

## Die Bestimmung der unteren Hörgrenze.

Von

KARL L. SCHAEFER.

Die tiefsten Töne können wie alle anderen durch pendelförmige Luftschwingungen hervorgebracht werden, Differenztöne sein oder durch regelmässig aufeinander folgende Unterbrechungen von Tönen entstehen. Die untere Hörgrenze muss daher für alle drei Gattungen gesondert aufgesucht werden.

### I.

Will man feststellen, wieviel Sinusschwingungen des uns umgebenden Mediums zu einer Tonwahrnehmung genügen, so muss man vor allen Dingen mit Schallquellen operiren, die frei von Obertönen sind. Diese unabweisliche Forderung ist von den Forschern vor HELMHOLTZ ganz aufser Acht gelassen worden, weshalb ihren Untersuchungen keine Bedeutung für unser Thema zukommt. Erst HELMHOLTZ<sup>1</sup> machte den Versuch, sehr tiefe Töne ohne Obertöne herzustellen. Er belastete Saiten mit Metallstücken, so dass sie beim Anschlagen nur hohe unharmonische Obertöne gaben, die mit dem Grundton nicht zu verwechseln waren, und fand, dass schon das  $D_1$  von 37 Schwingungen nur eine schwache Empfindung hervorrief, während bei dem  $B_2$  von 34 Schwingungen kaum noch etwas zu hören war.<sup>2</sup> Ob es bei solchen Experimenten mit Saiten nicht doch vielleicht zur Bildung von Obertönen in der umgebenden Luft kommen kann, möge hier dahingestellt bleiben. Jedenfalls waren diese Saitentöne zu

<sup>1</sup> D. Lehre v. d. Tonempfindungen. 4. Ausg. 1877. S. 294.

<sup>2</sup> Da das Verhältniss  $B_2 : D_1$  nicht gleich 34 : 37 sein kann, so muss hier ein Irrthum bezüglich der Zahlen oder Buchstaben vorliegen.

schwach. Je mehr man sich der unteren Hörgrenze nähert, um so geringer wird selbst bei gleicher und sogar wachsender Amplitude die subjective Intensität der Töne. Der tiefste, mit irgend einem Instrument herstellbare Ton kann daher leicht nur darum der tiefste sein, weil ein noch tieferer nicht in genügender Stärke zu erzeugen ist. Man muß deswegen bei der Bestimmung der unteren Hörgrenze darnach trachten, möglichst laute Töne zu erhalten.

W. PREYER<sup>1</sup> bediente sich in richtiger Erkenntniß dieses Umstandes einer Serie von Metallzungen, die in einem von ihm als Grundtöne-Apparat bezeichneten Blasebalgkasten zusammengestellt waren und der Reihe nach die Schwingungszahlen 8, 9, 10 . . . . . bis 40 hatten. Oberhalb 32 konnte „der Grundton, wie ihn die Stimmgabeln geben, im Klange gehört werden, trotz der sehr zahlreichen und starken Obertöne. Anders unterhalb 26. Hier hört auch der Aufmerksamste und Geübteste schwerlich ohne Weiteres im Klange den Grundton durch. Läßt man aber die Zunge ausklingen 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 eigenthümlichen 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.“ PREYER meint, es sei sicher, daß die Empfindung wirklich durch die Schwingungen des Grundtones direct verursacht werde. „Denn der Ton stimmt völlig überein mit dem gleich hohen der großen Stimmgabeln und außerdem ist das Gehörte sehr viel tiefer als irgend ein Oberton in dem Klange war, ehe er erlosch.“ Aber diese Beweisführung ist gewiß nicht zwingend. Daß ein Zungenton mit einem Stimmgabelton völlig übereinstimmt, kann ebensogut auf dem alleinigen Vorhandensein der gleichen Obertöne beruhen, und wenn die Tonempfindung, während die Zunge ausschwingt, viel tiefer wird als vorher, so wird zur Erklärung auch die Annahme genügen, daß mit der Verringerung der Amplitude von den ursprünglich zahlreichen Obertönen des unhörbaren Grundtones nach und

<sup>1</sup> Ueber d. Grenzen d. Tonwahrnehmung. Jena 1876. Cap. I: D. tiefsten Töne. S. 8.

nach die höchsten und höheren, aber nicht alle, verschwinden. PREYER giebt weiter an, daß die Tiefe des seiner Meinung nach isolirten Grundtones mit abnehmender Schwingungszahl für alle Normalhörigen eben merklich zunehme bis 24, und scheint daraus zu folgern, daß ein Hinaufschnellen der Tonhöhe es hätte verathen müssen, wenn unter 24 die Zungen angefangen hätten, statt ihrer Grundtöne Obertöne zu geben. Es kommen indessen in der untersten Tonregion die ärgsten Irrthümer bei Höhenurtheilen vor. Aber auch den idealen Fall gesetzt, wir hätten 40 Stimmgabeln oder Zungen von 11, 12 u. s. w. bis 50 Schwingungen, die alle eine Tonempfindung hervorzurufen vermöchten, und könnten von der höchsten ausgehend, jede folgende für sicher tiefer als die vorige erklären, so wäre damit nicht bewiesen, daß zuletzt wirklich der Ton 11, sei es allein oder mit seinen Obertönen, percipirt würde. Die Verhältnisse könnten auch folgendermaassen liegen. Die Gabel 50 mag noch, wie in den höheren Octaven, ihren Grundton lauter hören lassen als die Obertöne 100 und 150. Wenn nun etwa die Gabel 34, dem oben angeführten Versuche HELMHOLTZ' gemäß, den Ton 34 nur noch ganz schwach neben 68 und 102 erzeugt, so klingt sie wohl relativ zu hoch, nämlich höher als sie sein würde, wenn die Intensitäten von Grundton und Obertönen im üblichen Verhältniß ständen, kann aber trotzdem tiefer klingen als die Gabel 50, weil die sämtlichen Componenten ihres Klanges einzeln tiefer sind als bei jener. Ebenso kann dann aber die Gabel oder Zunge 30, selbst wenn sie gar nicht mehr den Grundton, sondern nur noch die Obertöne 60 und 90 hervorbringt, tiefer erscheinen als 34, da 60 und 90 tiefer sind als 68 und 102 und das den letzteren noch beigeesellte Minimum von 34 als zu schwach wohl ohne Einfluß bliebe. So käme man schließlichs dahin, daß die Gabel 11 tiefer wäre als alle anderen, obgleich ihr Klang vielleicht erst mit der Duodecime beginnen würde. Diese Auffassung setzt freilich voraus, daß an der unteren Tongrenze die Obertöne den Grundton an Stärke entsprechend überwiegen. HELMHOLTZ hat aber auch durch Versuche mit der Doppelsirene gezeigt, daß es sich in der That so verhält.<sup>1</sup>

Die von A. J. ELLIS an einem zweiten Exemplar des Grundtöne-

<sup>1</sup> a. a. O. S. 291 u. 292.

Apparates gewonnenen Resultate<sup>1</sup> weichen von denen PREYER's, welche sie bestätigen sollen, doch einigermaassen ab. ELLIS hörte schon bei 9 etwas wie einen Ton und hatte zwischen 10 und 15 bereits deutliche Tonempfindungen, die er freilich den Obertönen zuschreibt. Er nahm auch Schwebungszählungen vor und überzeugte sich unter anderem davon, daß die Zunge 15 wirklich den objectiven Grundton von 15 Luftstößen pro Secunde gab. Damit ist natürlich nicht bewiesen, daß die zugehörige subjective Empfindung auch factisch von diesen Stößen herührte. Ueberhaupt gelten alle oben gegen PREYER's Ausführungen erhobenen Bedenken auch ELLIS gegenüber.

Wo es auf das Fehlen von Obertönen ankommt, sind Stimmgabeln den Zungen entschieden vorzuziehen. Aber auch sie bieten nicht so ohne Weiteres eine Gewähr dafür, daß man es nur mit dem Grundton zu thun hat. Das haben Untersuchungen von HELMHOLTZ, PREYER, STUMPF<sup>2</sup> u. A. zur Genüge dargethan, welche uns hier insofern besonders interessiren, als BEZOLD<sup>3</sup> angiebt, daß eine EDELMANN'sche Gabel von 11 Schwingungen noch von manchen Personen gehört werde. Obertöne wären dabei selbst von einem geübten Ohre nicht zu vernehmen, und die graphische Aufzeichnung der Schwingungen ergäbe eine reine Sinuscurve. Ferner ginge der Mangel der Obertöne bei den EDELMANN'schen Gabeln aus gewissen Beobachtungen an Ohrenkranken hervor. „Es existiren nämlich einige häufig vorkommende . . . Erkrankungsformen des Ohres, bei welchen wir constant einen größeren oder kleineren vollkommenen Hördefect am unteren Ende der Tonskala nachweisen können. Wir überzeugen uns nun, wenn wir diese Kranken mit den unterhalb ihres unteren Grenztones liegenden Stimmgabeln untersuchen, daß innerhalb ihres pathologischen Defectes nicht nur der Grundton der in den Defect fallenden Stimmgabeln ausgefallen ist, sondern daß die Kranken, wenn wir nur das Auge

<sup>1</sup> PREYER, Akust. Unters. Jena 1879. Cap. I. Tiefste Töne ohne Obertöne. S. 6 ff.

<sup>2</sup> Ueber die Ermittlung von Obertönen. *Annalen d. Physik u. Chemie* (N. F.) 57, 674. 1896.

<sup>3</sup> Demonstration einer continuirlichen Tonreihe zum Nachweis von Gehördefecten, insbesondere bei Taubstummen, und die Bedeutung ihres Nachweises für die HELMHOLTZ'sche Theorie. *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg.* 13, 162 ff.

ausschließen, keine Ahnung davon haben, ob überhaupt die in starke Schwingungen versetzte Gabel direct vor dem Ohre sich befindet oder nicht. Es ist daher auch diese pathologische Hörgrenze meist sehr scharf, bis auf einen halben Ton zu bestimmen.“ „Da aber die betreffenden Kranken mit Hördefect am unteren Ende der Tonskala (für die Luftleitung) ein um so vollkommeneres Gehör besitzen, je höher wir in der Skala hinaufsteigen, wie wir uns durch Prüfung mit den in der Reihe ja ebenfalls enthaltenen höheren Stimmgabeln überzeugen können, so dürfen wir auch schliessen, daß Obertöne, zum mindesten soweit sie für die Hörprüfung in Betracht kommen, in den tiefen Stimmgabeln der vorliegenden Tonreihe nicht vorhanden sind.“ Verstehe ich den Autor hier recht, so meint er, daß wenn ein Kranker z. B. von einer Gabel mit 12 Schwingungen schlechterdings keine Empfindung habe, dagegen die Gabel 24 höre, erstere nicht 24 als zweiten Theilton enthalten könne. Aber muß es denn gerade der Grundton der Gabel 24 sein, der ihre Perception veranlaßt? Mir scheint der umgekehrte Schluss ebenso berechtigt, daß der Patient die Gabel 12 nicht wahrnimmt, obwohl sie die Obertöne 24 und 36 hervorbringt, und erst die Gabel 24 hört, weil er im Stande ist, ihren Oberton 48 zu percipiren. Jedenfalls ist dieses aus der Ohrenheilkunde entnommene Argument BEZOLD's für das Fehlen der Obertöne bei den EDELMANN'schen tiefsten Gabeln ebensowenig beweiskräftig, wie das Urtheil des bloßen Ohres, das ganz trügerisch ist, und die a. a. O. abgebildete Schwingungscurve, welche allerdings so aussieht, als ob sie nur aus dem Grundtone bestände, aber immerhin die Möglichkeit offen läßt, daß die Obertöne sich erst in der Luft bilden.

Somit ist es bisher nicht exact erwiesen, daß Sinustöne von 16 und vielleicht noch etwas weniger Schwingungen hörbar sind, und ein solcher Beweis dürfte überhaupt schwer zu erbringen sein. Denn das souveräne Mittel zur Beseitigung von Obertönen, nämlich ihre Vernichtung durch Interferenz, ist ja leider gerade in der tiefsten Region deswegen nicht anwendbar, weil die Interferenzröhren eine solche Länge erhalten müßten, daß dadurch die außerordentlich leisen tiefsten Grundtöne mit ausgelöscht werden würden. Doch soll die Möglichkeit, daß Pendelschwingungen von so geringer Zahl noch eine Tonempfindung auszulösen vermögen, keineswegs in Abrede gestellt werden.

Im Gegentheil dürfte das Ergebnifs des dritten Abschnittes dieser Untersuchung durchaus für dieselbe sprechen.

## II.

Während von der ganzen langen Reihe der einfachen Töne nur einer der tiefste sein kann, wäre es a priori möglich, daß tiefste Differenztöne von verschiedener Höhe vorkämen. Es könnte beispielsweise in der kleinen Octave der tiefste Differenzton bei einer geringeren Zahl von Schwebungen auftreten, als in der sechsgestrichenen. Dieser Umstand macht es nöthig, die untere Hörgrenze für Differenztöne in einer das ganze Tonreich berücksichtigenden Serie von Versuchen zu bestimmen.

Bisher liegen Beobachtungen über tiefste Differenztöne nur vereinzelt vor. PREYER<sup>1</sup> konnte den Differenzton 32 ebenso bei den Tönen 1024 und 992 wie in tieferen Lagen sofort erkennen. Im Allgemeinen war der Differenzton 24 gleichfalls noch deutlich; bei 18 wurde aber die Wahrnehmung zweifelhaft, und bei 12 war in der Regel keine Spur mehr zu bemerken. Nur unter besonders günstigen Umständen ergaben Metallzungen von noch nicht 16 Schwingungen Unterschied, wie 500 und 512, einen sehr tiefen Ton, von dem PREYER indessen meint, daß er ein Combinationston von Obertönen gewesen sein dürfte. Diese Annahme erscheint durchaus möglich. Sie mag auch die richtige Erklärung dafür enthalten, daß WUNDT<sup>2</sup> bei 8, beziehungsweise weniger als 16 Schwebungen einen Differenzton wahrnahm, und daß ich selbst, am APPUNN'schen Tonmesser experimentirend, zuweilen schon bei 10 Schwebungen einen äußerst tiefen Ton constatiren konnte. Man muß also mit obertonlosen Primärtönen arbeiten, wenn man Täuschungen beim Aufsuchen der Schwingungszahl des tiefsten Differenztones ausschließen will.

Nun liegt nach der eingehenden Untersuchung von STUMPF und MEYER<sup>3</sup> die obere Hörgrenze — wenigstens für die von den genannten Autoren benutzten beiden GALTON-Pfeifen — bei 20 000 Schwingungen. Oberhalb 10 000 haben demnach die Grund-

<sup>1</sup> Ueber d. Grenzen d. Tonwahrnehmung. Jena 1876. Cap. I. D. tiefsten Töne. S. 15.

<sup>2</sup> Grundzüge d. physiol. Psychologie. I. Aufl., Bd. I, S. 362; II. Aufl., Bd. I, S. 394.

<sup>3</sup> Schwingungszahlbestimmungen bei sehr hohen Tönen. *Annalen d. Physik u. Chemie* (N. F.) 61, 778. 1897.

töne dieser Pfeifen, mit denen auch die folgenden Versuche ausgeführt sind, keine Obertöne mehr. Es gelingt aber noch in einer Höhe von annähernd 12 000 Schwingungen — weiter aufwärts fangen die Versuche aus technischen Gründen an, unsicher zu werden — ganz tiefe Differenztöne deutlich zu hören und mit hinreichender Genauigkeit festzustellen, daß die Grenze ihrer Wahrnehmbarkeit zwischen 25 und 35 Schwebungen liegt. Da also hier keine Obertöne in Frage kommen, so ist nicht daran zu zweifeln, daß höchstens circa 30 Schwebungen zu einer Differenztonwahrnehmung nothwendig sind.

Die Versuchsanordnung, welche zu diesem Resultat führte, war die folgende. Als Tonquellen dienten, wie gesagt, die beiden von EDELMANN in München dem Berliner psychol. Seminar gelieferten GALTON-Pfeifen, welche auch STUMPF und MEYER für ihre eben erwähnte Arbeit verwendet haben. In Stativen unverrückbar befestigt, wurden sie durch getrennte Zuleitungen mit einem Blasebalg verbunden, der, nachdem er vollgepumpt, während der ganzen Zeit seines Absinkens einen constant bleibenden Druck von 90 mm Wasser liefert. Die Art des Anblasens hängt jedoch aufer von ihm noch von der verstellbaren Windspalte der Pfeifen ab, welche für jede Tonhöhenregion ein Optimum ihrer Breite besitzt, bei dem der Ton am lautesten und klarsten ist. Zur Messung derselben stand mir ein im EDELMANN'schen Institut zu diesem Zwecke gefertigter Elfenbeinkeil mit Millimetereintheilung zur Verfügung. Die Tonhöhe der Pfeifen, zwischen ca. 3000 Schwingungen und der oberen Hörgrenze variabel, richtet sich nach der Einstellung des längs einer Skala verschraubbaren Hutes der Pfeife. Die Einer der Gradzahlen, mit der höchsten Tonhöhe beginnend, sind auf dem festen Theile des Pfeifenrohres eingravirt, die Zehntel auf der Peripherie des Hutes abzulesen. Die Hundertstel, die in den weiter unten folgenden Versuchsprotokollen in Form eines gewöhnlichen Bruches an zweiter Stelle hinter dem Komma stehen, mußten besonders markirt und gemessen werden. Beide Galtons (G I und G II) wurden nun zunächst auf den, nach der speciell für sie berechneten Tabelle von STUMPF und MEYER (a. a. O. S. 767) einer Tonhöhe von 11 000 — 12 000 Schwingungen entsprechenden, Theilstrich 5,5 eingestellt, wofür sich eine Windspaltenöffnung (WS) von 0,5 mm als die günstigste erwies. Da aber der Ton von G II tiefer war als der andere, so mußte G II durch Hinaufschrauben verkürzt

werden, bis beim Theilstrich  $5,2\frac{1}{2}$  Unisono eintrat, was mit größter Sicherheit daran kenntlich ist, daß jede Verschiebung nach aufwärts oder abwärts Schwebungen hervorruft. Hierauf begann der eigentliche Versuch. G I wurde langsam so weit verkürzt, bis neben den an Frequenz fortwährend zunehmenden Schwebungen zuerst eine Tonempfindung auftauchte. Da die Auffindung dieses Momentes ein Schwellenversuch war, so wurden auch alle einem solchen zukommenden Cautelen beobachtet. Insbesondere ward die Schwelle wiederholt von beiden Seiten her aufgesucht. Hierbei war es im Allgemeinen leichter, den Augenblick zu erfassen, wo der Differenzton eben verschwand, als denjenigen, wo er zuerst erschien. Der Schwellenpunkt lag bei  $G I = 5,4\frac{3}{4}$ . Ich nenne ihn die obere Schwelle (OS), weil er durch das Erhöhen des Tones über das Unisono gewonnen wurde. In derselben Weise wurde dann auch durch Vertiefen der Pfeife G I unter Unisono die untere Schwelle (US) bei  $G I = 5,5\frac{1}{4}$  gefunden. Es mußte nun ermittelt werden, um wieviel Schwingungen erstens der Ton  $G I = 5,4\frac{3}{4}$  und zweitens  $G I = 5,5\frac{1}{4}$  von  $G II = 5,2\frac{1}{2}$  oder, was dasselbe, von dessen Unisono  $G I = 5,5$  differirte. Zu diesem Zwecke machte ich Gebrauch von der STUMPF'Schen Differenztonmethode. Es wurde, während G I auf  $5,4\frac{3}{4}$  stand, G II bis  $4,9\frac{1}{3}$  in die Höhe geschraubt, nämlich soweit, bis beide Pfeifen genau den Differenzton (D) 403 ergaben. (Vgl. die erste Rubrik des nachstehenden Protokolls I<sup>a</sup>.) Dann drehte ich G I herunter auf den Unisonopunkt 5,5 und fand, daß der Differenzton sich dadurch auf 435 erhöhte. (Vgl. die zweite Rubrik des nachstehenden Protokolls I<sup>a</sup>.) Mithin betrug die Tonhöhendistanz zwischen dem Unisono und der oberen Schwelle 32 Schwingungen und war die Wahrnehmung des tiefsten Differenztones (t.DT) bei 32 Schwebungen erfolgt. Für die untere Schwelle war das Verfahren ganz das gleiche. Zuerst wurde G II so eingestellt, daß es mit  $G I = 5,5$  den Differenzton 403 lieferte, und dann wurde G I bis zur unteren Schwelle  $5,5\frac{1}{4}$  vertieft, wodurch die Höhe des Differenztones um 27 Schwingungen stieg. (Vgl. die dritte und vierte Rubrik des Protokolls I<sup>a</sup>.) Hiernach war also bei 27 Schwebungen schon ein Differenzton gehört worden. Besonders wichtig mußte es offenbar sein, die Differenztöne 403 und 435 (bezw. 430) möglichst exact festzustellen. Sie wurden deswegen mit Zuhülfnahme zweier Stimmgabeln von 403 resp. 435 Schwingungen be-

stimmt und zwar der Differenzton 430 durch Auszählen seiner Schwebungen mit der Gabel 435 nach der Fünftel-Secundenuhr. Die Gabel 435 war von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt beglaubigt; die andere (403) und ebenso die auch gelegentlich benutzten Gabeln 700, 720 und 750 habe ich selbst durch Vergleichen mit den Zungen des APPUNN'schen Tonmessers, deren Schwingungszahlen vorher durch Schwebungszählungen controlirt waren, geaicht.

Ich lasse nun das Protokoll des ersten Versuches folgen und füge das eines zweiten ganz analogen bei.

### Versuch Ia.

WS: 0,5. G I = 5,5 unison mit G II = 5,2<sup>1</sup>/<sub>2</sub>. Tonhöhe 11 000—12 000.

|      | OS                              | Unisono                         |                                 | US                              |               |
|------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|
| G I  | 5,4 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> | 5,5                             | 5,5                             | 5,5 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> |               |
| G II | 4,9 <sup>1</sup> / <sub>3</sub> | 4,9 <sup>1</sup> / <sub>3</sub> | 4,9 <sup>2</sup> / <sub>3</sub> | 4,9 <sup>2</sup> / <sub>3</sub> |               |
| D    | 403                             | 435                             | 403                             | 430                             | t. DT: 32; 27 |

### Versuch Ib.

WS: 0,5. G I = 5,2 unison mit G II = 4,9<sup>2</sup>/<sub>6</sub>. Tonhöhe 11 000—12 000.

|      | OS                              | Unisono                         |                                 | US                              |               |
|------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|
| G I  | 5,1 <sup>2</sup> / <sub>3</sub> | 5,2                             | 5,2                             | 5,2 <sup>1</sup> / <sub>3</sub> |               |
| G II | 4,6 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> | 4,6 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> | 4,6 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> | 4,6 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> |               |
| D    | 403                             | 435                             | 403                             | 435                             | t. DT: 32; 32 |

Diese beiden Doppelbeobachtungen stimmen sowohl mit einigen Vorversuchen als auch mit einer Reihe von Control-Experimenten gut überein. Letztere, welche mit Abweichungen bis zu  $\pm 5$  als durchschnittliche Grenzzahl 30 ergaben, fanden nach einem abgekürzten Verfahren statt. Es wurden nämlich, um die immer wiederholte Anwendung der Differenztonmethode zu umgehen, schon vor dem Aufsuchen der oberen oder unteren Schwelle auf dem Pfeifenhute diejenigen fünf Abstände vom Unisonopunkte markirt, die 20, 25, 30, 35 und 40 Schwebungen entsprachen, wodurch es möglich wurde, beliebig viele Schwellenbestimmungen rasch hinter einander auszuführen und sofort die zugehörige Schwebungszahl abzulesen.

In der Region von 10000 und 9000 Schwingungen ergaben die geschilderten Methoden meistens 30 Schwebungen, zuweilen etwas weniger, als Schwelle der Differenztonwahrnehmung. Auch hier dürften die Obertöne, wenn sie sich überhaupt bilden, zu schwach sein, um neben den Primärtönen noch wirksam zu werden. Der Ton einer MELDE'schen Stimmlatte von 16384 Schwingungen wird schon von vielen Personen nicht mehr percipirt. Ich selbst höre ihn nur ganz leise und nur bei völliger Stille.

In der Tonreihe weiter hinabschreitend, wobei theils Stimmgabeln und angeblasene Flaschen, also Tonquellen mit möglichst wenigen und schwachen Obertönen, theils die Galtons benutzt wurden, untersuchte ich in oft wiederholten Beobachtungen je ein Primärtonpaar von der Höhe 8000, 7000, 6000 u. s. w. bis 1000, 750, 700, 500, 400, 300 und 200. Von 100 an abwärts wird es meinem Ohre schwierig, die tiefsten Differenztöne aus dem Klange der selbst tiefen Primärtöne herauszuhören, so daß ein zuverlässiges Urtheil nicht mehr möglich ist. Im Uebrigen fand eine Differenztonwahrnehmung oberhalb 30 Schwebungen stets, in der Regel schon viel früher, in einem Falle, in dem die Stimmgabel 200 und eine Flasche als Tonquellen dienten, bereits spurweise bei 14 statt. Die Schwebungen wurden in jedem Falle sorgfältig ausgezählt.

### III.

Wenn ein Ton  $m$  in der Secunde  $n$  mal unterbrochen wird, so hört man unter geeigneten Umständen neben dem Haupttone  $m$  auch einen Unterbrechungston von der Schwingungszahl  $n$ . Unterbrechungstöne lassen sich auf verschiedene Weise hervorbringen. So kann man den Ton einer Stimmgabel durch ein Hörrohr dem Ohre zuleiten und zugleich eine kreisförmig durchlöchernte Scheibe zwischen Gabel und Hörrohr rotiren lassen. So oft ein Loch hindurchpassirt, dringt der Ton ungehindert in die unmittelbar vor der Gabel befindliche Oeffnung des Hörrohres; ist das Loch vorüber und tritt eine undurchbohrte Partie der Scheibe an seine Stelle, so wird der Ton stark gedämpft oder ausgelöscht. Ein anderer Modus ist der, daß die Sirenscheibe selbst zur Erzeugung des Haupttones benutzt wird, indem man sie in Rotation versetzt und ihren Löcherkreis anbläst. Sind dabei in gewissen Abständen immer einige Löcher

verstopft, so findet an diesen Punkten eine Unterbrechung des Tones statt und ist die Gelegenheit zur Entstehung eines Unterbrechungstones gegeben. Nehmen wir an, der Kreis habe 300 Löcher, von denen regelmäsig 30 freie mit 30 verklebten abwechseln, so hätten wir  $\frac{300}{2 \cdot 30} = 5$  verschlossene und ebensoviele offene, mit einander alternirende Gruppen von je 30 Löchern. Macht nun diese Scheibe in der Sekunde beispielsweise 5 Umdrehungen von constanter Geschwindigkeit, so hört man den Hauptton 1500 und  $\frac{1500}{2 \cdot 30} = 25$  Unterbrechungen. Die allgemeine Formel für die Schwingungszahl  $n$  des Unterbrechungstones lautet also, wenn der Hauptton  $m$  und die Löcherzahl der Gruppe  $g$  ist,  $n = \frac{m}{2 \cdot g}$ .<sup>1</sup> Hiernach könnte die Aufgabe, den tiefsten Unterbrechungston zu finden, zunächst leicht erscheinen. Man braucht ja nur den Umlauf der Sirenscheibe, ganz langsam beginnend, allmählich so rasch werden zu lassen, bis neben dem Hauptton die erste, tiefste Unterbrechungstonempfindung auftaucht, oder die anfangs sehr rasche Rotation nach und nach soweit zu verringern, bis der zuerst relativ hohe Unterbrechungston, immer tiefer werdend, eben verschwindet. Allein eine große Schwierigkeit liegt in der Bestimmung des der Schwelle des Unterbrechungstones entsprechenden  $m$ . Der Beobachter muß die gesuchte Schwingungszahl des Haupttones durch Vergleichen desselben mit einem anderen, dessen Höhe bekannt ist, bestimmen. Dies ist umständlich und kann zu Irrthümern führen, zumal wenn inzwischen die Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe Schwankungen erleidet. Diese Uebelstände ganz vermeiden zu können, wurde mir durch die Güte des Herrn Dr. ABRAHAM möglich, welcher auf meinen Wunsch diese Versuche mit mir zusammen ausführte. Derselbe besitzt, wie den Lesern dieser Zeitschrift aus seinen Veröffentlichungen bekannt sein wird, ein absolutes Tonbewußtsein, das ihn befähigt, mit unfehlbarer Sicherheit von jedem Tone sofort anzugeben, ob er ein  $c$ ,  $d$ ,  $e$  oder was sonst für eine Note ist, und welcher Octave er angehört. Außerdem bin ich Herrn Dr. ABRAHAM auch in-

<sup>1</sup> Man könnte  $n$  auch aus der Zahl der Umdrehungen der Scheibe berechnen. Ein dazu nöthiger Tourenzähler stand mir jedoch nicht zu Gebote und wäre außerdem aus mehreren Gründen nicht zweckmäsig gewesen.

sofern zu großem Danke verpflichtet, als seine erprobte Hörschärfe für die Richtigkeit der sogleich mitzutheilenden Versuchsergebnisse eine werthvolle Garantie bietet.

Unsere Untersuchung beschränkte sich aus technischen Rücksichten auf die mittleren Tonlagen. Es ist auch kein Grund zu der Annahme vorhanden, daß der tiefste Unterbrechungston in höheren Regionen ein anderer sein sollte als in der Tiefe. Wir benutzten theils eine hölzerne, theils eine metallene Scheibe. Jede einzelne Beobachtung wurde so oft wiederholt, bis wir beide zu einem klaren und übereinstimmenden Urtheil über die Schwelle der Unterbrechungstonwahrnehmung gekommen waren. Ich stelle die Resultate in folgender Tabelle zusammen.

| Versuchsreihe | Instrument    | Hauptton | Schwingungszahl<br>des tiefsten<br>Unterbrechungs-<br>tones |
|---------------|---------------|----------|---|
| I.            | Holzscheibe   | $e^1$    | 24  |
| II.           | „             | $a^1$    | 24  |
| III.          | „             | $d^1$    | 25  |
| IV.           | „             | $b$      | 24  |
| V.            | Metallscheibe | $f^3$    | 23  |
| VI.           | „             | $e^3$    | 22  |
| VII.          | „             | $ges^3$  | 25  |
| VIII.         | Holzscheibe   | $g^2$    | 18  |
| IX.           | „             | $g^3$    | 18  |
| X.            | „             | $g^2$    | 16  |
| XI.           | „             | $dis^3$  | 16  |
| XII.          | „             | $d^2$    | 16  |

Diese Unterbrechungstöne haben nun, nach unseren gegenwärtigen physiologisch-akustischen Kenntnissen zu urtheilen, keine Obertöne. Unsere Versuche beweisen daher, daß schon 16 Erregungen in der Secunde eine Tonempfindung auszulösen im Stande sind. Die tiefsten Unterbrechungstöne zeichnen sich sowohl durch ihre außerordentliche Tiefe als auch durch eine extreme Rauigkeit aus. Mir erscheint der Ton gleichsam in eine Reihe einzelner ganz tiefer Stöße aufgelöst.

Herr Dr. ABRAHAM hat jedoch neben diesen Stößen noch eine schwache continuirliche Tonempfindung.

Der Tabelle zufolge ist die Schwelle der Unterbrechungstonwahrnehmung mit unserer wachsenden Uebung in diesen schwierigen Beobachtungen nach und nach von 24 bis auf 16, als äußerste für uns erreichbare Grenze, gesunken. Indessen möchte ich keineswegs die Möglichkeit bestreiten, daß es unter ausgesucht günstigen Bedingungen gelegentlich gelingen könnte, sie noch etwas zu erniedrigen. Je mehr die Unterbrechungstöne — und das Gleiche gilt auch von Differenztönen — sich dem Ende der Tonreihe nähern, desto discontinuirlicher, leiser und undeutlicher werden sie, bis sie allmählich gänzlich dem Ohre entschwinden. Die untere Hörgrenze ist daher nicht präzise bestimmbar, kein scharf markirter Punkt und dürfte je nach der Tonstärke, der Hörschärfe und der Aufmerksamkeit, sowie nach der Art der Schallquellen und der Beschaffenheit der sonstigen Umstände gewissen Schwankungen unterliegen.

---