

I.

Psychophysiologie der Klanganalyse.

Von

Karl L. Schaefer, Karlshorst.

Unter einem Tone oder, besser gesagt, einem einfachen Tone verstehen wir einen physikalischen pendelförmig-periodischen Schwingungsvorgang, welcher den Hörnerven erregt und dadurch eine Empfindung auslöst. Die Bewegung eines mathematischen Sekundenpendels ist gewiss eine typisch pendelförmige, aber wir rechnen sie nicht zu den Schallbewegungen, weil das Sekundenpendel wegen seiner zu grossen Schwingungsdauer unhörbar ist. Der vor einigen Jahren verstorbene Pariser Instrumentenbauer und Akustiker Rudolf Koenig hat Stimmgabeln hergestellt, die 90 000, und Edelmann in München hat Pfeifchen (nach Art der Galtonschen) konstruiert, die über 100 000 Schwingungen pro Sekunde abgaben; indessen sollte man auch hierbei exakterweise nicht, wie es meist aus Bequemlichkeit geschieht, von Tönen, sondern nur von physikalischen Tonschwingungen sprechen, da die genannten Instrumente für das menschliche Ohr absolut nicht vernehmbar sind. Andererseits ist in bezug auf die obige Definition des einfachen Tones die Bemerkung erforderlich, dass Tonempfindungen auch ohne eine ausserhalb unseres Körpers nachweisbare physikalische Ursache auftreten können. Aber dann handelt es sich entweder, wie bei den subjektiven Kombinationstönen und wohl auch bei den Erscheinungen der Diplakusis sowie gewissen anderen entotischen Tönen, um physikalisch entstehende Schallschwingungen im mittleren beziehungsweise inneren Ohre, oder aber, man hat es eben nicht mit eigentlichen Tönen, sondern lediglich mit Tonempfindungen zu tun, die je nach den Umständen zu den Halluzinationen zu rechnen oder sonst irgendwie auf physiologische oder pathologische Reizzustände der nervösen Substanz zurückzuführen sind.

Was nun die physikalische Herstellung eines einfachen Tones anlangt, so ist dieselbe nicht so leicht, wie der mit diesen Dingen nicht näher Vertraute etwa zunächst glauben könnte. Wenn nämlich jemand auf irgend einem musikalischen Instrument eine beliebige Note spielt, so produziert die Schallquelle durchaus keinen einfachen Ton, obwohl hierbei im musikalischen wie im alltäglichen Sprachgebrauch von einem „Tone“ gesprochen wird, sondern eine Mehrheit einfacher Töne, einen Klang, als dessen Partial- oder Teiltöne man den sogenannten Grundton und die Obertöne zu unterscheiden hat.

Wird, um die Sache an einem Beispiele näher zu erläutern, am Klavier die Taste für c^0 niedergedrückt, so geht aus demselben eine Klangwelle hervor, deren tiefste und stärkste pendelförmige Komponente der einfache Ton von der Schwingungszahl 128, eben der Grundton c^0 , ist. Ausserdem enthält der Klang aber noch eine Reihe von Obertönen, deren Schwingungszahlen ganze Vielfache von derjenigen des Grundtones sind. Solche Obertöne heissen mit Rücksicht darauf, dass die doppelte Schwingungszahl des Grundtones dessen Oktave, die dreifache seiner Duodezime, die vierfache seiner Doppeloktave, die fünffache deren Duoterz usw. entspricht, harmonische. Neben den harmonischen Obertönen bringen einige Instrumente auch mehr oder weniger deutliche unharmonische Obertöne hervor. So rührt das eigentümliche helle Klingen, das viele Stimmgabeln im Augenblicke des Anschlagens hören lassen und das nachher bald von selbst zu erlöschen pflegt oder sich durch Berühren des Knotenpunktes der einen Zinke sofort beseitigen lässt, von hohen unharmonischen Nebentönen her.

Dem Grundtone kommt nicht nur von allen Partialtönen die kleinste Schwingungszahl zu, sondern er ist zugleich der stärkste Teilton; er bildet, wie schon in seiner Bezeichnung zum Ausdrucke kommt, gleichsam die Basis des ganzen Klanges, dessen Höhe wir ja auch nach der Schwingungszahl des Grundtones zu bemessen pflegen. Die Anzahl und die Stärke, in welcher die Obertöne den Grundton begleiten, hängt in jedem Falle von der Beschaffenheit der Klangquelle ab. Ein Grundton, nehmen wir als Beispiel wieder c^0 , hat, auf dem Harmonium angegeben, eine relativ sehr grosse Anzahl harmonischer Obertöne, wobei die Schwingungszahlen der Teiltöne dieses Klanges im Verhältnis $1:2:3:4:5:6:7:8:9$ usw. stehen. Das c^0 des Pianofortes lässt ausser dem Grundtone noch die fünf ersten Obertöne, also c^1 mit $2 \cdot 128$ Schwingungen, g^1 ($= 3 \cdot 128$), c^2 ($4 \cdot 128$), e^2 ($5 \cdot 128$) und g^2 ($6 \cdot 128$), hören, während die Töne 7, 8 und 9 gar nicht oder doch sehr unvollkommen hervortreten, was mit der Lage der Anschlagsstelle auf der Saite zusammenhängt und auch musikalisch zweckmässig ist. Angeblasene Flaschen und weite, gedeckte Pfeifen haben nur sehr wenige und schwache Obertöne. Die gedeckten, zylindrischen Pfeifen der Orgel geben Klänge, in denen als Teiltöne nur die ungradzahligen Multipla des Grundtones, also die Töne 1,

3, 5 etc., enthalten sind; eine Eigenschaft, die der Klarinette ebenfalls zukommt, während Oboe und Fagott auch die geradzahligen Teiltöne produzieren.

Die Schwierigkeit, einfache Töne, also Grundtöne ohne Obertöne, experimentell zu erzeugen, hat bereits Helmholtz in seiner Lehre von den Tonempfindungen¹⁾ anerkannt. Er nennt den Klang weiter gedeckter und schwach angeblasener Orgelpfeifen fast frei von Obertönen und erklärt, bloss auf ausschliesslich einen Ton reduziere sich der Klang einer Schallquelle in sehr wenigen Fällen, wofür als Beispiel aber nur die Stimmgabeln angeführt werden, deren Ton durch eine passende Resonanzröhre auf die Luft übertragen wird. Indessen muss die Richtigkeit dieser letzteren Angabe auf Grund genauerer Untersuchungen verschiedener Autoren gegenwärtig mit Entschiedenheit bestritten werden. Man darf jetzt wohl behaupten, dass alle Gabeln, viele sogar auffallend stark, mindestens die Oktave hören lassen; häufig genug werden auch noch die Duodezime und vielleicht weitere harmonische Obertöne nachweisbar sein²⁾. Eine zylindrische Resonanzröhre, wie Helmholtz sie anwandte, verstärkt freilich ausser dem Grundtone, auf den sie abgestimmt ist, nur noch (in einem mit der Höhe abnehmenden Masse) die ungradzahligen Teiltöne, aber sie beseitigt doch darum die Oktave nicht. Diese wird sich vielmehr, wie ich bestimmt glaube, bei jeder Gabel durch Auslösen des Grundtones im Interferenzapparate konstatieren lassen. Auch durch die Schwebungen zweier Gabeln von verstimmttem Oktavenverhältnis pflegt sich das Vorhandensein der Oktave im Klange der tieferen Gabel zu dokumentieren. (Am wenigsten sicher scheint mir zu ihrem Nachweis die Benutzung eines auf sie abgestimmten Resonators zu sein.) Bei der Edelmannschen kontinuierlichen Stimmgabelreihe, einem Instrumentarium, das seiner vielseitigen Brauchbarkeit wegen in keinem akustischen Laboratorium fehlen sollte, benutze ich gerade die Oktavenschwebungen häufig zum Zwecke genauer Abstimmungen und beim Zusammenklange zweier solcher Laufgewichtgabeln, von denen die eine 24, die andere 26 Schwingungen in der Sekunde machte, habe ich einmal gleichzeitig Schwebungen von verschiedener Frequenz, nämlich die zwei Stösse der Grundtöne und die vier Stösse der Oktaven gehört. Es ist mithin sicher, dass diese Gabeln die Oktave mit im Klange enthalten. Eine von ihnen auf berusstem Papier aufgezeichnete Schwingungskurve gewährt freilich dem Auge den Anblick einer reinen Sinuskurve; aber das kann man unmöglich als Gegenbeweis gegen die Oktave geltend machen. Denn die Oktavenschwingungen entstehen gar nicht in den Zinken selbst, sondern in der Luft und zwar infolge gewisser physikalischer Vorgänge, die schon mehrfach, neuerdings namentlich von Lindig untersucht sind, auf dessen Publikation³⁾ hier verwiesen werden muss.

¹⁾ 5. Aufl. S. 97.

²⁾ Vergl. C. Stumpf, Über die Ermittlung von Obertönen. Ann. d. Phys. u. Chem. (N. F.) Bd. 57, S. 673.

³⁾ Annalen der Physik (IV. Folge). Bd. 11, 1903.

Die Stimmgabeln dürfen also keinesfalls mehr als Quellen einfacher Töne angesehen werden. Auch von grösseren zur Erzeugung sehr tiefer Töne benutzten schwingenden Stahllamellen gilt ähnliches, wie van Schaik¹⁾ gezeigt hat. Dagegen ist es mir bei kleineren, Töne bis zu ca. 400 Schwingungen hinauf gebenden, elektrisch schwingenden Federn, den sogen. Bernsteinschen Unterbrechern, bisher nicht immer gelungen, die Oktave oder gar höhere Teiltöne durch Resonatoren resp. Schwebungen festzustellen; doch möchte ich mir hierüber mangels hinreichender Erfahrungen noch kein abschliessendes Urteil erlauben. Wie weit es möglich ist, die Herstellung einfacher Töne mittelst einer Telefonsirene zu bewerkstelligen, lässt sich ebenfalls, soviel ich sehe, vorläufig nicht mit Bestimmtheit sagen. Während die Weber-Karstensche Telefonsirene nach Karsten²⁾ reine Töne liefern soll, erhielt Lindig³⁾ mit einer etwas modifizierten Form des Apparates keine reinen, sondern von diversen harmonischen Obertönen begleitete Grundtöne. Je mehr Magnete verwendet wurden, um so mehr traten allerdings die Obertöne zurück, bis schliesslich überhaupt „keine mehr zu konstatieren“ waren; aber eben dieses „Konstatieren“ scheint Lindig nur mit dem blossen Gehör ausgeführt zu haben, eine Methode, die als durchaus unzuverlässig anzusehen ist. Auch Max Wien⁴⁾ spricht bei der Schilderung seiner Versuche, die er mit der Wechselstromsirene über die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für Töne verschiedener Höhe anstellte, von den sehr schwachen und durch Einschaltung von Selbstinduktion und Kapazität im Telephonkreis noch weiter zu schwächenden Obertönen, aber genauere Angaben über den Erfolg der Schwächung fehlen. Überdies habe ich auf Grund gewisser eigener Beobachtungen Bedenken, ob nicht die Telephonmembran an sich selbständig dem Grundton Obertöne, wenn auch schwache, hinzufügen möchte.

Somit dürfte es praktisch kaum vorkommen, dass einfache Töne direkt durch eine Schallquelle erzeugt werden, und die sozusagen ständige Begleitung des Grundtones durch Obertöne ist ein physikalischer Umstand, welcher für die Klangauffassung gewisse wichtige Konsequenzen hat. Indessen besitzen wir zur Herstellung einfacher Töne doch ein indirektes Mittel in der Interferenz. Mit Hilfe eines ausreichend funktionierenden Interferenzapparates gelingt es, zumal aus einem Klange mit nicht zu vielen, zu starken und zu hohen Obertönen die letzteren so weit zu beseitigen, dass sie auf keine Weise mehr für das Ohr nachweisbar sind. Ausser dieser physikalischen Methode steht uns aber auch noch eine physiologische zu Gebote. Das Ohr, insbesondere das musikalische und geübte, vermag einen Teilton, auf den die Auf-

1) Wellenlehre und Schall. Deutsche Ausgabe. Braunschweig 1902, S. 164.

2) Schriften des nat. Vereins f. Schleswig-Holstein. 3, 2. Heft, S. 27 ff., Kiel 1879.

3) Annalen der Physik (IV. Folge). Bd. 10, S. 242 ff., 1903.

4) Pflügers Arch. f. d. ges. Physiologie. Bd. 97, 1903.

merksamkeit sich willkürlich oder unwillkürlich lenkt, aus dem Klange zu isolieren und auf diese Weise als einfachen Ton zu perzipieren.

Hiermit kommen wir zu der Tatsache, welche als die fundamentalste und wichtigste in der Lehre von der Klangwahrnehmung bezeichnet zu werden verdient, der Tatsache nämlich, dass das Ohr eben die Fähigkeit besitzt, einen Klang in seine Teiltöne aufzulösen, ihn in seine Komponenten zu zerlegen, ihn zu analysieren. Das Gehör zeigt hierin eine bemerkenswerte Verschiedenheit vom Gesichtssinne. Wenn wir dem Auge eine Mischung von rotem und gelbem Lichte darbieten, so erblickt es eine neue Farbe, Orange. Dieses Orange erinnert zwar zugleich an Rot und Gelb, aber man sieht darin nicht Rot- getrennt neben Gelb in dem Sinne, wie man etwa einen sehr tiefen Ton von einem gleichzeitigen sehr hohen gesondert wahrnimmt; und über jeden Zweifel erhaben ist es, dass man in einem durch Mischung zweier Komplementärfarben gewonnenen reinen Grau die Komponenten nicht zu erkennen vermag. Das Ohr würde wohl dazu imstande sein, wenn die Ather-schwingungen des Lichtes den Hörnerven zu erregen vermöchten.

Die Klängzerlegung seitens des Gehörs findet eine einfache, äusserst plausible, physiologische Erklärung durch die Helmholtzsche Resonanzhypothese. Diese nimmt bekanntlich an, dass die Basilarmembran des Ductus cochlearis aus gewissen, in ihrer Struktur gelegenen Gründen aufzufassen sei als ein System dicht nebeneinander liegender, von der Lamina spiralis zur Kuppel des Schneckenkanals sich herüberspannender Saiten, deren membranöse Querverbindung nur dazu diene, dem Druck der Flüssigkeit eine Handhabe zu bieten. Sie nimmt ferner an, dass für jeden unterscheidbaren physikalischen Ton eine bestimmte Gruppe dieser Saiten existiert, die auf ihn speziell abgestimmt und nur durch ihn und keinen höheren oder tieferen in Schwingungen (die dann das zugehörige Stückchen des Cortischen Organes erregen) zu versetzen ist; und postuliert somit schliesslich, dass beim Hören eines Klanges sich ebensoviele einzelne Erregungszonen in der Basilarmembran und also auch ebensoviele einzelne Tonempfindungen ergeben wie erregende Teiltöne im Klange enthalten sind.

Ich stehe durchaus auf dem Boden dieser Helmholtzschen Theorie. Sie ist zwar in den letzten Dezennien lebhaften Angriffen ausgesetzt gewesen, insbesondere auf dem von Helmholtz selbst nicht mehr völlig durchgearbeiteten Gebiete der sekundären Klangerscheinungen, worunter ich die Schwebungen, Kombinations-, Variations- und Unterbrechungstöne verstehe; aber man darf ruhig behaupten, dass sie diesen Angriffen siegreich standgehalten hat und gegenwärtig fester steht als je zuvor¹⁾. Ausserdem kommt ihr von den mancherlei anderen Hörtheorien,

¹⁾ Vergl. u. a. F. A. Schulze, Die Übereinstimmung der als Unterbrechungstöne bezeichneten Klangerscheinungen mit der Helmholtzschen Resonanztheorie. Ann. d. Phys. (IV. Folge). Bd. 26, 1908, S. 217.

die im Laufe der Zeit publiziert worden sind, keine gleich in bezug auf die umfassende und vielfach bis ins Einzelste gehende Übereinstimmung mit den Tatsachen.

Wird dem Ohre eine Zeitlang ein und derselbe Ton in beträchtlicher Stärke dargeboten, so tritt eine Art Betäubung des Hörnerven ein, die sich in Herabsetzung der Hörschärfe äussert. Aber diese betrifft nur den gehörten Ton und erstreckt sich nicht auf andere Tonhöhen. Auch die unter dem Namen *Diplacusia* bekannte pathologische Erscheinung des Verstimmthörens pflegt sich auf eine gewisse Anzahl von Tonhöhen zu beschränken. Sprechen nicht diese Beobachtungen im Verein mit den bei gewissen Krankheiten des Ohres vorkommenden „Tonlücken“ zwingend dafür, dass den einzelnen Tonempfindungen eine physiologische Selbständigkeit und Unabhängigkeit voneinander zukommt, gerade als ob wir für jede Tonhöhe ein gesondertes Perzeptionsorgan besässen, und wird nicht die Helmholtzsche Resonanzhypothese diesem Verhalten auf das Beste gerecht?

Indessen soll hier nicht näher auf die mannigfachen Stützpunkte dieser Theorie eingegangen werden. Die Hauptsache ist, dass sie die physiologische Klanganalyse in unübertroffener Weise erklärt, wie das selbst von solchen Forschern anerkannt ist, die sie im übrigen (wenn auch irrtümlich) für erweiterungs- oder modifikationsbedürftig gehalten haben.

Betrachten wir nun vom Standpunkte der Resonanzhypothese aus die Zerlegung, welche eine das Ohr treffende physikalische Klangwelle erfährt, genauer, so ergeben alsbald Theorie und praktische Beobachtung übereinstimmend, dass der Satz, das Ohr löse den Klang in seine Teiltöne auf, zwar im Prinzip und im allgemeinen unbestreitbar ist, dass er aber im konkreten Falle gewissen Einschränkungen unterworfen sein kann.

Wie schon erwähnt, ist der Grundton physikalisch der kräftigste Teilton des Klanges. Er dominiert auch bei mittlerer und hoher Lage physiologisch und psychologisch, was eben darin zum Ausdrucke kommt, dass wir dem Ganzen die Tonhöhe des Grundtones zuzuschreiben pflegen, trotzdem bei der Analyse jedem Partialton doch seine besondere Höhe zuerkannt werden muss. Dies hängt nach Stumpf¹⁾ mit dem allen Tonempfindungen eigenen räumlichen Moment zusammen, welches uns veranlasst, den jeweils tiefsten Ton eines Zusammenklanges, sei er auch gelegentlich nur ein Differenzton, wegen seiner räumlichen Präponderanz gleichsam als das tragende Fundament der übrigen Teile zu beurteilen. Wenn man nun aber, etwa in mittlerer Region beginnend, mit dem Grundtone immer weiter und weiter in der Skala hinabgeht, verliert er allmählich sein Übergewicht über die Obertöne und wird mehr und mehr von letzteren in der Wahrnehmung verdeckt. Helmholtz²⁾

1) Tonpsychologie, Bd. 2, S. 383 ff., 1890.

2) Lehre von den Tonempfindungen. 5. Aufl., S. 291 f.

hat hierüber schöne Versuche mittelst seiner Doppelsirene angestellt. Gab dieselbe als Grundton weniger Luftstösse als 36—40 pro Sekunde, so hörte er nur die Duodezime; bei Tönen von 40—80 Stössen war die Oktave der stärkste Partialton und erst bei Schwingungszahlen über 80 erschien der Grundton. An diesem Verhältnis zwischen den Partialtönen änderte sich auch nichts, wenn die Wirkung des Klanges auf das Ohr erheblich verstärkt wurde. So verband Helmholtz vergebens seinen Gehörgang durch eine passend eingeführte Röhre mit einer Öffnung, die in das Innere des Blasebalges führte. Die Erschütterungen des Trommelfelles waren dabei so stark, dass sie einen unleidlichen Kitzel verursachten, aber trotzdem wurden die tiefsten Töne nicht deutlicher.

Dass es sich hierbei, abgesehen von der weiter unten noch zu erörternden Verschmelzung des Grundtones mit den nächsten konsonanten Obertönen, der Oktave, der Duodezime und Doppeloktave, um eine wirkliche Verdeckung handelte, geht daraus hervor, dass faktisch tiefere Töne als solche von 80 Schwingungen noch sicher hörbar sind. Helmholtz selbst hat den Nachweis hierfür erbracht¹⁾. Über eine dünne Klaviersaite aus Messing wurde ein durchlochstes kupfernes Kreuzerstück geschoben und auf der Mitte der Saite fest und unverrückbar fixiert. Die Saite gibt dann einen Klang, dessen Grundton durch ein Intervall von mehreren Oktaven von den nächstfolgenden Obertönen getrennt ist, die überdies schnell verklingen; eine Verwechslung des Grundtones mit anderen Partialtönen ist also in diesem Falle ausgeschlossen. Eine solche Saite, die 37 Schwingungen machte und über einen Resonanzkasten gespannt war, dessen einzige Öffnung durch eine Röhre mit dem Ohre verbunden wurde, rief noch eine schwache Tonempfindung hervor. Bei 34 Schwingungen war aber kaum noch etwas zu hören.

Es ist möglich, um nicht zu sagen wahrscheinlich, dass noch tiefere Töne derartiger Saiten hörbar werden würden, wenn man sie in grösserer Stärke hervorzurufen vermöchte. Denn nach neueren Untersuchungen, namentlich von Max Wien²⁾, steht fest, dass die Intensitätsschwelle der Tonempfindung sich in gesetzmässiger Weise mit der Tonhöhe ändert: die Empfindlichkeit des Ohres ist am geringsten gegenüber den tiefsten Tönen, nimmt dann zu bis zu einem in den höheren Oktaven gelegenen Maximum und von da aus gegen die obere Hörgrenze wieder ab. Der tiefste Ton, den irgend eine Versuchsperson mit gesunden Ohren in irgend einem Falle noch hört, kann daher, wenn man davon absieht, dass auch Aufmerksamkeit, Beobachtungsschärfe und Übung hierbei eine bedeutsame Rolle spielen, leicht nur darum der tiefste sein, weil ein noch tieferer nicht mit genügender Intensität dem Ohre dargeboten werden konnte.

¹⁾ Lehre von den Tonempfindungen. 5. Aufl., S. 294.

²⁾ Pflügers Arch. Bd. 97, S. 1 ff., 1903.

In der Tat ist denn auch von verschiedenen Forschern angegeben worden, dass andere Schallquellen als die von Helmholtz benutzten Saiten erheblich tiefere Töne hören liessen. So teilt Helmholtz selbst mit¹⁾, er habe von Koenig in Paris zwei grosse Stimmgabeln erhalten, an deren Zinken Laufgewichte verschieblich angebracht waren. Je nach der Einstellung dieser Gewichte gab die eine Gabel Töne von 24—35, die andere solche von 35—61 Schwingungen. Wurde das Ohr dem Gewichte möglichst genähert — die Gewichte hatten die Form von Platten — so hörte man bei 30 Schwingungen noch deutlich einen schwachen dröhnenden Ton, bei 28 kaum noch eine Spur, trotzdem Oscillationen von 9 mm Amplitude erzeugt werden konnten. W. Preyer vermochte auf gleiche Weise noch einen Ton von 24 Schwingungen zu vernehmen. Ausserdem benutzte dieser Autor aber auch belastete Metallzungen zur Bestimmung der unteren Hörgrenze²⁾. Eine Serie solcher Zungen war in einem von Preyer als Grundtöne-Apparat bezeichneten Blasebalgkasten zusammengestellt. Sie gaben der Reihe nach die Schwingungszahlen 8, 9, 10 usw. bis 40. Unterhalb 26 Schwingungen hört nach Preyer „auch der Aufmerksamste und Geübteste schwerlich ohne weiteres im Klange den Grundton durch. Lässt man aber die Zunge verklingen und legt man die Ohrmuschel im Augenblick, da alles Dröhnen erlischt, fest an die Holzwand des Kastens, so hört man mit Leichtigkeit vollkommen deutlich einen eigentümlichen, ganz tiefen, summenden Ton, der nach und nach an Intensität abnimmt, bis er plötzlich verschwindet, dann nämlich, wenn die pendelnde Zunge schwächer schwingt und nahezu wieder in ihre Gleichgewichtslage zurückgekehrt ist.“ So liessen sich noch Töne bis zu 16 Schwingungen hinab wahrnehmen. Die von A. J. Ellis an einem zweiten Exemplar des Grundtöne-Apparates gewonnenen Resultate³⁾ weichen von denen Preyers einigermaßen ab. Ellis hörte schon bei 9 Schwingungen etwas wie einen Ton und hatte zwischen 10 und 15 bereits deutliche Tonempfindungen, die er freilich den Obertönen zuschreibt. Zu ähnlich niedrigen Zahlen wie Ellis sind auch noch andere Autoren gelangt, was der relativ beträchtlichen Schallstärke der benutzten Tonquellen zuzuschreiben sein dürfte: so fand Appunn 9—12 Schwingungen als Grenzwert; Cuperus mit der Appunnschen Lamelle 10—13; Bezold mit Edelmannschen Laufgewichtgabeln 11—12.

Indessen wird der Wert aller dieser Feststellungen dadurch höchst zweifelhaft, dass die verwendeten Tonmittel ausser dem Grundtone nachgewiesenermaßen auch noch die nächst höheren mit dem Grundton verschmelzenden resp. ihn mehr oder weniger verdeckenden Partialtöne mit ergeben, so dass man keine Gewähr dafür hat, ob die jeweils tiefste Tonemp-

1) Lehre von den Tonempfindungen. 5. Aufl., S. 294.

2) Über die Grenze der Tonwahrnehmung. Jena 1876. Kap. 1: Die tiefsten Töne. S. 8.

3) Preyer, Akustische Untersuchungen. Jena 1879. Kap. 1.

findung wirklich von dem Grundtone herrührt oder von einem Obertone oder von dem unanalysierbaren Zusammenklange mehrerer Obertöne des an sich unhörbaren Grundtones.

Der meines Wissens bisher einwandfreieste Versuch, tiefste reine Grundtöne physikalisch zu erzeugen, bleibt das erwähnte Helmholtzsche Experiment mit der belasteten Klaviersaite. Eine Art von physiologischem Seitenstück hierzu bilden meine eigenen Beobachtungen über tiefste Differenztöne sehr hoher Primärtöne¹⁾. Dieselben wurden angestellt mit den beiden Galtonpfeifen des Psychologischen Institutes der Universität Berlin, für welche bereits früher von Stumpf und Meyer²⁾ die obere Hörgrenze als bei 20000 Schwingungen gelegen festgestellt war. Brachte ich die Pfeifen in einer Höhenlage von ca. 12000 Schwingungen zunächst auf Unisono und veränderte dann die Höhe der einen ganz allmählich und kontinuierlich gegen die der anderen nach aufwärts oder abwärts, so traten zunächst nur Schwebungen und dann, wenn letztere eine Frequenz von 25 bis 35 pro Sekunde erreicht hatten, die erste tiefste Differenztonwahrnehmung auf. Den tiefsten, eben noch hörbaren Differenztönen dieser Höhenregion der Primärtöne entspricht also, ziemlich übereinstimmend mit dem Helmholtz'schen Klaviersaitenversuch, die durchschnittliche Schwingungszahl 30. In der Gegend von 9000 bis 10000 Schwingungen lag die Schwelle der Differenztonwahrnehmung meist noch bei 30 Schwebungen oder auch ein wenig tiefer. In der Tonreihe weiter hinabschreitend und Primärtöne von der Höhe 8000, 7000, 6000 usw. bis 1000, 750, 700, 500, 400, 300 und 200 wählend, hörte ich einen Differenzton oberhalb 30 Schwebungen stets, in der Regel schon viel eher, in einem Falle, in dem eine Stimmgabel und eine angeblasene Flasche als Tonquellen dienten, bereits spurweise bei 14. Sinkt die Tonhöhe der Primärtöne unter 100 Schwingungen herab, so wird es meinem Ohre schwierig, die tiefsten Differenztöne aus dem Klange der selbst tiefen Primärtöne herauszuhören, so dass ein zuverlässiges Urteil nicht mehr möglich ist.

Wenn man nun in mittlerer Höhenlage der Primärtöne bereits bei 14 bis 16 Schwebungen oder, wie ich am Appunnschen Tonmesser, der bekanntlich Zungenpfeifen enthält, experimentierend öfter fand, gar schon bei 10 einen äusserst tiefen Differenzton vernehmen kann, so ist es wohl höchst wahrscheinlich, dass hier die Obertöne der Primärtöne mit im Spiele sind: Die Oktaven der Primärtöne ergeben der Rechnung nach die Oktave, die Duodezimen die Duodezime des Differenztones der primären Grundtöne. Daher können denn auch derartige Differenzton-Beobachtungen nicht zu einem Urteil über die untere Hörgrenze als solche verwertet werden. Anders steht es mit den eben erwähnten Differenztönen der sehr hohen Primärtöne von

¹⁾ Karl L. Schaefer, Die Bestimmung der unteren Hörgrenze. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane Bd. 21, S. 166 ff., 1899.

²⁾ Ann. d. Phys. u. Chem. (N. F.). Bd. 61, S. 778, 1897.

10—12000 Schwingungen. Hier darf man bereits die Oktaven der Primärtöne als über die obere Hörgrenze hinausfallend und daher unhörbar ansehen, zum wenigsten für die von mir benutzten Instrumente, worauf es hier ja allein ankommt. Denn nach einer kürzlich von F. A. Schultze¹⁾ im Anschluss an seine eigenen Versuche über höchste Töne und die obere Hörgrenze veröffentlichten Zusammenstellung der wichtigsten bisher hierüber von den verschiedenen Autoren gemachten Beobachtungen liegt die obere Grenze der Tonperzeption ganz allgemein bei ungefähr 20000 v. d. Sieht man von gewissen Fällen ab, in denen viel zu hohe Werte infolge beträchtlicher Irrtümer hinsichtlich der benutzten Tonhöhen angegeben worden sind, so sind es eigentlich nur die Löchersirenen und die Zahnräder, die eine wesentlich höhere Grenze als 20000 ergeben haben. Es liegt aber der Verdacht vor, dass bei diesen Instrumenten gewisse Fehlerquellen vorhanden sind. Was speziell die Galtonpfeife anlangt, so hat bekanntlich Edelmann, der sich um die fortschreitende Verbesserung derselben sehr verdient gemacht hat, bereits im Jahre 1900 mitgeteilt²⁾, dass mit den neueren, durch Kundtsche Staubfiguren kontrollierten Exemplaren der Pfeife bei manchen Personen die Grenze erst in der Gegend von 50000 oder noch etwas mehr Doppelschwingungen erreicht würde. Diese Angabe beruht indessen, wie inzwischen von Ch. Myers und von F. A. Schulze evident erwiesen ist, auf einer Täuschung, welche in der üblichen Benützung eines Gummiballons zum Anblasen ihren Grund hat. Die Folge hiervon ist nämlich die, dass die Pfeife nicht einen Ton, sondern eine ganze Skala äusserst rasch aufeinander folgender Töne erzeugt und dass der jeweils faktisch gehörte höchste Ton viel tiefer in dieser Skala gelegen ist als jener angebliche Grenzton, den die Kundtschen Staubfiguren anzeigen.

Jedenfalls bildete bei den zu meinen Differenztonversuchen benutzten Galtonpfeifen die Tonhöhe von 20000 Schwingungen, wie schon betont wurde, die Grenze. Freilich könnte jemand einwenden, dass, wenn auch Obertöne jenseits 20000 von der Wahrnehmbarkeit an sich ausgeschlossen waren, dennoch hörbare Differenztöne durch sie hätten hervorgerufen sein können. In der Tat haben A. M. Mayer³⁾ und R. König⁴⁾ festgestellt, dass zuweilen Leute noch Differenztöne solcher Primärtöne zu hören vermögen, die selbst wegen zu grosser Höhe sich der Wahrnehmung entziehen. Es wäre ganz verdienstlich, wenn einmal in dieser Richtung systematische

1) Passows und Schaefers Beiträge zur Anatomie, Physiologie, Pathologie und Therapie des Ohres, der Nase und des Halses. Bd. 1, S. 134 ff., 1908. (Siehe auch Annal. d. Phys. [IV. Folge]. Bd. 24, S. 785, 1907.)

2) Fortschritte in der Herstellung der Galtonpfeife (Grenzpfife). Zeitschr. f. Ohrenheilk. Bd. 36, S. 330.

3) Report of the Meeting of the British Association for the Advancement of Science. Oxford 1894, p. 573.

4) Ann. d. Phys. u. Chem. (N. F.) Bd. 69, S. 636, 1899.

Versuche mit Primärtönen jenseits der physiologischen Hörgrenze angestellt würden. Vorläufig möchte ich glauben, dass bei meinen Beobachtungen die tiefsten Differenzttöne der höchsten Primärtöne wirklich einfache Töne waren, womit dann festgestellt wäre, dass einfache Töne sicher bis zu 25 Schwingungen hinab hörbar sind. Aber auch mit diesen Versuchen ist wie mit dem Helmholtzschen der Übelstand verknüpft, dass nicht entschieden werden konnte, ob nicht noch tiefere Differenzttöne hörbar gewesen sein würden, wenn sie sich in entsprechend grösserer Stärke hätten produzieren lassen. Ausserdem kommt als störend in Betracht, dass nicht wie beim Klaviersaiten-Experiment der fragliche Ton für sich allein dem Ohre dargeboten wurde, sondern aus einem Klange herausgehört werden musste. Zwar ist gerade das Zusammentreffen von sehr hohen mit sehr tiefen Tönen ein Fall, der für die Analyse keine besonderen Schwierigkeiten bietet; um so ungünstiger aber ist, dass die tiefsten Differenzttöne von Schwebungen begleitet sind und deren Anzahl mit der Schwingungszahl des betreffenden Differenztones übereinstimmt. Die wie feines Zwitschern klingenden Schwebungen der höchsten Töne können leicht die Aufmerksamkeit von der überaus weichen und schwachen Empfindung der tiefsten Differenzttöne ablenken beziehungsweise letztere verdecken.

Ausser Differenzttönen habe ich zu Versuchen über das Heraushören tiefster Töne aus einem Tongemenge auch noch die sogenannten Unterbrechungstöne herangezogen und zwar mit freundlicher Unterstützung von Herrn Dr. Otto Abraham, dessen ungewöhnlich feines und geübtes Ohr mir hierbei vortrefflich zu statten kam¹⁾. Unterbrechungstöne lassen sich auf verschiedene Weise hervorbringen. So kann man den Ton einer Stimmgabel durch einen Hörschlauch dem Ohre zuleiten und zugleich eine kreisförmig durchlöchernte Scheibe zwischen Schlauch und Gabel rotieren lassen. So oft ein Loch hindurch passiert, dringt der Ton ungehindert in die vor der Gabel befindliche Öffnung des Hörrohres; ist das Loch vorüber und tritt eine undurchbohrte Partie der Scheibe an seine Stelle, so wird der Ton stark gedämpft oder ausgelöscht. Ist die Schwingungszahl des Gabeltones hierbei m und die Anzahl der Intermissionen pro Sekunde gleich n , so wird unter passenden Umständen ein „Intermittenz“- oder „Unterbrechungston“ von der Schwingungszahl n gehört. Ein zweiter Modus ist der, eine Stimmgabel um ihre Längsachse vor einem Resonator rotieren zu lassen, wobei die Existenz der bekannten Interferenzflächen der Stimmgabeln eine viermalige Abschwächung des Tones bei jeder Umdrehung herbeiführt. Drittens kann man eine Löchersirene zur Erzeugung beider Töne, des zu unterbrechenden oder primären Tones m und des Unterbrechungstones n , benutzen, indem

¹⁾ Die Bestimmung der unteren Hörgrenze. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. S. Bd. 21, S. 170 ff., 1899.

man sie in Rotation versetzt und ihren Löcherkreis anbläst. Sind dabei in gewissen gleichen Abständen immer einige Löcher verstopft, so findet an diesen Stellen jedesmal eine Pause des Tones statt, also sovieler Unterbrechungen pro Sekunde, als Gruppen verschlossener Löcher an der Anblasvorrichtung vorbeigehen. Statt Löcher ausfallen zu lassen, kann man die Scheibe auch so einrichten, dass alle Löcher offen sind, aber der Durchmesser derselben periodisch zwischen einem Maximum und einem Minimum wechselt, wodurch ebenfalls Intensitätsschwankungen des Primärtones beim Anblasen entstehen. Schliesslich hat man auch telephonisch übertragene Töne durch periodisches Öffnen und Schliessen des Telephon-Stromkreises intermittierend gemacht, was eigenartige sekundäre Klangerscheinungen, nämlich Variationstöne erster und höherer Ordnung und verschiedene Kombinationstöne, deren Schwingungszahl gelegentlich mit der Unterbrechungszahl zusammenfällt, zur Folge hat.

Wir haben zu unseren Versuchen die an dritter Stelle genannte Methode verwendet, die für diesen Zweck die geeignetste und bequemste war. Da hierbei die Anzahl der Unterbrechungen, also auch die Höhe des Unterbrechungstones, unter sonst gleichen Umständen von der Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe abhängt, verfahren wir in jedem einzelnen Falle so, dass wir zunächst, von einem noch deutlich vernehmlichen Unterbrechungston ausgehend, die Umdrehungen sukzessive verlangsamen, bis der fragliche Ton, immer tiefer und schwächer werdend, schliesslich aufhörte, und dass wir dann, mit einer sicher zu langsamen Rotationsgeschwindigkeit beginnend, diese allmählich soweit steigerten, bis die erste, tiefste Unterbrechungstonempfindung auftauchte. Jede Beobachtung wurde immer so oft wiederholt, bis wir beide zu einem klaren und übereinstimmenden Urteil über die Schwelle des Unterbrechungstones gekommen waren.

Es ist erwähnenswert, dass in den ersten Versuchsreihen die Grenze bei 24 gefunden wurde, dass sie aber mit unserer zunehmenden Übung in diesen schwierigen Beobachtungen kontinuierlich bis auf 16 sank und bei dieser Zahl stehen blieb. Je mehr die Unterbrechungstöne — und das Gleiche gilt auch von den Differenztönen — sich dem Ende der Tonreihe nähern, desto diskontinuierlicher, leiser und undeutlicher werden sie, bis sie zuletzt dem Ohre gänzlich entswinden. Unterbrechungstöne und Differenztöne verhalten sich also hierin ganz ebenso wie die sonst von irgend einer Schallquelle unmittelbar erzeugten tiefsten Töne; was freilich nichts Merkwürdiges mehr hat, seit wir neuerdings zu der experimentell vollkommen gesicherten Erkenntnis gelangt sind ¹⁾, dass die früher als rein subjektiv im inneren Ohre zustande kommend angesehenen und demgemäss häufig gegen

¹⁾ K. L. Schaefer, Der Gehörsinn. Kap. 3: Von den sekundären Klangerscheinungen. Nagels Handbuch der Physiol. Bd. III, S. 525 ff. und 532 ff., 1905.

die Helmholtzsche Resonanzhypothese ins Feld geführten Intermittenz- und Kombinationstöne gleich allen anderen hörbaren Tönen als pendelförmige Komponenten in der ins innere Ohr eintretenden Klangwelle enthalten sind. Die Kombinationstöne entstehen jedenfalls im Trommelfell beziehungsweise in den Membranen der Labyrinthfenster; die Unterbrechungstöne werden, abgesehen von den oben als erster und zweiter erwähnten Fällen, wo sie als Differenztöne aufzufassen sind, durch die Schallquelle selbst hervorgerufen.

Früher auch meinerseits in der allgemein verbreiteten Meinung befangen, die Intermittenztöne entstanden auf rätselhafte Weise als einfache Töne im inneren Ohre — manche haben ihren Ursprung sogar ins Nervengewebe verlegen wollen — schrieb ich in meiner bereits zitierten Abhandlung über die untere Tongrenze: „Diese Unterbrechungstöne haben nun, nach unseren gegenwärtigen physiologisch-akustischen Kenntnissen zu urteilen, keine Obertöne. Unsere Versuche beweisen daher, dass schon 16 Erregungen in der Sekunde eine Tonempfindung auszulösen imstande sind.“ Dieser Satz ist nun nicht mehr aufrecht zu erhalten, seitdem ich selbst zusammen mit O. Abraham inzwischen nachgewiesen habe¹⁾, dass nicht bloss die Unterbrechungstöne beim Anblasen von Sirenenscheiben objektiv in der Luft vorhanden sind, sondern dass sie auch von objektiven Obertönen, mindestens von der Oktave, wie sich mit Hilfe von Resonatoren feststellen liess, begleitet werden. Die Anwesenheit der nächsthöheren Obertöne macht aber die Unterbrechungstöne ebenso wie die Differenztöne mittelhoher Primärtöne und die ganz tiefen Stimmgabeln oder Lamellen ungeeignet zu einer einwandfreien Bestimmung der unteren Hörgrenze. Überdies käme hier als weitere Schwierigkeit hinzu, dass die diversen Partialtöne des Sirenenklanges und die nebenher auftretenden Geräusche die tiefsten und daher schwächsten an sich möglichen Tonempfindungen verdecken dürften.

Dieser letzterwähnte Übelstand tritt übrigens auch bei der Benutzung von Zungen, Gabeln, Pfeifen etc. zur unmittelbaren Erzeugung sehr tiefer Töne mehr oder weniger merklich in die Erscheinung. Man stelle sich beispielsweise vor, es werde ein Zahnrad, auf dessen Zähnen ein Pappstreifen oder dergleichen schleift, zur Produktion eines möglichst tiefen Tones verwendet. Dann wird die eigentliche Tonempfindung oder richtiger Klangwahrnehmung durch die periodischen Luftbewegungen bewirkt, welche das Hin- und Hergehen des Pappstreifens hervorruft. Ausserdem entsteht aber bei jedem Aufschlagen des Streifens auf einen Zahn, also im Tempo der Schwingungszahl des eigentlichen Tones, ein Geräusch und das Ohr muss die Tonempfindung erst von diesem Geräusche trennen.

Benutzt man für die tiefsten Töne die Helmholtzsche Doppelsirene,

¹⁾ Studien über Unterbrechungstöne. Erste Mitteilung. Pflügers Arch. Bd. 83, S. 207 ff., 1901.

so hört man bei langsamem Anlassen anfangs nur die einzelnen Luftstösse und erst, wenn ungefähr 36 Schwingungen da sind, auch schwache Töne daneben, welche, wie oben schon erwähnt, zunächst bloss Obertöne sind. Aber auch über diese Grenze hinaus bleiben die Luftstösse noch vernehmlich. Da dieselben ihrer Natur nach den Charakter von Geräuschen haben, so wird auch hier der tiefste an sich perzipierbare Grundton von Geräuschen in der Frequenz seiner eigenen Schwingungszahl begleitet und überdeckt. Von den tiefsten Pfeifen der Orgel macht Helmholtz die ganz analoge und übrigens leicht zu bestätigende Angabe¹⁾, dass in der oberen Hälfte der zweiunddreissigfüssigen Oktave nach unten hin die Empfindung der einzelnen Luftstösse immer deutlicher, der kontinuierliche Teil der Empfindung immer schwächer werde und in der unteren Hälfte dieser Oktave, von etwaigen ganz schwachen Obertönen abgesehen, wohl eigentlich nichts mehr als eben die einzelnen Luftstösse zu vernehmen sei.

Im Hinblick auf die Verknüpfung von tiefsten Tönen und Geräuschen hat Max Meyer es vor einer Reihe von Jahren in einem kleinen Aufsatz „Über die Rauigkeit tiefer Töne“²⁾ unternommen, wie er sagt, „gegen die überall herumspukende Behauptung, dass tiefe Töne diskontinuierlich seien, Front zu machen“. Seine Erörterungen beschränken sich freilich auf Stimmgabelklänge. Er bestätigt die ältere Angabe von Preyer, dass bei tiefen Gabeln, die noch keinen hörbaren Ton erzeugen, die einzelnen Schwingungen als stossartige Geräusche bemerkbar seien. „Dies ist auch“, fährt er fort, „eigentlich selbstverständlich. Wenn ich mit einem Stocke durch die Luft schlage, so höre ich ein Sausen. Ebenso höre ich ein oft wiederholtes Sausen, wenn die Stimmgabelzinken oft wiederholte schnelle Bewegungen durch die Luft machen. Werden die Schwingungen schneller, so folgen auch die einzelnen Empfindungen des Sausens schneller aufeinander. Schliesslich kann ich sie nicht mehr auseinander halten; sie verschmelzen zu einem rauhen Geräusche. Sie verschmelzen aber nicht zu einem Tone, d. h. aus den einzelnen Stossgeräuschen wird nicht ein Ton. Das Geräusch bleibt Geräusch, nur wird aus dem intermittierenden Geräusche ein gleichmässiges. Daneben geschieht, wenn ich von langsameren Schwingungen zu schnelleren übergehe, noch etwas anderes. Bei einer gewissen Schnelligkeit tritt ein schwer zu hörender, von dem Geräusche noch fast verdeckter tiefer Ton auf Bei vergrösserter Schnelligkeit der Schwingungen wird der Ton leichter wahrnehmbar und höher. Das Geräusch macht neben dem Tone seine oben beschriebenen Veränderungen durch. Es hat mit dem Tone direkt gar nichts zu tun, ist vielmehr eine zufällige, freilich mehr oder weniger stets mit tieferen Tönen verbundene Begleiterscheinung.“

¹⁾ Lehre von den Tonempfindungen. 5. Aufl., S. 293 f.

²⁾ Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. S. Bd. 13, S. 75 ff., 1897.

Ich glaube, man wird diesen Ausführungen Meyers über die Töne sehr tiefer Gabeln im ganzen zustimmen können; braucht man doch nur mit dem Finger eine leicht schnellende Bewegung gegen die Gehörgangsöffnung zu machen, um sich von dem weichen tiefen Geräusch zu überzeugen, das eine nicht allzu langsam gegen das Ohr geführte Fläche hören lässt, und damit käme zu den mancherlei Mängeln, die der Verwendung von Stimmgabeln zur Prüfung der Perzeptionsfähigkeit des Ohres anhaften, eben noch der hinzu, dass man in der tiefsten Region keine Garantie dafür hat, ob das etwa noch von dem Untersuchten Gehörte der in Frage kommende Ton oder lediglich das begleitende Zinkengeräusch ist. Indessen, wenn auch das flatternde Geräusch der kräftig schwingenden Branchen mit der Diskontinuität der tiefsten Gabeltöne in Kausalzusammenhang stehen mag, so ist damit noch nicht gesagt, dass es die einzige Ursache und im übrigen die Tonempfindung an sich völlig glatt ist.

Mir scheint vielmehr sehr für eine Rauhigkeit auch der tiefsten Tonempfindungen als solcher der Helmholtz'sche Versuch mit der obertonlosen Klaviersaite zu sprechen. „Das D_1 von 37 Schwingungen rief nur noch eine sehr schwache Tonempfindung hervor und auch diese hatte etwas Knarrendes, was darauf schliessen lässt, dass das Ohr auch hier anfang, die einzelnen Stösse trotz ihrer regelmässigen Form einzeln zu empfinden.“ Mit diesen Worten tritt Helmholtz selbst bestimmt für die Diskontinuität der eigentlichen Tonempfindung bei diesem Experimente, wo von störenden Geräuschen schwerlich die Rede sein kann, ein und er bemerkt weiter: „Bei B_2 (34 Schwingungen) war kaum noch etwas zu hören. Es scheint also, dass diejenigen Nervenfasern, welche diese Töne empfinden, schon nicht mehr während der ganzen Dauer einer Schwingung gleichmässig stark erregt werden, sei es nun, dass die Phasen der stärksten Geschwindigkeit oder die Phasen der stärksten Abweichung der schwingenden Gebilde im Ohre die Erregung bewirken.“

Immerhin mögen hier auch individuelle Unterschiede vorhanden sein. Abraham und ich haben bei unseren Beobachtungen über Unterbrechungstöne den Eindruck erhalten, dass die tiefsten Töne dieser Art sich durch eine extreme Rauhigkeit auszeichnen. Mir erschien dabei der Ton gleichsam in eine Reihe einzelner ganz tiefer Stösse aufgelöst. Herr Dr. Abraham jedoch hatte neben diesen Stössen noch eine schwache kontinuierliche Tonempfindung und ähnliche Angaben sind mir, wenn auch nicht immer von seiten ebenso erprobt zuverlässiger Mitarbeiter, öfter auch beim Experimentieren mit tiefsten Gabeln gemacht worden.

Von gleichzeitigen anderen Tönen oder Geräuschen leicht verdeckt zu werden, ist nun nicht bloss eine Eigenschaft der tiefsten Töne sondern aller sehr schwachen Töne überhaupt. Ja, es werden selbst an und für sich nicht gerade besonders leise Gehörseindrücke übertönt, wenn nur der sie begleitende Schall die dazu nötige relative Intensität besitzt. Im täglichen Leben macht

man diese Erfahrung am häufigsten im Strassenlärm, in gewissen Fabrikbetrieben, bei heftigen Gewittern und dergl., wobei der übertönende Teil der Wahrnehmung aus lauten, oft exzessiv starken Geräuschen besteht. Von besonderem Interesse für den Psychophysiologen ist bei Vorgängen dieser Art die Verdeckungsschwelle, also derjenige Intensitätswert des verdeckenden Reizes, bei welchem die Verdeckung eben schon resp. eben noch eintritt. Wissenschaftliche Beobachtungen hierüber können sich erstrecken auf die Auslöschung von Geräuschen durch andere Geräusche oder Töne beziehungsweise von Tönen durch andere Töne oder Geräusche. Der Gewinnung exakter Ergebnisse steht freilich die erhebliche Schwierigkeit entgegen, dass wir noch immer kein hinreichend genaues und zugleich einfaches absolutes Mass für die Stärke besitzen, mit der ein beliebiger akustischer Reiz das Trommelfell trifft, und werden zu den Versuchen Geräusche gewählt, so kommt deren komplexe Natur und qualitative Unbestimmbarkeit als weiteres Hindernis eines klar übersichtlichen Resultates hinzu. Demgemäss haben auch Experimente, wie sie beispielsweise Alfred M. Meyer¹⁾ mit tickenden Uhren und J. Kessel²⁾ mit Töne verdeckenden Geräuschen anstellten, nur einen bedingten, sozusagen approximativen Wert³⁾. Immerhin verdienen die Angaben des Letztgenannten der Erwähnung an dieser Stelle. „Werden,“ sagt er, „neben Tönen auch Geräusche hervorgerufen und beide gleichzeitig dem Ohre zugeleitet, so zeigen sie je nach den Umständen ein sehr verschiedenes Verhalten zu einander. Im allgemeinen lässt sich die Tatsache konstatieren, dass Töne und Geräusche gleichzeitig als solche gehört werden, wenn sie in einem bestimmten Intensitätsverhältnisse zu einander stehen. . . . Wird dieses Verhältnis geändert, so beeinflussen sich beide Schallarten derart, dass die stärkere die schwächere überdeckt oder löscht. Sehr auffallend tritt die Beeinflussung zwischen tiefen Tönen und Geräuschen in die Erscheinung. Die drei untersten Oktaven von c^{-3} bis c^0 werden relativ leichter überdeckt als die folgenden. . . . Von c^0 bis c^2 beeinflussen die Geräusche die Töne noch sehr beträchtlich, von c^2 aufwärts schon weit weniger, so dass von c^7 an eine Beeinflussung durch meine Versuche nicht mehr nachweisbar ist. Auf diese

1) American Journal of Science and Arts. Vol. XII, Nov. 1876.

2) Arch. f. Ohrenheilk. Bd. 18, S. 140.

3) Dahingegen lässt sich die Verdeckungsschwelle in anderer Weise zu Messungen gut verwerten. Man wird nämlich von zwei qualitativ gleichen Schalleindrücken sagen dürfen, dass beide dann das Trommelfell auch mit gleicher Stärke treffen, wenn beide, jeder für sich genommen, einen und denselben dritten unveränderlichen Schall eben verdecken oder von letzterem eben verdeckt werden. Auf Grund dieser Überlegung könnte man beispielsweise die experimentelle Lösung der Frage versuchen, ob vier ganz konstante, nach Intensität und Qualität völlig übereinstimmende Töne in dem Abstände $2x$ vom Ohre ebenso laut empfunden werden als ein einzelner von ihnen im Abstände x , wie es das öfter umstrittene Gesetz, dass die Schallstärke umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung sei, verlangen würde. Auf einem ähnlichen Gedankengange beruhende Messungen der Schallabnahme mit der Entfernung habe ich bereits früher (Ann. d. Phys. u. Chem. (N. F.) Bd. 57, 1896) ausgeführt.

Versuche gestützt, halten wir die Annahme für genügend begründet, dass die tiefen Töne durch Geräusche leichter überdeckt werden als Töne der musikalischen Skala. Leitet man Geräusche und sehr hohe Töne, von 4000 Schwingungen angefangen, gleichzeitig dem Ohre zu, so beeinflussen sich dieselben nicht wesentlich, wenigstens ist dies durch meine Vorrichtungen nicht nachweisbar . . . auch wird das Hören des Geräusches eines Dampf-inhalationsapparates durch das Anschlagen der Koenigschen Klangstäbe nicht merklich gestört.“ Ausser durch den Inhalationsapparat wurden die in Rede stehenden Geräusche durch kleine Pfeifchen aus Messing von wenigen Millimetern Durchmesser, an denen verschiebbare Stempel angebracht waren, erzeugt, indem man dieselben schwach anblies, wobei keine Töne sondern Geräusche entstanden und zwar Geräusche mit einer bestimmten von der Stempelstellung abhängigen Tonhöhe. Aus den geschilderten Versuchen geht meines Erachtens deutlich hervor, dass die Töne von den Geräuschen um so weniger verdrängt wurden, je höher ihre Schwingungszahl oder mit anderen Worten, je grösser ihre Empfindungsstärke war, und wegen dieses Resultates scheinen mir die Versuche bemerkenswert. Kessel selbst meint auffallenderweise, die geringe psychophysische Intensität der tiefen Töne reiche nicht aus, um ihre leichte Auslöschbarkeit zu erklären, ohne aber für diese Behauptung einen eigentlichen Beweis zu erbringen.

Während früher die Meinung weit verbreitet war, die Geräusche wären etwas von den Tönen ihrem Wesen nach durchaus Verschiedenes — man schrieb ihnen darum auch ein spezielles Perzeptionsorgan, nämlich Vorhof und Bogengänge des inneren Ohres, zu, indess man die Schnecke ausschliesslich für die Tonempfindungen reserviert wissen wollte — und während noch jetzt manche glauben, es sei zwar in allen oder doch in den meisten Geräuschen eine mehr oder weniger grosse Zahl von Tönen enthalten, der Rest aber jedenfalls etwas spezifisch Geräuschiges, stehe ich selbst auf dem Standpunkte, dass die Geräusche gleich den Klängen nichts anderes sind als eine Summe von Tönen, allerdings eine Summe, deren Komposition von dem auf musikalischen Prinzipien ruhenden Bau der Klänge in verschiedenen Hinsichten wesentlich abzuweichen pflegt, und deren physikalische und physiologische vollständige Auflösung in ihre Bestandteile ausserordentlich viel schwieriger ist, als wenn es sich um Klänge handelt. Ich bin darum, wie schon angedeutet, auch der Ansicht, dass man zu Experimenten über Verdeckung eines Schalles durch einen anderen lieber möglichst reine Töne und nicht Geräusche, d. h. mehr oder weniger undefinierbare Tongemenge, benutzen sollte.

In dieser Richtung liegen bereits Versuche vor, über deren hauptsächliche Ergebnisse C. Stumpf in seiner Tonpsychologie¹⁾ berichtet. Wie er

¹⁾ Bd. 2, § 21.

hervorhebt, will Alfred Mayer gefunden haben, dass die Intensität des verdrängenden Tones immer etwa dreimal so gross sein müsse, wie die des verdrängten. Dabei mass Mayer die Tonstärke mittelst der Entfernung, in welcher der betreffende Ton, für sich allein angegeben, eben verschwand, und unter der Voraussetzung, die Schallstärke nehme im quadratischen Verhältnis mit der Distanzzunahme ab. Mayer hat ferner die Behauptung aufgestellt, dass durch tiefere Töne wohl höhere verdrängt würden, nicht aber das Umgekehrte der Fall sei. Mit Recht äussert Stumpf Zweifel gegenüber diesen Angaben, wenigstens gegenüber ihrer so bestimmten Formulierung beziehungsweise Verallgemeinerung, und beruft sich speziell hinsichtlich der zweiten These auf alltägliche Erfahrungen und eigene besondere Versuche: Das Summen einer tiefen Gabel sei neben dem schreienden Akkorde hoher Zungenpfeifen oder Trompeten, ja neben einer einzelnen, unhörbar; eine im Ausschwingen begriffene, aber noch gut hörbare C-Gabel verschwinde bei genügender Stärke oder Annäherung einer F-Gabel, und ähnliches ergebe sich bei einer Fis- und einer g-Gabel u. a. Erwähnenswert ist hier noch die folgende Beobachtung Stumpfs: „Wenn ich durch das Zusammenwirken der drei Zungenpfeifen e^1 , g^1 , c^2 den tiefen Differenzton C erzeuge¹⁾, hierauf zu den dreien noch die c^1 -Pfeife füge, so höre ich C jetzt weniger mächtig. Nach Meyer müsste man es noch mächtiger hören, da es nun auch durch c^1 mit-erzeugt wird und einer Verdrängung nicht unterliegen soll. Aber faktisch nimmt eben das hinzukommende starke c^1 dem C mehr an Stärke, als es ihm durch seine Verbindung mit den übrigen primären Tönen zubringen würde.“ Immerhin erscheint Stumpf soviel an der Mayerschen Behauptung richtig, dass der höhere Ton ein grösseres Übergewicht an Empfindungsstärke besitzen muss, um den tieferen zuzudecken als umgekehrt, dass also dem tieferen sozusagen die Vernichtung des anderen leichter wird; tiefe Töne werden bei geringerer Empfindungsstärke durch hohe hindurch gehört, als hohe durch tiefe.

Weitere Studien über die Verdeckung eines Tones durch einen anderen sind erwünscht, allerdings auch mühsam und schwierig. Man würde zunächst bei einem und demselben Tonpaar die absolute Intensität des schwächeren zu variieren und in einer Versuchsreihe den höheren, in einer zweiten den tieferen Ton zum verdeckenden zu machen haben. Dann wäre es besonders auch wichtig, in systematischer Weise verschiedene Höhenlagen und Höhendistanzen der beiden Töne zur Prüfung heranzuziehen. Dabei würde sich u. a. wahrscheinlich ergeben, dass bei konsonanten Intervallen der Grad der Verschmelzung auf die Verdeckung Einfluss übt; bei relativ hohen und nicht zu sehr distanten Tönen wird die noch zu besprechende Unanalysierbarkeit

1) Genauer genommen geben hierbei nur e^1 und g^1 den Differenzton C, dagegen g^1 und c^2 dessen Oktave c^0 ; beim Hinzutreten von c^1 entstehen beide nochmals: C aus $e^1 - c^1$ und c^0 aus $g^1 - c^1$.

solcher Zweiklänge in Betracht zu ziehen sein und wiederum bei sehr nahe zusammenliegenden Tönen die Mitwirkung der Schwebungen sich bedeutungsvoll erweisen. So bemerkt Kessel¹⁾, dass im allgemeinen ein Ton von einem anderen stärkeren verdeckt werde, wenn er selbst, isoliert gehört, sich an der Schwelle der Wahrnehmbarkeit befinde. Zwei auf Schwebungen gestimmte Gabeln machten hiervon aber eine auffallende Ausnahme; es trete in diesem Falle keine Löschung ein, sondern die Schwebungen wären gut zu vernehmen. Zur Erklärung dieser Erscheinung wird man erstens die allgemeine Erfahrung heranziehen können, dass ein intermittierender Sinnesindruck sich dem Bewusstsein leichter bemerklich macht als ein gleichmässiger. Zweitens ist daran zu erinnern, dass die dem schwächeren Tone entsprechende Faser der Basilarmembran im inneren Ohre durch die Annäherung des anderen Tones eine, eben als Schweben vernommene, periodisch abwechselnde Vergrösserung und Verringerung ihrer Amplitude erfährt, und dass jedesmal mit ersterer eine Zunahme der Empfindungsstärke verbunden ist.

Auch sonst pflegt man ja in der physiologischen und psychologischen Akustik die sogenannte „schwebende Hilfsgabel“ öfter zu benutzen, um über die an und für sich zweifelhafte Existenz eines bestimmten Tones in einem Klange oder Geräusche ins Reine zu kommen; z. B., wenn es sich darum handelt, festzustellen, ob es gelungen ist, die Oktave irgend eines Grundtones durch Interferenz zu beseitigen. Nach den Angaben von Stumpf wird es Ungeübten schon schwer, die Oktave neben dem Grundtone zu hören, wenn beide Töne von gleicher Stärke sind, und bei noch geringerer Intensität wird sie völlig ununterscheidbar. Die Ursache hierfür liegt nicht sowohl in der Verdeckung als vielmehr in der konsonanten Verschmelzung und der sorgfältige Beobachter ist der wirklichen Beseitigung der Oktave aus dem Empfindungskomplex erst dann sicher, wenn eine gegen dieselbe etwas verstimmte Gabel oder andere passende Tonquelle keinerlei Schwebungen mehr vernehmen lässt.

Als weitere, im Klange selbst gelegene Hilfsmittel zur Erleichterung des Heraushörens einzelner Partialtöne wären zu nennen: Intensitätsschwankungen oder stossweises Auftreten der betreffenden Töne, kleine Höhenschwankungen, ungleichzeitiges Einsetzen. Bewegt man während der aufmerksamen analysierenden Beobachtung eines Klanges den Kopf oder wechselt man den Standort, so springt oft plötzlich der eine oder andere Teilton mit besonderer Deutlichkeit aus dem Ganzen heraus, um vielleicht an einer anderen Stelle des Zimmers wieder völlig zu verschwinden. Dies rührt daher, dass infolge von Reflexion der Tonwellen an den Wänden, von Bildung stehender Schwingungen mit Bäuchen und Knoten sich Maxima und Minima der Intensität im Raume entwickeln. Namentlich beim Heraushören

¹⁾ Archiv f. Ohrenheilk. Bd. 18, S. 138.

schwacher Differenzttöne sind Kopfbewegungen oft sehr vorteilhaft. Hierbei spielt freilich auch die eigenartige Lokalisation dieser Töne eine besondere Rolle¹⁾. Man pflegt nämlich den Differenzton nicht an den Ort und in die Richtung zu verlegen, wo die Primärtöne herkommen. Ich selbst höre den Differenzton, wenn die Primärtonquellen sich beide auf derselben Seite des Kopfes befinden, unmittelbar vor dem Ohre eben dieser Seite, ein wenig von hinten und unten kommend. Dabei macht sein Ort alle Bewegungen des Kopfes mit, als ob er an ihm fixiert wäre. Andere haben mir angegeben, dass sie den scheinbaren Ursprungspunkt des Differenztones, wenn auch nicht immer unmittelbar in oder vor das Ohr, so doch in eine seitliche Richtung verlegten und ihn als deutlich gesondert von demjenigen der Primärtöne empfänden. Diese bei Kopfbewegungen besonders auffallende, räumliche Eigentümlichkeit der Differenzttöne — wodurch dieselben, nebenbei bemerkt, sich wesentlich von den Schwebungen unterscheiden, deren Richtung und Entfernung durchaus mit der der Primärtöne wechselt — begünstigt natürlich die Aussonderung dieser Töne aus dem Klange, wenn die Aufmerksamkeit einmal darauf gerichtet ist.

Teiltöne, welche in die Gegend der viergestrichenen Oktave fallen, sind ihrerseits für die Wahrnehmung in gewissem Grade dadurch bevorzugt, dass der Gehörgang auf sie wie ein Resonator verstärkend wirkt. Bei seinen Studien über die Zusammensetzung der Vokale fiel es Helmholtz²⁾ auf, dass in der Gegend des e^4 bis g^4 die Töne der Klaviere eigentümlich scharf klangen, so dass man leicht zu dem Glauben kommen konnte, dass die Hämmer dieser hohen Töne zu hart seien. Es war aber bei allen Klavieren dasselbe, und wenn Helmholtz eine ganz kleine Glasröhre oder -Kugel an das Ohr setzte, so wurden die vorher scharfen Töne mild und schwach wie die anderen, und eine tiefer gelegene Reihe von Tönen trat nunmehr stärker und schärfer hervor. Damit ist die Resonanz des Ohres für die Töne zwischen e^4 und g^4 und die Abstimmung des Gehörganges auf einen dieser Töne erwiesen. „Neuerdings“, fügt Helmholtz hinzu, „finde ich, dass mein rechtes Ohr am meisten für f^4 und das linke für c^4 empfindlich ist. Wenn ich Luft in die Trommelhöhle eintreibe, geht die Resonanz herab bis auf cis^4 und gis^3 .“ Auch Rinne fand den Eigentön des Gehörganges in der Gegend des f^4 ; Hensen bei sich selbst rechts d^4 , links a^4 und bei einer Frau rechts f^4 , links g^4 ; Kiesselbach links a^4 , rechts h^4 .

Überwiegende Stärke, Stärkeschwankungen, auch gleichmässige Zunahme oder Verringerung der Intensität, örtliche Unterschiede und grosse Distanz (bei ungefähr gleicher Empfindungsstärke) der Partialtöne — das alles sind Momente, welche das Heraushören fördern, weil sie die Aufmerk-

1) K. L. Schaefer, Über die Wahrnehmung und Lokalisation von Schwebungen und Differenzttönen. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. S. Bd. 1, S. 96, 1890.

2) Lehre von den Tonempfindungen. 5. Ausg. S. 187.

samkeit auf sich ziehen, ja unter Umständen sich der gesonderten Wahrnehmung geradezu aufdrängen. In anderen Fällen muss man willkürlich die Aufmerksamkeit auf die Klangkomponenten richten, wobei es nützlich ist, vorher die Teiltöne, welche man etwa zu hören erwartet, mittelst irgend eines Instrumentes anzugeben oder sie sich wenigstens lebhaft vorzustellen. Bietet die Analyse erhebliche Schwierigkeiten, so empfiehlt es sich, längere Zeit die gespannte Aufmerksamkeit auf ein Ohr zu konzentrieren und für dieses, entsprechend dem oben über die Kopfbewegungen Gesagten, eine möglichst günstige Lage zu suchen. Nicht zuletzt freilich kommt es darauf an, ob der Beobachter in der Klanganalyse mittelst des Ohres Übung besitzt oder nicht. Stumpf sagt von derselben in seiner Tonpsychologie¹⁾, dass ihr Eintreten, ihre rasche Steigerung, aber auch bei längerem Nichtgebrauch ihr Verlust und dann ihr doppelt rascher Wiedererwerb beim Heraushören von Obertönen ganz besonders auffallend wäre. Sie sei eine spezielle für die einzelnen Tonregionen. Die für die Obertöne der zweigestrichenen Oktave erlangte Übung übertrage sich nicht ohne weiteres vollwirksam auf die viergestrichene und umgekehrt, wenn auch ein günstiger Einfluss vom einen auf den anderen Fall schon durch die leichtere Lenkung der Aufmerksamkeit vom Grundton aus nach der Richtung höherer Töne überhaupt gegeben sei. Hiernach möchte Stumpf die oft betonte Schwierigkeit des Heraushörens, die sich angeblich bei vielen bis zur Unmöglichkeit steigern soll, nur als eine bloss augenblickliche, auf dem Mangel an Übung beruhende betrachten — und ich kann ihm darin nur beistimmen, zumal ich bei meinen zahlreichen Studien über die Kombinations- und sogenannten Unterbrechungstöne bezüglich des Wachsens und Verschwindens der Übung ganz ähnliche Erfahrungen gemacht habe.

Dass das Heraushören der harmonischen Obertöne für so besonders schwer gilt, dafür lassen sich hauptsächlich zwei Gründe anführen. Der eine ist der, dass im allgemeinen die Obertöne an Stärke mehr oder weniger erheblich hinter dem Grundtone zurückstehen und mit zunehmender Ordnungszahl immer schwächer werden. Den anderen bildet die, von Stumpf experimentell wie theoretisch mit eingehendster Sorgfalt untersuchte und von ihm zur Grundlage seiner Theorie der Konsonanz und Dissonanz gemachte *Tonverschmelzung*²⁾.

Stumpf versteht unter Verschmelzung allgemein dasjenige Verhältnis zweier Empfindungsinhalte, wobei diese nicht eine blosse Summe sondern ein Ganzes bilden. Die Folge dieses Verhältnisses ist, dass mit höherer Stufe desselben der Gesamteindruck sich unter sonst gleichen Umständen immer mehr dem einer einzigen Empfindung nähert und immer schwerer

1) Bd. 2, S. 239.

2) Tonpsychologie, namentlich Bd. 2, § 19 u. 20; Beiträge zur Akustik und Musikwissenschaft. Heft 1: Konsonanz und Dissonanz. (Dasselbst noch weitere Literaturangaben.)

analysiert wird. Wenn nun zwei Töne zusammen erklingen, so werden sie stets als ein Ganzes aufgefasst, auch wenn man sie als zwei erkennen und auseinanderhalten kann. Eine Verschmelzung findet also in jedem Falle statt, aber die Verschmelzung hat verschiedene Grade, die durch das Intervall bedingt sind. Am grössten ist die Einheitlichkeit des Zweiklanges, wenn dieser eine Oktave ist, dann folgen die Quinte, die Quarte, die Terzen und Sexten und zuletzt die übrigen Intervalle, welche sämtlich den geringsten Verschmelzungsgrad zeigen.

Diese Reihenfolge der Verschmelzungsstufen, die sich mit derjenigen der Konsonanzstufen deckt, ist von Stumpf durch zahlreiche Beobachtungen in immer übereinstimmender Weise festgelegt worden und einige andere Autoren¹⁾ haben seine Versuchsergebnisse im wesentlichen nur bestätigen können. Stumpf hat dabei vorwiegend mit Unmusikalischen experimentiert und zwar in der Art, dass er ihnen Zweiklänge von verschiedenem Intervall, also Oktaven, Quinten, Quarten, übermässige Quarten, Terzen, Sekunden, vorlegte und sie darüber urteilen liess, ob das Gehörte als ein „Ton“ oder als zwei Töne empfunden werde. Hierzu sind musikalische Personen nicht zu gebrauchen, insofern sie höchstens bei Oktaven hier und da, bei anderen Intervallen aber so gut wie niemals falsche Urteile liefern, die Unterschiede in der Schwierigkeit der Analyse bei den einzelnen Intervallen also nicht zutage treten können, weil die Schwierigkeit eben in jedem Falle überwunden wird. Die ganze Frage ist gegenwärtig bereits so weit durchgearbeitet, dass man, wie Stumpf²⁾ sagt, „nunmehr geradezu voraussagen kann, dass bei stark Unmusikalischen für die Oktave etwa 75 % falscher Fälle³⁾, für die Quinte etwa 40—60 %, für die Quarte etwa 28 bis 36 %, für die Terzen etwa 20—30 %, jedesmal aber diese Reihenfolge mit deutlichen Abständen resultieren wird“.

Mit der Verschmelzung stehen zahlreiche Tatsachen des gleichzeitigen Hörens in Zusammenhang, die Stumpf in seiner Tonpsychologie ausführlich behandelt hat. An dieser Stelle interessiert darunter am meisten die auf den ersten Blick paradoxe Erscheinung, dass gewisse schwächere Obertöne leichter herauszuhören sind als gewisse stärkere. Die auf den Grundton zunächst folgenden Obertöne, die Oktave und deren Quinte, sind bei voller Klangfarbe die kräftigsten. Dennoch sind sie, zumal die Oktave, am schwersten isoliert zu perzipieren, worin eben auch der immer wieder auftauchende Irrtum, dass es obertonlose Stimmgabeln gäbe, seinen Grund findet. Viel besser gelingt es, den 7. und 9. Teilton des Klages wahrzunehmen. Denn diese sind zwar

¹⁾ A. Faist, *Versuche über Tonverschmelzung*; A. Meinong und St. Witasek, *Zur experimentellen Bestimmung der Tonverschmelzungsgrade*. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. S. Bd. 15, 1897.

²⁾ *Neueres über Tonverschmelzung*. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. S. Bd. 15, S. 299, 1897.

³⁾ Wo also das Urteil „ein Ton“ statt „zwei Töne“ abgegeben wird.

im allgemeinen weit leiser als Oktave und Duodezime des Grundtones, dafür aber verschmelzen sie auch in bedeutend geringerem Grade mit letzterem. Überhaupt scheint das Urteil in akustischen Beobachtungen Geübter dahin zu gehen, dass die ungradzahligen Teiltöne leichter bemerkt werden als die geradzahligen. Da die letzteren, wenigstens bis zum 8. inklusive, zu einander beziehungsweise zum Grundtone im Oktaven- und Quintenverhältnis stehen, so fügt sich auch diese Angabe durchaus dem Verschmelzungsgesetze, welches sich übrigens auch nachweislich auf die Kombinationstöne und zweifellos ebenso auf die sogenannten Unterbrechungstöne erstreckt; ein Umstand, der hier immerhin hervorgehoben werden mag, obschon er sich nach unseren jetzigen Kenntnissen von dem Wesen der sekundären Klangerscheinungen eigentlich von selbst versteht.

In der ganz tiefen Tonregion, wo die Analyse ohnehin auf Hindernisse stösst, wird auch die Erkennung und Vergleichung des Verschmelzungsgrades schwierig resp. unmöglich. In den höchsten Lagen, etwa von der fünfgestrichenen Oktave an, scheinen andererseits nach Stumpf¹⁾ die Verschmelzungsunterschiede überhaupt hinwegzufallen.

Dafür macht sich nun in den sehr hohen und höchsten Oktaven besonders geltend eine andere Art von Verschmelzung, die nichts mit Konsonanz und Dissonanz zu tun hat, sondern auf zu geringer Verschiedenheit der Tonhöhen beruht. Bekanntlich ist unsere Unterschiedsempfindlichkeit für aufeinanderfolgende Töne bei hervorragend entwickeltem Gehör wenigstens in der mittleren Region des Tonreiches sehr gross. Hier können noch Höhendifferenzen von einer halben Schwingung und darunter bemerkt werden. Ganz anders bei gleichzeitigen Tönen: für solche liegt die Schwelle der Unterscheidung beträchtlich höher.

Über diesen, für die Lehre von der Klangzerlegung seitens des Ohres sehr wichtigen Punkt hat bereits Bosanquet²⁾ einige Studien angestellt. Er benutzte sein 53-stufig gleichschwebend temperiertes Harmonium auch zu Beobachtungen über die Grenze, an welcher man nicht zu entscheiden vermag, ob die beiden Töne eines Zweiklanges neben ihren Schwebungen getrennt hörbar sind, oder ob es sich um einen unreinen Einklang handelt, und gibt an, dass dieses „kritische Intervall“, wie er es nennt, in der mittleren Region der musikalischen Skala ungefähr zwei Kommas betrage, jedoch individuell etwas verschieden sei. Jedenfalls liege es aber zwischen einem und drei Kommas. Hiernach würden zwei Töne aus der Mitte der eingestrichenen Oktave, die beim Zusammenklang voneinander unterschieden werden sollen, mindestens um ca. zehn Schwingungen differieren müssen. Von Bosanquet selbst sind aber keine zahlenmässigen Belege für das Resultat seiner Versuche, die sich

¹⁾ Tonpsychologie. Bd. 2, S. 136.

²⁾ Philosoph. Magaz. (5). Vol. XI, 1881.

übrigens anscheinend auch nur auf zwei Personen erstreckten, beigebracht. Dann hat sich Stumpf in seiner Tonpsychologie¹⁾ mit diesem Problem beschäftigt. Er führt an, dass er gelegentlich die Terz CE der Orgel bei einer Intervallweite von 16 Schwingungen schon im ersten Momente des Hörens als Zweiklang erkannt habe, während A₁ und C oder F₁ und A₁ (mit einer Differenz von elf Schwingungen) bei gleichzeitigem Erklängen nicht mehr auseinander zu halten waren. Ferner ist auch von Felix Krueger²⁾ bei seinen zahlreichen Stimmgabelversuchen über Zweiklänge die Frage erörtert worden, bei welchem Intervall der Zweiklang als solcher vom Einklang eben unterscheidbar ist. Jedoch hat Krueger nur drei verschiedene Tonhöhen untersucht, nämlich c¹, c² und c³. Zwei gleichzeitige Töne, von denen der eine 256, der andere 264 Schwingungen machte, wurden von allen Beobachtern immer als ein Ton aufgefasst. Bei dem Zweiklange 256 + 268 begann für drei der Hörer eine verschwommene Zweiheit eben merklich zu werden; ein vierter konstatierte erst bei + 284 eine „Spur von Zweiheit“. Von + 280 ab hatten die meisten Beobachter „stets den Eindruck der gestörten Einheit oder der Zwiespältigkeit, der mehr oder weniger deutlichen Tonmehrheit. Diese Mehrheit war zunächst, bis etwa + 284, nur sukzessive wahrnehmbar. Wo es in dieser Gegend zeitweise gelang, zwei Töne nebeneinander zu hören, wurde das Urteil erheblich sicherer, wenn die Aufmerksamkeit sich den beiden Tönen einzeln nacheinander zuwandte . . . Von + 300 an waren beide Primärtöne stets deutlich nebeneinander zu hören“. Die Versuchsergebnisse der c²-Oktave hat Krueger am ausführlichsten mitgeteilt. Aus der dieselben enthaltenden Tabelle folgt, dass ein Mitarbeiter bei 16 Schwingungen Distanz (512 + 528) schon die Primärtöne trennen konnte; zwei andere vermochten dies und zwar mit Mühe erst bei + 532, ein vierter erst bei + 544, während für den zuerst genannten die Zweiheit bereits bei + 536 unzweifelhaft war. In der Gegend des c³ (= 1024) fand Krueger das erste Auftreten einer noch unsicheren Zweiheit wiederum bei 16 Schwingungen Intervallweite und lag der Übergang zur deutlichen Zweiheit bei + 1080.

Da indessen alle diese vorstehenden Mitteilungen über die Schwelle der Unterscheidung von Einklang und Zweiklang doch noch ein ziemlich dürftiges Versuchsmaterial darstellen im Verhältnis zu dem Interesse, welches das Thema nicht nur vom psychophysiologischen sondern auch vom musikalischen Standpunkte aus verdient, so habe ich zusammen mit A. Guttman den Gegenstand nochmals einer besonderen, etwas breiteren und umfassenderen Untersuchung unterzogen³⁾.

Es wurden die Tonregionen von 90, 150, 300, 400, 600, 800, 1000 und 1200 Schwingungen geprüft und zwar mit Stimmgabel- oder Flaschentönen. Als

1) Bd. 2, S. 321 ff., 1890.

2) Wundts Philosophische Studien, Bd. 16 (3 u. 4), 1900.

3) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. S. Bd. 32, S. 87 ff., 1903.

Beobachter fungierten vier mit Tönen in jeder Beziehung wohl vertraute und in der Klanganalyse geübte Personen, deren Befunde sowohl unter einander wie mit den früheren von Bosanquet, Stumpf und Kruegers geübteren Beobachtern gut übereinstimmten. Es zeigte sich, dass die Zweifeltsgrenze in dem mittleren Teile der musikalischen Skala bei einer Tonhöhendifferenz von etwa 10 bis 20 Schwingungen liegt. In der eingestrichenen Oktave scheint die Unterschiedsempfindlichkeit am grössten zu sein. Nach der Tiefe zu findet jedenfalls ein deutliches Steigen der Schwelle statt, das wir in einigen besonderen Versuchsreihen mit Gabeln bis zum Kontra-G verfolgt haben. Wir erhielten dabei einen Schwellenwert von 20—30 Schwingungen. Von der eingestrichenen Oktave bis zum d^3 zeigt die Unterschiedsempfindlichkeit eine gewisse, wenn auch nicht sehr ausgesprochene, Tendenz zur Abnahme und weiter aufwärts muss sich diese Abnahme rasch vergrössern, denn Gabel-Zweiklänge aus der oberen Hälfte der vier- und dem Anfange der fünfgestrichenen Oktave wie $3200 + 3840$, $3840 + 4000$, $4000 + 4800$, bei denen die Differenz in die Hunderte geht, erscheinen durchaus als ein Ton; die beiden Teiltöne sind nicht zu trennen, trotzdem ihr Zusammenwirken sich für das Ohr durch den sehr deutlichen Differenzton dokumentiert.

Im ganzen ergibt sich also die bemerkenswerte Tatsache, dass die absolute Unterschiedsempfindlichkeit für gleichzeitige Töne zwar nicht hinsichtlich ihrer Feinheit, wohl aber hinsichtlich ihrer Veränderungen in den verschiedenen Tonregionen ein ganz ähnliches Verhalten zeigt wie die für aufeinanderfolgende.

In musikalischer Beziehung ist von Interesse, dass selbst in der kleinen Oktave gleichzeitige Töne vom Intervall einer Sekunde, mehr nach der Tiefe zu aber sogar Intervalle in der Grösse der Quarte und Quinte von durchaus musikalischen, geübten Personen nicht sicher unterschieden werden. Dieses von uns gefundene Verhalten hängt aber jedenfalls mit der weichen, für den Musiker ungewohnten Klangfarbe der Gabel- und Flaschentöne zusammen, die wir absichtlich wählten, um mit möglichst einfachen Tönen zu arbeiten. Denn bei ihren Versuchen über Schwebungen und Zwischentöne am Harmonium konnten Stumpf¹⁾ und G. Engel Zusammenklänge wie $E_1 G_1$ und C-Cis noch als Zweiklänge erkennen. Diese Urteile können indessen nach unseren Befunden nur als mittelbare, hauptsächlich durch die Unterscheidung der benachbarten Obertöne beider Klänge vermittelte aufgefasst werden.

1) Tonpsychologie. Bd. 2, S. 482 f.