6. *Schwingungszahlbestimmungen bei sehr hohen Tönen; von C. Stumpf und M. Meyer.*

Beobachtungen über tiefste und höchste Töne sind nicht bloss von Werth für den Ohrenarzt, dem es daran liegen muss, die normalen Tongrenzen und ihre durch Alter oder Krankheit bedingten Veränderungen zu ermitteln, sondern auch für den Physiologen und Psychologen, die die Veränderungen der Unterschiedsempfindlichkeit, des Intervallurtheils und des Harmoniegefühls in den Grenzgebieten feststellen wollen. Man muss aber vor allen Dingen über die objective Tonhöhe der angewandten Klangquellen Sicherheit haben.

An der *unteren Tongrenze* lassen sich zunächst die Schwingungszahlen von Stimmgabeln, wie sie jetzt von Edelmann in München vorzüglich hergestellt werden, auf graphischem Wege genau ermitteln, und dann kann die Tonhöhe anderer Klangquellen mit Hülfe der Schwebungen, die sie mit den Gabeln machen, bestimmt werden. Für das Gehör des Untersuchenden und der etwa untersuchten Personen besteht hier nur die Aufgabe, nicht Obertöne der Gabeln mit dem Grundtone zu verwechseln. Denn es ist auch in solchen Gabeln noch der erste Oberton vorhanden.¹⁾ Indessen lässt sich durch Uebung und Sorgfalt diese Schwierigkeit überwinden. Man muss auf die fortschreitende Vertiefung des gehörten Klanges in der Versuchsreihe achten, jeden neuen, anscheinend tieferen, mit den früher gehörten Tönen und namentlich mit seiner vorher festgestellten höheren Octave vergleichen.

Schwieriger ist die Bestimmung der Schwingungszahlen *sehr hoher Töne*. Die blosse Berechnung aus den Dimensionen der Klangquelle leitet nicht sicher, da wir die Bedingungen und Gesetze der Tonbildung namentlich bei winzigen Gabelchen und Pfeifchen nicht hinreichend übersehen können. Viel zuverlässiger sind auch hier vibrographische und ähnliche

1) C. Stumpf, Wied. Ann. 57. p. 674. 1896.

Methoden, die Kundt und neuerdings Melde¹⁾ ausgebildet haben. Aber sie lassen sich kaum auf alle zu akustischen Versuchen gebräuchlichen Klangquellen anwenden. Auch würde die Durchführung der exacten Melde'schen Methoden für eine ganze Reihe von Gabeln sehr mühsam sein.

Gegen die einzige rein akustische Methode, die Beobachtung von Differenztönen hoher Töne und tieferer, deren Höhe bereits bestimmt ist, hat Melde, obschon er sie als brauchbar anerkennt, doch das Bedenken erhoben, dass Zweifel entstehen könnten, in welcher Octave der Differenzton zu suchen sei. Wir stellten uns gleichwohl die Aufgabe, diese rein akustische Methode auf die neuerdings in Deutschland vorzugsweise für akustische und ohrenärztliche Studien benutzten Klangquellen anzuwenden. Denn wenn man stufenweise hinaufgeht und die Stufen klein genug nimmt, so kann man Differenztöne von jeder beliebigen geringeren Höhe erzeugen; und dann ist es selbst einem weniger geübten Ohre durchaus nicht schwer, über die Octave ins klare zu kommen, und wo noch ein Zweifel besteht, kann man durch Schwebungen des Differenztones mit entsprechenden Stimmgabeltönen die Entscheidung herbeiführen. Da das Berliner Psychologische Seminar eine grosse Menge von Gabeln jeder Region besitzt, so war diese Entscheidung leicht zu bewerkstelligen. In der Beobachtung der Differenztöne selbst aber haben wir uns durch jahrelange Beschäftigung damit eine solche Uebung erworben, dass wir eine Täuschung für ausgeschlossen halten dürfen, zumal da beide Beobachter unabhängig voneinander den gleichen Differenzton constatirten und ihn durch Nachsingen, durch Vergleichung der bezüglichen Gabel, endlich in vielen Fällen auch durch Schwebungen des Differenztones mit dem Tone dieser Gabel controllirten.

Die Prüfung erstreckte sich hauptsächlich auf drei Exemplare des sogenannten Galtonpfeifchens, auf eine von Appunn jun. verfertigte Pfeifenserie und auf die von Appunn sen. herührende, von Preyer²⁾ zuerst benutzte Serie kleiner Stimmgabeln.

Es war übrigens nicht bloss unsere Absicht, diese im

1) Melde, Wied. Ann. 51. p. 661. 1894; 52. p. 238. 1894.

2) Preyer, Die Grenzen der Tonwahrnehmung, p. 18 ff. 1876.

Augenblicke zufällig disponiblen und gebräuchlichen Klangquellen zu prüfen; vielmehr sollte zugleich und vorzugsweise die Brauchbarkeit und die Grenze der Methode selbst untersucht und die bei ihrer Anwendung erforderlichen Vorsichtsmaassregeln festgestellt werden.

I. Wir gingen aus von den *Galtonpfeifchen* der verbesserten Form, die ihnen Prof. Edelmann in München gegeben hat. Sie haben den doppelten Vortheil, dass sie sich continuirlich verstimmen lassen, was namentlich für die Beobachtung des Differenztones ausserordentlich wichtig ist, und dass man beliebig lang andauernde Töne erhält, während die Gabeln rasch verklingen.¹⁾

Die Hauptschwierigkeit lag in der Herstellung einer gleichmässigen Windstärke, da die Tonhöhe von Pfeifen mit der Windstärke variirt. Hierzu diente uns comprimirt Luft, die aus einem Kessel durch Schläuche zu den Pfeifen geleitet wurde, vorher jedoch noch durch ein Reducirventil hindurchzugehen hatte. Die von der „Luftdruck-Wasserhebungs-Gesellschaft Krause & Co.“, Berlin SO, Michaelskirchplatz 24, gelieferte Einrichtung²⁾ besteht aus einer Luftpumpe, einem Kessel von 0,6 cbm Inhalt, worin die Luft bis zu 3 Atm. comprimirt werden kann, und dem daran angebrachten Reducirventil, vermittelst dessen man einen constanten, vom Ueberdruck im Kessel unabhängigen Luftstrom herstellen kann. Doch wurde bei unseren Versuchen das Reducirventil auf einen höheren Druck eingestellt, als zum Anblasen der Pfeifen unbedingt nothwendig gewesen wäre, nämlich auf 1,2 Atm., weil bei

1) In der Figur bedeutet: *a* Träger des Pfeifchens, *m* das verstellbare, in einen ringförmigen Schlitz mündende Anblaserohr, *r* das eigentliche Pfeifenrohr, *b* eine Millimeterscala, *h* den verschraubbaren Hut, woran der das Pfeifenrohr abschliessende Stempel befestigt ist, *s* Gummischlauch, *l* Gummiball, wie sie von dem Verfertiger dazu geliefert werden.

2) Vgl. W. Stern, Verh. der Physikal. Ges. zu Berlin, 16. p. 47.

Einstellung auf geringeren Druck und dadurch bedingter schwacher Spannung der Federn die Theile des Ventils infolge unvermeidlicher Erschütterungen sich leicht gegeneinander verschieben und dadurch die Spannung der Federn und also auch die Stärke des Luftstroms verändert werden kann. Bei Einstellung des Ventils auf 1,2 Atm. wurde dies vermieden; da nun aber der Luftstrom unter diesen Umständen zum Anblasen der Pfeifen viel zu stark gewesen wäre, so wurde er durch Anlegen einer durch eine Schraube verstellbaren Klemme an den Zuleitungsschlauch beliebig eingeschränkt. Hierdurch wurde zugleich erreicht, dass wir die Pfeifen mit leichter Mühe bald mit grösserer, bald mit geringerer, und doch immer gleichmässiger Windstärke anblasen konnten, indem dazu nur eine Verstellung der Klemmschraube erforderlich war. Nur einen Fehler hat der Apparat. Wenn man nämlich mehrere Minuten lang ununterbrochen die Luft ausströmen lässt, so wird die Temperatur des Luftstroms infolge der Ausdehnung der comprimierten Luft geringer, und dies bewirkt eine geringe Aenderung der Tonhöhe. Dies Sinken der Temperatur muss man dadurch vermeiden, dass man die Luft nur solange ausströmen lässt, als man sie zur Beobachtung braucht. Während man die Ablesungen, Aufzeichnungen und sonstigen Manipulationen vornimmt, hält man die Luft abgeschlossen; und diese Zeit ist vollkommen hinreichend, um den gewünschten Temperatureausgleich zwischen Kesselluft und äusserer Luft herbeizuführen. Bei Anwendung dieser Vorsichtsmaassregel hat sich der Apparat für unsere Zwecke vorzüglich bewährt. Doch muss man nicht meinen, den Blasebalg allgemein durch einen Kessel mit comprimierter Luft ersetzen zu können. Beide Windquellen dienen ganz verschiedenen Zwecken. Der Blasebalg liefert grosse Windmengen unter geringem Druck, der Kessel kleine Windmengen unter hohem Druck, wie sie eben zum Anblasen kleinster Pfeifchen benöthigt werden.

Wir hatten drei Galtonpfeifchen zur Verfügung, eines davon, mit *B* bezeichnet, Eigenthum des Herrn Prof. Bezold in München, die anderen beiden, *A* und *C*, von dem Edelmann'schen Institut für das Seminar geliefert. Die Pfeifchen sind graduirt. Sie beginnen zu tönen mit etwa 3000 Schwingungen beim Theilstrich 26. Bei 0,0 hat der in der Pfeifenröhre

verschiebbare Stempel den Röhrenrand erreicht. Ausser der Verschiebung des Stempels kann die Entfernung der einen ringförmigen Spalt bildenden Blaseöffnung vom gegenüberliegenden Pfeifenrande grösser oder kleiner gemacht und so eine Stellung gesucht werden, bei welcher der Ton jedesmal am besten und kräftigsten herauskommt. („*Windstellung*“ bei *m* gegenüber der „*Tonstellung*“ bei *h*, vgl. die Figur.) Hierbei verändert sich allerdings zugleich die Tonhöhe, und es musste daher, wenn eine solche Verstellung mit dem Emporsteigen in der Tonreihe nothwendig wurde, die Tonhöhe für die neue Windstellung aufs neue bestimmt werden, bez. die Tonstellung so verändert werden, dass nun der nämliche Ton wie vorher erschien. Darauf beziehen sich die in den Tabellen angegebenen doppelten Werthe für die Tonstellung eines Pfeifchens bei bestimmter Tonhöhe. Der zweite Werth entspricht immer einer solchen Windstellung des Pfeifchens, die für die nächstfolgende Tonregion am günstigsten war und möglichst lange beibehalten werden konnte. In der letzten Versuchsreihe, wo wir schon mit 7000 Schwingungen begannen, gelang es bei einem der Pfeifchen, ohne jede Aenderung der Windstellung auszukommen.

Hierbei ist noch folgendes zu beachten: Wenn man in grösserer Tonhöhe dem Pfeifchen eine gute Windstellung gegeben hat, und es nun stetig auf noch grössere Tonhöhen übergehen lässt, so wird der Ton mit der Erhöhung zugleich schwächer und verschwindet schliesslich. Aber bei weiterer Verstellung in derselben Richtung kommt öfters wieder ein Ton zum Vorschein. Dieser neue Ton entsteht unter anderen Bedingungen und darf nicht als Fortsetzung der früheren Tonreihe betrachtet werden. Er ist tiefer als die letzten Töne dieser Reihe. Die Lücke ist oft so kurz, dass man sie nur bei ganz langsamer Drehung des Stempels und scharfem Hinhören bemerkt. Wir haben daher diesem Punkte besondere Aufmerksamkeit geschenkt und uns stets überzeugt, dass wir es mit einem bei gegebener Windstellung *lückenlos* in die Höhe gehenden Tone zu thun hatten.

Ferner entstehen bisweilen gleichzeitig mit dem Tone, auf den ein Pfeifchen eingestellt ist (manchmal statt dieses Tones, wenn die Windstellung augenblicklich nicht die richtige ist),

noch gewisse tiefere Nebentöne, die durch die Construction des Pfeifchens bedingt sind. Wahrscheinlich kommt hier die Resonanz der Luftmasse zur Wirkung, die in der drehbaren, den Stempel tragenden Kapsel enthalten ist. Diese Nebentöne dürfen nicht mit Differenztönen verwechselt werden. Sie sind daran kenntlich, dass sie schon bei dem einzelnen Pfeifchen auftreten und mit dem Haupttone in die Höhe gehen. Uebrigens sind in dieser Beziehung ebenso wie in Hinsicht der vorher erwähnten Lückenbildungen die einzelnen Pfeifchen verschieden, manche besser, manche schlechter.

Als Ausgangston benutzten wir zunächst 4000 (ungefähr h_4). Dieser Ton war uns durch eine Appunn'sche Stimmgabel gegeben, deren richtige Stimmung sich durch tiefere Gabeln controlliren liess. Wir stellten nun ein Pfeifchen bei günstiger Windstellung so ein, dass es mit der Gabel unisono tönte, stimmten hierauf ein zweites Pfeifchen unisono mit dem ersten und notirten die Stellungen der beiden. Hierauf gingen wir mit dem ersten soweit in die Höhe, dass ein bestimmter Differenzton erschien, der von uns beiden vollkommen deutlich gehört, eventuell auch durch schwebende Gabeln aus der bezüglichen Region controllirt wurde. Meist benutzten wir hierzu den Differenzton 500, auch 400, 600, 1000, 2000; bald war der eine, bald der andere zweckmässiger. Man hört bei der Verstimmung des ersten Pfeifchens zuerst das Klopfen, Rollen und Schwirren der Schwebungen, dann kommt der Differenzton aus der Tiefe herauf, und man macht bei der gewünschten Höhe Halt. So ist jede Täuschung ausgeschlossen. Hierauf stimmten wir wieder das zweite Pfeifchen unisono mit dem ersten, wobei der Differenzton nun wieder hinunter geht und das Schwirren, Rollen und Klopfen der Schwebungen auftritt, bis Unisono oder nahezu Unisono erreicht ist.

Hierbei war noch eine Eigenthümlichkeit unserer Einrichtung zu berücksichtigen. Der vom Luftkessel kommende Schlauch theilte sich gabelförmig und versorgte so beide Pfeifen gleichzeitig mit Luft. Hätte man nun, wenn das eine Pfeifchen allein tönen sollte, den zum andern führenden Schlauchtheil ganz abgeklemmt, so würde der Ton des ersten Pfeifchens wegen des stärkeren Windzufflusses ein anderer gewesen sein, als nachher beim gleichzeitigen Ansprechen beider Pfeifchen.

Deshalb liessen wir in solchen Fällen den Wind auch aus dem zweiten Pfeifchen strömen und verhinderten nur die Tonbildung durch Einstellung auf die Tonstellung Null. Wir überzeugten uns, dass bei diesem Verfahren die Tonhöhe des ersten Pfeifchens beim isolirten und beim gleichzeitigen Ansprechen unverändert blieb.

Bis zur Tonhöhe 7000 controllirten wir die durch abwechselnde Höherstimmung der beiden Pfeifchen und Beobachtung der so entstehenden Differenztöne gewonnenen Ergebnisse auch noch direct durch Vergleichung mit Stimmgabeltönen, da uns noch die Gabel 4800 zu Gebote stand und die Differenztöne bis zu 2200 noch leicht gehört und verglichen werden können.

Nach viermaligen Vorversuchen, die uns von 4000 (auch einmal 3200) bis zu 7000 Schwingungen führten und bereits gut übereinstimmende Ergebnisse lieferten (z. B. für 4000 in sieben Einzelbeobachtungen Tonstellungen, die nur zwischen 19,0 bis 19,25 schwankten), machten wir vier längere Versuchsreihen, deren Ergebnisse in den folgenden Tabellen zusammengestellt sind. Die zweite und dritte Reihe begannen wir sogleich mit 6000, die vierte mit 7000; und hier gingen wir, nachdem wir der Methode und der hinreichenden Uebung sicher waren, sogleich in grösseren Schritten, um 2000 Schwingungen, in die Höhe, um bei den letzten Beobachtungen noch frisch genug zu sein. Denn diese Beobachtungen ermüden natürlich sehr, da sie bei der zunehmenden Schwäche der Töne in den höchsten Lagen die gespannteste Aufmerksamkeit erfordern.

Wir kamen auf diese Weise gemeinschaftlich bis 13 600, der eine von uns auch noch bis 14 000 (etwa a^6), während für den andern (Stumpf) der Differenzton hier schon zu schwach war, um noch vernommen zu werden, was mit dem vorgeschritteneren Lebensalter zusammenhängen dürfte. Weiter hinauf war es unmöglich, noch Differenztöne zu hören. Die Töne der Pfeifchen, d. h. die hohen, die Reihe continuirlich fortsetzenden Töne (die erwähnten unter anderen Bedingungen entstehenden, tieferen Töne hört man auch weiterhin oft ziemlich stark) werden von da ab selbst so schwach, dass sie von dem Blasegeräusch fast gänzlich überdeckt werden.

Tabelle für das Galtonpfeifchen.

Schwingungszahlen	I. Reihe.		II. Reihe		III. Reihe		IV. Reihe	
	A	B	A	C	A	B	A	C
4000	19,6	19,3						
5000	15,2	15,2						
6000	12,4	12,4	12,5	12,7	12,1	12,1		
7000	10,4	10,3	10,3	10,2	9,9	10,0	10,2	10,1
8000	8,85	8,7	8,7	8,6	$\left\{ \begin{matrix} 8,0 \\ 8,4 \end{matrix} \right.$	$\left\{ \begin{matrix} 8,3 \\ 8,5 \end{matrix} \right.$		
9000	7,5	7,5	7,45	7,3	$\left\{ \begin{matrix} 7,0 \\ 7,2 \end{matrix} \right.$	7,3	7,4	7,2
10 000	6,6	6,6	6,5	6,2	6,3	6,3		
11 000	5,7	5,6	5,7	$\left\{ \begin{matrix} 4,6 \\ 5,7 \end{matrix} \right.$	$\left\{ \begin{matrix} 5,3 \\ 5,5 \end{matrix} \right.$	5,5	5,6	5,3
12 000	4,8	4,6	$\left\{ \begin{matrix} 4,6 \\ 4,8 \end{matrix} \right.$	4,8	4,8	$\left\{ \begin{matrix} 4,7 \\ 4,75 \end{matrix} \right.$	4,8	$\left\{ \begin{matrix} 4,2 \\ 4,9 \end{matrix} \right.$
13 000					4,15	4,15	4,25	
13 600							3,9	3,8
14 000							3,7	

Man kann nun versuchen, aus dieser Tabelle eine Formel abzuleiten und aus dieser die Höhe der den folgenden Tonstellungen des Pfeifchens entsprechenden Töne zu berechnen, wobei man sich freilich sagen muss, dass die blossе Berechnung in solchen Fällen, wo man sich der Grenze der Leistungsfähigkeit eines Apparates nähert und die normalen Bedingungen seiner Wirksamkeit nicht mehr allein in Betracht kommen, stark hypothetisch bleibt. Das Gesetz, dass der halben Pfeifenlänge die Octave des ursprünglichen Tons entspricht, gilt natürlich nur dort, wo die Länge der Pfeife alle anderen Dimensionen an Grösse weit übertrifft, und auch dort nur angenähert. Dass es bei unseren Pfeifchen ganz unbrauchbar ist, sieht man z. B. daraus, dass die Pfeifenlänge von A in der I. Reihe für den Ton 6000 gleich 12,4 mm, für 12 000 gleich 4,8 mm ist. Berechnet man die zusammengehörigen Schwingungszahlen und Pfeifenlängen nach folgender Formel

$$h = -3,2 + \frac{98\,400}{n} - \frac{28\,800\,000}{n^2},$$

wo h die Pfeifenlänge, n die Schwingungszahl bedeutet, so erhält man folgende Werthe:

4000	19,6	8 000	8,7	12 000	4,8	18 000	2,2
5000	15,3	9 000	7,4	13 000	4,2	20 000	1,6
6000	12,4	10 000	6,4	14 000	3,7	25 000	0,7
7000	10,3	11 000	5,6	16 000	2,9	30 000	0,05

Die berechneten und die experimentell bestimmten Zahlen stimmen genügend überein. Ueber 30 000 hinaus könnte die Pfeife hiernach überhaupt keine Töne mehr geben, da die Pfeifenlänge dann negativ wird.

Edelmann hatte an dem *B*-Pfeifchen für einige Pfeifenlängen folgende Tönhöhen in Buchstaben angegeben, zu denen wir die Schwingungszahlen (abgerundet, $a^1 = 435$) hinzufügen:

22,2	a^4	3500		8,6	c^6	8 400		2,1	a^7	27 800
18,3	c^5	4200		5,4	a^6	14 000		1,9	c^8	33 400
9,8	a^5	7000		3,9	c^7	16 700		1,0	a^8	55 700

Bei den tieferen Tönen bis zu 8400 ist eine ziemlich gute Uebereinstimmung dieser Angaben mit unseren Ergebnissen vorhanden; von da ab werden jedoch die Abweichungen beträchtlich. Edelmann hat sich bei der Tönhöhenbestimmung zweier Methoden bedient, des Anblasens mit Luft und mit Leuchtgas (man erhält hierdurch für dieselbe Tonstellung ziemlich genau ein Quintenintervall) und des Vergleichens mit grösseren, mathematisch ähnlichen Pfeifen. Doch beruhen seine Angaben über die höchsten Töne, die mit unseren Beobachtungen nicht mehr stimmen, nicht auf der experimentellen Methode, sondern nur auf theoretischer Ableitung. Durch die erstere ist er nach brieflicher Mittheilung bei einer neuerlichen Prüfung nur bis zur Tonstellung 5 gelangt.

Galton¹⁾ will das Pfeifchen höchstens soweit verkürzen, dass seine Länge $1\frac{1}{2}$ mal so gross ist als sein Durchmesser. Er meint auf Grund theoretischer Erwägungen, dass bei weiterer Verkürzung der Ton nicht wesentlich höher werde, weil dann der Durchmesser einen grösseren Einfluss gewinne als die Länge der Pfeife. Wenn dies richtig ist, so wäre die

1) Galton, *Inquiries into human faculty*, p. 375 ff. 1883.

Tonhöhe der Edelmann'schen Galtonpfeifchen überhaupt nicht über 14 000 Schwingungen hinaus zu steigern, da ihr Durchmesser nur 4 mm beträgt.

Zwaardemaker¹⁾, der sich schon früher zur Abstimmung des Galtonpfeifchens der Methode des Anblasens mit Luft und mit Leuchtgas bedient hat, theilt eine Curve mit, aus der man folgende zusammengehörigen Werthe von Tonhöhe und Pfeifenlänge ablesen kann:

g^6 5,0 mm a^6 3,8 mm b^6 2,8 mm c^7 2,4 mm d^7 1,75 mm e^7 1,25 mm

Zwaardemaker behauptet jedoch nur die Richtigkeit der angegebenen Intervalle, nicht der absoluten Tonhöhe. Mit unseren Ergebnissen können wir die Angaben Zwaardemakers schon deshalb nicht vergleichen, weil uns nicht bekannt ist, ob sein Pfeifchen denselben Durchmesser hatte, wie die von uns benutzten Edelmann'schen. Sollte der Durchmesser derselbe sein, so würden die Angaben Zwaardemaker's recht gut mit den von uns berechneten Werthen übereinstimmen. Die absolute Tonhöhe seines Pfeifchens bestimmt Zwaardemaker durch eine Gleichsetzung, von der er selbst betont, dass sie arbiträr sei. Die Tongrenze für das Alter von sieben Jahren liegt nämlich nach ihm bei dem von König mit mi^9 (e^7) bezeichneten Klangstäbchen, dessen Stimmung jedoch als sehr problematisch gelten muss, und zugleich bei der Einstellung seines Pfeifchens auf 1,25. Infolge dessen setzt er beide Töne gleich.

Um einen Begriff zu haben, innerhalb welcher Grenzen die Tonhöhen sich bei den Galtonpfeifchen *mit der Windstärke ändern*, haben wir diese Grenzen für drei verschiedene Tonhöhen ungefähr bestimmt, indem wir dem einen Pfeifchen durch ein besonderes Gebläse Wind zuführten, während das andere durch die vorher beschriebene Einrichtung zuerst sehr schwach angeblasen wurde, dann mit wachsender und schliesslich sehr grosser Windstärke. Stimmtten sie zuerst unisono, so ergab sich nachher ein in die Höhe gehender Differenzton, aus dessen schliesslicher Höhe die des zweiten Pfeifchens bestimmt werden

1) Zwaardemaker, Zeitschr. f. Ohrenheilk. 24. p. 284.

konnte. Das erste Pfeifchen wurde hierbei durch ein kleines, mit der Hand zu treibendes Gebläse sehr schwach angeblasen und die Umstände, Belastung des Reservebalges etc., so ausprobiert, dass die Tonhöhe genügend constant blieb. *Schwache* Töne kann man bei einem solchen Gebläse ziemlich gut constant erhalten, wenn auch nicht in der Vollkommenheit wie mit der comprimierten Luft. Man muss sich darauf besonders einüben und vorsichtig manipuliren.

Es ergab sich so, dass das zweite Galtonpfeifchen in der Höhe von 4000 Schwingungen bis zu etwa 400, in der Höhe von 6000 bis zu etwa 500, in der Höhe von 10 000 bis zu etwa 550 Schwingungen höher wurde. Wenn man auch sehr schwache Töne in den Kauf nehmen will und dann bis zu den äussersten Grenzen der Windstärke nach beiden Seiten hin geht, so können auch noch grössere Verstimmungen erzeugt werden, und wir werden sogleich noch bedeutend grössere bei anderen Pfeifchen kennen lernen. Auf diese Abhängigkeit der Tonhöhe von der Windstärke hat man also bei Benutzung der Tabelle Rücksicht zu nehmen.

II. An zweiter Stelle untersuchten wir nun eine *Serie von Pfeifchen*, wie sie von Anton Appunn in Hanau neuerdings hergestellt werden. Es waren dies 62 Stück, die nach der darauf angebrachten Bezeichnung von 1500 Schwingungen (g^3) bis zu 50 880 (gis^6) reichen und in Halbtonstufen fortschreiten sollen. Wir gingen sogleich von der mit 4000 bezeichneten Pfeife aus, welche mit mittlerer Stärke angeblasen mit der Stimmgabel 4000 in guter Uebereinstimmung war.

In einer ersten Beobachtungsreihe benutzten wir bis zu 7000 Schwingungen die Differenztöne der Pfeifchen mit einer Stimmgabel, von da ab die der Pfeifchen untereinander, wobei die eine mit unserer Einrichtung, die andere mit dem Munde angeblasen wurde, damit sie sich nicht gegenseitig Wind entzögen. Hierbei stellten wir zunächst die Grenzen fest, innerhalb deren der Ton der zweiten Pfeife schwankte, wenn sie von sehr geringer bis zu sehr grosser Windstärke angeblasen wurde, also der Differenzton stetig in die Höhe ging, sodann die Tonhöhe der Pfeife bei einem Optimum der Windstärke, das den Ton besonders kräftig und rein erklingen liess. Dieser

Ton wurde dann als Ausgangspunkt für die weitere Bestimmung festzuhalten gesucht.

Diese Methode war jedoch unvollkommen, da man bei mündlichem Anblasen die Stärkeregulierung doch nicht genügend in der Gewalt hat. Wir machten daher eine zweite Beobachtungsreihe, bei der auch die Pfeifen über 7000 Schwingungen durch Differenztöne mit Stimmgabeln und zwar vorzugsweise mit der Gabel 4800 bestimmt wurden. Es zeigte sich, dass dies nach der nunmehr erlangten Uebung ohne grosse Schwierigkeit durchführbar war mit Hülfe des Differenztons ($2t-h$), wobei t die kleinere und h die grössere Schwingungszahl bedeutet, also t gleich 4800 und h gleich der zu bestimmenden Schwingungszahl der Pfeife ist. Bei den zwei höchsten Pfeifen wurde der Differenzton ($h-2t$) benutzt. Der Ton 11500 wurde auch noch durch den Differenzton ($3t-h$), in unserem Falle 500, controllirt, wobei t durch die Gabel 4000 erzeugt wurde. Die beiden Beobachtungsreihen stimmten bis 7000 Schwingungen sehr gut miteinander überein, von da ab wachsen hingegen die Werthe der zweiten Reihe stärker als die der ersten; auch die Grenzbestimmungen für minimale und maximale Windstärke unterscheiden sich dadurch, dass sie in der zweiten Reihe nach beiden Richtungen weiter gehen, da wir hier die Windstärke bis zu den äusserst erreichbaren Grenzen variiren konnten. Es sind deshalb in die folgende Tabelle nur die Ergebnisse der zweiten Beobachtungsreihe aufgenommen.

Was das Stärkeminimum betrifft, so machten wir hier bei allen Pfeifen mit ganz wenigen Ausnahmen (diese Ausnahmen fanden stets bei Pfeifen statt, die überhaupt schlecht ansprechen) die Bemerkung, dass bei Verringerung der Windstärke der Ton immer tiefer und schwächer wird und schliesslich verschwindet, dass jedoch bei weiterer Verringerung der Windstärke nach einer häufig verschwindend kleinen Lücke wieder ein höherer Ton (wahrscheinlich ein Oberton des Grundtons) zum Vorschein kommt. Auf diese Lücke in der Tonbildung ist bei Versuchen zu achten, doch werden Irrthümer hierdurch nicht leicht hervorgerufen werden, da man die Pfeifen im allgemeinen so schwach nicht anbläst.

Tabelle für die Appunn'schen Pfeifen.

Pfeifen- nummer	Angegebene Tonhöhe	Durch Beobachtung festgestellte Höhe bei		
		geringster	grösster	bester Windstärke
18	4000, <i>c</i> ⁵	2800	4360	4000 ± 100
22	5000, <i>e</i> ⁵	3500	4800	4200
25	6000, <i>g</i> ⁵	4100	4700	4440
30	8000, <i>c</i> ⁶	4700	6000	5300
37	12000, <i>g</i> ⁶	4750	7200	6500 ± 100
42	16000, <i>c</i> ⁷	4800	8200	6600
46	20240, <i>e</i> ⁷	5100	8500	6800
54	32000, <i>c</i> ⁸	7000	9350	8300
55	33920, <i>cis</i> ⁸	5800	9800	8375
56	36000, <i>d</i> ⁸	7700	9600	8725
57	38080, <i>dis</i> ⁸	8200	9600	9000
58	40480, <i>e</i> ⁸	7800	9600	9000
59	42780, <i>f</i> ⁸	—	—	10000
62	50880, <i>gis</i> ⁸	—	11500	10900

Wir haben, wie man sieht, nicht alle Pfeifen der Appunn'schen Serie durchgeprüft, sondern nur so viele, um eine genauere Vorstellung von dem Gange der Schwingungszahlen zu bekommen. Bei den zwei letzten Pfeifen, die wir prüften, waren die Grenzbestimmungen schwierig, weil bei den in dieser Höhe ohnedies schwachen Tönen die Differenzttöne unhörbar werden, wenn der durch die Pfeife erzeugte Primärton bis zu minimaler Stärke abgeschwächt wird. Doch haben wir bei der letzten Pfeife ausser dem Optimum auch noch das Maximum der Windstärke festgestellt, um die höchste mit dieser Serie erreichbare Schwingungszahl zu finden. Der Spielraum der Windstärke, innerhalb dessen eine Pfeife noch anspricht, also auch ihr Tonumfang, ist, wie die Tabelle zeigt, bei den einzelnen Pfeifchen verschieden. Manche (z. B. 55), die sehr leicht und gut ansprechen, können ihre Tonhöhe um mehr als eine Grosse Sexte (4000 Schwingungen in diesem Falle) verändern. Zur Controlle unserer Bestimmungen haben wir auch vielfältig die Pfeifen untereinander verglichen und die Differenzttöne, bez. Schwebungen je zweier miteinander ermittelt. Die Ergebnisse bestätigten durchweg die vorherigen Bestimmungen. Z. B. zeigten sich Nr. 57 und 58 bei gleichzeitigem Ansprechen in der That nahezu unison (deutliche Schwebungen),

56 gab mit 57 den Differenzton 300, 59 mit 62 den Differenzton 1000 (eine Differenz von 100 Schwingungen kann natürlich durch die geringste Aenderung der Windstärke eintreten; das Optimum ist ja kein mathematischer Punkt) und so fort.

Endlich verglichen wir die Ergebnisse mit denen bei den *Galtonpfeifchen*, um beide Reihen gegenseitig durch einander zu controlliren. Das *B-Pfeifchen* wurde hierbei durch das kleine Handgebläse besonders angeblasen. Nr. 59 erwies sich als ungefähr unison mit dem Galtonpfeifchen, wenn dieses auf 6,2, Nr. 62, wenn es auf 5,0 gestellt wurde. Aus der Tabelle p. 767 geht hervor, dass die bezüglichen Schwingungszahlen, so gut man es unter solchen Verhältnissen nur wünschen kann, mit den hier gefundenen übereinstimmen, denn 6,2 entspricht etwas über 10 000, 5,0 etwas über 11 000 Schwingungen; und die kleinen Differenzen verschwinden, sobald man in Betracht zieht, dass das Galtonpfeifchen durch das Handgebläse nicht mit der Stärke angeblasen werden konnte, wie in jener Beobachtungsreihe mit comprimierter Luft.

Es sei noch erwähnt, dass wir bereits früher, ehe uns noch die comprimerte Luft als Windquelle zur Verfügung stand, eine andere Serie Appunn'scher Pfeifchen, die in Ganztonintervallen fortschreitet, mit Hülfe des Handgebläses untersucht und dabei von d^4 stufenweise in die Höhe gehend für das letzte Pfeifchen, das mit f_{is}^8 (48 000) bezeichnet war, nur etwa 10 000 Schwingungen (e^6) gefunden hatten. Auch dieses Ergebniss, obschon wir es nur als ein ganz vorläufiges betrachteten, stimmt gut mit den nun erhaltenen überein. Und wir glauben darum, dass jeder auch ohne die feineren Einrichtungen zur Regulirung der Windstärke bei hinreichender Uebung in der Behandlung eines kleinen Gebläses mit Reservebalg und im Hören von Differenztönen unsere Resultate annähernd bestätigt finden wird.

Das Anblasen der Pfeifchen, auch der Galtons, mit einem *Gummiball* freilich kann zu solchen Untersuchungen nichts helfen. Der Ton ist nicht bloss zu kurz, sondern verändert auch während dieser kurzen Dauer seine Höhe beträchtlich, wie wir durch das rasche Hinaufgehen des Differenztones erkannten. Dieser heult, so zu sagen, wie ein Sturmwind aus der Tiefe in die Höhe. Auch ohrenärztliche Untersuchungen

über die von einem Individuum gehörten Töne, über Tonlücken und dergl. sollten darum nicht mit Hülfe eines Gummiballs, sondern einer einigermassen constanten Windquelle angestellt werden, zumal da nur in diesem Falle controllirt werden kann, ob nicht *ausser* dem Haupttone noch Nebentöne oder gar *statt* des Haupttons aus zufälligen Ursachen ein unbeabsichtigter anderer Ton entsteht.

III. An dritter Stelle untersuchten wir die *Serie von Stimmgabeln*, die von Georg Appunn seinerzeit für Preyer's Beobachtungen angefertigt und uns nun von dem Physiologischen Institut zu Jena übersandt worden war. Die Serie umfasst 31 Gabeln, die von 2040 bis 40960 Schwingungen reichen und die diatonische Leiter von c^4 bis c^8 geben sollen.

Wir liessen gleichzeitig mit einer solchen Gabel die Galtonpfeife *B* ertönen und stellten diese so ein, dass jede Veränderung nach der einen und der anderen Seite das unverkennbare Schwirren der Schwebungen und weiterhin einen aufsteigenden Differenzton erzeugte. Wir begannen mit der Gabel 12 gleich 6144 Schwingungen (die Nummern sind in den Gabeln, die Schwingungszahlen in das Holzgestell eingeschlagen), da bei den Gabeln von 1 bis 12 die Abstimmung leicht auf dem gewöhnlichen Wege als hinreichend genau erkannt werden konnte. Die folgende Tabelle giebt die zu den einzelnen Gabeln gefundenen Tonstellungen des Galtons, aus denen man mit Hülfe der Tabelle (p. 767) die zugehörigen Schwingungszahlen annähernd erkennen kann. Bei den Gabeln 22 bis 24 sind je zwei Tonstellungen des Pfeifchens verzeichnet. Die jedesmal zweite entspricht der Windstellung, die von da ab sich als günstiger erwies und dann während der weiteren Beobachtungsreihe beibehalten wurde.

Es ergibt sich also, dass diese Gabeln ungefähr ebenso weit reichen, als wir bei den Galtons mit unseren Bestimmungen gekommen waren. Aber es zeigt sich das **Merkwürdige**, dass die Gabeln *nicht ununterbrochen in die Höhe gehen*. 21 giebt ungefähr denselben Ton wie 14, die dazwischen liegenden Gabeln aber sind sogar meistens erheblich tiefer. Wir haben dieses Verhalten durch mannichfache Controllversuche ausser allen Zweifel gestellt. Appunn's ausgezeichnetes Gehör scheint bei 14 und 21 doch einmal gleich hohe Töne mit Octaven

Tabelle für die Appunn'schen Gabeln.

Nummer der Gabel	Angebliche Tonhöhe	Tonstellung des Pfeifchens	Nummer der Gabel	Angebliche Tonhöhe	Tonstellung des Pfeifchens
12	6144	12,0	22	(c ⁷) 16384	(8,0) 8,4
13	6826	11,8	23	18432	(7,4) 7,8
14	7680	9,1	24	20480	(5,7) 6,7
15	(c ⁶) 8192	11,3	25	21845	6,5
16	9216	11,8	26	24576	5,7
17	10240	11,4	27	27306	4,7
18	10922	11,0	28	30720	5,3
19	12288	9,0	29	(c ⁶) 32768	4,5
20	13653	8,5	30	36834	4,1
21	15330	9,2	31	40960	3,6

verwechselt zu haben. Schwerer begreiflich ist es, dass Appunn die starke Vertiefung der zwischenliegenden Gabeln 15 bis 18 entgangen ist. Man kann in der That ohne weiteres sagen, dass 16 tiefer ist als 14, wenn sie einfach nacheinander angestrichen werden. Ebenso leicht erkennt man, dass 16 gleich 13 ist, und dies wird bestätigt, wenn man sie zusammen anstreicht: es erfolgen nur langsame Schwebungen. Ebenso giebt 19 mit 14 deutliche, etwas raschere Schwebungen. Ferner lassen sich die Höhenverhältnisse der genannten Gabeln auch durch ihre Differenztöne untereinander aufs deutlichste feststellen. Z. B. giebt 15 mit 17 nicht einen Differenzton von etwa 2000 Schwingungen, sondern rasche Schwebungen und einen ganz tiefen Differenzton, ungefähr einem Unterschiede von 80 bis 100 Schwingungen entsprechend.¹⁾

So haben wir auch die in der Reihe weiter folgenden Gabeln vielfach untereinander verglichen. 24 giebt mit 25 etwa den Differenzton 150 und lässt zugleich deutlich schwirrende Schwebungen erkennen. 28 fällt wieder aus der Reihe; sie ist tiefer als 27. Auch hier ist dies schon beim successiven Anstreichen erkennbar, ferner durch den Differenzton von 28 und 25, der gleich 600 ist. 29 gab mit 27 den Differenzton 360 etc.

1) Dieser unser Befund rührt nicht etwa daher, dass die Reihenfolge, in der die Gabeln in den Löchern des Gestelles stecken, sich verschoben hatte. Wir überzeugten uns beim Herausnehmen der Gabeln, dass sie alle genau ihren eingepprägten Nummern nach aufeinander folgten.

Auch das, was Melde mit seiner rein physikalischen Methode an Appunn'schen Gabeln gefunden hat, stimmt mit diesen Ergebnissen überein. Er fand aus einer von Appunn sen. herrührenden Serie c^6 um etwa 1300 Schwingungen, c^7 um eine volle Octave zu tief (l. c., zweite Abhandl., S. 256).

Bei einer dem Berliner Physikalischen Institut gehörigen Appunn'schen Serie, die an Zahl und Bezeichnung der Gabeln der Jenenser Serie vollkommen gleich ist (solche oder ähnliche Serien scheinen sehr verbreitet zu sein), fanden wir ebenfalls an mehreren Stellen Verschiebungen, und von Nr. 25 an (= Galton 4,5) überhaupt keine Erhöhung mehr. Sehr auffallend war aber, dass diese Reihe von Nr. 12 ab durchgängig erheblich tieferen Tonstellungen des Galtons, also höheren Tönen entsprach, z. B. Nr. 15 der Berliner Serie = 9 Galton, während Nr. 15 der Jenenser = 11,3. Wir fanden dies bestätigt, als wir nachher die beiden Serien direct untereinander verglichen. Nr. 12 ist beiderseits noch fast identisch, Nr. 15 J (Jenenser) = 12 B (Berliner) + 200 Schwingungen, 18 J = 13 B, 22 J = 15 B, 24 J = 17 B, 26 J = 19 B (mit Differenzen bis höchstens 140 Schwingungen). Die Berliner Gabeln sind hier vielfach um etwa eine ganze Octave höher als die Jenenser von gleicher Nummer; sie bleiben weniger als diese hinter der beanspruchten Höhe zurück. Gegen das Ende hin nähern sich aber beide Serien einander wieder und sind die Fehler von gleicher Grösse.

IV. Da Melde auch einige *König'sche Gabeln* geprüft und dafür sehr befriedigende Resultate erhalten hatte, erbaten wir uns diese Gabeln zur Untersuchung nach unserer Methode. Sie sind auf die Töne $c^4 = 2048$, $c^5 = 4096$, $c^6 = 8192$, $c^7 = 16384$ abgestimmt. c^4 stimmt absolut genau mit einer anderen uns vorliegenden König'schen Gabel c^4 auf Resonanzkasten. c^5 ergibt mit c^4 , ebenso c^6 mit c^5 keinerlei Differenztöne oder Schwebungen; im ersten Falle ist bei successivem Anstreichen das Octavenverhältniss, im zweiten wenigstens die Tonerhöhung überhaupt durch das Gehör noch direct erkennbar, also die Verwechslung mit unisono ausgeschlossen. Dem Tone von c^6 entspricht am Galtonpfeifchen die Tonstellung 8,2, was gut mit der angegebenen Höhe stimmt. Mit der Gabel 4800 gab die Gabel c^6 einen Differenzton, den wir als etwa

1370 bestimmten und als $2t-h$ betrachteten, woraus sich die Schwingungszahl h auf etwa 8230 berechnet. Die kleine Abweichung wird an der Bestimmung des Differenztones liegen, die wir hier nur mit Hülfe eines Tonmessers aus der tieferen Octave bewerkstelligen konnten.

Bei c^7 konnte einer von uns (Stumpf) überhaupt kaum noch einen Ton neben dem Geräusche des streichenden Bogens vernehmen. Der andere (Meyer) hörte noch deutlich einen ganz feinen, spitzen Ton. Mit der Galtonpfeife zusammen liessen sich sehr schwache Differenztöne und bei Annäherung an das Unisono deutliche Schwebungen vernehmen, welche letztere auch für Stumpf erkennbar waren. Dem Unisono entsprach je nach der Windstellung die Tonstellung 2,8—3,0, bei übermässig starkem Anblasen 3,3—3,46. Der Tonstellung 2,9 würde nach der Tabelle p. 768 eine Tonhöhe von etwa 16 000 Schwingungen entsprechen. Nun hat Melde nach seiner „Resonanzmethode“ für die Gabel c^7 nur eine Abweichung von + 96 Schwingungen gegenüber der angegebenen Schwingungszahl 16 384 gefunden, welche Abweichung natürlich ebenso auf Melde's wie auf König's Rechnung kommen kann. Und so erhalten wir hiermit zugleich noch eine experimentelle Ergänzung zur Tabelle für die Tonstellungen der Galtonpfeifchen (p. 767).

Die Uebereinstimmung der König'schen und unserer Bestimmungen mit denen Melde's darf man wohl auch zugleich als eine Bestätigung dafür betrachten, dass Melde's Zweifel in Hinsicht der Differenztonmethode nicht begründet sind, sobald sie mit der Sorgfalt gehandhabt wird, die bei allen experimentellen Untersuchungen nothwendig ist; wie denn auch Melde selbst am Schlusse seiner Abhandlung hervorhebt, dass seine Uebereinstimmung mit König (welcher Differenztöne zur Abstimmung benutzte) in Hinsicht des c^7 als ein „für beide Theile sehr befriedigendes Resultat“ betrachtet werden müsse.

V. Sind sonach unsere Ergebnisse für die Methode der Differenztonbeobachtung günstig, so können wir dagegen, was die untersuchten Apparate anbetrifft, nicht umhin, unserer Verwunderung darüber Ausdruck zu geben, dass eine so ver-

diente Firma, wie die Appunn'sche, Schwingungszahlen an die Gabeln und Pfeifen zu schreiben vermochte, die um Beträge bis zu 40 000 von den wahren abweichen. Wie viele Physiker, Physiologen und Ohrenärzte sind dadurch getäuscht worden. Und nicht bloss bezogen sie ihre Beobachtungen auf viel zu hohe Schwingungszahlen, sondern die zuversichtliche Angabe der letzteren verleitete auch wohl zu falschen Beobachtungen, zu Selbsttäuschungen. So giebt Preyer an, dass man vollkommen deutlich erkenne, wie bei der Gabelserie die Töne bis zum letzten immer höher werden (l. c. 780), während sie thatsächlich bei seinem eigenen Apparate bald höher, bald tiefer werden.

Vor allem aber bedarf die bis zum heutigen Tage gebräuchliche Angabe, dass die obere Tongrenze bei etwa 50 000 Schwingungen liege, hiernach einer Revision. Am höchsten scheint man noch mit den Galtonpfeifchen zu kommen. Der höchste hier erreichbare Ton scheint uns, wenn man die Bedingung einer stetigen Erhöhung des Tones im Auge behält, etwa bei der Tonstellung 1,5 zu liegen, die nach der Tabelle p. 768 ungefähr 20 000 Schwingungen entsprechen würde. Bei den noch folgenden Tonstellungen treten Lücken in der Tonbildung ein, man muss die Windstellung neu reguliren und hat keine Garantie, dass die neben dem zunehmenden Blasegeräusch etwa noch vernehmbaren Tonspuren stetig in die Höhe gehende Töne darstellen; am allerwenigsten, wenn man mit dem Gummiball anbläst.

Ausserdem ist die physikalisch erreichbare *Tongrenze* nicht ohne weiteres mit der physiologischen *Hörgrenze* zu verwechseln. Zunächst hört eben nur die Möglichkeit auf, hinreichend kräftige und geräuschfreie Töne von grösserer Höhe noch herzustellen. Man kann von einer Hörgrenze bis jetzt nur sprechen in Bezug auf eine bestimmte Klangquelle und auf eine bestimmte, möglichst kräftige Erregung, deren sie fähig ist. Will man für das menschliche Ohr eine absolute Hörgrenze mit Sicherheit feststellen, so darf man sich der Verpflichtung nicht entziehen, durch rein physikalische Methoden den Nachweis zu führen, dass die an bez. jenseits der Hörgrenze liegenden Töne überhaupt existiren, und zwar als Schwingungen, deren Intensität nicht geringer ist als die der höchsten noch hörbaren Töne.

Man beobachtet nun zwar bei Stellungen des Galtonpfeifchens, die einen Ton nicht mehr erkennen lassen, noch das Niederdrucken einer Flamme, wie es für Töne charakteristisch ist. Aber dieses kann ebensowohl die Folge des Blasegeräusches sein, wie es denn auch bei Zischlauten eintritt; und wenn dieses Geräusch Töne enthält oder aus Tönen besteht, so sind sie doch schwerlich von der Höhe, welche der Stellung des Galtonpfeifchens entsprechen würde.

Schliesslich möchten wir die Bemerkung nicht unterlassen, dass die hier untersuchten Klangquellen, wenn auch die meisten weit unter den angegebenen Höhen zurückbleiben, doch hiermit ihre Brauchbarkeit nicht verlieren. Jede hat ihre besonderen Vorzüge. Die Appunn'schen Pfeifchen z. B., die in Hinsicht der angegebenen Schwingungszahlen am meisten enttäuschen, dürften sich für praktische Zwecke besonders dadurch nützlich erweisen, dass sie nicht die fatalen tieferen Nebentöne geben, die bei unvorsichtiger Handhabung des Galtonpfeifchens irre führen können.

(Eingegangen 27. Mai 1897.)