der Resonatorenhypothese nicht zu vereinigen; — was zu beweisen wäre.

Meyer's eigene Theorie des Hörens (46—50) geht von der Thatsache aus, dass die membrana basilaris keine feste Wand, sondern eine dehnbare Membran ist, die innerhalb bestimmter Grenzen dem Druck der umgebenden Flüssigkeit wird nachgeben können. Jede positive Bewegung des Steigbügels wird zur Folge haben, dass die Membran sich ausbuchtet, und diese Ausbuchtung wird von der Schneckenbasis zur Schneckenspitze hin allmählich fortschreiten. Bei geringer Excursion des Steigbügels soll die Ausbuchtung auf den Anfang der Membran beschränkt bleiben, bei größerer Amplitude sich über einen größeren Theil der Membran erstrecken, so dass die Intensität eines empfundenen Tones von der Zahl der gereizten Nervenendigungen abhinge. Die Tonhöhe sei bedingt durch die Frequenz, mit der ein peripheres nervöses Endorgan periodisch bewegt werde. Hinsichtlich der Rückwärtsbewegung des Steigbügels nimmt Meyer an (47, 24; 48, 48), dass die entsprechende Zurückbewegung der Membran über deren Ausgangslage nicht hinausgehe; wegen ihrer unsymmetrischen Belastung sei es wahrscheinlich, dass die Membran thatsächlich nur nach einer Seite hin sich ausbuchte. (Die entgegengesetzte Annahme würde die ganze Theorie erheblich compliciren.) Ferner findet Meyer es sehr wahrscheinlich, »dass die membranösen Wände des Schneckenkanals als weiche, in Flüssigkeit gebettete, organische Körper, wenn sie aus ihrer normalen Lage durch äußere Kräfte verrückt worden sind, nur verhältnissmäßig langsam (erst nach mehreren Secunden) wieder in den alten Zustand zurückkehren werden, falls dies nicht wiederum durch äußere Kräfte geschieht.« Es wird daher angenommen, dass die Membran nur durch äußere Kräfte bewegt werde; sämtliche von der Theorie in Anspruch genommenen Theile werden als absolut unelastisch vorausgesetzt (50, 360). Jede beliebige die Steigbügelbewegung darstellende, zusammengesetzte Welle wird nun nach Meyer (50, 359) »vom Ohre so zerlegt, dass 1. die sämtlichen Hin- und Herbewegungen zur Wirkung kommen; dass 2. gleichzeitig auch alle, die übrig bleiben, wenn man die kleinste Hin- und Herbewegung vernachlässigt, einen zweiten Ton bedingen; dass 3. auch alle, die übrig bleiben, wenn man die nächstkleinste Hin- und Herbewegung vernachlässigt, einen dritten Ton bedingen u. s. w.«

Für alles Nähere sei auf die mehrfachen Originaldarstellungen

Meyer's in zahlreichen Abhandlungen und Recensionen (46—50) verwiesen. Die Darstellung der Theorie ist bisher nur auf geometrischem Wege gelungen, und ihre Anwendung auf concrete Fälle dadurch sehr erschwert.

Es ist klar, dass die neue Theorie sowohl die Helmholtz-Hensen'sche Resonatorenhypothese gänzlich aufgibt, als auch die dieser zu Grunde liegende Ohm'sche Zerlegungstheorie, wonach das Ohr jede Schwingungsbewegung der Luft in ihre pendelförmigen Componenten auflöst. Und es scheint mir ebenfalls zweifellos zu sein, dass die thatsächliche Wahrnehmung eines aus verschiedenen Pendelschwingungen zusammengesetzten objectiven Klanges durch die ältere Theorie einfacher erklärt wird. Die physikalischen und anatomischen Voraussetzungen der Meyer'schen Theorie sind an sich nicht besser begründet und nicht weniger complicirt, als die der Helmholtz'schen Lehre.

Den wirklich schwachen Punkt dieser Lehre bilden die Combinationstöne. Wie steht es hier mit Meyer's Theorie? Seine Curvenzerlegungen ergaben im allgemeinen die Primärtöne und die wirklich wahrnehmbaren Differenztöne. Aber zunächst führen sie in vielen Fällen auch auf solche Differenztöne, die thatsächlich nicht zu hören sind. Schaefer (50, 515) construirte und zerlegte nach den Angaben Meyer's die combinirte Curve der einfachen Töne 4 und 9 und erhielt die Theiltöne 9, 8, 6, 4, 2 und 1. In mehreren anderen Fällen ergab sich Aehnliches, und Schaefer vermuthete danach, man würde »bei nur genügend großen Dimensionen der Zeichnung immer sämmtliche Töne, vom höchsten Primärton an bis herunter zu 1 erhalten«. Meyer erhielt für dasselbe Intervall 4:9 bei demselben (gleichen) Intensitätsverhältniss und nur kleineren absoluten Ausmessungen der Zeichnung (!) lediglich die Töne 9, 4 und 1. Der D_1 5 kam in beiden Fällen nicht heraus; ihn habe ich aber bei den verschiedensten Intensitätsverhältnissen sicher festgestellt.

Den Einfluss der Phasenverschiebung auf das Ergebniss seiner Curvenzerlegungen hat Meyer nicht untersucht. Soweit ich sehe, müsste nach seiner Theorie sowohl das Phasen- als das Intensitätsverhältniss der Primärtöne für Zahl und Stärke der Differenztöne eine Bedeutung haben, wie sie thatsächlich das erste gar nicht, das zweite in viel geringerem Grade besitzt.

Dass ein thatsächlich vorhandener Theilton in Meyer's Constructionen verschwindet, begegnet noch häufiger als das Umgekehrte. So ergeben sich ihm (46, 218; 47, 29; 48, 52) aus $5 + 8$ die Töne 8, 5, 2 und 1, nicht, so lange 8 nicht objectiv stärker ist als 5, der zweifellos hörbare D_1 3¹); bei $5 + 8 + 10$ ergeben sich die Töne 1, 3 (als stärkster), 4, 6 [?], 8, 10 (mehr als dreimal so schwach wie 6): der Primärton 5 fällt aus. Ebenso bei²) $4(10) + 20(20) + 23(20)$ der Primärton 4.

Vielfach muss Meyer, um die Consequenzen seiner Theorie mit den Thatsachen in Einklang zu bringen, Hülfs hypothesen einführen. So soll (47, 31; 48, 54 ff.) die periodisch wiederkehrende Folge von sieben »Reizen« und einer Reizunterbrechung eben so wie der Rhythmus von acht Reizen den Ton 8 erregen. So sollen gelegentlich je zwei Reizungen wie eine wirken; und eine eigenthümliche »Zweideutigkeit« der Reize soll in vielen Fällen eine »abwechselnde Verstärkung« bald des einen, bald eines anderen Differenztones zur Folge haben, wofür ich wenigstens in den Thatsachen der Beobachtung keinen Anhalt finde.

Die Mehrzahl der Meyer'schen Constructionen und Berechnungen führt auf Differenztöne, die an Intensität einen oder beide Primärtöne erheblich übertreffen. Durchschnittlich sind die Differenztöne der Theorie viel stärker, die Primärtöne schwächer als in Wirklichkeit. Meyer selbst bezeichnet (47, 33; 48, 58) die aus seinen Hypothesen sich ergebenden relativen Intensitäten der Theiltöne als am meisten Bedenken erregend. Er verweist dem gegenüber auf zwei der Einfachheit wegen bisher zu Grunde gelegte Voraussetzungen, von denen die eine möglicherweise, die andere sicherlich den Thatsachen nicht entspricht. Die speciellen Ueberlegungen und Berechnungen gingen nämlich von der Annahme aus, dass die Nervenendigungen von der Schneckenbasis bis zur Schnecken spitze gleich dicht über die Grundmembran vertheilt seien, und dass ferner die Länge der ausgebuchteten Membranstrecke der jeweiligen Amplitude der Steigbügelbewegung einfach proportional sei. In der

1) Wie Herr Professor Stumpf mir mittheilte, hörte auch er bei der kleinen Sexte, im Gegensatz zu Meyer, regelmäßig den Differenzton 3, und zwar stärker als 2.

2) Die eingeklammerten Zahlen bedeuten die relativen Amplituden.

ausführlichsten Darstellung seiner Anschauungen (48; Anhang II) erweitert Meyer die Theorie nach dieser zweiten Richtung hin. Der Querschnitt des Schneckenkanals und mit ihm die Breite der Basilar-membran nimmt ja vom Anfang bis zur Schnecken spitze erheblich zu. Diese (bei der Kritik der Resonatorenhypothese als sehr geringfügig behandelte) Thatsache wird nun herangezogen, um die Intensitätsverhältnisse der Theiltöne besser zu erklären. Der Steigbügel verdrängt bei jeder positiven Bewegung eine Flüssigkeitsmenge, die, wie man annehmen kann, seiner Entfernung aus der Ruhelage proportional ist. Die nach der Theorie jeweils in Mitleidenschaft gezogene Membranstrecke ist aber nicht proportional der verdrängten Flüssigkeitsmenge, sondern wegen der zunehmenden Erweiterung des Schneckenkanals bleibt die Länge der ausgebuchteten Membranstrecke mit wachsender Amplitude der Steigbügelbewegung mehr und mehr hinter jener Proportionalität zurück. Daraus ergibt sich im Sinne der Theorie eine Verschiebung der relativen Intensitäten zu Gunsten der höheren Töne.

Auf diese Weise lassen sich aber keineswegs alle Inconsequenzen zwischen der Theorie und den Thatsachen beseitigen. Beim Zusammenklange der Töne $5 + 8 + 10$ oder $4 + 20 + 23$ fällt z. B. nach der Theorie jeweils der tiefste Primärton gänzlich aus (46, 222; 224). Um solche Schwierigkeiten zu umgehen, hatte Meyer seiner Zeit (46, 227) ganz im Sinne Helmholtzens auf die verschiedene Breite der Grundmembran hingewiesen. Es sei nicht ausgeschlossen, dass jede einzelne Stelle der Membran auf einen bestimmten Ton in Mitschwingung gerathe, und diese specifische Resonanz sollte mit den übrigen, von der neuen Theorie geforderten Bewegungsvorgängen zusammen entstehen. Bald danach (47) hat Meyer diesen Rest Helmholtz'scher Anschauungen ausdrücklich fallen gelassen, ohne jedoch die nun entstandene theoretische Lücke auszufüllen. Ursprünglich sollte die neue Theorie nur da Platz greifen, wo die alte versage. Selbst die Helmholtz'sche Theorie der subjectiven Combinationstöne hatte Meyer noch neben der seinigen stehen gelassen und in einem concreten Falle einen unbezweifelten Summationston danach erklärt (46, 222).

Die Meyer'sche Theorie gibt keinerlei Aufschluss über die Entstehung der Summationstöne. Sie erklärt, wie wir sahen, auch

die Erscheinungen, für die sie gemacht ist, die Wahrnehmung der Differenztöne neben den primären Tönen, durchaus nicht einwandfrei. Die zahlreichen anderen Thatsachen, die eine Theorie des Hörens im Zusammenhange begreifen muss, hat Meyer bisher nicht berücksichtigt. Die partielle Taubheit z. B., deren Erklärung nach der Resonatorentheorie er überscharf zurückweist, wird auf dem Boden seiner eigenen Hypothesen völlig unverständlich.

b. Ewald's Theorie der Schallbilder.

Die Gründe, durch die Ewald sich veranlasst sieht, die Resonatorenhypothese fallen zu lassen (55, 151), sind folgende:

1. Resonanz tritt physikalisch auch da ein, wo die Schwingungszahl des erregenden Tones um ein Geringes von dem Eigentone des Resonators abweicht. Dem gegenüber erscheine die von Helmholtz angenommene organische Verbindung der verschiedenen abgestimmten Resonatoren mit einer zusammenhängenden Membran (der Grundmembran) als sehr ungünstig für ein isolirtes Mitschwingen einzelner Resonatoren. Von jedem müssten die Schwingungen jederzeit auch auf die nächst benachbarten sich übertragen. — Aber dass dem wirklich so ist, scheint mir aus zwei Thatsachen deutlich hervorzugehen: Töne von sehr geringem Schwingungsunterschiede werden bekanntlich subjectiv nicht unterschieden, und wenn sie gleichzeitig erklingen, vernimmt das Ohr einen Ton, der bei weiterem Abstände der objectiven Töne bis zu einer gewissen Grenze auch neben ihnen noch wahrzunehmen ist. Diese Thatsachen: der qualitativen Unterschiedschwelle und des Zwischentones muss jede Theorie des Hörens zu erklären suchen. Eine gewisse physiologische Mehrdeutigkeit der Reize muss daher in jedem Falle angenommen werden. Sie wäre übrigens unter den Voraussetzungen der (sogleich zu erörternden) Ewald'schen Theorie in Anbetracht der geringen Längenausdehnung der Membran kaum weniger erheblich zu denken, als nach der Resonatorenhypothese. Helmholtz hat, wie man weiß, die hier hervor gehobene Schwierigkeit wohl bedenkend, auf die (verschieden starke) Belastung der einzelnen Membrantheile, sowie besonders darauf hingewiesen, dass die Grundmembran in der Querrichtung erheblich gespannt ist, in der Längsrichtung dagegen eine sehr

geringe Spannung und einen lockeren organischen Zusammenhang aufweist.

2. Die Intermittenz- und subjectiven Differenztöne blieben bei Helmholtz unerklärt. — Auf den zweiten Punkt brauchen wir vorläufig nicht von neuem einzugehen. Die Unterbrechungstöne bilden nach dem früher Gesagten (S. 260 ff.) keine Schwierigkeit, sondern vielmehr eine Bestätigung der Resonanztheorie.

3. Setzte Helmholtz einmal voraus, dass nur pendelförmige Luftschwingungen als akustische Reize wirken können, so musste er consequenterweise die Geräusche als Complexionen aus zahlreichen (in ihrem Zusammentreten und Verschwinden unregelmäßig wechselnden) Pendelschwingungen auffassen. Man kennt die synthetischen und analytischen Erfahrungen, die diese Auffassung bestätigen. Da die meisten Geräusche sehr hohe Theiltöne enthalten, konnte Helmholtz noch die zunehmende qualitative Unbestimmtheit der höchsten Töne zu seiner Erklärung heranziehen (21, 350). Ewald findet den Unterschied zwischen Geräuschen und musikalischen Tönen oder Klängen größer, als er nach Helmholtz sein dürfte.

Neuere Untersuchungen haben uns gelehrt, dass als Minimum bereits zwei Tonschwingungen genügen, um die der Geschwindigkeit ihrer Aufeinanderfolge entsprechende Tonhöhe erkennen zu lassen. Dem stellt Ewald die Helmholtz'sche Vermuthung gegenüber, dass die erste Schwingung stets alle Resonatoren, die zweite auch noch eine große Anzahl erregen werde. — Aber diese Vermuthung bildet keinen integrirenden Bestandtheil der Resonanzhypothese. Es ist keineswegs wahrscheinlich, dass alle Membranfasern auch nur auf die erste Schwingung in gleicher Weise ansprechen sollten. Vielmehr werden schon die beiden ersten Schwingungen den auf sie »abgestimmten« Resonator stärker erregen, als alle übrigen. Dazu kommt vor allem, dass die Zahl der Resonanzschwingungen und diejenige der erregenden Luftverdichtungen und -verdünnungen nicht identisch sind. Ein Resonator, dem eine fremde Schwingungsbewegung aufgezwungen wird, schwingt ja in seiner Eigenperiode nach, aber schwächer und kürzer als ein mit der Phase seines Eigentones erregter Resonator.

Zum Beweise seiner These, dass zwischen Tönen und Geräuschen ein größerer, principieller Unterschied bestehen müsse, als Helmholtz ihn begreiflich mache, führt Ewald des weiteren an: »Unmu-

sikalische unterscheiden die Geräusche so gut, wie Musikalische.« Und »wer es nicht merkt, dass unrein gesungen wird, unterscheidet doch zwei Personen mit Sicherheit an der Sprache.« — Die erste dieser Behauptungen ist nur cum grano salis richtig. Feinere qualitative Unterschiede werden selbst bei Geräuschen von Musikalischen besser erkannt. Der zweite Satz bezeichnet eine wichtige Thatsache, die jedoch ohne neue physiologische Hypothesen erklärt werden kann. Man muss dabei, wie es Helmholtz thut, das Problem der Klangfarben und das der Geräusche zunächst auseinanderhalten. Die Klangfarben im engeren Sinne des Wortes, die Helmholtz in bisher unerschütterter Weise ausschließlich auf die Zahl und die musikalischen Eigenschaften der Theiltöne zurückführt, sie werden zweifellos von musikalisch Geübten besser unterschieden und wiedererkannt als von Unmusikalischen. Zur Klangfarbe im weiteren Sinne des Wortes pflegt man noch alle diejenigen charakteristischen Eigenschaften zu rechnen, wodurch auch zwei in ihrem musikalischen Theile gleiche Klangeindrücke sich von einander zu unterscheiden pflegen: die zeitlichen Verschiedenheiten in der Dauer, im An- und Abklingen der Lautcomplexe und ihrer Theile, ferner vor allem die wesentlich verschiedenen sogenannten Erzeugungsgeräusche beim Sprechen, Singen, Blasen, Streichen, Zupfen u. s. w. (vgl. Helmholtz 21, 112). Bekanntlich bestehen die Consonanten der Sprache fast ausschließlich aus eigenthümlichen Geräuschen; und auch die Vocale, namentlich die gesprochenen, setzen sich zum Theil aus Geräuschen zusammen. Neuerdings hat Wundt wiederum darauf hingewiesen, dass auch innerhalb derselben Sprachgemeinschaft erhebliche Unterschiede der allgemeinen Articulationsweise bestehen (41, 365). Es ist nun kein Zweifel, dass die verhältnissmäßig sehr weit verbreitete und fein entwickelte Fähigkeit, Lautcharaktere nach der Art ihrer Erzeugung zu unterscheiden und wiederzuerkennen, größtentheils auf die erwähnten charakteristischen Geräusche zurückgeht. Man muss dabei zunächst bedenken, dass Geräusche aller Art im gewöhnlichen Leben ungleich häufiger und in ihren Verschiedenheiten praktisch wichtiger sind als musikalische Töne oder Klänge. Die auffallende Sicherheit im Wiedererkennen individueller Sprechweisen ist ganz besonders durch eine tausendfache Uebung bedingt, die hier durch die hoch entwickelte Fähigkeit des Hörers zu eigener Erzeugung ähnlicher

Sprachlaute unterstützt wird. Die Sprechweise eines Individuums — und ähnliches gilt von den meisten Naturlauten — ist außer durch die Eigenschaften der einzelnen Laute stets durch solche Eigenthümlichkeiten charakterisirt, die dem zeitlichen Verlauf der zusammenhängenden Rede angehören: durch Nüancen der Modulation, des Rhythmus und der Betonung überhaupt. Der ganze, für gewöhnlich nicht analysirte Complex dieser Eigenschaften gibt jeder individuellen Sprechweise eine sehr bestimmte Färbung. Schon die Klangfarbe im engeren, musikalischen Sinne des Wortes bildet, in der Terminologie von Ehrenfels und Cornelius zu reden, eine Gestaltqualität, d. h. eine über die Qualitäten aller Theilhalte hinausgehende spezifische Eigenschaft des Empfindungsanzuges. Während nun die musikalische Geübtheit vorzugsweise in einer durch Uebung erworbenen Fähigkeit der Analyse besteht, hat man es beim Unterscheiden und Wiedererkennen von Klangfarben mit Eigenschaften akustischer Complexe zu thun, die auch ohne genauere Analyse bemerkt werden und der Aufmerksamkeit sich mehr aufdrängen, als die Eigenschaften elementarerer akustischer Inhalte. Dasselbe gilt in gesteigertem Maße von der durch die Vielheit ihrer Componenten einzigartig qualificirten Sprechweise eines jeden Menschen.

Ein 4. Einwand Ewald's richtet sich nicht unmittelbar gegen die Resonatorenhypothese: der Unterschied zwischen Consonanz und Dissonanz werde von Helmholtz nicht befriedigend erklärt. Ewald behauptet nicht — was sich auch schwerlich beweisen ließe — die Thatsachen der Consonanz und Dissonanz ständen der Helmholtz'schen Hörtheorie entgegen. Seine Ausführungen beziehen sich vorzugsweise auf die Unannehmlichkeit der Dissonanzen und wenden sich gegen die Zurückführung der Dissonanz auf Schwebungen. Hierauf wird meine nächste, ausschließlich dem Consonanzproblem gewidmete Abhandlung des näheren eingehen.

An 5. Stelle verweist Ewald auf die fundamentale Thatsache, dass wir von zwei Tönen eindeutig entscheiden können, welcher der höhere ist. Dafür gebe die Resonanztheorie keine Erklärung. Er beruft sich auf eine Aeußerung Mach's: »Wir ordnen die Töne ihrer Höhe nach in eine Reihe. Wie gelangen wir dazu? Dies ist noch von gar keiner Seite aufgeklärt«. Mach hatte, im allgemeinen auf dem Boden der Helmholtz'schen Hörtheorie stehend, dafür eine

eigenthümliche, wie er meinte, sehr nahe liegende Erklärung versucht (22, 298). Er schrieb bekanntlich dem tensor tympani die Function zu, durch seine Spannungsänderungen die Organe des Mittelohres in ihrer Mitschwingungsfähigkeit zu beeinflussen und dadurch für die verschiedenen Tonhöhen zu accommodiren. Nun setzte er die Tonreihe in Analogie zu dem nach der Lotze-Wundt'schen Localzeichentheorie erklärten Gesichtsraume: sie sollte dadurch entstehen, dass »sich die Tonhöhen mit jenen Spannungen [der Ohrmuskeln; genauer: den entsprechenden Muskelempfindungen] associiren, welche zu ihrer deutlichsten Wahrnehmung nöthig sind.« Abgesehen von den inneren Schwierigkeiten dieser Theorie — die zur deutlichsten Wahrnehmung eines Tones nöthige Muskelspannung hängt wahrscheinlich nicht nur von dessen Höhe, sondern auch von seiner Stärke ab; in Wirklichkeit wird der Tonus der Ohrmuskeln jedenfalls noch durch andere als diese Factoren bestimmt; wie soll man sich ferner die qualitative Unterscheidung einer gleichzeitigen Tonmehrheit denken? —, die ganze Anschauung beruht auf der dem Physiker naheliegenden, psychologisch aber unhaltbaren Voraussetzung, dass die qualitative Aehnlichkeit zweier psychischer Inhalte jederzeit in dem gemeinsamen Vorhandensein qualitativ gleicher und nur intensiv abgestufter Theile bestehe¹⁾. Wenn wir auch die Qualitätsabstufungen der Töne mit räumlichen Symbolen zu bezeichnen pflegen, so haben diese qualitativen Aehnlichkeiten und Verschiedenheiten doch mit räumlichen Relationen gar nichts zu thun. Sie dürfen nur — mutatis mutandis — zu den Farbenqualitäten in Parallele gesetzt werden; die Farbenunterschiede hat wohl noch niemand auf Spannungsänderungen der Accommodationsmusculatur zurückzuführen versucht. So ist denn auch Mach's Theorie der Tonqualitätenreihe meines Wissens von niemandem acceptirt worden. Ewald lässt sie völlig unerwähnt. Aber sein vorhin wiedergegebener Einwand gegen die Resonatorenthorie beruht auf ähnlichen erkenntnisstheoretischen und psychologischen Voraussetzungen, wie die Fragestellung und die Zusatzhypothese Mach's. Zur Begründung seines Bedenkens hebt

1) Diese Ansicht hat Mach mit Bezug auf die einfachen Töne ausdrücklich formulirt in einem von Ewald (55, 181 f.) ohne Widerspruch abgedruckten und zur Erhärtung seiner Theorie herangezogenen Passus der »Beiträge zur Analyse der Empfindungen«.

Ewald hervor, dass nach der Resonanzhypothese die räumliche Anordnung der Resonatoren im inneren Ohre principiell gleichgültig sei. Aber wird die Thatsache der qualitativen Tonunterscheidung denn im geringsten begreiflicher, wenn man die Helmholtz'sche Annahme einer specifischen Abgestimmtheit einzelner Membrantheile aufgibt und dafür mit Ewald stets die ganze Basilarmembran in Mitschwingung gerathen lässt, nur für jeden Ton in anderer Form? »Wir können«, sagt Ewald, »doch weder die Zahl der Schwingungen der beiden Töne zählen, noch ein Urtheil darüber gewinnen, welcher der beiden Resonatoren näher der Schneckenbasis und welcher näher der Schneckenspitze liegt«. Aber eben so wenig könnten wir durch das bloße Hören darüber etwas erfahren, wie viele Knotenlinien unsere nach der neuen Theorie schwingende Grundmembran bildete, und wie diese Knotenlinien zu einander geordnet wären, — obwohl Ewald es zuweilen so ausdrückt. Mach war durch die vermeinte Analogie seiner Hypothese mit einer Theorie der optischen Raumwahrnehmung irre geführt worden. Ewald gelangt von einer anschaulichen Theorie der Membranschwingungen zu einer Darstellung der vorausgesetzten physiologischen Vorgänge beim Hören, als wären diese unmittelbar anschaulich. Mit vollem Rechte wollte Mach, wie es scheint, zwei Fragen von einander scheiden: wie kommt es, dass wir 1. überhaupt verschiedene Töne hören, z. B. 500 Tonschwingungen anders empfinden als 900? dass wir 2. alle Tonqualitäten in eine (eindimensionale) Reihe ordnen können? Die von Ewald urgirte Feinheit der Unterschiedempfindlichkeit (55, 155) ist principiell ganz gleichgültig. Das Erste ist psychologisch eine nicht weiter erklärbare, letzte Thatsache, — für die Physiologie des Ohres ein Hauptproblem. Dass (2.) der physikalische Ton 600 für das Bewusstsein »höher« ist als 500, der Ton 700 noch höher u. s. f., dass alle Tonempfindungen der Höhe nach vergleichbar und gegen einander abstufbar sind, kann psychologisch insofern weiter zurückgeführt werden, als es auf allen Gebieten des psychischen Lebens Aehnlichkeit und Grade der Aehnlichkeit gibt (vgl. Cornelius 54, 41 ff.). Wenn nicht alle Töne in gewisser Weise ähnlich wären, würden wir sie nicht mit demselben Namen bezeichnen. Dabei sind gerade die Töne ein untrügliches Beispiel, dass es Aehnlichkeit ohne gemeinsame gleiche Theile gibt. Eine Anzahl Töne oder Klänge kann weiterhin

in allem Uebrigen sehr verschieden, d. h. ganz anders- und verschiedenartig nach Aehnlichkeiten abgestuft sein (Intensität, Dauer, Klangfarbe u. s. w.), sie wird doch eindeutig immer derselben Reihe der Tonhöhen eingeordnet. Wir können ja auch sonst Aehnlichkeiten in bestimmter Hinsicht und deren Grade beachten und von anderen abstrahiren. Die Physiologie hat angesichts dieser (unter 2. zusammengefassten) psychologischen Thatsachen so lange wie möglich an dem fruchtbaren psychophysischen Arbeitsprincipe festzuhalten, dass ähnlichen psychischen Vorgängen ähnliche physiologische zur Seite gehen. Diesem Principe wird die Resonatorenhypothese durchaus gerecht. Die neue Ewald'sche Theorie, die sich ebenfalls nur auf die Vorgänge im peripheren Sinnesorgan erstreckt, ist in diesem Punkte nicht schlechter, aber auch um kein Haar besser daran als sie.

Ohne eine erschöpfende Kritik liefern zu wollen, äußert Ewald schließlich ein 6. Bedenken gegen Helmholtzens Theorie. Sie könne eine allgemeine Vervollkommnung und Anpassung des Ohres durch natürliche Zuchtwahl nicht erklären. Die für das Leben einer Gattung wichtigen Töne und Geräusche, hervorgebracht von den Thieren selbst, ihren Feinden, ihren Beutethieren, änderten sich erheblich im Laufe der Generationen. Unter Voraussetzung der Resonanzhypothese wäre immer nur eine partielle Vervollkommnung des Gehörorgans, nämlich der jeweils am häufigsten gebrauchten Resonatoren möglich, welche Vervollkommnung bei jeder Aenderung der Lebensbedingungen relativ nutzlos würde. Thatsächlich zeige das normale Ohr, abgesehen von den Grenzen der Tonskala, eine gleichmäßige Ausbildung für alle Tonhöhen. Entspräche die Resonatoretheorie den Thatsachen, so müssten Gehörlücken, auch bei sonst Normalhörigen, viel häufiger sein, als sie wirklich sind.

Was den letzten Punkt betrifft, so werden sicherlich zahlreiche Fälle von partieller Taubheit deshalb nicht entdeckt, weil alle im Leben vorkommenden Klänge und Geräusche aus verschiedenen Tönen zusammengesetzt sind, von denen in der Regel nur ein kleiner Theil in eine etwa vorhandene Gehörlücke fallen wird. Thatsächlich sind solche Gehörlücken zweifellos festgestellt und bleiben (abgesehen von Fällen isolirter Basstaubheit) nach der bereits angedeuteten Ewaldschen Theorie unerklärbar. Dass neben partieller Taubheit fast jedesmal auch andere Mängel, namentlich eine allgemeine Schwer-

hörigkeit, nachzuweisen sind, kann bei der Kleinheit des Corti'schen Organes und dem innigen Zusammenhange aller seiner Theile nicht Wunder nehmen. Wo indessen anderweitige Gehörsanomalien nicht bestehen sollten, da müsste eine partielle Taubheit, vollends auf einem Ohre, um so leichter unentdeckt bleiben. Im Uebrigen ist auf das Ewald'sche Argument Folgendes zu erwiedern. Ob unsern thierischen Ahnen wesentlich andere Resonatoren nöthig und nützlich waren, als dem entwickelten Menschen, ist sehr fraglich, wenn man die Zusammengesetztheit und Mannigfaltigkeit der Naturlaute bedenkt und neben den hohen Obertönen z. B. die tiefen Differenztöne berücksichtigt. Ferner ist das Princip der natürlichen Zuchtwahl nicht das einzige, das die organische Entwicklung beherrscht. Ich erinnere nur an die Thatsachen der Mitübung und der Correlation der Organe.

Zum Ersatz der Resonanzhypothese entwickelt Ewald eine geistvolle, wegen ihrer Einfachheit zunächst bestechende neue Theorie des Hörens. Er spannte eine dünne Gummimembran schlaff in der Längsrichtung auf einen kleinen Holzrahmen. In der Querrichtung war sie entweder viel stärker oder (bei der Mehrzahl der Versuche) gar nicht gespannt. In beiden Fällen waren, wenn eine schwingende Stimmgabel von mittlerer Tonhöhe gegen das eine Ende der Membran gedrückt wurde, eigenthümliche »Schallbilder« auf der glänzend gemachten Fläche zu bemerken. Die Schwingungsperiode der Stimmgabel wurde der Membran aufgedrängt, und durch die Reflexion der Schwingungsbewegung an der jenseitigen Rahmenleiste kam es zur Bildung stehender Wellen. Diese stehenden Wellen wurden auf der Membran als dunkle, quergestellte Streifen sichtbar, zwischen denen in gleichen Abständen hellere Streifen lagen. Es zeigte sich, dass die Wellenlänge der Membranschwingungen in einem gesetzmäßigen Verhältniss zur Schwingungszahl des erregenden Tones stand. Der Abstand je zweier Knotenlinien war bei der tieferen Octave doppelt so groß wie bei der höheren u. s. f. Wurde die Membran durch zwei im Verhältniss der Octave oder der Quinte schwingende Gabeln gleichzeitig angesprochen, so lagerten sich die beiden entsprechenden Streifensysteme ohne gegenseitige Störung über einander; wo zwei Knotenlinien theoretisch zusammenfielen, entstand auf der Membran ein breiterer Streifen (vgl. die Abbildungen 55, 166; 169; 170). Die

Experimente gelangen auch, wenn die Membran beiderseitig von Wasser umgeben war.

Ganz analog diesen interessanten Erscheinungen denkt sich nun Ewald die Bewegungen der Basilarmembran beim Hören von Tönen und Klängen. Sie soll dann ebenfalls in ihrer ganzen Längenausdehnung schwingen, unter Bildung von stehenden Wellen, deren Zahl oder Länge für die Höhe des empfundenen Tones maßgebend sei. Der spezifische Nervenreiz für eine bestimmte Tonhöhe besteht demnach nicht in isolirtem Mitschwingen eines bestimmten Membrantheils, sondern in einem charakteristischen Schallbilde, d. h. in der Vertheilung der räumlich jeweils feststehenden Knotenlinien und Wellenbäuche über die ganze Membran. Je höher der Ton, um so zahlreicher sind die Knotenlinien, um so kleiner ihre immer gleichen Abstände von einander. Ist eine einzelne Stelle der Membran functionsunfähig, so bleibt die typische Gestalt des Schallbildes vollständig erhalten; sie wird in gesetzmäßig charakteristischer Weise alterirt, wenn eine regelmäßige Folge von Tonimpulsen periodisch auf kurze Zeit unterbrochen wird. Ein einzelner Luftstoß oder eine unperiodische Luftbewegung können auf der Membran nur laufende Wellen, für das Bewusstsein nur den Eindruck von Geräuschen erzeugen. —

Dass wir es im inneren Ohre mit erheblich complicirteren physikalischen Bedingungen zu thun haben, als bei den von Ewald benutzten Gummimembranen, liegt auf der Hand. Zunächst sind ja die Ausmessungen der Basilarmembran so klein, dass jedes functionsfähige Modell sehr weit darüber hinausgehen muss. Wichtiger ist, dass der Grundmembran die Schwingungen des Trommelfells nicht durch einen ihr unmittelbar aufliegenden festen Körper mitgetheilt werden, der die Stelle der Ewald'schen Stimmgabel verträte. Auch besteht die Grundmembran bekanntlich nicht aus einer einheitlichen und gleichförmigen Masse, sondern ist aus lebendigen Zellen sehr verschiedenartig aufgebaut (vergl. Meyer 50, 347 ff.); sie ist durch zahlreiche, zu ihrer Längsrichtung senkrecht gestellte, relativ schwere und von einander unabhängige Gebilde belastet. Sie ist ferner in der Querrichtung ziemlich straff, in der Längsrichtung dagegen sehr schwach gespannt und leicht zerreißbar. Eben aus diesen Thatsachen, namentlich aus der zuletzt erwähnten, von Hensen festgestellten, folgerte Helmholtz, ganz im Gegensatz zu Ewald, in der Längs-

richtung der Membran sei eine Wellenbildung ausgeschlossen, eine solche finde vielmehr nur in der Querrichtung statt, und die Quersaiten müssten, wie gespannte Saiten, nahezu unabhängig von einander schwingen.

Aber nehmen wir einmal an, die Basilmembran vollführe beim Hören thatsächlich Bewegungen von ganz analoger Form, wie die Ewald'schen Membranen bei der Berührung schwingender Stimmgabeln. Dann hätten wir für jeden einfachen, allein erklingenden Ton eine bestimmte Anzahl gleich weit von einander abstehender Knotenlinien und dazwischen die entsprechenden, unter sich genau gleichen Wellenbäuche. Das Bild wird aber sofort viel weniger einfach und übersichtlich, wenn zu einem gegebenen auch nur ein zweiter Ton hinzutritt. Von den Knotenlinien des ersten bleiben dann nur diejenigen erhalten, die mit Knotenlinien des zweiten zusammenfallen. Betrachten wir zunächst den einfachsten Fall, dass die Schwingungszahl des höheren Tones ein ganzes Vielfaches derjenigen des tieferen betrage. Nur dann können für den tieferen Ton wieder so viele Knotenlinien sich ergeben, als wenn er allein erklänge. Stehen die beiden Töne z. B. im Verhältniss der Octave, so liegt es ja am nächsten, anzunehmen, dass alle Knotenlinien des tieferen Tones mit den ungeradzahligem des höheren zusammenfallen, während dann, wie bei der Ewald'schen Membran, die geradzahligem Knoten des höheren Octaventones natürlich in die Mitte der Spatien des tieferen zu liegen kämen. Soll nun, wie Ewald es für einzelne Töne annimmt, der gleichmäßig sich wiederholende Abstand zweier absoluter Minima der Schwingungsbewegung, also zweier Knotenlinien im strengen Sinne des Wortes für die Tonempfindung maßgebend sein? Dann kämen beim Octavenzweiklang nur die Knotenlinien des tieferen Tones in Betracht, und man dürfte nur ihn hören. Unter derselben Voraussetzung ergäbe sich für jedes Schwingungsverhältniss der objectiven Töne subjectiv ein Ton, der zu dem primären Klange jeweils ein anderes Verhältniss hätte; z. B. für 32 : 45, wie Meyer (50, 351) richtig ausführt, der Ton 1; denn wenn wiederum die beiden Wellensysteme mit der gleichen Phase beginnen, so sind hier die absoluten Minima, d. h. die zusammenfallenden Knotenstellen um 32 Knoten des tieferen oder um 45 des höheren Tones von einander entfernt. Auf diese Weise erhielten wir für jedes beliebige Intervall den Ton,

dessen Verhältnisszahl den größten gemeinschaftlichen Theiler der primären Verhältnisszahlen darstellt; also, wenn das primäre Schwingungsverhältniss in möglichst kleinen Zahlen ausgedrückt ist: jederzeit den Ton 1.

Meyer hat (50, 351—355) erschöpfend die verschiedenen Möglichkeiten untersucht, wie man die Ewald'sche Theorie eindeutig interpretiren könnte. Es sind außer der bereits erwähnten noch fünf. Für einen wahrzunehmenden Ton könnte maßgebend sein: der Abstand zweier nächstbenachbarter Stellen 2. von relativen Reizminimen, 3. von gleich großen relativen Reizminimen, 4. vom absoluten Reizmaximum, 5. von relativen oder 6. von gleich großen relativen Reizmaximen. Eine einfache Ueberlegung zeigt, dass keine dieser Annahmen auch nur die gleichzeitige Wahrnehmung zweier Primärtöne begreiflich macht. Schon hier also müsste Ewald, um den Grundgedanken seiner Theorie zu behaupten, eine und jedenfalls mehr als eine Hülfsypothese einführen. Ich unterlasse es, ihm darin vorzugreifen.

Von Ewald's Einwänden gegen die Resonanzhypothese konnten wir nur einen als berechtigt anerkennen: dass sie die subjectiven Combinationstöne nicht erkläre. An diesem Punkte vor allen müsste eine neue Hörtheorie ihre Ueberlegenheit gegenüber der Helmholtz'schen erweisen. Ewald führt zu diesem Zwecke nur einen concreten Fall an, die reine Quinte (55, 187). Ein Blick auf die (ebendort S. 170 wiedergegebene) Figur zeige, »dass der Differenzton im Schallbilde dargestellt wird.« Macht man die vorhin zuerst angegebene Voraussetzung, dass der Abstand je zweier absoluter Reizminima für einen Ton entscheidend sei, so ersieht man aus diesem Schallbilde allerdings den bei der Quinte allein möglichen Differenzton 1. Aber zunächst bleibt, wie wir fanden, die Wahrnehmung der Primärtöne dann unerklärt. Und wie steht es bei den übrigen Intervallverhältnissen? In bestimmten Fällen tritt auf diese Weise von den thatsächlich vorhandenen Combinationstönen einer in dem Schallbilde hervor. Nämlich dann, wenn einer der Differenztöne durch die Verhältnisszahl 1 ausgedrückt werden kann. Das gilt bei den Intervallen, deren primäre Verhältnisszahlen nur um eine Einheit verschieden sind (2 : 3, 3 : 4, 4 : 5 u. s. w.), natürlich für den ersten Differenzton. Bei den anderen ergibt sich auf diesem Wege ein Diffe-

renzton höherer Ordnung; z. B. für die große Sexte und die große Decime $D_{2=3}$, für den Tritonus (5:7) und die kleine Sexte $D_{3=4}$; allgemein der charakteristische Differenzton im früher erörterten Sinne, aber kein anderer. Durch allerhand Hilfsannahmen versuchte ich, die übrigen Differenztöne gleichfalls aus den nach Ewald construirten Schallbildern herauszulesen: ohne jeden Erfolg. Bei allen Dissonanzen, die nicht durch zwei auf einander folgende ganze Zahlen können ausgedrückt werden, lässt uns die Schallbildertheorie vollends im Stich. Sie ergibt also bei der überwiegenden Mehrzahl der möglichen Intervalle keinen einzigen Differenzton. Der Summationston bleibt überall unerklärt.

Nach alledem können wir die principiell weniger wichtigen Punkte, die bei dieser Theorie bedenklich sind, und einige andere, die an sich dafür sprechen würden, unerörtert lassen.

5. Schaefer's Erklärung der subjectiven Combinationstöne auf Grund der Resonanzhypothese.

Alle Versuche, den Grundgedanken der Helmholtz'schen Hörtheorie zu durchbrechen oder ganz aufzugeben, sahen wir scheitern. Von all diesen verschiedenartigen akustischen Hypothesen finden wir uns um so entschiedener auf die Resonanztheorie als diejenige zurückverwiesen, die die Thatsachen am einfachsten und vollständigsten erklärt. Nur eine wesentliche Lücke ist in dieser Lehre noch unausgefüllt, um derentwillen allein die neueren Theorien ausführlich zu erwägen waren. Helmholtzens Erklärung der subjectiven Combinationstöne kann nicht genügen. Ebensowenig können die im Gegensatz zu Helmholtz aufgestellten Hypothesen diese wichtigen Thatsachen befriedigend erklären. Da liegt es am nächsten, auf dem Boden der Resonanztheorie eine neue Erklärung zu versuchen. Ein solcher Versuch ist im vorigen Jahre von Schaefer, im Anschlusse an Helmholtz, gemacht worden; wie mir scheint, mit gutem Erfolge.

Im Eingang des II. Capitels sind die Thatsachen mitgetheilt worden, die es nöthig machen, subjective und objective Combinationstöne zu unterscheiden. Für die objectiven hat Helmholtz eine bisher unerschütterte mathematische Theorie geliefert (21, Beilage XVI,

S. 660), die völlig unabhängig ist von der oben zurückgewiesenen Ableitung der subjectiven Combinationstöne aus der unsymmetrischen Elasticität des schwingenden Körpers und von der darin enthaltenen Annahme einer nicht als unendlich klein zu betrachtenden Größe der Schwingungen. Ueberall, wo es zur Bildung objectiver, in der Luft als pendelförmige Schwingungsbewegung nachweisbarer Combinationstöne kommt, haben wir »Oeffnungen, deren Weite periodisch wechselt, und haben auf der einen Seite Luft unter größerem Druck als auf der anderen«. Es sind ferner in diesen Fällen mindestens zwei Oeffnungen (bezw. Löcherreihen) von an sich verschiedener Weite gegeben. Dann erfährt der Druckunterschied an der einen Oeffnung pendelperiodische Schwankungen, die durch die periodischen Luftbewegungen an der anderen bedingt sind. Und die resultirende, dem Ohre mitgetheilte Wellenbewegung enthält nicht nur sinusförmige Componenten für die primären Töne n und n' , sondern ebensolche mindestens noch für den Summationston $n + n'$ und den ersten Differenzton $n' - n$.

Analoge Vorgänge finden nach Schaefer (56, 524; cf. 57) im inneren Ohre statt, wenn es von zwei Tönen gleichzeitig getroffen wird. Die Schwingungen der auf den tieferen Ton abgestimmten Corti'schen Faser erführen pendelperiodische Amplitudenschwankungen im Rhythmus der Schwingungen des höheren Tones, und umgekehrt. Schaefer hatte diese Hypothese im ersten Entwurfe etwas zu apodiktisch hingestellt; er hatte insbesondere nicht ausdrücklich hervorgehoben, dass unter den gewöhnlichen, einfachsten physikalischen Bedingungen die Schwingungen eines tönenden Körpers durch diejenigen eines anderen, daneben schwingenden Körpers nicht unmittelbar derart beeinflusst werden, dass es zu den von der Theorie geforderten Amplitudenschwankungen käme. Dies ist der berechnete Kern einer schroff ablehnenden Kritik, mit der Meyer alsbald (51) den Schaefer'schen Vorschlag beantwortete, — einer Kritik, die im übrigen weit über ihr Ziel hinausschießt. Einige Missverständnisse Meyer's und unbegründete Zweifel, vor allem hinsichtlich der objectiven Combinationstöne, hat Schaefer bereits richtiggestellt (57).

Dass die subjectiven Combinationstöne im Labyrinth auf ähnliche Weise objectiv entständen, wie die objectiven in der Luft, begründet

Schaefer durch seine oben erörterten Beobachtungen über den zwischenliegenden Differenzton erster Ordnung. Diesen Differenzton konnte er weder an Stimmgabeln, an der Flaschenorgel, am Klavier, noch am Harmonium und Appunn'schen Dreiklangapparat, wo sonst objective Differenztöne nachzuweisen sind, sicher feststellen. In seiner Replik auf Meyer's Einwendungen trägt er noch einige Versuche am Dreiklangapparate nach, die ihm die Analogie zwischen objectiven und subjectiven Differenztönen voll zu machen scheinen: bei Intervallen um die große Septime war der objective Differenzton im Resonator zuweilen gar nicht, zuweilen »erst bei längerem, aufmerksamem Horchen etwas deutlicher« zu hören. Für das unbewaffnete Ohr schien ihm, wie man sich erinnert, der Differenzton erster Ordnung jenseits der großen Septime bei jeder Art der Klangerzeugung endgültig zu verschwinden. Ich habe oben (S. 208 ff.) ausführlich nachgewiesen, dass es solche und zwischenliegende Differenztöne thatsächlich gibt. Gegen die neuen Schaefer'schen Versuche über objective Combinationstöne bei der großen Septime habe ich denselben Einwand zu erheben, wie gegen die früher besprochenen Versuche mit unbewaffnetem Ohre: Schaefer war, wie allen seinen Vorgängern, die Thatsache unbekannt, dass Differenztöne mit nahegelegenen Primärtönen oder anderen Differenztönen zu Zwischentönen verschmelzen. Bei der großen Septime ist in den von Schaefer benutzten Tonlagen der erste Differenzton dem dritten und andererseits dem Grundtone nahe genug, um mit beiden bereits zu Zwischentönen zu verschmelzen. Schaefer aber hat nur auf die theoretische Tonhöhe des ersten Differenztones geachtet und auf diese auch den Resonator eingestellt. Meyer gibt ihm, im Gegensatz zu seinen eigenen früheren Beobachtungen (und irrthümlicherweise nach den meinigen) zu, dass subjective zwischenliegende Differenztöne nicht existirten. Des weiteren hebt Meyer mit Recht hervor, dass Rücker und Edser die Existenz objectiver zwischenliegender Differenztöne unzweifelhaft nachgewiesen haben. Diese beiden Forscher sahen (42, 349 f.) ihren Stimmgabelresonator auf einen zwischenliegenden Differenzton etwas schwächer (rather feebler) ausschlagen als auf einen unterhalb des Grundtones gelegenen, und Meyer weist (51, 57) noch darauf hin, dass in jenem Falle aus technischen Ursachen auch die Primärtöne schwächer waren; er erinnert ferner an den — oben erwähnten — Rücker-Edser'schen

Nachweis objectiver echter Summationstöne, während Schaefer die Wahrnehmbarkeit solcher Summationstöne, die nicht mit Hülfe von Obertönen als Differenztöne zu begreifen sind, bestritten hatte. Schaefer hatte allerdings nicht die objective Existenz von Summations- und zwischenliegenden Differenztönen geleugnet, sondern nur ihre Hörbarkeit; in seiner zweiten Veröffentlichung (57, 77) schränkte er auch diese Angabe noch etwas ein: die fraglichen Töne seien zwar »unter gewöhnlichen Umständen nicht hörbar«, sie könnten aber sowohl im Ohre als in der Luft schwach vorhanden sein.

Durch meine Beobachtungen über subjective Summations- und zwischenliegende Differenztöne wird nun die von Meyer behauptete »Nichtübereinstimmung« der subjectiven mit den objectiven Combinationstönen theilweise wieder aufgehoben; nur theilweise, denn z. B. die Zwischentonverschmelzung besteht natürlich nur für die subjectiven Differenztöne. Das von Schaefer angewendete Helmholtzsche Verfahren, objective Combinationstöne festzustellen (Verstärkung fürs Ohr durch Resonatoren), weicht ja von den physikalischen Methoden Rücker's und anderer insofern erheblich ab, als dabei die Erregung des resonirenden Körpers nicht für das Auge wahrnehmbar gemacht wird; sondern das gleichzeitig von beiden Primärtönen getroffene Ohr mit allen dadurch gesetzten physiologischen Bedingungen bleibt als nothwendiger Apparat in den Versuch eingeschaltet. Zweifellos ist die Verschmelzung nahe benachbarter und die Abschwächung hoher Töne neben gleichzeitigen tiefen, wahrscheinlich auch die relativ geringe Empfindungsstärke der zwischenliegenden Differenztöne rein physiologisch, durch die Eigenschaften des Gehörorganes bedingt.

Durch neue, zahlreichere und genauere Experimente nach der (noch zu vervollkommnenden) Weise Rücker's und Edser's müssen die Eigenschaften der objectiven Combinationstöne aller Art für sich untersucht werden. Weitgehende Analogien zwischen objectiven und subjectiven Combinationstönen werden sich dann wahrscheinlich herausstellen. Was Schaefer darüber bisher beigebracht hat, ist unzureichend begründet und stimmt nicht ganz zu den von mir festgestellten Thatsachen. Aber der Gedanke, Helmholtzens Theorie der objectiven Combinationstöne auf die subjectiven zu übertragen, ist darum nicht minder fruchtbar; er würde es bleiben, selbst wenn

die beiden Erscheinungsreihen in noch anderen Punkten, als den vorhin angedeuteten, Verschiedenheiten zeigen sollten.

Dass die von Schaefer herangezogene Theorie einen Summationston und einen ersten Differenzton von genau der gleichen Amplitude ergibt, während die Empfindungsstärke der Summationstöne im allgemeinen erheblich geringer ist, daraus lässt sich durchaus kein principiell Bedenken herleiten. Wird doch selbst von zwei primären Tönen, die physikalisch gleich stark zusammen erklingen, der höhere regelmäßig für die Empfindung abgeschwächt. Helmholtz hat seiner Theorie der objectiven Combinationstöne die einfachsten möglichen Annahmen zu Grunde gelegt. Er sagt deutlich genug (21, 667): »In Wirklichkeit werden nun die Gleichungen immer viel complicirter werden, als ich sie hier hingestellt habe, um den Vorgang in seiner einfachsten Gestalt darzustellen. Es wird der Ton n [n'] ebenso gut Einfluss auf den Druck p haben wie m [n], ja sogar die Combinationstöne werden p verändern, endlich wird meistens die Größe der Oeffnung nicht durch eine so einfache periodische Function, wie wir für ω angenommen haben [= $A(1 - \sin 2\pi n t)$], ausgedrückt werden können«. »Die vollständige mathematische Theorie eines solchen Falles wird außerordentlich complicirt«. Das gilt schon für das Zusammenwirken zweier Sirenen- oder Zungentöne in der Luft. Soviel aber ist gewiss, dass wir im Labyrinth, wo die beteiligten Körper lebendig zellige, z. T. contractile und mit einander organisch verbundene Gebilde sind, es mit viel complicirteren physikalischen Bedingungen zu thun haben. Von einer genauen, vollends mathematischen Beschreibung der Vorgänge, die bei der Wahrnehmung eines Zusammenklanges im Gehörorgane sich abspielen, sind wir gegenwärtig noch sehr weit entfernt, was ja schon aus den großen Meinungsverschiedenheiten hervorgeht, die selbst bezüglich der allgemeinsten mechanischen Eigenschaften dieser Prozesse immer von neuem entstehen. Für die Schwingungsvorgänge, die durch objective, in der Luft nachweisbare Combinationstöne gekennzeichnet sind, führt Helmholtz aus, dass bei genauerer mathematischer Darstellung der physikalischen Verhältnisse auch einige Obertöne der primären Töne und deren Combinationstöne sich aus der Rechnung ergeben werden. Thatsache ist, dass auch da, wo die Bedingungen objectiver Combinationstöne fehlen, der Zusammenklang zweier ein-

facher Töne subjectiv einen Summationston und vier bis fünf Differenztöne zu enthalten pflegt, während die Obertöne in der Empfindung ebensowenig wie in der Luft nachzuweisen sind. Solange wir an der Resonanzhypothese und der Ohm'schen Zerlegungstheorie festhalten, müssen wir postuliren, dass die thatsächlich wahrzunehmenden subjectiven Combinationstöne neben den Primärtönen als pendelförmige Schwingungscomponenten irgendwo im Ohre objectiv entstehen, und dass alle anderen, von irgend einer Theorie geforderten Tonschwingungen entweder in ihrer Entstehung gehindert sind oder in ihrer Intensität unter die Reizschwelle hinabgedrückt werden. Es liegt vorläufig am nächsten, die hierdurch geforderten Bewegungsvorgänge als wesentlich analog zu denken den Luftbewegungen, die Helmholtz für den Fall der Entstehung objectiver Combinationstöne beschreibt.

Was die Differenztöne höherer als erster Ordnung angeht, so erscheint es zunächst am einfachsten, jeden von ihnen wie einen D_1 auf das Zusammenwirken derjenigen Theiltöne zurückzuführen, deren Schwingungsdifferenz seiner Schwingungszahl entspricht. Dann hätte die Theorie der Differenztöne principiell nur die Aufgabe, aus dem gleichzeitigen Gegebensein zweier sinusförmiger Schwingungsbewegungen im inneren Ohre den ersten Differenzton begreiflich zu machen. Gegen den Versuch, alle Differenztöne als solche erster Ordnung zu deuten, indem man jeweils einen oder auch zwei niedere Differenztöne wie Primärtöne auffasst, sind die Intensitätsverhältnisse der wirklich wahrzunehmenden Differenztöne eingewendet worden. Aber ich vermag darin keine unüberwindliche Schwierigkeit zu erblicken. Meyer, der diese Schwierigkeit besonders betont hat, führt andererseits einige thatsächliche Beispiele dafür an, dass man »unter Umständen wohl einen Differenzton, den ihn erzeugenden Primärtönen aber nicht hören kann« (47, 5; 48, 29). Die früher eingehend besprochenen regelmäßigen Stärkeunterschiede, soweit sie unabhängig von der Ordnungszahl der Differenztöne bestehen, werden ihre besonderen physiologischen Ursachen haben. Ich meine vor allem die relativ geringe Intensität der zwischenliegenden und die relative Aufdringlichkeit der tiefen Differenztöne. Abgesehen von diesen beiden Regelmäßigkeiten ist ein einfacher Differenzton höherer Ordnung nur selten stärker als ein gleichzeitig vorhandener niederer. Wo größere Stärkeunterschiede in dieser Richtung vorkommen, da erklären sie sich

fast ausnahmslos durch die bisher sehr wenig berücksichtigten und erst im Zusammenhange meiner Versuche genauer festgestellten Thatsachen des Zusammenfallens oder undeutlichen Auseandertretens zweier Theiltöne.

Zwischen Combinationstönen und primären, durch objective Sinusschwingungen bedingten Tönen kann physiologisch ein wesentlicher Unterschied nicht bestehen. Die Thatsachen fordern vielmehr gebieterisch, den oben in anderem Zusammenhange bereits formulirten Grundsatz hier anzuwenden, wonach für ähnliche psychische Vorgänge auch ähnliche physiologische vorauszusetzen sind. Ich erinnere nur an folgende Uebereinstimmungen zwischen beiden Erscheinungsreihen: die untere Hörgrenze ist für Differenztöne annähernd dieselbe wie unter sonst gleichen Umständen für primäre Töne. Differenztöne erzeugen mit einander und mit primären Tönen neue Differenztöne, Schwebungen und, was bisher unbekannt gewesen ist, Zwischentöne in derselben Weise, wie Primärtöne unter sich. —

Der Fortschritt der physiologischen Akustik hängt wesentlich davon ab, wie die Anatomie des Labyrinthes und die mathematische Bewegungslehre fortschreiten. Aber vor aller physiologischen Theorienbildung liegt hier noch die psychologische Beobachtung und Analyse des im Bewusstsein Vorgefundenen. Die Physiologie der Sinne hat ja keine andere Aufgabe als, die Thatsachen der Empfindung in den allgemeineren Zusammenhang des körperlichen Lebens und des physikalischen Geschehens einzuordnen. Für dieses Unternehmen gibt es nur einen Ausgangspunkt und nur eine zuverlässige Controlle: die experimentell geregelte Beobachtung der unter gegebenen physikalischen Bedingungen wirklich erlebten Empfindungen.

Die psychologische Analyse führt außerdem zu rein psychologischen, von der physiologischen Interpretation relativ unabhängigen Ergebnissen, wie ich deren für die Auffassung von Zusammenklängen einige bereits früher berichtet habe, andere demnächst unter dem Titel »Differenztöne und Consonanz« veröffentlichen werde.

Aus den vorstehend mitgetheilten Beobachtungen und Erwägungen ergab sich im wesentlichen Folgendes:

1. Der Zusammenklang zweier Töne enthält für die Wahrnehmung in der Regel einen Summationston und vier bis fünf Differenztöne. Alle diese Combinationstöne mit ihren Folgeerscheinungen

(Schwebungen, Zwischentönen u. a.) sind an das Dasein von Obertönen des primären Klanges nicht gebunden.

2. Alle Schwebungen sind auf das Vorhandensein von mindestens zwei benachbarten, d. h. um höchstens eine große Terz von einander entfernten Tönen zurückzuführen; es gibt keine multiplen Schwebungen im Sinne Koenig's.

3. Die von Koenig sogenannten »Stoßtöne« sind nicht die einzigen Combinationstöne. Es gibt insbesondere auch zwischen den Primärtönen gelegene Differenztöne.

4. Es gibt nur zwei Arten Combinationstöne : Differenztöne und Summationstöne. Die Unterscheidung von Stoßtönen und Differenztönen ist durch die Thatsachen nicht gefordert. Sie erklärt sich historisch aus einer unzureichenden Berücksichtigung der Dissonanzen und einer damit zusammenhängenden irrthümlichen Verallgemeinerung bestimmter Stärkeverschiedenheiten der Differenztöne.

5. Hermann'sche Mitteltöne, Riemann'sche Untertöne und subjective Obertöne existiren nicht.

6. Alle bis jetzt hervorgetretenen Versuche, die Ohm'sche Zerlegungstheorie und die darauf gegründete Helmholtz-Hensen'sche Resonanzhypothese principiell aufzugeben und durch andere Annahmen zu ersetzen, leiden an großen inneren Schwierigkeiten oder (und) widerstreiten der akustischen Erfahrung.

7. Die gegen die Helmholtz'sche Theorie des Hörens erhobenen Einwände, auch der der Unterbrechungstöne, sind nicht stringent.

8. Helmholtzens Erklärung der subjectiven Combinationstöne ist unbefriedigend.

9. Die physiologische Theorie dieser Töne braucht den Boden der Resonanzhypothese nicht zu verlassen. Es empfiehlt sich vielmehr zunächst der Versuch, Helmholtzens Theorie der objectiven Combinationstöne auf die Vorgänge anzuwenden, die bei der Wahrnehmung subjectiver Combinationstöne im inneren Ohre stattfinden.

Litteratur.

- 1) Romieu, Nouvelle découverte des sons harmoniques graves etc. 1743 (1751 der Academie in Montpellier überreicht).
- 2) A. Sorge, Vorgemach der musikal. Composition 1745—47.
- 3) Tartini, Trattato di musica secondo la vera scienza dell' armonia 1754.
- 4) de la Grange, Nouvelles recherches sur la nature et la propagation du son. Miscel. phil.-math. soc. priv. Taurinensis T. I. 1759.
- 5) Th. Young, Outlines of experiments and inquiries resp. sound a. light. Phil. transact. of the R. Soc. P. I. 1800. Auch in Lect. on nat. phil. V. II. 1807.
- 6) Chladni, Akustik 1802.
- 7) —, Neue Beiträge zur Akustik 1817.
- 8) Vieth, Ueber Combinationstöne, in Bez. a. einige Streitschr. über sie zwei engl. Physiker, Th. Young u. J. Gough. Annal. d. Physik ed. L. W. Gilbert Bd. I. 1805.
- 9) Le baron Blein, Exposé de quelques expériences nouveaux sur l'acoustique etc. 1827.
- 10) W. Weber, Ueber die Tartini'schen Töne. Poggendorff's Annal. d. Phys. u. Chem. Bd. 15. 1829.
- 11) G. G. Hällström, Von den Combinationstönen. Pogg. Ann. 24. 1832.
- 12) A. Roeber, Untersuchungen des Herrn Scheibler üb. d. sog. Schläge, Schwebungen od. Stöße. Pogg. Ann. 32, 1834.
- 13) —, Akustik, Repertor. d. Physik ed. Dove Bd. III. 1839.
- 14) Poggendorff, Zusatz (zu 12), *ibid.*
- 15) G. S. Ohm, Bemerkungen üb. d. Combinationstöne u. Stöße. Pogg. Ann. 47. 1839.
- 16) —, Noch ein paar Worte über die Definition des Tones. Pogg. Ann. 62. 1844.
- 17) H. Helmholtz, Ueber Combinationstöne. Pogg. Ann. 99. 1856.
- 18) —, Ueber die Combinationstöne. Monatsber. d. Preuß. Acad. 1856.
- 19) —, Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden. Journ. f. d. reine u. angew. Mathem. ed. Crelle, Bd. 57, 1860.
- 20) —, Bemerkung (zu dem Experimentalberichte Lummer's, cf. 28) 1886.
- 21) —, Die Lehre von den Tonempfindungen. 5. Ausg. 1896.
- 22) E. Mach, Zur Theorie des Gehörorgans. Sitzgsber. d. Wien. Acad. Bd. 48². 1863 (unverändert abgedr. Prag 1872).
- 23) R. Koenig, Ueber den Zusammenklang zweier Töne. Pogg. Ann. 157. 1876.
- 24) —, Bemerkungen üb. d. Klangfarbe. Wied. Ann. d. Phys. u. Chem. Bd. 14. 1881.
- 25) —, Quelques expériences d'acoustique. 1882.

- 26) W. Preyer, Akustische Untersuchungen 1879.
- 27) —, Ueber Combinationstöne. Wied. Ann. 38. 1889.
- 28) O. Lummer, Ueber eine empfindl. obj. Klanganalyse. Verhandl. d. Berl. phys. Gesellsch. i. J. 1886. Jahrg. V, 1887.
- 29) H. Dennert, Akustisch-physiol. Untersuchungen. Arch. f. Ohrenheilkunde Bd. 24. 1887.
- 30) M. Wien, Ueber d. Messung d. Tonstärke. Wied. Ann. 36. 1889.
- 31) W. Voigt, Ueber d. Zusammenklang zweier einfacher Töne. Wied. Ann. 40. 1890 (auch in Nachr. v. d. Götting. Ges. d. Wiss. 1890).
- 32) C. Stumpf, Tonpsychologie, Bd. II, 1890.
- 33) —, Ueber die Ermittlung v. Obertönen, Wied. Ann. 57. 1896.
- 34) —, Consonanz u. Dissonanz. Beitr. z. Akustik u. Musikwissensch. 1. Heft 1898.
- 35) L. Hermann, Zur Theorie der Combinationstöne. Pflüger's Archiv f. d. ges. Physiologie etc., Bd. 49. 1891.
- 36) —, Beiträge zur Lehre v. d. Klangwahrnehmung. Pflüg. Arch. 56. 1894.
- 37) —, Zur Frage betr. d. Einfluss der Phasen auf die Klangfarbe. Wied. Ann. 58. 1896.
- 38) W. Wundt, Grundzüge der physiol. Psychologie. Bd. I. 4. Aufl. 1893.
- 39) —, Ist der Hörnerv direct durch Tonschwingungen erregbar? Philos. Studien Bd. VIII. 1893.
- 40) —, Akustische Versuche an einer labyrinthlosen Taube. Philos. Studien IX. 1894.
- 41) —, Völkerpsychologie I. Bd. 1. Theil. 1900.
- 42) A. W. Rücker and W. Edser, On the objective reality of combination tones. Philos. Magazine T. 39; 5. ser. 1895.
- 43) H. Pipping, Zur Lehre v. d. Vocalklängen. Zeitschr. f. Biologie Bd. 31; N.F. Bd. 13. 1895.
- 44) E. Sauberschwarz, Interferenzversuche mit Vocalklängen. Pflüg. Arch. 61. 1895.
- 45) Fr. Bezold, Das Hörvermögen der Taubstummten mit bes. Berücks. der Helmholtz'schen Theorie u. s. w. 1896.
- 46) M. Meyer, Ueber Combinationstöne u. einige hierzu in Bez. steh. akust. Erscheingn., Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. d. S. 11. 1896.
- 47) —, Zur Theorie d. Differenztöne u. d. Gehörempf. überhaupt, Zeitschr. f. Psych. 16. 1898. (Abgedr. u. durch zwei Anhänge vermehrt in:
- 48) — Beitr. zur Akust. u. Musikw. 2. Heft. 1898).
- 49) —, Ueber die Function des Gehörorgans. Verhandl. d. Berl. Physik. Gesellsch. 1898. 17. Jahrg.
- 50) —, Zur Theorie des Hörens. Pflüg. Arch. 78. 1899.
- 51) —, Karl L. Schaefer's »Neue Erklärung der subj. Combinationstöne«. Pflüg. Arch. 81. 1900.
- 52) H. Ebbinghaus, Grundzüge der Psychologie. 1. Hlbbd. 1897.
- 53) —, Bemerkungen zu der Abhandl. Meyer's »Zur Theorie der Differenz-töne« u. s. w. Zeitschr. f. Psych. 16. 1898.
- 54) H. Cornelius, Psychologie als Erfahrungswissenschaft. 1897.
- 55) K. Ewald, Zur Physiologie des Labyrinths. VI. Mittheil. Eine neue Hörtheorie, Pflüg. Arch. 76. 1899.

- 56) K. L. Schaefer, Eine neue Erklärung der subj. Combinationstöne auf Grund d. Helmholtz'schen Resonanzhypothese. Pflüg. Arch. 78. 1899.
 - 57) —, Weitere Bemerkungen zu meiner »neuen Erklärung etc.« Pflüg. Arch. 83. 1900.
 - 58) H. Zwaardemaker, Ueber Intermittenzöne. Arch. f. Anat. u. Physiol. ed. His u. du Bois-Reymond. Suppl. Bd. 1900.
 - 59) F. Krueger, Beobachtungen an Zweiklängen. Philos. Stud. 16. 1900.
 - 60) K. L. Schaefer u. O. Abraham, Studien über Unterbrechungstöne. I. Mittheil. Pflüg. Arch. 83. 1901.
-

Inhaltsübersicht.

	Seite
Einleitung	185
Erstes Capitel. Die Thatsachen	186—216
a. Eigene Beobachtungen über die Combinationserscheinungen	186
b. Historisch vorliegende Angaben	189
Zweites Capitel. Vorfagen für die Erklärung der Combinations- erscheinungen	216—252
1. Objective und subjective Combinationstöne	216
2. Die Combinationserscheinungen und die Obertöne. (Neue Inter- ferenzversuche)	219
a. Obertöne und Schwebungen	227
b. Obertöne und Differenztöne	230
3. Schwebungen, »Stoßtöne« und Differenztöne. Die Intensitäts- verhältnisse	237
Drittes Capitel. Die physiologischen Theorien	252—306
1. Helmholtz's Theorie der subjectiven Combinationstöne	252
2. Erweiterungen der (Ohm-)Helmholtz'schen Theorie des Hörens	256
a. Die Theorie der Schwebungstöne (Koenig). Die Unter- brechungs- und Variationstöne	256
b. Voigt's Versuch einer mathematischen Ableitung der Com- binationstöne	265
c. Die Theorie der directen Erregbarkeit des Hörnerven (Wundt)	266
d. Hermann's Theorie des phasenwechselnden Mitteltones	268
e. Ebbinghaus' Erweiterung der Resonanzhypothese. Zwischenton. »Untertöne«	272
3. Die Summationstöne und die »subjectiven Obertöne«	278
4. Neue Theorien des Hörens	282
a. Meyer's Theorie der Wellenzerlegung	282
b. Ewald's Theorie der Schallbilder	288
5. Schaefer's Erklärung der subjectiven Combinationstöne auf Grund der Resonanzhypothese	299
Zusammenfassung	305
Litteratur	307
