Über die beim Ausströmen der Luft entstehenden Töne.

Der interessanteste Körper ist für den Akustiker unstreitig die Luft, nicht blos in sofern dieselbe als Schallleiter in den meisten Fällen uns die Wahrnehmung des Schalles vermittelt, sondern auch dadurch, daß sie innerhalb fester Hüllen (Pfeifen) stehende Schwingungen annimmt und somit als selbsttönender Körper auftritt. Die Mannigfaltigkeit der Blaseinstrumente in Beziehung auf Gestalt, Dimension und Eigenthümlichkeit des Tons zeigt schon, daß kein Körper gleich der Luft geeignet ist, die höchsten wie die tiefsten Töne zu erzeugen und eine gleiche Mannigfaltigkeit in Beziehung auf den Charakter des Ton's darbietet. Hierzu kommt noch die Bequemlichkeit und Sicherheit, mit welcher die in den Pfeifen von der verschiedensten Gestalt eingeschlossenen Luftkörper durch einen Luftstrom zum Tönen gebracht werden können, wodurch die Construction des großartigsten aller musikalischen Instrumente, nämlich der Orgel möglich wurde. Die Orgel ist älter als die Theorie des Schalles, denn die Orgelbauer verstanden schon lange ihre Pfeifen vortrefflich anzufertigen, bevor die Akustiker die Schwingungen der Luft in denselben erklärt und gemessen haben.

So interessant das Tönen der Luft ist, so schwierig ist die Untersuchung desselben. Die tönenden Schwingungen der Stäbe, der Saiten, der Klangscheiben und der elastischen Membranen sind im Allgemeinen als bekannt und erklärt zu betrachten und die an diesen schwingenden Körpern zuerst beobachteten Erscheinungen und die für dieselben giltigen Gesetze sind den Akustikern bei der schwierigeren Untersuchung der Vibrationen der Luft hilfreiche Führer gewesen. Dagegrn bietet sich in Beziehung auf die tönenden Schwingungen der Luft trotz der Arbeiten ausgezeichneter Akustiker, wie Chladni, Weber, Savart, Seebeck und Wertheim, immer noch eine Menge Fragen dar, welche bis jetzt noch nicht beantwortet werden konnten. Wir kennen z. B. die Schwingungsweise der in den Orgelpfeifen enthaltenen Luftsäulen, können aber darüber noch nicht hinreichend Auskunft geben, wie der über die Aufschnittsöffnung streichende Luftstrom diese Schwingungen erzeugt. Ebenso sind die Töne, welche der Wind bei seinem Durchgang durch Ritze erzeugt, so wie die pfeifenden Töne, die wir mit dem Munde hervorbringen können, noch keineswegs hinreichend erklärt.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

1. Es ist mir angenehm, zur Erklärung dieser Erscheinungen einen kleinen Beitrag liefern zu können. Ich habe mich nämlich schon seit längerer Zeit mit der Untersuchung der Frage beschäftigt, unter welchen Umständen ein aus einer Oeffnung in's Freie tretender Luftstrom tönt oder Töne erzeugt, und habe dabei gefunden, daß Töne unter gewissen Umständen entstehen, welche meines Wissens noch nicht bekannt geworden sind. Die Veranlassung zu meinen Versuchen war die zufällige Beobachtung eines solchen Ton's, welcher bei einer andern Operation entstand. Ich wollte nämlich ein prismatisches Gefäß, in dessen beiden Grundflächen sich durch Schrauben verschließbare Oeffnungen befanden, rasch trocknen und trieb deßhalb mittelst eines doppelten Blasebalgs einen Luftstrom durch dasselbe. Hierbei wurde, wenn der Luftstrom beim Herabsinken des oberen Blasebalgs schwach werdend versiegte, jedesmal ein hoher pfeifender Ton hörbar. Es stellte sich leicht heraus, daß das Gefäß und die darin enthaltene Luft nicht vibrirten, sondern daß der Ton in der untern mit einem Schraubengewinde versehenen Oeffnung, durch welche die Luft einströmte, entstand, wie denn auch andere Schraubenmuttern, die ich, auf einem durchbohrten Kork befestigt, auf das Rohr des Blasetisches setzte, eben solche Töne hören ließen. Diese Töne waren meistens sehr hoch und änderten sich in Beziehung auf ihre Höhe mit dem Luftdruck, entstanden aber nur bei geringem Luftdrucke.

Um diese meines Wissens noch nicht bekannte Erscheinung aufzuklären, suchte ich durch Versuche zu ermitteln, unter welchen Bedingungen beim Ausfließen der Luft aus Oeffnungen von verschiedener Beschaffenheit überhaupt Töne entstehen, wobei ich die Frage über jenen in der Schraubenmutter entstandenen räthselhaften Ton gleichfalls zu lösen hoffte.

Die ersten Resultate meiner Versuche habe ich schon in einer am 14. Oktober 1848 abgehaltenen Sitzung der naturwissenschaftlichen Section der schlesischen Gesellschaft für vaterländische Kultur mitgetheilt, *) die weitere Untersuchung hat sich jedoch, weil meine Zeit durch meine amtliche Beschäftigung und durch einige andere Arbeiten zu sehr in Anspruch genommen war, sehr in die Länge gezogen und kann auch jetzt noch nicht als abgeschlossen angesehen werden. Doch glaube ich mit der Veröffentlichung des bis jetzt Gefundenen nicht länger zögern zu dürfen.

2. Der wichtigste Theil meines Apparates ist ein mit einem doppelten Blasebalg versehener Blasetisch, dessen oberer Blasebalg senkrecht aufsteigt und mittelst einer über Rollen gelegten Schnur und eines Gegengewichtes so erleichtert werden kann, daß die Luft nur mit geringem Drucke ausströmt. Das Windrohr steht senkrecht und ist 1″ weit und ungefähr 1¾′ lang. Anfänglich setzte ich die Oeffnungen, durch welche ich die Luft strömen lassen wollte, mittelst durchbohrter Korkstöpsel unmittelbar auf das Rohr des Blasetisches, später wendete ich, weil die Messung des Luftdruckes nothwendig war, einen hölzernen Hohlcylinder an, welcher durch eine an der Seite angebrachte Oeffnung mit einem Wassermanometer verbunden und außerdem noch mit einer Vorrichtung versehen war, um dem aus der Oeffnung tretenden Luftstrome verschiedene kleine Apparate entgegen-halten zu können. Nachdem ich mich durch die vorläufigen Versuche über die Bedingungen, die ein zu Messungen geeigneter Apparat zu erfüllen hätte, orientirt hatte, ließ ich den in Figur 1 abgebildeten Apparat anfertigen. **AA BB** ist ein Glascylinder von 16,2 Centimeter Höhe und von 6,2 Centimeter Durchmesser, welcher oben und unten mit Messingfassungen versehen ist. Die untere Fassung bildet den Boden des Gefäßes, in dessen Mitte das Messingrohr **cc** so eingelöthet ist, daß es auch nach innen einen halben Zoll vor-

*) Uebersicht der Arbeiten und Veränderungen der Schlesischen Gesellschaft für vaterländische Kultur im Jahre 1848 pag. 41.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

steht, damit das eingegossene Wasser nicht durch das Rohr **cc** ausfließt. In der Bodenplatte ist noch das Manometerrohr **dd** eingekittet. Die obere Fassung ist nur ein offner Messingreif, welcher zur Befestigung des vertikalen Maaßstabes **ff** dient und beledert ist, um verschiedene passende Blechfassungen, welche mit Ausflußöffnungen versehen sind, winddicht aufsetzen zu können. Der Maaßstab **ff** ist mit einem Nonius **gg** versehen, an welchen mittelst einer Klemmschraube **h** die Gegenstände befestigt werden, gegen welche in verschiedener aber bestimmter Entfernung der Luftstrom stoßen soll. Dieser Apparat wird mit dem von außen belederten Rohr **cc** in das Windrohr des Blasetisches eingesetzt und dient zugleich als Luftreservoir, als Träger der Ausflußöffnungen, als Manometer und Distanzmesser. Der vertikale Maaßstab ist in Pariser Linien eingetheilt; sein unterer Theil dient dazu, die Höhe des Wassers in dem Manometerrohre abzulesen. *) An dem obern Theil des Maaßstabes können die Distanzen von der Ausflußöffnung mit Hilfe des Nonius bis auf **0,1** Pariser Linie genau bestimmt werden.

3. Ich fand mit diesem Apparate zunächst, wie sich auch bei den früheren Versuchen entschieden herausgestellt hatte, daß ein durch eine einfache, in einem dünnen Bleche glatt ausgeschnittenen Oeffnung von beliebiger Gestalt und Größe in's Freie tretender Luftstrom keinen Ton erzeugt. Bei einem mäßigen Luftdruck, der einer Wasserhöhe von **1** bis **2** Zoll entspricht, fließt die Luft ganz geräuschlos aus den Oeffnungen und auch bei verstärktem Luftdrucke hört man nur ein Zischen oder Rauschen, in welchem jedoch eine gewisse Tonhöhe obwaltet, die mit dem Luftdrucke zunimmt. Ich bemerke hierbei, daß ich diese Oeffnungen, durch welche die Luft ausströmte, in dünnen Bleiplatten ausschnitt, welche ich auf passende Blechfassungen (**Fig. 2**) kittete und mittelst derselben auf den oben beschriebenen Apparat aufsetzte. Ich konnte daher die Oeffnungen rasch wechseln und die Versuche unter übrigens gleichen Umständen mit verschiedenen Ausflußöffnungen anstellen.

Wenn der ruhig und ungestört ausfließende Luftstrom keinen Ton erzeugt, so kann man ihn doch dadurch zum Tönen bringen, daß man entweder anderweitig erzeugte Schallwellen auf ihn wirken läßt, ihn also zum Mittönen zwingt, oder ihn gegen die scharfen Kanten eines entgegen gehaltenen Körpers stoßen läßt.

Ueber die erste Art der Tonerzeugung kann ich mich, obwohl dieselbe meines Wissens noch nirgends erwähnt oder untersucht ist, kurz fassen, da ich bei derselben nicht grade viele bemerkenswerthe Umstände beobachtet habe, und die Erklärung der Erscheinung keine Schwierigkeiten darbietet. Um die Erscheinung sicher hervorzurufen, lasse ich die Luft durch eine kreisrunde oder rechteckige Oeffnung unter einem bestimmten Drucke von **5** bis **30** Millimeter Wasserhöhe ausströmen und blase in der Nähe der Ausflußöffnung ein kleines Orgelpfeifchen kräftig an. Es tönt dann ein zweiter Ton mit, der in Beziehung auf die Art des Klanges von dem Ton der Pfeife wesentlich verschieden ist, in Beziehung auf die Höhe aber genau mit ihm zusammenhängt. Er ist nämlich in der Regel eine Octave tiefer als der Ton der Pfeife, oft hat er aber auch genau dieselbe Höhe. Im Uebrigen ist er viel schwächer und hat in seinem Charakter etwas Heiseres, welches ihn dem Tone einer Zungenpfeife ähnlicher macht als einem Flötentone. Läßt man die Luft nicht aus der Oeffnung strömen, so gelingt es nicht, die in dem Glascylinder eingeschlossene Luftsäule zum Schwingen und Tönen zu bringen, so kräftig man auch die

---

*) Da im Verlaufe der Versuche eine genauere Ablesung der Wasserhöhe nothwendig wurde, so habe ich einen papiernen, in Millimeter getheilten Maaßstab unter die Röhre geschoben und nach diesem den Luftdruck bestimmt.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Orgelpfeifen anblasen mag; ja es muß sogar die Luft unter einem bestimmten Drucke ausströmen, der von der Höhe der angeblasenen Pfeife abhängt, damit der andere Ton mittönt, und zwar muß die Ausströmungsgeschwindigkeit um so größer sein, je höher der primäre Ton ist. Dazu kommt noch, daß der secundäre Ton beim successiven Anblasen verschiedener Orgelpfeifen, auch wenn der zweckmäßige Luftdruck vorhanden ist, nicht immer gleich gut und kräftig entspricht und deßhalb, um ihn zu erzeugen, die eine Pfeife manchmal in der unmittelbaren Nähe der Ausflußöffnung stark angeblasen werden muß, während man eine andere in der Entfernung von 10 Zoll und darüber halten und mäßig anblasen kann. Man kann sehr leicht den mitklingenden secundären Ton in die höhere Octave übergehen lassen, wenn man den Luftdruck plötzlich verstärkt, so daß er dann mit dem Tone der Pfeife übereinstimmt; dagegen ist es mir nie gelungen, den secundären Ton auch nur einen Moment für sich allein, d. h. nach dem Aufhören des Tons der Pfeife fortdauern zu lassen.

Ich habe diese Versuche mit kreisförmigen und mit viereckigen Ausflußöffnungen von verschiedener Größe angestellt, von denen die ersteren Durchmesser von 4 bis 8 Millimeter, die anderen Seiten von 3 und 15 Millimeter bis 4 und 33 Millimeter Länge hatten; die angewendeten Pfeifen waren kleine zinnerne Orgelpfeifen meist aus der 4mal gestrichenen Octave, doch ist es mir auch gelungen, den secundären Ton durch das Anblasen einer Pfeife zu erhalten, welche gis^2 angab.

Beispielsweise gebe ich eine Versuchsreihe an, bei welcher die Ausflußöffnung einen Durchmesser von 4 Millimeter hatte.

Tabelle I.

Ton der angeblasenen Pfeife.	Wasserhöhe im Manometer in Mm.	Der secundäre Ton.
d^5	20 — 24	d^4
c^5	15 — 20	c^4
h^4	15 — 18	h^3
a^4	14 — 16	a^3
g^4	12 — 15	g^3
f^4	9 — 14	f^3
e^4	7 — 10	e^3
d^4	6 — 8	d^3
c^4	5 — 6	c^3
b^4	3 — 4	b^2

Ich muß in Beziehung auf die in der 2ten Columne angegebene, den Luftdruck bestimmende Höhe der Wassersäule des Manometers bemerken, daß diese Messungen blos als beiläufig anzusehen sind, da es mir oft durch stärkeres Anblasen der einzelnen Orgelpfeifen gelungen ist, über die angegebenen Grenzen des Luftdruckes hinaus, den secundären Ton zu erzeugen, so daß

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

manchmal zwei bis drei aufeinander folgende Töne auch bei demselben Luftdrucke erzeugt wurden. Außerdem ist der zur Erzeugung des secundären Tons erforderliche Luftdruck ein anderer, wenn die Luft aus einer andern Ausflußöffnung ausströmt.

Daß bei diesen Tönen die unter der Ausflußöffnung befindliche, also hier in dem Glascylinder enthaltene Luftsäule nicht auf dieselbe Weise, wie in einer Orgelpfeife, schwingt, geht schon daraus hervor, daß der secundäre Ton dem Tone der angeblasenen Pfeifen durch alle Töne der Octave folgt und läßt sich auch schon aus seinem schwachen, matten Klange schließen, der von dem Tone einer irgendwie in Schwingung versetzten, und entweder im Ganzen oder in aliquote Theile getheilte vibrirenden Luftsäule wesentlich abweicht.

4. Durch einen aus einer Oeffnung in dünner Wand ausfließenden Luftstrom kann, wie ich oben erwähnte, ein Ton erzeugt werden, wenn er gegen eine entgegen gehaltene Schneide oder Spitze stößt. Die Physiker mögen solche Töne schon oft bemerkt haben, denn bei der Anwendung des Löthrohrs und besonders beim Glasblasen sind gar oft die Umstände vorhanden, die zur Erzeugung derselben erforderlich sind, aber die Schwäche und, ich möchte sagen, die Unansehnlichkeit, mit welcher sie hier gewöhnlich auftreten, ist offenbar Ursache gewesen, daß man sie noch keiner besonderen Berücksichtigung gewürdigt hat. Läßt man aber den aus der Oeffnung tretenden Luftstrom unter günstigen Umständen auf Kanten stoßen, hält man über die Ausflußöffnung, z. B. ein Blech, in welchem ein Loch von derselben Größe und Gestalt ausgeschnitten ist, so entstehen bei ziemlich mäßigem Luftdrucke laute und deutliche Töne, die man beliebig oft reproduciren kann, wenn man den Luftstrom unter denselben Umständen durch die Oeffnung streichen läßt. Um sich blos von der Existenz dieser Töne zu überzeugen, braucht man gar keinen complicirten Apparat. Man durchbohrt einen Kork, kittet darauf eine kleine Blechscheibe, welche in ihrer Mitte ein kleines Loch enthält, hält ein zweites ebensolches Blechscheibchen darüber und treibt mit dem Blasebalg, oder wenn man keinen solchen besitzt, mit dem Munde einen schwachen Luftstrom hindurch. Solche Töne entstehen auch, wenn man, ohne zu pfeifen, mit dem Munde ganz schwach gegen die Schneide eines Messers bläst.

Ich habe, um diese Töne zu studiren, eine große Anzahl von Versuchen unter den mannigfaltigsten Abänderungen der zur Entstehung derselben erforderlichen Umstände angestellt. Ich kittete die Platten von dünnem Bleiblech, in welchen Oeffnungen von verschiedener Größe und Gestalt ausgeschnitten waren, auf Blechfassungen (**Fig. 2**,) welche auf den belederten Mesingring **bb** des Cylinders (**Fig. 1**,) winddicht aufgesetzt wurden. Hierauf wurde der Blasebalg in Thätigkeit gesetzt und der aus der Ausflußöffnung tretende Luftstrom beobachtet. Da die Ausflußöffnungen immer viel kleiner waren als der Querschnitt des Zuflußrohres **cc**, so blieb der als Luftreservoir dienende Glascylinder immer mit Luft von einer bestimmten Spannung gefüllt, welche von der Belastung des oberen senkrecht aufsteigenden Blasebalgs abhing und an der Wasserhöhe in dem Manometerrohre **dd** abgelesen werden konnte. Der Luftdruck war leider, wie das Manometer zeigte, nicht constant, sondern nahm beim Sinken des oberen Blasebalgs ab und stieg ruckweise, wenn durch die Arbeit des untern Balges neue Luftmassen nach oben getrieben wurden; doch habe ich diesen nicht zu beseitigenden Uebelstand durch sorgfältige und rasche Beobachtung des Manometers so wie durch oftmalige Wiederholung der einzelnen Versuche nach Kräften unschädlich zu machen gesucht. Die Bleche, gegen welche ich den Luftstrom stoßen lassen wollte, befestigte ich mittelst der Klemmschraube **h** an dem auf dem Maaßstabe **ff** verschiebbaren Nonius **gg**. Durch diese Einrichtung wurde es nicht blos möglich, diese Bleche in die gehörige Lage und Entfernung zur Ausflußöffnung zu bringen und in derselben sicher fest zu hal-

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

ten, sondern ich konnte auch die Entfernung derselben messen, indem ich zuerst die Stellung des Nonius am Maaßstabe ablas, wenn jene Bleche die Platte mit der Ausflußöffnung berührten, und diese abgelesene Höhe von der Höhe des Nonius in den einzelnen Versuchen abzog. Die Apparate, gegen welche ich den Luftstrom stoßen ließ, waren theils kreisförmige mit einem Stiel versehene Bleiplatten von ungefähr einem Zoll Durchmesser, in welche die verschiedenen Oeffnungen eingeschnitten waren, wie (**Fig.** 4, 5, und 6) darstellen, theils schmale Blechstreifen oder auch kleine kreisförmige Blechscheibchen, welche mittelst eines dünnen Biegels aus Blei an dem Nonius befestigt wurden, wie in (**Fig.** 7) dargestellt ist.

5. Ich theile zunächst einige Bemerkungen mit, welche sich auf die Entstehungen der Töne im Allgemeinen beziehen. Die Gestalt und Größe der Ausflußöffnung und der Oeffnung in der darüber gehaltenen Platte, gegen deren Ränder der Luftstrom stößt, sind innerhalb der Grenzen meiner Versuche für die Entstehung der Töne gleichgültig, doch ist dann sowohl ihre Stärke als ihre Höhe verschieden, und man muß, um die Töne zu erzeugen, die Platte in eine andere Entfernung einstellen und einen anderen Luftdruck anwenden. Am besten tönt der Apparat, wenn die in der oberen Platte ausgeschnittene Oeffnung der Ausflußöffnung gleich oder nur wenig größer ist. Ich habe bei meinen Versuchen fast immer dünne Blechplatten angewendet und überdieß noch die Ränder der Oeffnungen von der einen Seite zugeschärft, aber die besprochenen Töne entstehen auch, wenn die Ausflußöffnung oder die Oeffnung in der obern Platte, oder auch beide Oeffnungen in Blechen von einigen Millimeter Dicke angebracht sind; es können sogar die scharfen Ränder der Oeffnungen von einer oder auch an beiden Seiten abgerundet werden. Die Substanz der Platten ist ebenfalls gleichgültig und man kann statt des Metallbleches auch dünne Scheiben von Holz oder Kork, ja sogar von Papier anwenden. Man kann ferner auch die obere Platte so verkleinern, daß sie nur noch einen schmalen, die Oeffnung einschließenden Reif (**Fig.** 8) vorstellt, oder man kann auch den Luftstrom gegen ein kleines Scheibchen stoßen lassen, welches ungefähr eben so groß ist (**Fig.** 7), als die Ausflußöffnung und erhält immer noch dieselben Töne, wenn auch weniger klangvoll. Endlich kann man statt der Platte dem Luftstrome auch das offene Ende einer Röhre entgegenhalten, deren Querschnitt ungefähr gleich der Ausflußöffnung ist, wobei sehr oft auch die in der Röhre enthaltene Luftsäule in Schwingung geräth und ein verstärkter Ton entsteht.

Ich bemerke hier noch, daß man die Platte, welche die Ausflußöffnung enthält, mit der darüber zu haltenden Platte fest verbinden kann, indem man ein kurzes Blechrohr zwischen dieselben löthet. Man kann dieß auch so ausführen, daß man auf die Platte mit der Ausflußöffnung einen niedrigen Korkring legt und auf denselben die obere Platte so legt, daß ihre Oeffnung sich senkrecht über der Ausflußöffnung befindet. Hierdurch wird ein Luftvolumen zwischen beiden Platten abgegränzt und es hat der Apparat nun im Wesentlichen dieselbe Construction wie das kleine Instrument, welches unter dem Namen Jägerruf oder Vogelruf bekannt ist, und welches die Jäger benützen, um die Stimmen der Vögel nachzuahmen. Obgleich sich schon mehrere Physiker mit diesem Instrumente beschäftigt haben, so ist die Eigenthümlichkeit der mit demselben erzeugten Töne noch nicht erkannt worden, denn sie dürfen weder zu den Tönen der Labial- noch der Zungenpfeifen gerechnet werden, sondern gehören ohne Zweifel zu den hier betrachteten Tönen.

Die unter den angegebenen Umständen entstehenden Töne sind in Beziehung auf Stärke, Höhe und Eigenthümlichkeit des Klanges verschieden und ändern sich, wenn in der Einrichtung des Apparates eine Aenderung vorgenommen wird. Die Intensivität der Töne ist im Allge-

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

meinen größer, wenn der Luftstrom mit größerer Geschwindigkeit austritt, jedoch treten oft einzelne Töne besonders schön und klangvoll unter den übrigen hervor, ohne daß ein äußerer begünstigender Umstand zu bemerken ist. Die Töne sind meistens sehr hoch und liegen größtentheils in den Octaven, welche man die drei, vier und fünfgestrichenen nennt. Doch entstehen unter später anzugebenden Umständen auch tiefere Töne, welche aber meistens schwach und klanglos sind.

Die Höhe der Töne hängt von der Größe der Ausflußöffnung, von dem Luftdrucke und dem Abstand der von dem Luftstrom gestoßenen Kanten ab, und zwar sind die Töne im Allgemeinen höher, 1) wenn man eine kleinere Ausflußöffnung anwendet, 2) wenn die gestoßene Platte der Ausflußöffnung genähert wird und 3) wenn die Geschwindigkeit des Luftstromes durch Anwendung eines größeren Druckes vergrößert wird; jedoch ändert sich die Höhe der Töne nicht kontinuirlich in demselben Sinne, sondern die Töne springen, nachdem sie bei abnehmendem Luftdruck oder bei der allmähligen Entfernung der beweglichen Platte von der Ausflußöffnung successive tiefer geworden sind, plötzlich wieder in einen höhern Ton über, der dann wieder allmählich tiefer wird. Diese Erscheinung wiederholt sich zwei bis dreimal und findet auch in der umgekehrten Weise statt, wenn man durch Annäherung der beweglichen Platte oder durch Steigerung des Luftdruckes den Ton höher werden läßt. Manchmal findet die Erhöhung oder Vertiefung des Tones so allmählig statt, daß man die einzelnen Töne nicht von einander unterscheiden kann, in anderen Fällen aber, wo die beiden Oeffnungen eine andere Stellung oder ein anderes Verhältniß zu einander haben, sind die aufeinanderfolgenden Töne scharf von einander getrennt. In Beziehung auf die Eigenthümlichkeit des Klanges oder den Charakter sind, wie schon bemerkt worden ist, die von mir beobachteten Töne verschieden, denn wenn auch die meisten den Tönen der kleinen Labialpfeifen ähnlich sind, so zeigen sie doch in Beziehung auf Helligkeit und Intensivität eine große Verschiedenheit, und außerdem treten oft mitten unter Pfeifentönen auch eigenthümliche schnarrend und scharf klingende Töne auf, die eher den Tönen der Zungenpfeifen zu vergleichen sind.

6. Bevor ich zu der speziellen Betrachtung der bei dieser Tonerzeugung obwaltenden Umstände übergehe, theile ich eine Reihe von Versuchen mit, die ich mit dem beschriebenen Apparate angestellt habe. Die Ausflußöffnung war eben so wie die Oeffnung der an dem verschiebbaren Nonius des Maaßstabes befestigten Bleiplatte kreisrund und beide hatten einen Durchmesser von 4 Millimetern. Ich stellte die obere Platte, so weit es aus freier Hand geht, genau so ein, daß ihre Oeffnung senkrecht über die Ausflußöffnung zu stehen kam, vergrößerte allmählig den Abstand der beweglichen Platte von der Ausflußöffnung, las die Stellung des Nonius am Maaßstabe ab und bestimmte mittelst eines Monochords die Höhe der durch den Luftstrom erzeugten Töne, wobei das Manometer fortwährend beobachtet wurde, um den zu dem Versuche erforderlichen Luftdruck zu erzeugen und zu erhalten. Die Bestimmung der Tonhöhe hat mir große Schwierigkeiten gemacht, weil die Töne theils in Beziehung auf Intensivität und Eigenthümlichkeit des Klanges ungleich sind, theils weil sie schon bei einer geringen Zu- oder Abnahme des Luftdruckes sich ändern. Besonders schwierig war oft die Entscheidung, in welche Octave einzelne Töne gehörten. In der folgenden Tabelle ist in der ersten Columne die Entfernung der obern beweglichen Platte von der Ausflußöffnung in Millimetern angegeben. Da der vertikale Maaßstab in Pariser Linien eingetheilt war und ich an demselben mit Hilfe des Nonius nur Zehntel-Linien ablesen konnte, so sind die angebenen Zehntheil-Millimeter natürlich nur annähernd

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

richtig. Die zweite Columne enthält die am Manometer abgelesene Wasserhöhe in Millimetern, wobei zu merken ist, daß die hier angegebene Decimalstelle das Resultat der Schätzung ist. In der dritten Spalte habe ich die beobachteten Töne angegeben und in der 4ten die denselben angehörenden Schwingungszahlen nach der gleichschwebenden Temperatur beigefügt, und bemerke ausdrücklich, daß ich dieselben blos als Näherungswerthe betrachte, da ich bei der Bestimmung der Tonhöhe auf die Berücksichtigung der Verschiedenheit des Tones innerhalb einer kleinen Sekunde verzichtet und der jedesmaligen Bestimmung der Schwingungszahl die Angabe des zunächstliegenden musikalischen Tones vorgezogen habe.

Tabelle II.

Abstand. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachteter Ton.	Schwingungszahl.	Abstand. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachteter Ton.	Schwingungszahl.
1,1	60—70	cis^{6} (?)	17358	2,9	9	f^{4}	5467
1,3	33—35	dis^{5}	9742		10	fis^{4}	5793
	52—55	g^{5}	12274		11	g^{4}	6137
1,5	21	c^{5}	8192		12.2	a^{4}	6889
	34	e^{5}	10321		15	f^{5}	10935
1,8	24	a^{5}	13777		21	a^{4} u. a^{3}	6889
	35	e^{5}	20642		35	c^{5} u. c^{4}	8192
2,2	11—15	a^{4}	6889		51	c^{6}	16384
	12—25	c^{5}	8192	3,4	2,2	cis^{3}	2170
2,5	10	fis^{4}	5793		5,2	a^{3}	3444
	10,5	g^{4}	6137		6	h^{3}	3866
	11	gis^{4}	6502		7	c^{4}	4096
	12—13	a^{4}	6889		7,5	cis^{4}	4339
	14	b^{4}	7298		10	e^{4}	5161
	14,6	h^{4}	7732		11	fis^{4}	5793
	15	a^{4}	6889		25—27	gis^{4}	6502
	20	a^{4}	6889		28	a^{4}	6889
	22	b^{4}	7298		35—38	gis^{4}	6502
	28	c^{5}	8192		55	d^{4}	4598
	38—39	d^{5}	9195	4,0	2,5—2,7	cis^{5}	2170
	43	dis^{5}	9742		3	d^{3}	2299
	50	f^{5}	10935		3,5	dis^{3}	2435
2,9	6,8	c^{4}	4096		4	e^{3}	2580
	7	cis^{4}	4339		5	fis^{3}	2896
	8	dis^{4}	4871		6,5	gis^{3}	3251

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Abstand. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachteter Ton.	Schwingungszahl.
4,0	7	a^3	3444
	13	c^4	4096
	14	cis^4	4339
	38	a^4	6889
	46	h^4	7732
	57	cis^5	8679
	65	d^5	9195
4,5	2,8—3,5	cis^3	2170
	3,8— 4	dis^3	2435
	4,5	e^3	2580
	6	g^3	3068
	7	gis^3	3251
	8	f^3	2734
	10	a^3	3444
	15	c^4	4096
	18	cis^4	4339
5,2	3,5—4	cis^3	2170
	7	f^3	2734
	10	fis^3	2896
	14	a^3	3444
	15	b^3	3649
	20	c^4	4096
5,6	2,5	cis^3	2170
	3	d^3	2299
	4	fis^3	2896
	4,5	dis^3	2935
	5	cis^3	2170
	9—10	e^3	2580
	15	g^3	3068
6,8	2,2	b^2	1824
	2,5	h^2	1933
	2,8	cis^3	2170
	3—3,5	d^3	2299
	4	e^3	2580
	5	fis^3	2896
	6	g^3	3068
	10	dis^4	4871

Abstand. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachteter Ton.	Schwingungszahl.
6,8	12—15	e^4	5160
7,9	1,5	gis^2	1625
	1,8	a^2	1722
	2	b^2	1824
	2,5	h^2	1933
	3,1	cis^3	2170
	4	d^3	2299
	4,5	dis^3	2435
	5	e^3	2580
	6	gis^3	3251
	7	a^3	3444
	8	b^3 u. b^2	3649
	9	h^3 u. h^2	3866
	10	h^3	3866
	11	c^4	4096
	12	cis^4	4339
	13	d^4	4598
	15	dis^4	4871
9,0	1	fis^2	1448
	2	gis^2	1625
	2,5	b^2	1824
	3	h^2	1933
	3,5—4	cis^3	2170
	4,5	e^3	2580
	5	fis^3	2896
	6	g^3	3068
	7	gis^3	3251
	8	a^3	3444
	15	cis^4	4339
10,1	1—4	schwache Töne.	
	4	cis^3	2170
	5	d^3	2299
	6	e^3	2580
	7	f^3	2734
11,3	1—4,5	schwache Töne.	
	4,5	e^3	2580
	5	cis^2	1085

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Abstand. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachteter Ton.	Schwingungszahl.	Abstand. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachteter Ton.	Schwingungszahl.
11,3	6	gis²	1625	15,8	1—5	schw. Töne	
	6,5	d²	1149		5	gis²	1625
12,4	1—4,5	schw. Töne		16,9	1—5,5	schw. Töne	
	4,5	dis³	2435		5,5	g² schwach	1534
	5	e³	2580	18,0	1—4	schw. Töne	
14,6	1—4	schw. Töne			4	cis² schw.	1085
	4	d³	2299	bis 27,0	1—4	schw. Töne	
	5	e³	2580				

Aus der in der vorstehenden Tabelle enthaltenen Reihe von Versuchen ist zu ersehen, daß sowohl die Distanz der beweglichen Platte von der Ausflußöffnung als auch der Druck, unter welchem die Luft ausströmt, ziemlich bedeutend geändert werden kann, indem die beobachteten Töne entstanden sind bei einer Distanzänderung von 1 Millimeter bis 18 Millimetern und bei einer Verschiedenheit des Luftdruckes, welche der Höhe der Wassersäule in dem Manometer von 1 bis 70 Millimeter entspricht. Zu jedem einzelnen Abstande der Platte gehört innerhalb gewisser Gränzen ein angemessener Luftdruck, bei welchem die Töne entstehen, und zwar ist, wenn die Entfernung der obern Platte klein ist, ein stärkerer Luftdruck zur Erzeugung der Töne erforderlich; muß dagegen der Luftstrom bis zu den Rändern der obern Oeffnung einen längern Weg zurücklegen, so entstehen die Töne nur bei geringerem Luftdrucke. Ist der Luftdruck zu schwach, so bleibt der Apparat lautlos, ist der Luftdruck aber zu stark, so hört man wohl ein Rauschen, Schwirren oder Kreischen, aber es kommt nicht zur Bildung eines Tones von bestimmter Höhe. Ein solches Rauschen oder Schwirren entsteht aber auch nicht selten innerhalb der Grenzen des Luftdruckes, bei welchem musikalische Töne erzeugt werden, bevor der durch allmählige Steigerung oder Verringerung sich ändernde Luftdruck zur Bildung des nächstfolgenden Tones geeignet geworden ist.

Rückt man die bewegliche Platte so nahe an die Ausflußöffnung, daß ihre Entfernung weniger als ein Millimeter beträgt, so entsteht kein Ton, entfernt man sie aber weiter als 18 Millimeter von derselben, so werden die Töne so schwach, daß man sie nicht mehr deutlich erkennen kann und nur bei hinreichender Stille noch hört, wenn man das Ohr dem Apparate nahe bringt. Bei den diesen beiden Grenzen zunächst stehenden Distanzen der beweglichen Platte entstehen auch nur wenige Töne, wogegen eine Menge von Tönen durch Anwendung von verschiedenem Luftdrucke erzeugt wird, wenn jene Distanz zwischen 2,5 und 9 Millimeter groß ist. Von diesen bei einer und derselben Distanz bei verschiedenem Luftdruck entstehenden Tönen sprechen einige immer besonders leicht und lange an, andere sprechen nur schwer an und können bei dem sich ändernden Luftdruck manchmal gar nicht hervortreten und leicht unbemerkt bleiben, weßhalb wohl möglich ist, daß einzelne solcher Töne in der einen Beobachtungsreihe bemerkt worden, in der andern dagegen ausgefallen sind. Vergleicht man die aufeinanderfolgenden mit successive vergrößerter Distanz der Platte angestellten Versuchsreihen mit einander, so bemerkt man, daß einige Töne sich immer wieder finden, daß jedoch die dem größeren Luft-

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

druck entsprechenden höhern Töne allmählig wegfallen und dafür tiefere bei geringerem Luftdrucke eintreten. Außerdem ist zu beachten, daß zur Erzeugung derselben Töne bei größerer Distanz der obern Platte ein größerer Luftdruck erforderlich ist, woraus folgt, daß die Entfernung der Platte und die Geschwindigkeit des Luftstromes einen entgegengesetzten Einfluß auf die Höhe des Tones ausüben.

7. Von großer Wichtigkeit schien es mir, die Abhängigkeit der Tonhöhe von dem Luftdruck und der Plattendistanz zu bestimmen, doch war es mir lange Zeit nicht möglich zu einem Resultate zu gelangen, da zwischen den aufeinanderfolgenden, durch allmählige Vergrößerung des Luftdruckes oder der Plattendistanz erzeugten, successiv höhern oder tiefern Tönen immer wieder Töne entstanden, welche außer der Reihe lagen und sich keinem Gesetze fügen wollten. Endlich überzeugte ich mich, daß die Schwingunszahl von zwei zusammen gehörenden, ich möchte sagen, in dasselbe Register der Tonbildung gehörenden Tönen im graden Verhältnisse zur Quadratwurzel aus der Wasserhöhe im Manometer und im umgekehrten Verhältnisse zu dem Abstande der vom Luftstrome gestoßenen Platte steht. Da die Geswindigkeit des ausfließenden Luftstromes der Quadratwurzel aus dem vom Manometer angegebenen Drucke proportionirt ist, **so steht mithin die Schwingungszahl des erzeugten Tones im graden Verhältnisse zur Geschwindigkeit des Luftstromes und im umgekehrten Verhältnisse zum Abstande der obern Platte.**

Ein großer Theil der in der vorangehenden Tabelle enthaltenen Beobachtungen stimmt mit diesem Gesetze so gut überein, als sich mit Rücksicht auf die Beobachtungsfehler nur ewarten läßt. Ueber die Schwierigkeit, die hohen und sich rasch ändernden Töne genau zu bestimmen, habe ich mich schon oben ausgesprochen, und bemerke hier noch, daß auch die Angabe des den einzelnen Tönen entsprechenden Luftdruckes durch die Höhe der Wassersäule im Manometerrohre nicht immer genau sein mag, denn zunächst ist das Manometer noch verhältnißmäßig zu wenig empfindlich und außerdem dauern manche Töne, wenn sie erst entstanden sind, auch bei einem nicht unbedeutend veränderten Luftdrucke fort, während andere nur bei einem bestimmten Luftdrucke erhalten werden können. Daher war auch der beobachtete Luftdruck bei Erzeugung derselben Töne nicht selten etwas verschieden, je nachdem durch allmählige Vermehrung oder Verminderung des Druckes die aufeinander folgenden Töne erzeugt wurden. Es war überdieß nicht leicht, mittelst des auf den obern Theil des doppelten Blasebalges ausgeübten Druckes einen bestimmten gleichmäßigen Luftdruck zu erzeugen und zugleich mit der Tonhöhe zu bestimmen. Wenn ich mich daher auch bemüht habe, durch sorgfältige Beobachtung größere Fehler möglichst zu vermeiden, so möchte ich doch nicht behaupten, daß es mir möglich gewesen ist, die theils in der Natur der Erscheinung liegenden, theils aus der Einrichtung der Apparate hervorgegangenen Schwierigkeiten gänzlich zu überwinden.

Ich habe außer einer größern Anzahl von Beobachtungsreihen, welche der oben mitgetheilten ganz ähnlich sind, auch noch andere Versuche angestellt, um das Gesetz über die Abhängigkeit des Tones von dem Luftdrucke und der Plattendistanz theils zu ermitteln, theils zu bestättigen. Um den Einfluß des Luftdruckes für sich zu bestimmen, ließ ich den Abstand der obern Platte ungeändert und suchte durch rasche Veränderung des Luftdruckes nach einander zwei Töne zu erzeugen, welche mit einander ein bestimmtes Intervall, z. B. Terz, Quart, Quinte, Octave bilden, und beobachtete, während ich den erforderlichen Druck mit der Hand auf den obern Blasebalg ausübte, das Manometer. Es stellte sich hierbei heraus, daß in den meisten Fällen die Quadratwurzel aus dem Verhältnisse der beiden Wasserhöhen im Manometer dem Schwingungs-

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

verhältnisse des beobachteten Intervalls der Töne sehr nahe kam. Schwieriger war es, bei constant erhaltenem Luftdrucke durch Verschiebung der an dem Nonius befestigten beweglichen Platte rasch nacheinander zwei um ein bestimmtes Intervall von einander entfernte Töne zu erhalten, doch zeigte sich auch hier, daß die Schwingungszahl des Tones dem Abstand der obern Platte von der Ausflußöffnung umgekehrt proportionirt ist, denn das Schwingungsverhältniß des Intervalls von zwei Tönen war meistens gleich dem Quotienten der beiden Plattendistanzen.

8. Um die Veränderung, welche die successive Vergrößerung der Plattendistanz unter übrigens gleichen Umständen in dem durch den Luftdruck erzeugten Tone verursacht, speziell anzugeben, theile ich noch zwei Versuchsreihen mit, welche ich mit demselben Apparate und derselben Ausflußöffnung und beweglichen Platte wie oben in der Weise angestellt habe, daß der Luftdruck immer möglichst constant erhalten wurde und das eine Mal einer Wassersäule von 5 Mm. das andere Mal von 12 Millimetern entsprach. In der ersten Columne ist die successive, in der Regel um 0,1 Pariser Linie vermehrte Plattendistanz auf Millimeter reducirt, angegeben. In der zweiten Columne habe ich, um Raum zu sparen, mit Weglassung der Schwingungszahlen, bloß die musikalischen Zeichen für die beobachteten Töne beigesetzt.

Tabelle III.
Luftdruck = 5 Mm. Wasserhöhe
Radius der Oeffnungen = 4 Mllm.

Mm.	Ton.	Mm.	Ton.
3,4	g^3	8,3	f^{3}_{-}
3,6	g^3	8,6	e^{3}_{+}
3,8	g^3	8,8	e^3
4,1	f^3	9,0	e^{3}_{-}
4,3	f^3 u. cis^4	9,2	e^{3}_{-}
4,5	c^{4}_{-}	9,5	dis^3
4,7	h^3	9,7	dis^3
5,0	b^3	9,9	d^{3}_{+}
5,2	b^3	10,1	d^{3}_{-}
5,4	a^{3}_{+}	10,4	cis^3
5,6	a^3	10,6	cis^2
5,9	a^{3}_{-}	10,8	c^3
6,1	gis^{3}_{+}	11,0	c^3
6,3	gis^3	11,3	c^3
6,5	g^3	11,5	h^2
6,8	g^3	11,7	e^3
7,0	g^3	11,9	e^3 u. e^4
7,2	fis^{3}_{+}	12,2	e^3
7,4	fis^3	12,6	e^{3}_{-}
7,7	fis^{3}_{-}	13,1	dis^3
7,9	f^3	14,2	d^3
8,1	f^3	14,9	cis^3

Tabelle IV.
Luftdruck = 12 Mm. Wasserhöhe
Radius der Oeffnungen = 4 Mllm.

Mm.	Ton.	Mm.	Ton.
2,3	b^4	7,4	d^4
2,5	gis^4	7,7	d^{4}_{-}
2,7	a^4	7,9	cis^{4}_{+}
2,9	g^4	8,1	cis^{4}_{-}
3,1	fis^4		
3,4	e^4 u. cis^4		
3,8	c^{4}_{+}		
4,1	c^4		
4,3	c^{4}_{-}		
4,5	h^3		
4,7	b^3		
5,0	a^3		
5,2	gis^{3}_{-}		
5,4	g^3		
5,6	fis^{3}_{+}		
5,9	f^3		
6,1	f^3		
6,3	e^{3}_{+}		
6,5	e^3 u. e^4		
6,8	e^4		
7,0	dis^{4}_{+}		
7,2	dis^{4}_{-}		

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Aus diesen beiden Tabellen ist zunächst zu ersehen, wie der Ton allmählig tiefer wird, wenn der Abstand der Platte, gegen welche der Luftstrom stößt, zunimmt, wie aber bei gewissen Distanzen der Ton plötzlich einen Sprung macht, hierauf aber wieder in derselben Weise wie vorher tiefer wird; so geht z. B. in der Tabelle **III.** bei einer Plattendistanz von 4,3 Millimeter der Ton von f^3 in cis^4, bei 11,5 bis 11,7 Millimeter von h^2 in e^3 über; desgleichen in Tabelle **IV.** bei der Dinstanz 3,4 Millimeter von e^4 in cis^4. Vergleicht man ferner das Schwingungsverhältniß von zwei Tönen, zwischen welchen kein solcher Sprung vorkommt, mit dem Verhältniß ihrer Plattendistanzen, so sieht man, daß beide Zahlen in einigen Fällen übereinstimmen, oft einander ziemlich nahe kommen. Aus der Tabelle **III.** ergeben sich Verhältnisse der Plattendistanzen, welche meistens größer als die Schwingungsverhältnisse der Intervalle sind, dagegen stimmen die sich aus Tabelle **IV.** ergebenden Werthe viel besser überein. Um diese Vergleichung zu erleichtern, stelle ich in der folgenden Tabelle **V.** für die in den letzten beiden Beobachtungsreihen enthaltenen Intervalle die Vergleichung an. In der 1sten Columne ist das Intervall der verglichenen Töne, in der 2ten das Schwingungsverhältniß desselben nach der gleichschwebenden Temperatur, in der 3ten die verglichenen Töne selbst, in der 4ten die denselben entsprechenden Plattendistanzen, und in der 5ten deren Quotient angegeben. Da die 0,1 Millimeter in den beobachteten Plattendistanzen nicht einmal ganz genau sind, so habe ich die Quotienten derselben bloß bis zur 2ten Decimalstelle ausgerechnet, und das Schwingungsverhältniß in der 2ten Columne auch blos die auf 2 Decimalstellen genau angegeben. In der ersten Abtheilung der Tabelle **Va** sind die in Tabelle **III**, in der 2ten Abtheilung **Vb** die in Tabelle **V.** enthaltenen Beobachtungen verglichen.

Tabelle V a.

Intervalle der verglichenen Töne.	Schwingungsverhältniß.	Beobachtete Töne.	Abstand der Platten.	Verhältniß der Abstände.
Kleine Sekunde.	1,06	$b^3 : h^3$	5,0 : 4,7	1,06
		$g^3 : gis^3$	6,8 : 6,3	1,08
Große Sekunde.	1,12	$f^3 : g^3$	4,1 : 3,6	1,14
		$a^3 : h^3$	5,6 : 4,7	1,19
		$g^3 : a^3$	6,8 : 5,6	1,21
		$cis^3 : dis^3$	14,9 : 13,1	1,14
Kleine Terz.	1,19	$a^3 : c^4$	5,6 : 4,5	1,24
		$g^3 : b^3$	6,8 : 5,2	1,31
Große Terz.	1,26	$g^3 : h^3$	6,8 : 4,7	1,44
		$c^3 : e^3$	11,0 : 8,8	1,25
Reine Quart.	1,33	$fis^3 : h^3$	7,4 : 4,7	1,57
		$f^3 : b^3$	7,9 : 5,2	1,52
		$e^3 : a^3$	8,8 , 5,6	1,57

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Intervalle der verglichenen Töne.	Schwingungsverhältniß.	Beobachtete Töne.	Abstand der Platten.	Verhältniß der Abstände.
Reine Quint.	1,50	$e^3 : h^3$	8,8 : 4,7	1,87
		$d^3 : a^3$	9,9 : 5,6	1,76
		$h^2 : fis^3$	11,5 : 7,4	1,55
Große Sext.	1,68	$es^3 : c^4$	9,7 : 4,5	2,15
		$d^3 : h^3$	9,9 : 4,7	2,11
Große Septime.	1,89	$des^3 : c^4$	10,4 : 4,5	2,31
		$c^3 : h^3$	11,0 : 4,7	2,34
		$h^2 : ais^3$	11,5 : 5,2	2,21
Octave.	2,00	$c^3 : c^4$	11,0 : 4,5	2,44
		$h^2 : h^3$	11,5 : 4,7	2,44

Tabelle V b.

Intervalle der Töne.	Schwingungsverhältniß.	Beobachtete Töne.	Abstand der Platten.	Verhältniß der Abstände.
Kleine Sekunde.	1,06	$fis^4 : g^4$	3,1 : 2,9	1,07
Große Sekunde.	1,12	$b^3 : c^4$	4,7 : 4,1	1,14
		$a^3 : h^3$	5,0 : 4,5	1,11
		$f^3 : g^3$	6,1 : 5,4	1,13
		$d^4 : e^4$	7,4 : 6,8	1,09
Kleine Terz.	1,19	$a^4 : c^4$	5,0 : 4,1	1,22
		$g^3 : b^3$	5,4 : 4,7	1,15
Große Terz.	1,26	$g^3 : h^3$	5,4 : 4,5	1,20
		$f^3 : a^3$	6,1 : 5,0	1,22
Reine Quart.	1,33	$g^3 : c^4$	5,4 : 4,1	1,32
		$f^3 : h^3$	6,1 : 4,5	1,33
Reine Quint.	1,50	$f^3 : c^4$	6,1 : 4,1	1,50
		$e^3 : h^3$	6,5 : 4,5	1,44
Kleine Sept.	1,59	$e^3 : c^4$	6,5 : 4,1	1,59

9. Außer dem Luftdruck, unter welchem der Luftstrom ausfließt, und der Distanz der gestoßenen Platte hat noch die Größe und die Gestalt der Ausflußöffnung Einfluß auf die Höhe

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

des Tones. Daß, wenn die Ausflußöffnung ebenso wie die Oeffnung in der beweglichen Platte, gegen deren Ränder der Luftstrom stößt, größer ist, tiefere Töne entstehen, ist unverkennbar, doch bin ich bis jetzt über die Abhängigkeit der Tonhöhe von der Größe und Gestalt jener Oeffnungen noch zu keinem bestimmten Resultate gelangt; es scheint mir aber nach den bis jetzt angestellten Versuchen, daß der Einfluß der Größe und Gestalt der Oeffnungen nur ein secundärer ist, da ich mit verschiedenen Oeffnungen unter übrigens gleichen Umständen auch dieselben Töne erhalten habe. Wenn die Ausflußöffnung größer ist, so nimmt, wie später ausführlicher angegeben werden wird, die unterhalb der Oeffnung befindliche Luft leichter und entschiedener an den Schwingungen Theil, und dadurch entstehen tiefere Töne.

10. Indem ich nun zur nähern Betrachtung der Entstehung der besprochenen Töne übergehe, ist zunächst zu untersuchen, welcher Körper schwingt und dadurch die Töne erzeugt. Daß die Töne nicht durch die Vibration der obern Platten, gegen welche der Luftstrom stößt, entstehen, darf als entschieden angesehn werden; denn abgesehen davon, daß diese Platten aus einem unelastischen Körper, nämlich aus Blei gefertigt sind, und daß man dieselben mit den Fingern festhalten kann, ohne die Entstehung und Fortdauer des Tones zu hindern, ist auch die Höhe des Tones von der Größe und dem Gewichte der Platten gänzlich unabhängig, so wie es auch gleichgültig ist, aus welcher Substanz die Platten angefertigt sind. Ein so schwacher Luftstrom, als in den meisten Fällen angewendet wurde und zur Erzeugung der Töne erforderlich ist, dürfte erfahrungsgemäß auch gar nicht im Stande sein, eine von den angewendeten Platten, auch wenn sie elastisch wäre, wie die Zunge einer Orgelpfeife, in Vibration zu versetzen. Wenn demnach nur die Annahme übrig bleibt, daß die Luft selbst der tönende Körper ist, so ist es doch nicht möglich, ein durch eine feste Hülle begrenztes Luftvolumen nachzuweisen, welches durch den Luftstrom, ähnlich wie die Luftsäule in einer Labialpfeife, in stehende Schwingungen versetzt würde.

Die zwischen der Deckelplatte, welche die Ausflußöffnung enthält, und der obern beweglichen Platte befindliche Luft kann füglich nicht als ein begrenztes Luftvolumen angesehn werden, welches stehende Schwingungen annimmt. Hierfür spricht zunächst der Umstand, daß die Höhe des Tones nur von dem Luftdruck und der Plattendistanz, aber nicht von der Größe und Gestalt der Platten abhängt, und daß der Ton ungeändert bleibt, wenn man die zwischen den Platten liegende Luftschicht dadurch partiell begränzt, daß man den Finger oder einen gebogenen Blechstreif von der einen Seite nähert. *) Der Ton entsteht aber auch unter Umständen, bei welchen von einem begrenzten Luftvolumen oberhalb der Ausflußöffnung gar nicht die Rede sein kann, z. B. wenn man den Luftstrom gegen eine kleine runde Scheibe von der Größe der Ausflußöffnung, (**Fig. 7**) oder gegen eine aus dünnem Draht zusammengebogene Oese von derselben Größe stoßen läßt (**Fig. 8**). Ueberdieß ist mir auch keine Beobachtung bekannt geworden, durch welche dargethan worden wäre, daß eine zwischen zwei Ebenen befindliche Luftschicht durch Anblasen oder auf irgend eine andere Weise zum Tönen gebracht werden kann. Wenn es hiernach als ausgemacht angesehen werden darf, daß die betrachteten Töne nicht durch die Schwingungen der zwischen den Platten befindlichen Luft entstehen, so ist doch anzuerkennen, daß die umgebene Luft auf Stärke, Leichtigkeit des Ansprechens und sogar auf die Höhe der Töne von Einfluß ist; denn begrenzt man den Raum zwischen beiden Platten, indem man einen Blechreif von der Breite der Plattendistanz oder eine durchbohrte Korkscheibe zwischen die Platten ein-

*) Begränzt man diesen Raum vollständig oder größten Theils, so wird allerdings der Ton modificirt.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

fügt, so werden die durch den Luftstrom erzeugten Töne stärker und tiefer und treten in größerer Mannigfaltigkeit auf; sie sprechen auch leichter an und entstehen noch bei sehr schwachem Luftdrucke, bei welchem sie unter gleichen Umständen nicht mehr zu beobachten sind, wenn der das Luftvolumen begrenzende Korkring oder Blechreif weggenommen wird. Hierbei ist es nicht nothwendig, den Korkring oder Blechreif mit den beiden Platten luft- oder winddicht zu verbinden, sondern es reicht zur Abgrenzung des mitschwingenden Luftkörpers hin, die Theile des Apparats aufeinander zu legen. Auch ein offenes Rohr, welches über die Oeffnung der obern beweglichen Platte gehalten wird, verstärkt und modificirt den Ton, ja oft wird derselbe, wenn die Plattendistanz groß und der Luftdruck schwach ist, nur noch durch ein darüber gehaltenes Rohr wahrnehmbar. Diese Erscheinung, in welcher ein Luftkörper durch sein Mitschwingen den Ton verstärkt, seinerseits aber auch Einfluß auf die Tonhöhe ausübt, enthält nichts Auffallendes, es findet sogar beim Tönen der Zungenpfeife etwas ganz Analoges statt, bei welchen die in dem Aufsatzrohre enthaltene Luftsäule denselben Einfluß auf die Schwingungen der Zunge ausübt.

11. Nachdem die oberhalb der Ausflußöffnung befindlichen Theile des Apparats betrachtet worden sind, entsteht die Frage, welchen Einfluß die unterhalb derselben befindliche in dem cylindrischen Reservoir enthaltene Luft auf die Entstehung und Beschaffenheit des Tones ausübt. Die Annahme, daß die in dem Cylinder enthaltene Luftsäule der tönende Körper sei und wie in einer Orgelpfeife schwinge, dürfte schon auf den ersten Blick nicht zuläßig erscheinen, denn zunächst hat der ganze Apparat eine Construction, welche von der Construction einer Labialpfeife wesentlich verschieden, ich möchte sagen, welche die Umkehrung derselben ist; dann aber widerspricht hauptsächlich dieser Annahme die leichte Veränderlichkeit des Tones, welcher abgesehn von den einzelnen oben bemerkten Sprüngen allmählig durch die Veränderung des Luftdruckes oder der Plattendistanz höher oder tiefer wird, und sich hierin als von einem bestimmten Luftvolumen unabhängig zeigt. Man kann allerdings durch verschiedenes Anblasen aus einer Orgelpfeife auch eine Reihenfolge von Tönen erhalten, zu deren Erzeugung die Luftsäule in mehrere Theile getheilt schwingt und welche unter den Namen Flageolettöne oder harmonische Töne bekannt sind, aber diese Töne unterscheiden sich von den hier betrachteten wesentlich dadurch, daß sie immer eine von der Luftsäule abhängige Reihenfolge bilden, und durch bestimmte Interwalle von einander getrennt sind.

Obgleich hieraus schon erhellen dürfte, daß die durch den Luftstrom erzeugten Töne von der in dem Cylinder eingeschlossenen Luftsäule im Allgemeinen unabhängig sind, so schien es mir doch noch wünschenswerth, mich durch einen directen Versuch hiervon zu überzeugen. Ich setzte deßhalb mittelst einer der oben erwähnten Blechfassungen eine Deckelplatte auf den Glascylinder, welche ich mit zwei kreisförmigen Ausflußöffnungen von 4 Mm. Durchmesser versehen hatte, und ließ nur den aus der einen Oeffnung tretenden Luftstrom wie früher gegen die in einer beliebigen Entfernung eingestellte bewegliche Platte stoßen. Ich fand zunächst, daß auch bei dieser Einrichtung die Töne ganz in derselben Weise wie früher entstehen und daß durch ein abwechselndes Schließen der zweiten Oeffnung keine andere Aenderung in dem Ton herbeigeführt wird, als daß er ein wenig höher wird, was offenbar daher kommt, daß durch das plötzliche Absperren des einen Luftstromes der andere etwas verstärkt oder beschleunigt wird. Befände sich dagegen die in dem Cylinder enthaltene Luftsäule in stehender Schwingung, so müßte der Ton durch das Schließender zweiten Oeffnung tiefer weeden, wie sich in der That auch zeigte, als ich den Cylinder an der einen Oeffnung von Außen anbließ und die andern abwechselnd schloß und öffnete. Ein anderer Versuch führte zu demselben Resultate. Ich hielt nämlich über jede der beiden Ausflußöffnungen eine

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Platte und fand, daß jeder der auf dieselben stoßenden Luftströme für sich Töne erzeugte, die von den Tönen des andern unabhängig sind, so daß, wenn die Platten in verschiedener Distanz eingestellt sind, zwei Töne von verschiedener Höhe zu gleicher Zeit wahrgenommen werden. Bleibt die Entfernung der einen Platte constant, während die andere mit dem Nonius auf und abgeschoben wird, so bleibt bei gleichem Luftdrucke auch der eine Ton constant, während der andere sich fortwährend ändert.

Aus dem Vorhergehenden darf jedoch nicht geschlossen werden, daß die Luft unterhalb der Ausflußöffnung gänzlich unbewegt bleibt, sie nimmt sogar nach meiner Ansicht in der Nähe der Ausflußöffnung ohne Zweifel an den Oscillationen Theil, aber nicht in der Weise, daß der im Cylinder enthaltene Luftkörper als Ganzes oder in Theilen schwingt, sondern so, daß die Oscillationen sich von der Ausflußöffnung an, ins Innere bis zu einer von der Höhe des Tones abhängigen Grenze fortsetzen. Ich stelle mir die innerhalb einer Hemisphäre, in deren Mitte die Ausflußöffnung liegt, enthaltene Luft mitschwingend vor und nehme an, daß diese Hemisphäre sich erweitert, wenn der Ton tiefer wird, und sich wieder verengt, wenn die Höhe des Tones in Folge des verstärkten Luftdruckes oder der Annäherung der obern Platte zunimmt. Ist der Raum, aus welchem die verdichtete Luft durch die Ausflußöffnung ausströmt, unbegrenzt oder kann derselbe im Vergleich zur Ausflußöffnung als unendlich groß angesehen werden, so haben die Schallwellen, welche von der ersten oben erwähnten primitiven Welle erregt werden, keinen rückwirkenden Einfluß, ist dagegen unterhalb der Ausflußöffnung, ein begrenzter lufterfüllter Raum, wie in meinem Apparate der als Luftreservoir dienende Cylinder, vorhanden, so werden die fortgepflanzten und von den Wänden zurückgeworfenen Schallwellen auf die primitive Welle zurückwirken und dadurch die Töne modificiren. Es kann hierbei der begrenzte Luftkörper unter günstigen Umständen wirklich in stehende Schwingungen gerathen und durch Stärke und Eigenthümlichkeit des Klanges sich auszeichnende Töne hervorbringen, es kann sogar hierbei Interferenz der Schallwellen entstehen und bewirken, daß nicht selten grade bei einem bestimmten Luftdrucke kein Ton anspricht, während bei einem nur wenig stärkeren und schwächeren Luftdrucke unter übrigens gleichen Umständen deutliche Töne entstehen, wie beinahe in jeder Versuchsreihe sich in der That gezeigt hat. In dieser Annahme finden die meisten der oben in Beziehung auf die Beschaffenheit und Reihenfolge der beobachteten Töne gemachten Bemerkungen ihre Erklärung, und es dürften nunmehr die Sprünge, welche sich in den Beobachtungsreihen finden, nicht mehr überraschen, so wie es auch nicht mehr zufällig erscheinen wird, daß die in Tabelle **Va** zusammengestellten Versuche mit dem Gesetze über die Abhängigkeit des Tones von der Plattendistanz weniger gut übereinstimmen als die in Tabelle **Vb** verglichen, da letztere bei einem mehr als doppelt so großen Luftdrucke angestellt worden sind und deßhalb als von den secundären Einflüssen unabhängiger betrachtet werden müssen.

12. Um den Einfluß, welchen der in dem Cylinder enthaltene Luftkörper auf die Töne ausübt, näher kennen zu lernen, habe ich theils größere Ausflußöffnungen angewendet, theils den Raum, aus welchem die Luft ausströmt, beschränkt. Durch diese Versuche wurde der Einfluß des abgegrenzten Luftvolumens entschieden nachgewiesen, denn es zeigte sich in beiden Fällen, daß die durch den auf die obere Platte stoßenden Luftstrom erzeugten Töne im Zusammenhange mit den Tönen stehen, welche man erhält, wenn man die in dem Glascylinder enthaltene Luftsäule durch Anblasen in stehende Schwingung versetzt. Ich benütze zum Anblasen von solcher eingeschlossenen Luftsäule den in (**Fig. 9**) abgebildeten Apparat, welcher aus einer kurzen cylindrischen Blechröhre **AC** und einer darangelötheten breitgeschlagenen Blechröhre **CB** besteht. Wenn

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

ich das Ende **B** an die Oeffnung, an welcher ich den Luftkörper anblasen will, ansetze, und mit dem Munde einen bandförmigen Luftstrom über die Oeffnung treibe, so gelingt es durch verschiedene Haltung des Anblaserohres und durch verschieden starkes Anblasen eine Reihe von Tönen zu erhalten. Diese Töne werden, wenn die Ausflußöffnung im Vergleich zu dem Luftvolumen im Cylinder nicht zu klein ist, auch durch den Luftstrom besonders leicht und, wiederkehrend erzeugt und zeichnen sich durch größere Intensivität vor den übrigen aus. Bei hinreichend großer Ausflußöffnung stimmen die durch den Luftstrom erzeugten Töne fast ganz mit denen überein, welche durch das Anblasen erhalten wurden, wobei zu merken ist, daß bei dieser Einrichtung des Apparats die Töne nicht mehr in Folge der Aenderung des Luftdruckes oder der Plattendistanz allmählig höher oder tiefer werden, sondern plötzlich in einander überschlagen oder nur durch ein zwischen ihnen auftretendes Rauschen getrennt sind.

Die Verengung des Raumes, aus welchem die Luft durch die Ausflußöffnung ausströmt, habe ich dadurch ausgeführt, daß ich die mit der Ausflußöffnung versehenen Platten auf cylindrische Röhren von verschiedener Länge kittete, diese Röhren in eine geeignete Blechfassung (**Fig. 3**) hineinschob und mit der Blechfassung auf den Glascylinder setzte. Bei dieser Einrichtung ist anzunehmen, daß nicht mehr das den Glascylinder erfüllende Luftvolumen, sondern nur die in der Röhre enthaltene Luftsäule mitschwingt und auf die hier untersuchten Töne Einfluß übt. Die Versuche wurden, abgesehen von der eingesetzten Röhre, in derselben Weise wie die in Tabelle **II** mitgetheilten, bei verschiedener Plattendistanz und unter verschiedenem Luftdrucke angestellt. Die Weite der eingesetzten Röhre betrug **19** Mm. und ihre Länge war in der 1sten Versuchsreihe **115**, in der 2ten **92**, in der 3ten **68** Mm. Die Ausflußöffnungen waren wegen der Vergleichung mit den früheren Versuchen ebenfalls kreisförmig und hatten einen Diameter von 4 Millimetern. In einer 4ten Versuchsreihe hatte die eingesetzte Röhre eine Weite von **18** Mm. und eine Länge von **92** Mm., aber ihre Ausflußöffnung hatte einen Diameter von 8 Mm. Ich stelle diese Beobachtungen in 4 Tabellen zusammen, welche ganz dieselbe Einrichtung wie Tabelle **II.** haben.

Tabelle VI.

Versuche mit eingesetztem Rohre von 19 Mm. Weite, 111 Mm. Länge und kreisförmiger Ausflußöffnung von 4 Mm. Diameter.

Plattendistanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.	Plattendistanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.
1,6	8	a^4	6889	2,0	4,5	d^2	1149
	13	d^5	9195		5	d^4	4598
	20—24	h^5	15464		11	a^4	6889
	30—40	d^5	18390		12	b^4	7298
1,8	8—10	a^4	6889		16	d^5	9195
	15—17	d^5	9195	2,2	4,5	d^2	1149
	20—25	h^5	15464		5	d^4	4598

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Platten-distanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.	Platten-distanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.
2,2	11	a^4	6889	3,8	1	b^2	1824
	16	d^5	9195		2	c^3	2048
2,7	1	h^2	1933		3	d^3	2299
	4—4,5	h^3	3866		7	c^4	4096
	5	cis^4	4339		9	d^4	4598
	5,5	d^4	4598		10	dis^4	4871
	9	e^4	5161		22	a^4	6889
	11	d^4	4598	4,5	1,2	b^2	1824
	15	a^4	6889		2	h^2	1933
	25	c^4	4096		2,5	c^3	2048
2,9	1	h^2	1933		5	cis^3	2170
	5	h^3	3866		9	c^4	4096
	5,5	c^4	4096		10—11	d^4	4598
	6	d^4	4598		23	d^4	4598
	9	e^4	5161	5,6	1,5	b^2	1824
	11	d^4	4598		2	h^2	1933
	15	a^4	6889		2,5	c^3	2048
	25—28	c^5	8192		3	cis^3	2170
3,1	1	h^2	1933		4,5	d^3	2299
	2	cis^3	2170		5	dis^3	2435
	5—6	c^3	2048		10	e^3	2580
	6,5	cis^3	2170		11	f^3	2734
	7	d^3	2299		32	dis^4	4971
	10	e^4	5161				
	10,5	f^4	5467				
	15—17	a^4	6889				

Tabelle VII.

Versuche mit eingesetztem Rohre von 19 Mm. Weite und 92 Mm. Länge und kreisförmiger Ausflußöffnung von 4 Mm. Diameter.

Platten-distanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.	Platten-distanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.
1,3	25	e^4	5161	1,6	18	c^5	8192
1,6	5	d^3	2299		23—27	e^4	5161

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Platten-distanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.	Platten-distanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.
1,8	6	e^4 u. d^3	5161 2299	4,5	3	d^3	2299
					4	e^3	2580
	14	c^4	4096		7	e^3	2580
	20	c^5	8192		10	g^3	3068
2,2	2	d^3	2299		15	e^4	5161
	6	e^2 u. e^4	1290 5161		20	fis^4	5793
				5,6	2,5	d^3	2299
	14	h^3	3866		3	e^3	2580
	15	c^4	4096		5	d^3	2299
3,4	2	d^3	2299		7	e^3	2580
	2,5	dis^3	2435		10	f^3	2734
	3	d^3	2299		24—25	e^4	5161
	4	f^3	2734	6,8	3	d^3	2299
	5	f^4	5467		4	e^3	2580
	7	e^2	1290		5	d^3 u. f^3	2299 2734
	9—10	e^4	5161				
	20	fis^4	5793		7	f^3	2734
	30	c^5	8192				

Tabelle VIII.

Versuche mit eingesetztem Rohre von 19 Mm. Weite und 68 Mm. Länge und kreisförmiger Ausflußöffnung von 4 Mm. Durchmesser.

Platten-distanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.	Platten-distanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.
1,3	6	f^3 u. a^4	2734 6889	1,6	15	f^5	10935
					35—40	fis^4	5793
	15	f^5	10935	2,0	0,5	f^3	2734
	40	g^4	6137		1	fis^3	2896
1,6	6	f^3 u. a^4	2734 6889		7	f^3	2734
					8	a^4	6889

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Platten-distanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.
2,0	10	b^4	7298
	13	c^5	8192
2,2	2—,25	f^3 u. fis^4	2734 / 2896
	8—10	a^4	6889
	20—25	d^5	9195
2,9	2,5	f^3	2734
	3	fis^3	2896
	4,5	a^3	3444
	5	fis^3	2896
	11	a^4	6889
3,4	2,5—3	f^3	2734
	4	fis^3	2896
	5	a^3	3444
	15—16	a^4	6889
	25	h^4	7732
4,5	1,5	f^3	2734
	2	fis^3	2896
	3	f^3	2734
	6	a^3	3444
	8—9	a^3	3444
	17—18	b^3	3649
5,6	2	f^3	2734
	2,5	fis^3	2896
	5	a^3	3444
	5,2	f^3	2734
	6	fis^3	2896
	8	g^3	3068
	9—10	a^3	3444
6,8	3	fis^3	2896
	4	g^3	3068
	5	a^3	3444
	7,0	fis^3	2896
	7,1	f^1	683
	10	a^3	3444
7,9	2	f^3	2734
	3	fis^3	2896
	4	fis^3	2896
	5	g^3	3068
	7	b^3	3649
	8	h^3	3866
9,0	5	f^3	2734
	9	b^3	3649
	9—10	h^3	3866
10,1	2	cis^3	2170
	5	g^3	3068
	6	gis^3	3251
	10	a^3	3444
	12—13	h^3	3866
11,3	2	f^2	1367
	2,5	cis^3	2170
	11	a^3	3444
	11,5	a^2	1722
12,4	2	f^2	1367
	2,5	c^3	2048
	4	g^3	3068
	5	fis^3	2896
13,5	6	fis^3	2896

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Tabelle IX.

Versuche mit eingesetztem Rohre von 18 Mm. Weite und 92 Mm. Länge und kreisförmiger Ausflußöffnung von 8 Mm. Durchmesser.

Plattendistanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.	Plattendistanz. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.
1,1	7—10	f^3	2734	4,5	3	f^3	2734
	15	f^3	"		4	es^3	2435
	22	f^4	5467		5	e^3	2580
					7	f^3	2734
1,8	6	f^4	"		9	f^3	"
	7—8	f^3	2734		18—20	f^4	5467
	10—12	f^3	"		54	c^5	8192
	13—15	f^3 u. f^4	"				
2,5	2	f^3	"	5,6	8	e^3	2580
	7—9	f^4	5467		9	f^4	5468
	14—17	f^3 u. f^5	2734		10	f^3	2734
	20	c^5	8192		25	f^3	"
	30—32	f^5	10935				
				6,8	5	f^3	"
3,1	3	f^3	2734		7	g^3	3068
	9—10	f^4	5467		8	e^3	2580
	15	g^4	6137		9—10	f^3	2734
	30	c^5	8192		11	f^4	5467
3,8	3,5	f^3	2734				
	14	f^4	5467				
	40	c^5	8192				

13. Vergleicht man die in den letzten vier Tabellen enthaltenen Beobachtungen mit den oben in Tabelle **II.** mitgetheilten, so findet man, daß die Verkleinerung des unter der Ausflußöffnung vorhandenen Luftkörpers einen entschiedenen Einfluß nicht bloß auf die Höhe, sondern auch auf die Entstehung des durch den Luftstrom erzeugten Tones hat, denn nach Einsetzung des Rohres entstanden einerseits unter denselben Umständen andere wesentlich verschiedene Töne, andererseits reichte schon ein geringer Luftdruck bei den kleinsten Plattendistanzen hin, um eine Aufeinanderfolge von mehreren nicht all zu hohen Tönen zu erzeugen, während früher ohne Rohr bei denselben Plattendistanzen durch Anwendung eines viel größeren Luftdruckes nur einzelne sehr

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

hohe Töne erhalten werden konnten. Die Mannigfaltigkeit der Töne ist nach der Einsetzung der Röhren nicht mehr so groß, wie früher und zwar treten weniger Töne auf, wenn das eingesetzte Rohr kürzer ist oder eine größere Ausflußöffnung trägt. Der Gedanke, daß die in den letzten Versuchsreihen vorherrschenden Töne im Zusammenhange mit den Tönen stehen möchten, welche man erhält, wenn die in den Röhren eingeschlossenen Luftsäulen in stehende Schwingungen versetzt, liegt sehr nahe, und ich habe mich von seiner Richtigkeit überzeugt, indem ich die einzelnen noch in dem Cylinder eingesetzten Röhren an der Ausflußöffnung mit Hilfe des oben erwähnten Blechrohres anbließ. Ich fand, daß das bei den in Tabelle **VI.** enthaltenen Versuchen angewandte Rohr beim Anblasen die Töne

$$h^2,\ c^3,\ c^4,\ d^4 \text{ und } a^4$$

angab; aus dem Rohre in Tabelle **VII.** erhielt ich

$$d^3,\ e^4 \text{ und } f^5$$

aus dem Rohre in Tabelle **VIII.**

$$c^2,\ f^3,\ fis^3 \text{ und } a^4$$

aus dem Rohre in Tabelle **IX.**

$$e^3,\ f^4 \text{ und } fis^5.$$

Ich habe hierbei noch zu bemerken, daß der Ton c^2, welcher aus dem bei dem Versuche in Tabelle **VIII.** angewandten Rohre von 19 Millimetern Durchmesser und 68 Mm. Länge erhalten wurde, nicht bloß durch die Schwingungen der eingeschlossenen Luftsäule entstanden sein kann, sondern daß der in dem Glascylinder enthaltene Körper offenbar dazu mitgewirkt haben muß, wie auch daraus hervorgeht, daß die aus dem Cylinder herausgenommene Röhre diesen tiefen Ton nicht mehr angab. Man wird beim Ueberblicken der vorstehenden Tabellen leicht bemerken, daß die beim Anblasen der Röhren erhaltenen Töne unter den Tönen, welche durch den auf die obere Platte stoßenden Luftstrom erzeugt werden, entschieden vorherrschen. Um dieß gehörig zu würdigen, muß man aber beachten, daß die untersuchten Töne einerseits oft leicht in die höhere oder tiefere Octave überspringen, andrerseits oft durch eine allmählige Zu- oder Abnahme des Luftdruckes erst höher oder tiefer werden, bevor sie in einen andern Ton übergehn. Es beschleunigt nämlich der rascher ausfließende Luftstrom die Schwingungen der Luftsäule ähnlich wie das stärkere Anblasen von Außen, ohne sofort die Schwingungsart zu ändern, und deßhalb sind die naheliegenden Töne, welche durch allmählig veränderten Luftdruck höher oder tiefer geworden sind, dem primitiven Tone beizuzählen. Auch bei den Versuchen, welche in der Tabelle **II.** zusammen gestellt sind, zeichneten sich gewisse Töne durch Intensivität und leichtes Ansprechen aus, woraus zu schließen ist, daß das in dem Glascylinder enthaltene Luftvolumen auch im Vergleich zu der allerdings kleinen kreisförmigen Oeffnung von 4 Mm. Durchmesser noch nicht als unendlich groß betrachtet werden darf, sondern ab und zu selbst in stehende Schwingungen geräth und dadurch auch auf die durch den Luftstrom erzeugten Töne einen gewissen Einfluß ausübt.

Ich versuchte auch den mit der bezeichneten Ausflußöffnung von 4 Millimetern Durchmesser versehenen Glascylinder durch Anblasen zum Tönen zu bringen. Es gelang mir, jedoch nur schwer und durch sehr vorsichtiges Anblasen aus demselben mehrere Töne hervorzulocken, nämlich **g**, d^1_+, cis^3 und cis^4, deren Schwingungszahlen in derselben Reihenfolge 283, 575, 2170 und 4339 sind. Die beiden tieferen Töne sprachen nur beim schwächsten Anblasen an, und

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

waren sehr schwach, weßhalb sie auch schwer zu bestimmen waren. Es dürfte nun anzunehmen sein, daß der durch den auf die obere Platte stoßenden Luftstrom erzeugte Ton die in dem Glascylinder enthaltene Luftsäule immer dann zum Mitschwingen bringt, wenn er durch die Abänderung der Plattendistanz oder des Luftdruckes eine solche Höhe erreicht hat, daß seine Schwingungszahl entweder gleich der Schwingungszahl von einem der durch das Anblasen der Luftsäule erhaltenen Töne ist, oder in einem einfachen Verhältnisse zu derselben stehe. Im letzteren Falle würden dann mehrere Schwingungen des einen Tones auf eine Schwingung des andern kommen und würden dann entweder, wie es in der That sich bei den Beobachtungen oft gezeigt hat, wirklich zwei Töne wahr zu nehmen sein oder es würde einer der beiden Töne sich dem andern accomodiren. Durch das Zusammenklingen von zwei nicht zu unterscheidenden Tönen dürfte auch der eigenthümliche scharfe, trompetenähnliche Charakter, der an einzelnen Tönen oft bemerkt wurde, zu erklären sein, wie auch das Schwirren und Schnarren, welches manchmal die Töne begleitete, wahrscheinlich auf dieselbe Weise entstanden ist.

Die mitschwingende Luftsäule hat ohne Zweifel auch auf die Höhe der beobachteten Töne Einfluß geübt, denn einmal in Schwingung versetzt, verharrt sie auch bei einem etwas veränderten Luftdrucke noch in demselben, so daß der durch den Stoß des Luftstroms erzeugte Ton gewissermaßen festgehalten wird und sich erst bei einer größeren Differenz des Luftdruckes ändert, als ohne den Einfluß der Luftsäule geschehen würde. Die Luftsäule hört dann, wenn sie nicht eine andere Schwingungsart annimmt, auf mitzuschwingen und der beobachtete Ton ist dann plötzlich schwächer.

14. Nachdem ich in dem Vorangehenden die Umstände, unter welchen die untersuchten Töne entstehen, nach allen Seiten hin möglichst sorgfältig betrachtet habe, kann ich zur Beantwortung der Frage schreiten, wie die primitiven Schwingungen, welche diese Töne erzeugten, hervorgerufen werden. Es bleiben nach den vorangehenden Betrachtungen nur noch zwei Annahmen übrig, nämlich, entweder daß die rasch aufeinanderfolgenden Stöße der an die obere Platte prallenden Lufttheilchen die Töne erzeugen, oder daß die aus der Ausflußöffnung strömende Luft als ein von der umgebenden ruhenden Luft gesonderter Körper anzusehen ist, der durch den Stoß an den Rändern der in der obern Platte vorhandenen Oeffnung in Schwingungen versetzt wird, an welchen die in der Nähe befindlichen Luftkörper unter günstigen Umständen Theil nehmen. Für die erste Annahme spricht allerdings die oben gemachte Bemerkung, daß die Schwingungszahl der Töne im graden Verhältnisse zur Ausflußgeschwindigkeit der Luft steht; doch dürfte bei der in der Nähe der Ausflußöffnung vorhandenen Continuität des Luftstromes eine Aufeinanderfolge von einzelnen Stößen kaum denkbar sein, und es müßte der Ton hiernach sicherer und leichter erzeugt werden, wenn der Luftstrom erst in einer größeren Entfernung, wo er sich schon zu zertheilen beginnt, auf die obere Platte stößt. Außerdem lehrt die Erfahrung, daß gar kein Ton entsteht, wenn der Luftstrom in irgend einer Entfernung auf die Mitte einer hinreichend großen Platte stößt, woraus folgt, daß nicht sowohl der Stoß gegen eine Fläche als die Reibung oder Steifung des Luftstromes an einer scharfen Kante zur Erzeugung des Tones erforderlich ist.

Deßhalb möchte die zweite Annahme angemessener erscheinen, nach welcher der aus der Ausflußöffnung tretende Luftstrom als ein Stab angesehen wird, der sich fortwährend nach oben bewegt und an seinem Umfange durch Reibung in Longitudinalschwingungen versetzt wird. Es würde hiernach diese Tonerzeugung Aehnlichkeit haben mit den Tönen der hölzernen Stäbe, welche man mit Kolophonium einreibt und dadurch in Schwingung versetzt, daß man mit den Fingern

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

an ihnen herunterstreicht. So wie der Stab kräftiger und sicherer anspricht, wenn man ihn rings umfaßt, als wenn man bloß mit einem Finger an ihm herunterstreicht, so geräth auch der Luftstrom entschiedener und kräftiger in Schwingungen, wenn er sich beim Durchgange durch die in der obern Platte vorhandene Oeffnung an seinem ganzen Umfange an dem Rande derselben reibt, als in dem Falle, wo er nur an einer einzelnen Stelle an einer Spitze oder Kante vorbeistreift. Die Erfahrung bestättigt dieß nicht blos bei runden Ausflußöffnungen; denn läßt man den Luftstrom durch einen langen schmalen Spalt ausfließen, so tönt er nur schwach, wenn man ihm bloß an den Enden eine Kante entgegen hält, der Ton wird dagegen schon viel stärker, wenn man den Luftstrom auf einer der breiten Seiten der ganzen Länge nach an einer Schneide vorbeistreifen läßt, und spricht am besten und schönsten an, wenn man auf beiden langen Seiten in gleicher Höhe Kanten nähert oder den Luftstrom durch eine Oeffnung streichen läßt, welche der Ausflußöffnung gleich ist.

Das vorzüglichste Bedenken, welches diese Ansicht über die Entstehung der betrachteten Töne entgegen gesetzt werden dürfte, möchte durch den Zweifel entstehen, ob eine bewegte Luftmasse in Beziehung auf die tönenden Schwingungen als ein von der umgebenden ruhenden Luft abgegrenzter Körper angesehen werden kann. Meines Wissens liegen bis jetzt keine Erfahrungen vor, welche zur Aufstellung oder Lösung dieser Frage Veranlassung gegeben hätten und auch ich fühle mich für jetzt außer Stande dieselbe entscheidend zu beantworten, doch will ich einige hierher gehörende Bemerkungen nicht zurück halten.

15. Ein Analogon mit der Tonerzeugung in freier Luft bietet zunächst ein großes glattgehobeltes Brett, welches, wenn man mit einem oder mehreren Finger rasch darüber hinstreicht, an den gestrichenen Stellen ebenso wie der Stab in Schwingung versetzt wird und einen meistens hohen Ton erzeugt. Hier schwingt und tönt bloß die geriebene Stelle, da die schwache und vorübergehende Erregung nicht im Stande ist, das ganze Brett in Schwingung zu versetzen, und es ist daher der Ton nicht von der Größe des Brettes, sondern nur von der Geschwindigkeit des Streichens abhängig. Aehnlich ist es, wenn man eine dünne Ruthe oder eine Degenklinge mit raschem Schwunge durch die Luft bewegt und dadurch die Luft, ohne sie in Bewegung zu versetzen, an den durchgehauenen Flächen durch Stoß oder Reibung in rasch vorübergehende Schwingungen versetzt und einen hohen Ton erzeugt, *) der um so höher ist, je rascher der Schlag ausgeführt wird. Bewegt sich die Luft mit derselben Geschwindigkeit gegen eine Schneide, so muß folgerichtig derselbe Ton entstehen, wie wenn die Schneide gegen die ruhende Luft bewegt wird, und daher auch um so höher sein, je größer die Geschwindigkeit des Windes ist. Die Töne, welche der Wind auf diese Weise erzeugt, sind aber sehr schwach und werden nur stärker, wenn die Kanten, gegen welche er stößt, größere Ausdehnung haben oder wenn Luftsäulen zum Mitschwingen gebracht werden. In meinem Apparate erzeugt der aus der Ausflußöffnung tretende Luftstrom an den gestoßenen Kanten der oberen Platte die primitiven Schwingungen ohne Zweifel auf dieselbe Weise. Die dadurch allein erzeugten Töne würden aber wegen der geringen Ausdehnung des Luftstromes und der gestoßenen Kanten äußerst schwach sein und würden auch nur von der Geschwindigkeit des Luftstromes, nicht aber auch von dem Abstande der obern Platte abhängen. Daher muß hier noch entweder der zwischen den Platten

*) Das Pfeifen der Kugeln entsteht auf dieselbe Weise.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

gelegene Theil des Luftstromes für sich oder überhaupt die zwischen den Platten befindliche Luft bis in eine gewisse Entfernung rings um die Ausflußöffnung herum mitschwingen.

Um die Art und Weise, wie der aus der Ausflußöffnung tretende Luftstrom in die umgebende Luft übergeht, kennen zu lernen, suchte ich den Luftstrom dadurch sichtbar zu machen, daß ich die Luft vor ihrem Austritte aus der Oeffnung mit Tabakrauch mischte. Ich habe diese Versuche schon im vorigen Jahre in Poggendorff's Annalen für Physik und Chemie, Band 85 pag. 58 beschrieben und theile deßhalb hier nur dasjenige mit, was in unmittelbarer Beziehung zu der besprochenen Tonerzeugung steht. Es zeigte sich bei diesen Versuchen, daß der durch Rauch sichtbar gemachte Luftstrom bei einem mäßigen oder schwachen Luftdrucke, wie er zu der Erzeugung der Töne nothwendig ist, einen von der umgebenden Luft scharf abgegrenzten continuirlichen Faden oder Strahl bildet, der erst in der Entfernung von ungefähr einem Zoll unruhig wird, sich zertheilt und mit der umgebenden Luft vermischt. Bei stärkerem Luftdrucke, also bei größerer Ausflußgeschwindigkeit verkürzt sich der zusammenhängende und ruhig ausfließende Theil des Luftstromes, grade so wie dieß bei einem aus einer Bodenöffnung ausfließenden Wasserstrahl Statt findet, mit welchem überhaupt der Luftstrom auch in seinem übrigen Verhalten große Aehnlichkeit zeigt. *)

Läßt man den Luftstrom auch durch die in der obern beweglichen Platte vorhandene Oeffnung streichen, so wird an demselben keine Veränderung sichtbar, außer daß er an einzelnen Stellen, wo er wegen der nicht ganz vollkommenen Einstellung über den Rand der Oeffnung übergreift, zurückgeworfen wird. An dem unter der Platte befindlichen Theile des Luftstromes ist auch während des Tönens keine Bewegung oder Erzitterung zu bemerken, wie denn auch die Schwingungen viel zu rasch sind, als daß sie sichtbar sein könnten. In Beziehung auf die Entfernung der beweglichen Platte von der Ausflußöffnung ist noch zu bemerken, daß nur dann noch deutliche Töne von bestimmter Höhe entstehen, wenn die Platte innerhalb des noch zusammenhängenden Theils des Luftstromes eingestellt wird, wogegen nur ein Rauschen entsteht, wenn die Platte von dem oberen Theile des Luftstromes getroffen wird. Hiermit stimmen auch die mitgetheilten Beobachtungen überein, denn dieselben zeigen, daß bei größerer Plattendistanz nur noch bei schwachem Luftdrucke Töne erzeugt werden, bei welchem der Luftstrom sich, wie oben bemerkt wurde, erst in größere Entfernung der Ausflußöffnung zertheilt.

Diese Beobachtungen scheinen dafür zu sprechen, daß die erzeugten Töne von den Longitudinalschwingungen des scharfabgegrenzten continuirlichen Theiles des zwischen den Platten enthaltenen Luftstromes **) herrühren, denn der Ton kann nach dieser Ansicht nicht entstehen, wenn der Körper, der ihn erzeugen soll, aufhört, ein homogenes Ganze zu sein. Noch ein anderer Umstand spricht für dieselbe Ansicht. Die obere Platte nämlich, durch welche der Luftstrom hindurch geht, muß nicht aus harter, schwerer Substanz bestehen, sondern man kann statt derselben

---

*) Nach Savart entstehen beim Ausfließen des Wassers aus einer Bodenöffnung des Gefäßes auch Töne, deren Höhe der Ausflußgeschwindigkeit proportionirt ist.

**) Der durch die obere Platte hindurch gegangene Theil des Luftstromes hat keinen Einfluß auf den Ton, wie daraus hervorgeht, daß man von oben her einen Blechstreifen nähern kann, ohne daß der Ton aufhört oder auch nur irgend eine Modifikation erleidet.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

einen Streifen ganz feines Postpapier anwenden, in welchem man eine kreisförmige Oeffnung ausgeschnitten hat, und erhält doch noch dieselben Töne. Damit das Blättchen Postpapier nicht von dem anprallenden Luftstrome umgebogen oder fortgerissen wird, ist es rathsam, diese Oeffnung etwas größer zu machen, als die Ausflußöffnung ist. Man kann auch bei diesem Versuche ein mit einer Oeffnung versehenes Scheibchen von feinem Postpapier auf einen Korkring von der Dicke der zur Tonerzeugung erforderlichen Plattendistanz legen. Bei richtiger Einstellung der Oeffnung reißt der Luftstrom das leichte Papierscheibchen nicht fort, erzeugt dagegen dieselben Töne. Ab und zu hört man nur noch außerdem einen schnarrenden Ton, der von dem Erzittern des Blättchens und dem Aufschlagen desselben auf die Unterlage herrührt. Es ist hieraus jedenfalls zu schließen, daß zu der besprochenen Tonerzeugung nur eine äußerst schwache Reibung an einem festen Körper, nicht aber eine Aufeinanderfolge von Stößen auf denselben erforderlich ist. Endlich ist noch als hierher gehörend zu bemerken, daß entweder gar keine oder doch nur sehr schwache, schwirrende Töne entstehn, wenn man den Luftstrom durch eine Röhre von der Weite der Ausflußöffnung ins Freie treten und auf die darüber gehaltene Platte stoßen läßt. Diese Ausflußröhre braucht gar nicht lang zu sein, sondern es reicht eine Länge derselben von einem Zoll hin, um die Entstehung der Töne zu verhindern. Es wird durch den Stoß auf den Rand der in der obern Platte vorhandenen Oeffnung nur noch ein Rauschen hervorgebracht, wie es auch entsteht, wenn die bewegliche Platte zu weit von der Ausflußöffnung entfernt wird.

Das Ausbleiben der Töne in diesem Falle, welches auf den ersten Blick überraschend erscheinen kann, dürfte am leichtesten und einfachsten durch die Annahme erklärt werden, daß der durch das Rohr ausfließende Luftstrom sich gleich bei seinem Austritte sich zu zertheilen anfängt und keinen solchen ruhig fließenden continuirlichen Theil enthält, wie er zur Bildung der Töne erforderlich ist.

Nach dem Vorangehenden dürfte die Annahme, daß der zwischen den Platten befindliche Theil des Luftstromes als ein gesonderter Luftkörper zu betrachten ist, der Longitudinalschwingungen macht und dadurch tönt, schon einige Wahrscheinlichkeit gewinnen, doch werden über das Verhalten von solchen durch die Bewegung isolirter Luftmassen noch andere Erfahrungen gesammelt werden müssen, bevor dieselben anerkannt werden können.

16. Da bei den beschriebenen Versuchen die Ausflußöffnung immer in dünner Wand sich befand, so habe ich, um die Untersuchung der beim Ausströmen der Luft entstehenden Töne zu vervollständigen, noch den Fall zu betrachten, wo die Luft durch eine in einer dicken Wand angebrachte Oeffnung ausströmt. Dieser Fall wird dadurch interessant, daß nicht bloß die oben beschriebenen Töne durch den auf die obere Platte stoßenden Luftstrom erzeugt werden, sondern auch beim bloßen Ausfließen der Luft schöne und kräftige Töne von bestimmter Höhe entstehen, ohne daß eine Platte über die Ausflußöffnung gehalten wird. Um diese Töne zu erhalten, ist in der Regel ein stärkerer Luftdruck erforderlich, als zur Erzeugung der früher betrachteten Töne angewendet werden mußte, und außerdem muß zwischen der Größe der Ausflußöffnung, der Dicke der Platte, in welcher dieselbe ausgeschnitten ist, und der Luftsäule unterhalb der Ausflußöffnung ein zweckmäßiges Verhältniß Statt finden. Um diese Töne sicher zu erhalten, ist keineswegs ein complicirter Apparat erforderlich. Man nimmt eine Röhre aus beliebiger Substanz z. B. Glas, Holz, Pappe, Metall, befestigt an dem einen Ende derselben eine 2 bis 3 Millimeter

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

dicke Platte, durch welche man eine cylindrische Ausflußöffnung so gebohrt hat, daß auf beiden Seiten scharfe Ränder entstehen, und bläs't mit dem Munde durch das Rohr. Die auf diese Weise erhaltene Pfeife ist die einfachste, welche denkbar ist, und spricht an, sowohl wenn man die Luft durch sie hindurch treibt, als auch, wenn man die Luft einsaugt. In **Fig. 10** ist ein solcher Apparat im Durchschnitt abgebildet.

Ich habe zunächst zu bemerken, daß die Platte aus beliebiger Substanz angefertigt werden kann, denn diese Pfeifen sprechen gleich gut an, wenn jene Platte aus Holz, Blei, Zinn, Gutta-Percha oder Korkholz bestand. Ferner muß die Ausflußöffnung nicht grade kreisförmig sein, sondern es tönen solche Apparate mit drei- und viereckiger Ausflußöffnung eben so gut. Ist die Platte etwa nur 1,5 bis 2 Mllm. dick, so ist es wesentlich, daß die Ränder der Ausflußöffnung scharf sind, denn macht man diese Ränder stumpf, so tönen die Apparate nicht mehr, die ihren Ton vorher leicht und sicher angegeben haben. Wenn die Platte dagegen dicker ist, so kann man die Ränder etwas abrunden, muß aber dann etwas stärker blasen, um den Ton noch zu erhalten. Bei dicken Platten kann man statt der cylindrischen Ausflußöffnung auch eine konische anwenden, die sich nach Außen erweitern muß (**Fig. 11**), wenn man den Ton beim Durchblasen erhalten will. Befestigt man die Platte mit der konischen Ausflußöffnung umgekehrt an der Röhre (**Fig. 12**), so entsteht der Ton beim Einsaugen der Luft oder wenn man den Apparat von Oben anbläs't. Die Innenwand der cylindrischen Oeffnung muß ferner nicht glatt sein, sondern sie kann mit Riffen oder Schraubengängen versehn sein. Der mit der Schraubenmutter erzeugte Ton, dessen Beobachtung mich zu dieser Untersuchung veranlaßte, findet also hier seine Erklärung.

Bei der Erzeugung dieser Töne schwingt die unterhalb der Ausflußöffnung befindliche Luftsäule offenbar mit und zwar eben sowie in einer offnen Labialpfeife, denn die Höhe des Ton's hängt von den Dimensionen der Röhre ebenso ab, wie bei einer Labialpfeife. Die folgenden Bemerkungen lassen darüber keinen Zweifel: 1. Der Ton des Apparats ist derselbe, welchen man erhält, wenn man die Röhre wie einen Schlüssel anbläst; 2. wenn man die untere Oeffnung der Röhre verengt, so wird der Ton tiefer; 3. dasselbe Rohr giebt mit einer kleinern Ausflußöffnung einen etwas tiefern Ton; 4. durch verstärktes Blasen erhält man dieselben Flageolettöne wie bei einer Labialpfeife.

Um noch über die Dimensionen der von mir konstruirten Apparate, so wie über die mit denselben erzeugten Töne und den dazu erforderlichen Luftdruck nähere Auskunft zu geben, stelle ich in der folgenden Tabelle **X.** die mit einigen solchen einfachen Pfeifen angestellten Versuche zusammen. In der ersten Columne habe ich die laufende Nummer der angewendeten cylindrischen Röhren, in der zweiten ihre Länge, in der dritten ihre Weite in Millimetern angegeben. In der vierten Columne ist die Substanz bezeichnet, aus welcher die an dem einen Ende der Röhre befestigte, mit der Ausflußöffnung versehene Platte besteht. In der fünften Columne ist die Dicke der Platte, in der sechsten die Gestalt der Ausflußöffnung, in der siebenten die Länge des Durchmessers oder der Seiten derselben angegeben. Die achte Columne enthält die im Manometerrohre des Luftreservoirs (**Fig. 1**), auf welches die Pfeifen gesetzt wurden, abgelesene den Luftdruck messende Wasserhöhe in Millimetern. In der neunten Columne habe ich die dem Luftdruck entsprechenden Töne angegeben und in der zehnten ihre Schwingungszahlen beigesetzt.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Tabelle X.

Nro. der Röhre.	Länge der Röhre. Mm.	Weite der Röhre. Mm.	Substanz der Platte.	Dicke der Platte.	Gestalt der Ausflußöffnung.	Durchmesser od. Seite. Mm.	Luftdruck. Mm.	Beobachtete Töne.	Schwingungszahl.
1	333	28	Holz.	3,7	Kreis.	11,7	3	a^1	861
							12—14	a^2	1722
							22—25	e^3	2580
	"	"	Holz.	7,5	Kreis.	11,7	2	gis^1	812
							4—5	gis^2	1625
							10	c^4	4096
							11—15	e^3	2580
							16—20	a^3	3444
							30	c^4	4096
2	175	11	Blei.	1,5	Kreis.	3,6	10	g^3	3068
							20	d^4	4598
	"	"	Blei.	1,5	Rechteck.	2,7 / 6,9	15	gis^3	3251
							30	dis^4	4871
3	115	11	Blei.	1,5	Kreis.	3,6	5—7	cis^3	2170
							15—24	cis^4	4339
							55—60	c^5	8192
	"	"	Blei.	1,5	Rechteck.	2,7 / 6,9	20—25	d^4	4598
							65—70	cis^5	8679
4	126	7,5	Zinn.	1,2	Kreis.	2,8	20—25	d^4	4598
							38—43	a^4	6889
5	74	7	Gutta-Percha.	2	Kreis.	2,5	10—15	a^3	3444
							40—44	a^4	6889
6	61	6,8	Blei.	1,2	Kreis.	2,8	9	c^4	4096
							11	d^4	4598
							15	dis^4	4871
							36—38	c^5	8192
7	39	5,5	Blei.	1,2	Gleichseitiges Dreieck.	3,4	30—35	g^4	6137
							40—50	a^4	6889
							75—80	a^5	13777
8	20	5,5	Zinn.	2	Kreis.	3	14—30	f^5	10935
							64—75	f^6	21870

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Bei diesen Versuchen war der Kanal der Ausflußöffnung immer cylindrisch oder prismatisch. Verbindet man die Röhre mit einer Platte, deren Ausflußöffnung sich nach Außen konisch erweitert, so erhält man im Wesentlichen dieselben Töne, nur sprechen die tieferen Töne, welche der Schwingung der ganzen in den Röhren enthaltenen Luftsäulen entsprechen, besser an. Die Röhre Nro. 2 giebt z. B. mit den angewendeten Bleiplatten den Grundton der Luftsäule nämlich g^2 nicht an, versieht man sie dagegen mit einer konischen Ausflußöffnung, so erhält man bei einem Luftdrucke von 8—15 Mllm. Wasserhöhe g^2, bei 32—40 Mllm. Wasserhöhe g^3. Die angewendete konische Ausflußöffnung ist in einer Korkplatte von 6 Mllm. Dicke so ausgeschnitten, daß der untere kleinere Kreis des Kegelstumpfes einen Durchmesser von 4,5 Mllm., der obere größere einen Durchmesser von 8 Mllm. hat.

Die meines Erachtens einzig mögliche Erklärung dieser Tonerzeugung ist sehr einfach und steht in naher Beziehung zu der oben gegebenen Erklärung der durch den auf die Kanten einer Platte stoßenden Luftstrom erzeugten Töne. Es ist nämlich anzunehmen, daß der Luftstrom bei seinem Durchgange durch die cylindrische oder konische Ausflußöffnung sich entweder an dem zweiten Rande oder an der ganzen innern Fläche derselben reibt und dadurch in Longitudinalschwingungen versetzt wird, welche von der angrenzenden in dem Rohre enthaltenen Luftsäule gleichfalls angenommen werden. Die Schwingungen, welche der durch die in dicker Wand enthaltene cylindrische oder konische Oeffnung gehende Luftstrom annimmt, müssen viel intensiver sein als diejenigen, in welche er durch den Stoß auf die über ihn gehaltene Platte versetzt wird, weil er im ersten Falle größere Luftvolumen zum Mitschwingen veranlaßt und dadurch tiefere und stärkere Töne erzeugt. Nur wenn ich größere Ausflußöffnungen anwendete und unter einem sehr schwachen Luftdrucke den Luftstrom auf die in größerer Distanz eingestellte obere Platte stoßen ließ, gelang es mir, die in dem Glascylinder enthaltene ganze Luftsäule mitschwingen zu lassen und dadurch tiefe Töne zu erzeugen; dagegen traten diese sicher und viel stärker auf, wenn ich die Wand dadurch verdickte, daß ich einen niedrigen Ring von Metall oder Kork über die Oeffnung legte. Besonders sicher entstanden diese tiefen Töne, wenn die Oeffnung des Ringes sich nach oben konisch erweiterte.

17. Um die Grenzen dieser Abhandlung nicht zu überschreiten, muß ich es mir versagen, auf diese Tonerzeugung noch genauer einzugehn; ich kann aber nicht unterlassen, von dem durch die vorangehende Untersuchung gewonnenen Standpunkte aus einige Blicke auf ein Paar längst bekannte akustische Erscheinungen zu werfen. Zunächst ließen sich jetzt die Umstände genauer angeben, unter welchen der Druck des Windes in Gebäuden die bekannten pfeifenden und heulenden Töne erzeugt. Die mit dem doppelten Blasebalg und dem beschriebenen Apparat erzeugten Töne erinnerten auch oft, wenn der Druck der Luft allmählig gesteigert oder ermäßigt wurde, an das Pfeifen und Heulen des Windes. Es würde aber eine müßige Beschäftigung sein, die Gestalt der Ritze und Spalten zu beschreiben, durch welche die eindringende Luft pfeifend hindurch gehen müßte. Ich begnüge mich daher bloß mit der Andeutung, daß bei dem im Zimmer bemerkten Heulen des Windes die offenen Schlüssellöcher eine Hauptrolle spielen und daß man mit Recht auf Verstärkung des Windes schließt, wenn der durch ihn erzeugte Ton höher wird.

Von größerem Interesse ist die Betrachtung der pfeifenden Töne, welche man mit dem gespitzten Munde hervorbringen kann, das sogenannte Pfeifen mit dem Munde. Nach meiner Ansicht entstehen diese Töne nicht durch ein Erzittern der Lippen, sondern auf dieselbe Weise, wie in dem zuletzt beschriebenen Apparate. Die Röhre ist die Mundhöhle und die Ausflußöffnung

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

wird von den zusammengepreßten Lippen gebildet. Die Geschicklichkeit im Pfeifen besteht darin, daß man den Lippen die gehörige Stellung giebt, die Mundhöhle durch die Haltung der Zunge zur Erzeugung der verschiedenen Töne gehörig verengt und erweitert und den Luftstrom mit dem erforderlichen bald stärkeren bald schwächeren Drucke durch den von den Lippen gebildeten Kanal hindurch treibt. Beobachtet man die Haltung, welche man zur Erzeugung der Pfeiftöne den Lippen geben muß, genauer, so bemerkt man, daß der **Musculus orbicularis** oder **Sphincter oris** dabei so zusammen gezogen wird, daß die Lippen dadurch ordentlich steif und hart werden und daß an ihnen nach der innern Seite ein hart anzufühlender Rand hervortritt. Schon hierdurch dürfte der Einwand, daß die Lippen zu weich sind, entkräftet werden; doch lehrt auch noch die Erfahrung, daß obige Apparate ihren Ton noch sehr gut erzeugen, wenn die Platte welche die Ausflußöffnung enthält, aus ziemlich weicher Substanz, wie Kork, Leder, Gutta-Percha oder Gummielasticum besteht.

Daß das Pfeifen mit dem Munde auf dieselbe Weise wie in jenen Apparaten ensteht, läßt sich auch vorzüglich aus dem ähnlichen Verhalten der erzeugten Töne schließen. Man kann nämlich auch die Pfeiftöne mit dem Munde sowohl beim Ausstoßen als auch beim Einsaugen der Luft erzeugen. Ferner ist hier gleichfalls zur Erzeugung von höheren Tönen ein stärkerer unter größerem Drucke erzeugter Luftstrom erforderlich und endlich vergrößert man durch Zurückziehen der Zunge den Raum der Mundhöhle, wenn man tiefere Töne erzeugen will, schiebt dagegen die Zunge nach vorn, wenn höhere Töne hervorgebracht werden sollen. Durch die gemeinschaftliche Anwendung dieser Mittel d. h. durch Anwendung eines stärkeren oder schwächeren Druckes beim Ausstoßen der Luft und durch Verengung und Erweiterung des Raumes im Munde, in welchem die Luft mitschwingt, ist man im Stande innerhalb zwei bis drei Octaven Töne von beliebiger Höhe hervorzubringen und rasch zu verändern. Die Grenze für die tiefen Töne ist durch die Größe der Mundhöhle von selbst gegeben, während sich der Umfang des Pfeifregisters nach obenhin durch Uebung eher erweitern läßt. Die mit dem Munde hervorzubringenden Töne liegen etwa zwischen c^2 und c^3 bis d^3.

Zum Schluß bemerke ich noch, daß die Resultate der vorstehenden Untersuchung auch über die Erzeugung der Töne in Labialpfeifen manche Aufklärung versprechen, denn einige hier auffallende und unerklärliche Erscheinungen treten auch bei den von mir untersuchten Tönen auf und dürften auf dieselbe Weise zu erklären sein. Es ist beim Anblasen der Orgelpfeifen wie bei der Entstehung der hier untersuchten Töne wesentlich, daß der Luftstrom gegen eine Kante stößt; die Stärke des Luftstromes hat in beiden Fällen denselben Einfluß. Setze ich eine Orgelpfeife mittelst einer von der obenerwähnten Blechfassungen auf den als Luftreservoir dienenden Glascylinder und blase dieselbe unter verschiedenem Luftdrucke an, so entstehn außer den Normaltönen und den durch Ueberblasen erhaltenen Flageolettönen bei schwächerem Luftdrucke noch mehrere Reihen von Tönen, die den von mir untersuchten Tönen ähnlich sind. Der Abstand der Kante der Aufschnittsöffnung von der Ausflußspalte hat bei den Labialpfeifen einen ähnlichen Einfluß wie die Plattendistanz bei meinem Apparate.

Ich muß mich, um die Grenzen dieser Abhandlung nicht zu überschreiten, mit diesen Andeutungen begnügen und werde bei einer andern Gelegenheit auf diese Erscheinungen genauer eingehn.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf