3. Die Triebkraft für die Tonschwingung in den Labialpfeifen und die Lamellentöne; von Victor Hensen.

(Hierzu Taf. V, Figg. 2–19.)

I. Die Labialpfeife.

Während der *Vorgang* des Tönens in Labialpfeifen sehr genau bekannt ist, sind die Ansichten über die *Entstehung* des Tönens noch wenig entwickelt, widerstreiten sich und treffen, wie im Folgenden nachgewiesen wird, nicht ganz zu.

Nach der Wellenlehre der Gebr. Weber¹⁾ würde sich bei Labialpfeifen der Luftstrom in dem Anblasespalt (Fig. 1, *m*) abwechselnd verdünnen und verdichten, nach Analogie eines periodischen Luftzuges, den sie in den damaligen Oefen (wahrscheinlich eine Zugwirkung des Windes auf die damaligen Schornsteine) beobachteten. Der Luftstrom fließt indessen thatsächlich continuirlich aus dem Spalt, wie eine in den Strom gehaltene Flamme ergiebt. Ich habe gezeigt, dass der Ton der Pfeife sofort erlischt, wenn man den Strom pulsirend macht.²⁾ Ich hatte freilich früher der Tonbewegung *an sich* diese Wirkung beigemessen, neuere Untersuchungen zeigen mir indessen, dass das Auslöschen der tönenden Schwingung nur erfolgt, wenn sich neben den Longitudinalschwingungen noch sogenannte *pulsatorische* Bewegungen in der anblasenden Luftlamelle finden. Die Annahme von Weber ist nicht haltbar.

Nach Helmholtz³⁾ hätten wir anzunehmen, dass die Pfeife durch *Resonanz* einen Ton des Geräusches, das an der Schneide entsteht, so sehr verstärke, dass sich daraus der Ton entwickle. Diese Ansicht vertritt auch Strouhal.⁴⁾ Es kann indessen heute keinem Zweifel unterliegen, dass die Labialpfeife selbsttönend ist wie etwa ein angeblasener Resonator, und nicht nur einen etwa vorhandenen Ton nur verstärkt, wie

1) W. Weber's Werke I. Akustik. 1892.

2) V. Hensen, Zeitschr. f. Biologie 10. p. 32. 1891.

3) H. v. Helmholtz, Lehre von den Tonempfindungen 8. p. 149. 1870.

4) V. Strouhal, Wied. Ann. 5. p. 245. 1878.

ein resonirender Resonator, der vor solchem Schneidengeräusch fast keine Spur von Ton giebt.

Die Erklärung, die jetzt gegeben wird, finde ich am ausführlichsten in Wüllner's Lehrbuch der Experimentalphysik behandelt.¹⁾ Er schreibt (vgl. meine, die seine etwas berichtigende Figur): „Die Bodenplatte der Labialpfeife lässt an der Seitenwand einen Spalt, durch welchen der Luftstrom austritt, um sich an der oberen Lippe l , welche die in der Seitenwand gelassene Mundspalte lm nach oben begrenzt, zu teilen. Durch den teilweise in die Röhre eindringenden Luftstrom wird die in der Röhre zunächst über der Mundspalte befindliche Luft nach oben getrieben und verdichtet. Diese Verdichtung bewirkt, dass die Luft nicht mehr in die Röhre eindringt, sondern nur vorbeistreicht; dadurch dehnt sich die vorher verdichtete Luft wieder aus und kehrt nach unten zurück, worauf dann neue Luft in die Röhre dringt und neue Verdichtung veranlasst. Die Luft erhält also zunächst an der Mundspalte eine hin und her gehende Bewegung.“

Fig. 1.

Gang der Luftmasse in einer Labialpfeife, diese im Durchschnitt gezeichnet. a Führungsweg in den Spalt m , aus dem die primäre Luftlamelle p austritt, und bis zur Schneide l verläuft, se äusserer, si innerer sekundärer Luftstrom, g Gegenstrom.

Es liegt in dieser, auf Selbsttönen fussenden Erklärung schon ein erheblicher Fortschritt, dennoch erweist sie sich als unmöglich. Die Erklärung geht von der Annahme aus, dass zuerst ein Teil der Luft in die Pfeife hineinblase, verdichtet

werde, sich dann wieder rückwärts (warum?) ausdehne und dadurch die Lamelle nach aussen treibe. Danach würde ein

1) A. Wüllner, Lehrbuch der Experimentalphysik 18. p. 879. 1895.

primäres Vorbeiblasen das Tönen überhaupt nicht erzeugen können, denn der Rückfluss wäre erst der Erzeuger des Pendulirens der Lamelle. Gut construirte Labialpfeifen der gewöhnlichen Form lassen die Hauptmasse des Luftstromes aussen an der Schneide vorbei gehen und es hat keine Schwierigkeit, eine Pfeife zum Tönen zu bringen, wenn man den Rand der Schneide noch weiter nach innen stellt. Bei sehr tiefen Pfeifen ist solche Stellung sogar vorteilhaft, umgekehrt aber sehr schädlich.

Bedenklicher in dieser Theorie ist folgendes. Ein unter der Wirkung der Schwerkraft stehendes, schwingendes Pendel kommt infolge der Reibung bald zur Ruhe. So müsste auch die pendulirende Luftlamelle bald genug zur Ruhe kommen, und dann in gedackter Pfeife den Druck dauernd erhöhen, in offener Pfeife einen Luftstrom bewirken. Beidem widerspricht das thatsächliche Verhalten.

Den richtigen Weg zur Erklärung zeigt eine Arbeit von Brockmann.¹⁾ Er untersuchte die tönende Luftbewegung in Labialpfeifen mit Hülfe von Gasflammen, die unter sehr vermindertem Druck brannten. Gelegentlich eines Versuches, die Luft in offener Pfeife dazu zu bringen, aus der Endöffnung weder hinaus noch hinein zu strömen, sagt er: „Blasen wir nämlich einen Luftstrom durch die freie Luft, so strömt von den Seiten Luft gegen diesen Strom, die umgebende Luft wird mit fortgerissen. Beim Anblasen der Pfeife findet dasselbe statt.“ Er geht mit keinem Wort weiter auf diese Anziehungskraft der Luftlamelle ein, und *doch liegt in dieser die Bedingung der Tonerzeugung in Hohlräumen durch ein strömendes Luftband.*

Uebrigens hat schon Thomas Young²⁾ diese Anziehung entdeckt, er geht indessen bei seiner Erklärung des Tönens der Labialpfeifen auch nicht auf die Sache ein.

Es liegt mir ob, nachzuweisen, wie die *dauernde* Tongebung sich erklärt. Ich nenne die Wand der Pfeife, an der die Anblaseöffnung liegt, vordere Wand, den aus dem blasenden Spalt austretenden Luftstrom (Fig. 1, *p*) die primäre Lamelle,

1) Brockmann, Wied. Ann. 31. p. 78. 1887.

2) Th. Young, A course of Lectures on natural Philosophy London 1807, Outlines . . . respecting sound and light, 16 January 1800.

den daran verlaufenden Luftstrom aus dem Innern der Pfeife, *s i*, den secundären inneren Strom, den an der hinteren Wand absteigenden Strom *g* den Gegenstrom.

Die Massenbewegung der Luft habe ich mit Hülfe eines Wachsstockes, der durch Druckschwankungen in der Luft nicht beeinflusst wird, in verschiedenen Labialpfeifen mit übereinstimmendem Erfolg geprüft. Die Kerze brennt die Schneide einer tönenden Pfeife nicht an, ich habe mir indessen eine achtfüssige Pfeife mit metallener, verstellbarer Schneide und metallischem Boden, sowie einem grossen Glasfenster gebaut, um bequemer zu beobachten. Steht die Flamme dicht am Boden, so wird sie durch einen secundären inneren Luftstrom stark nach der Lamelle hin gedrückt, ein bewegter Spiegel zeigt, dass sie dabei auf und ab schwingt, die Neigung nach vorn ist ihre *Mittellage*. Aussen an die blasende Lamelle gehalten, weist die Flamme einen starken und gleichmässigen secundären äusseren Luftstrom nach. In die Lamelle selbst eingetaucht, brennt die Flamme in der Wurzel bei nicht zu starkem Blasen einigermaassen gleichmässig, bei starkem Druck beginnt sie auch hier zu pendeln, wenn sie nicht ausweht. An der Schneide teilt sie sich scheinbar in einen nach aussen und einen nach innen brennenden Teil, ihr Bild im bewegten Spiegel weist nach, dass sie hin und her schwingt, wie ja bekannt. Betrachtet man die Flamme mittels bewegtem Spiegel gerade von vorn, so sieht man natürlich nicht dies Penduliren, es zeigt sich indessen, wenigstens bei den tieferen Pfeifen, der Rand der Flamme gezackt. Dies rührt nicht von Obertönen her, die sich übrigens bei Seitenansicht sehr gut erkennen lassen, sondern es kommt daher, dass die äussere Luft in über 8 mm lange Lamellen hinnin schlägt, gleichsam in Spaltenräume derselben. Die Fig. 1 giebt die auf genannte Weise ermittelten Luftströme an. Bohrt man etwas über der Basis der Schneide ein Loch in die Wand der Pfeife, so wird hier die Flamme kräftig nach innen gezogen, was ich für einen Beweis halte, dass die Luft an der Vorderwand der Pfeife rasch nach oben strömt. Das Bemerkenswerteste ist, dass die Flamme an der hinteren Wand in der Pfeife stark nach abwärts gedrückt wird. Die Flamme kann überall in der Pfeife brennen, ohne den Ton zu stören, wenn sie aber hinten

brennt (bei stehender Pfeife), so erlischt der Ton und kehrt erst nach einigen Secunden, ganz leise beginnend, wieder, wenn man die Flamme, die freilich nicht gar zu klein sein darf, fortnimmt. Die Hitze der Flamme macht die Luft aufsteigend und behindert oder vernichtet den Gegenstrom. Da in diesem Falle der Ton aufhört, ist der Gegenstrom für seine Unterhaltung eine der Bedingungen. Da ein Luftstrom von erheblicher Stärke an der Hinterwand hinab, ebenso ein Strom an der Vorderwand nach oben fliesst, sollte man erwarten, dass auch ein Strom quer von vorn nach hinten fließen muss, ein solcher ist indessen nicht nachzuweisen. Es ist möglich, dass ein solcher Strom durch Wirbel, von denen schon Brockmann spricht, verdeckt wird, es kann aber auch die Umkehr unter so spitzem Winkel erfolgen, dass die Flamme ihn deshalb nicht zeigt.

Nach den angegebenen Thatsachen ist der Vorgang, der das Penduliren der Luftlamelle unterhält, folgender. Es gehe, Wüllner's Annahme entsprechend, zuerst ein Teil der Luftlamelle in eine ungedeckte Pfeife. Man kann dann den Vorgang in vier Stadien teilen. 1. Die Luft aus dem untersten Teil der Pfeife wird durch den secundären, inneren Strom nach oben gerissen. Es entsteht der Lamelle gegenüber eine Luftverdünnung, die die Lamelle nach innen hinein biegt. Die Lamelle bläst dann mit ihrer ganzen Dicke eine grosse Luftmasse nach oben zu in die Pfeife hinein, während sie fortfährt unten am Boden zu evacuiren. 2. Die eingepresste Luftmasse kann nicht aus der oberen Mündung des Rohres hinaus, weil, ehe sie dort anlangt, die unten unter ihr entstandene Druckverminderung sie zwingt umzudrehen. Sie schlägt den Weg längs der Rückwand ein, weil an der vorderen Wand die Lamelle noch voll entgegen bläst und evacuiert. 3. Unter Verspätung langt die Luftmasse des Gegenstromes mit periodischen Beschleunigungen am Boden der Pfeife an. Da die Pfeife, Wüllner's Annahme entsprechend, im Beginn mit Luft überfüllt worden ist, entsteht durch den Gegenstrom in jeder Schwingungsperiode eine über Atmosphärendruck hinausgehende Füllung und damit ein so starker Stromstoss und Druck senkrecht gegen die Lamelle, dass sie über die Schneide hinaus nach aussen, also über die ursprüngliche Gleichgewichts-

lage hinaus gedrängt wird. 4. Die Lamelle evacuirt nun den unteren Teil der Pfeife mächtig und bis zu einer gewissen Höhe hinauf nach aussen hin, doch auch dabei bleibt nicht Zeit genug, um die Entleerung bis an die obere Oeffnung zu treiben, wenigstens nicht bei normal gebauten Pfeifen. Die Lamelle hebt dabei den Ueberdruck am unteren Ende auf und kehrt wieder in die Anfangslage zurück.

Der Vorgang verläuft etwas einfacher, wenn die Lamelle im Anfang an der Schneide vorbei bläst, da aber die Schneide absichtlich etwas stumpf gemacht wird, geht immer ein kleiner Anteil der Lamelle horizontal in die Pfeife hinein. Der Ausgleich der Störungen des Gleichgewichtes kann als Folgeerscheinung nicht gleichzeitig mit diesen Störungen eintreten, sondern muss, weil die Luftmassen eine Strecke zu durchlaufen haben, sich merklich verspäten. Daher erfolgt eine übermässige Evacuierung und übermässige Füllung, das Uebermaass ist erfahrungsmässig und verständlicherweise gross genug, um die Reibung zu compensiren und den schwingenden Zustand zu erhalten.

Die einfache Art, das Penduliren in Perpetuum zu unterhalten, ist gewiss bemerkenswert, dabei bleibt dann noch genug überschüssende Energie in der Luftlamelle, um tönende Molecularschwingungen zu erregen. Wie letztere aus der periodischen Massenbewegung hervorgeht, ist eine andere Frage, der ich nicht direct näher trete. Der Luftstrom in der Pfeifezeugt Transversalschwingungen der Lamelle und diese sind, wie mir scheint, Entwickler der *normal* zu ihnen pendelnden Longitudinalschwingungen — des Tones — in der Pfeife. Rayleigh¹⁾ äussert gelegentlich: die Untersuchung von Tönen, die durch Luftlamellen erzeugt werden, seien für die mathematische Behandlung wegen unserer Unkenntnis über die Art der Wirkung des Windes ungenügend. Insoweit sich diese Aeusserung auf Labialpfeifen bezieht, glaube ich sagen zu können, dass ein Studium des Geschehens in der Lamelle nicht weiter helfen wird. Ich habe den Vorgang analysirt, doch sehe ich mich genötigt mich darauf zu beschränken, weiterhin über das Resultat dieser Arbeit nur die zum Verständnis nötigen

1) Lord Rayleigh, Theorie des Schalles 11. p. 247. 1880.

Befunde anzugeben. Bei diesen Studien traten mir die Erscheinungen, die auftreten, wenn man eine Einlage in die Lamelle legt, als überraschende und unerklärte Verhältnisse lebhaft entgegen. Ich habe den Vorgang klarlegen können und gebe darüber nachfolgende Rechenschaft.

II. Die Lamellentöne.

Strouhal¹⁾ hat die Pfeiftöne untersucht, die beim Hieb einer Gerte in der Luft entstehen. Er glaubt sie auf Reibung zurückführen zu können. Er erklärt, dass er auch den Fall, wenn die Luft tönend an einem festen Körper vorbeistreicht, für ziemlich identisch mit der Tonerzeugung durch Hieb halte, hat indessen den Vorgang nicht weiter untersucht.

Die Mannigfaltigkeit der Klänge und der Tonhöhen, die durch eine feste Einlage in eine Luftlamelle erzeugt werden können, ist sehr gross, es interessirt indessen zunächst die Weise, in welcher dabei diese, im ganzen recht lauten Naturtöne erzeugt werden. Für die Untersuchung habe ich einen in allen Richtungen fein einstellbaren Apparat hergestellt. Seine Beschreibung würde zu weit gehen, statt ihrer biete ich an, den Apparat denen, die ein Interesse daran haben, zur Ansicht zu senden. Es handelt sich um ein Rohr mit zu erweiternder, spaltförmiger, parallelwandiger Oeffnung, über dem beliebige Einlagen, in beliebigen Stellungen und Entfernungen justirt, angebracht werden können.

Wenn man in eine Lamelle von 0,12 bis 2 mm Breite einen Keil oder eine sonstige, nicht vibrirende Fläche einlegt, so entsteht je nach Entfernung von dem Spalt und nach dessen sonstiger Stellung, sowie nach Windstärke ein ganz reiner oder doch von wenig Geräusch begleiteter Klang. Dieser entsteht an oder, genauer gesagt, etwas oberhalb der Schneide. Dabei findet kein Penduliren der Lamelle unterhalb der Schneide statt, wie eine an die Lamelle geführte Flamme mit Sicherheit nachweist. Legt man dünnes Seidenpapier auf die Lamelle unterhalb der Schneide, so erlischt der Ton, legt man das Papier neben die Wand des Keiles, so beginnt es zu vibriren und zu tönen. Wenn man ein in einen Spalt auslaufendes

1) V. Strouhal, l. c.

Rohr mit einer König'schen Gaskapsel vor rotirendem Spiegel verbindet und den Spalt an den Keil anlegt, so sieht man im Spiegel die Klangvibrationen der Flamme. Schiebt man den Spalt bis an die Schneide vor, so hören die Vibrationen auf. Dass sich die umgebende Luft in Molecularschwingungen befindet, kann ein Spaltrohr nicht nachweisen, indessen constatirt dies unser Ohr.

Nach Auffindung des *Ursprungsortes* handelt es sich zunächst um Feststellung der *Entstehungsart* des Klanges. Bläst man mit horizontal liegender Luftlamelle durch die Flamme eines Schnittbrenners, so erhält man bei bestimmten gegenseitigen Lagen heftige Pfeiftöne.¹⁾ Lässt man den Schnitt des Brenners gerade unter der Mündung des Spaltes stehen (Fig. 2 u. 3, Taf. V), so entsteht ein lautes Pfeifen. Die Flamme flackert unvermeidlich etwas hin und her, dementsprechend variiert die Tonhöhe, man hat den Eindruck, als wenn ein Schwein schrie. Der durchblasene Teil der Flamme hat nach aussen einen scharfen Rand, Fig. 2, *Bd*, Taf. V, und zeigt, genauer gesagt, eine blaue Leiste. Dort ist die Stelle der Tonbildung, mit deren Auftreten entsteht, mit deren Verschwinden erlischt der Ton. Wenn der Wind im Gebläse ausgeht, so steigt diese Linie empor, etwa wie der Rand einer sich schliessenden Pultklappe. Die Leiste entspricht der Peripherie der Flamme. Stellt man den Schnitt des Brenners wie in Fig. 4, *Br*, Taf. V, so verschwindet der Ton fast vollständig. Die gelb brennende Flamme breitet sich sowohl dem Luftstrom entgegen bis zum Spalt, als auch jenseits des Schnittes aus, hier sich in knatternde Flammenspitzen auflösend. Ueber dem Schnitt entwickelt sich eine orangene Feuerleiste *o* in blau brennendem Grunde, etwas darunter kann eine rote, hufeisenförmige Linie auftreten, in der man glühende Kohlepartikel rotiren sieht. Schiebt man den Brenner noch weiter nach aussen (Fig. 5, Taf. V), so entwickelt sich an der dem Spalt zugekehrten Seite die blaue Leiste *Bd*, und die Flamme wird wieder laut tönend. Indessen knattern jetzt die Flammenzacken am Aussenrand so

1) In Tyndall's Vorlesungen: Der Schall, p. 300. Braunschweig 1869, findet sich in einer Anmerkung erwähnt, dass Flammen oder unentzündete Gasstrahlen, die sich aneinander „reiben“, Klänge geben können.

heftig, dass dadurch der Ton etwas verdeckt wird. Das Knattern rührt daher, dass die Lamelle in 7 bis 10 mm Abstand von dem Spalt stark auseinander zu strahlen beginnt. Dabei erweist sich die strömende Luft als verdünnt und daher bricht Aussenluft in die Lamelle hinein.

Man erhält auch Töne, wenn man das nicht entzündete Gas gegen die Lamelle strömen lässt, oder wenn man aus einem zweiten Spaltrohr senkrecht gegen die Lamelle Luft bläst. Nach dem Ort, wo die Lamelle getroffen wird, sind die Töne höher oder tiefer. Sie traten bei meinen Versuchen nicht sehr laut hervor, aber ich habe mich auch nicht darum bemüht, sie laut zu machen. Bläst man die zweite Luftlamelle auf die Fläche des Keiles, während die erste gegen dessen Schneide strömt, so erhält man neue tiefere Töne, kommt man der Schneide sehr nahe, so verstärkt sich der vorhandene Ton.

Dementsprechend lag die Annahme nahe, dass die Lamelle durch eine Art Schnürleiste im freien Erguss behindert werde. Daher werde sich die Luft vor der Leiste so lange anstauen, bis deren Widerstand überwunden, bez. die Leiste zersprengt und mit fortgerissen werde. Die angehäuften und gepressten Luft schiesse dann vorwärts und jetzt bilde sich die Leiste von neuem. So entstehe, ähnlich wie an den Stimmbändern, die Periodicität in dem gleichmässigen Fluss der Luft. In dieser Richtung war also die Untersuchung an der Einlage weiter zu führen.

Wird die Einlage (Fig. 6, Taf. V) horizontal gelegt und mit Wasser gefüllt, so hebt sich eine Leiste des Wassers in einiger Entfernung von der scharfen Kante der Einlage in die Höhe, aber die ansteigende Fläche bleibt glatt und ruhig. Weiter fort, auf dem Gipfel des Hügels, entstehen Kräuselungen, die von Tonschwingungen der Luft herrühren müssen. Die feine Linie auf der Fig. 6, Taf. V deutet das Verhalten der Wasseroberfläche, im Durchschnitt gesehen, an. Weiterhin entwickeln sich auf der bewegten Fläche des Wassers 1 bis 4 Wirbel, die namentlich klar hervortreten, wenn *Lycopodium* auf die Fläche gestreut wird. Es zeigt sich, dass eine Reibung an der Fläche der Einlage ohne Bedeutung ist, da der Ton in gleicher Weise auftritt wenn das Wasser fehlt.

Wenn man die Kante der Flamme eines Schnittbrenners von vorne her in eine bestimmte Entfernung von der tönenden Lamelle bringt, so erhält man, wie der Assistent des Institutes, Hr. Dr. Deetjen zuerst bemerkte, das Bild Fig. 7, Taf. V. Es bildet sich also ein Höcker oder eine Leiste aus, die scheinbar ruhig stehen bleibt, solange die Lamelle tönt. Die Leiste kann ein wenig wandern, doch steht sie in der Regel hart über der Schneide der Einlage. Dieser Vorsprung der Flamme kann nicht die gesuchte Schnürleiste sein, denn das Gas wird hier *herangezogen*, kann also nicht drücken. Die Leiste kann nur verstanden werden als negativer Teil einer in loco zuerst entstehender Welle, die senkrecht gegen die Keilwand anschwingt. Die Vibration geht zu rasch, als dass das Auge eine Bewegung sehen könnte und die positive Welle wird in der leuchtenden Gasmasse unsichtbar.

Zur Analyse der Bildung wurde eine mit total reflectirendem Prisma armirte Stimmgabel von 155,5 Schwingungen benutzt. Es gelang den Lamellenton mit genügender Annäherung auf 311 Schwingungen einzustellen und jetzt ergab sich das in Fig. 8, Taf. V dargestellte Bild. Die Stimmgabel schwingt parallel mit der laufenden Welle auf und ab und bringt sie dadurch scheinbar zum Stillstand, nach stroboskopischem Princip. Ist der Lamellenton zu hoch, so läuft die Welle nach der Flammenspitze zu, ist er zu niedrig, läuft er umgekehrt.¹⁾ Die erste Welle entsteht dort, wo die er-

1) Für eine normal gegen die Pendelbewegung des Molecúles in einer Welle schwingende Stimmgabel habe ich früher (E. du Bois, Archiv für Physiologie p. 155. 1879) die Vorgänge und das Ansehen der schwingenden Flammen beschrieben. Wenn die Stimmgabel parallel mit dem Fortgang der Wellen schwingt, erläutert sich der Vorgang aus der Fig. 9, Taf. V. Sei *A* das beobachtende Auge und seien die Punkte 1, 2, 3 auf den Wellengipfeln der Doppelt octave des Stimmgabeltons gelegen, liege in der Mitte zwischen *A* und *B* der Spiegel der schwingenden Stimmgabel, der in den Lagen des Anfangs und Endes einer vollen Schwingung, sowie bei $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ und bei Vollendung der halben Schwingung gezeichnet ist. Die Linien seien die Richtungsstrahlen für die Wellenpunkte gleicher Phase und für das Auge. Das Auge projectirt bei Beginn und Vollendung der Schwingung den Punkt 1 nach *B*, ebenso bei $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ Schwingung den Punkt 2 nach *B*, endlich nach $\frac{1}{2}$ Schwingung den Punkt 3 nach *B*. Der Gipfel bleibt also für das Auge ruhig bei *B* stehen. Die gleiche Construction kann für jeden anderen Punkt

wähnte Leiste sich zeigt. Die Wellenlänge des Tones beträgt nahe 4 mm. Es handelt sich hier also um *Massenschwingungen* — relative Hin- und Herschwingungen — innerhalb der fließenden Luftmasse. *Diese sind hier, wie auch wohl in vielen sonstigen Fällen, Erzeuger der tönenden Molecularschwingungen der Luft.* Ich denke mir die Erregung nach Analogie der Vorgänge auf dem Billard. Trifft eine Elfenbeinkugel tangierend eine zweite, so fliegt diese senkrecht gegen die Bewegungsrichtung der ersten fort, so auch dürften die durch die passirenden Massenswellen getroffenen Molecüle der nebenliegenden Luft gestossen werden und dann elastisch schwingen. Die Flamme zeigt tatsächlich dies Verhalten, und kann nicht selbsttönend werden.

Diese Versuche führen noch immer nicht auf die Entstehungsgeschichte der Periodicität des Lamellenstromes. Eine Luftlamelle, die auf eine feste Wand prallt, prallt nicht etwa von dieser unter irgend einem Winkel zurück, *sondern läuft fernerhin an dieser Wand entlang* und weiter in Richtung der Ebene dieser Wand. Dies zeigt sich, sobald man mit einem Licht die Richtung des Luftstromes aufsucht. An der schrägen Fläche, Fig. 9A, Taf. V geht z. B. die Luft sowohl nach oben, wie nach unten. Bildet man die Lamelle aus Kohlensäure, trockenem Wasserdampf, heisser Luft oder Chloroform (dessen Dampf mit Jod gefärbt werden kann), so sieht man direct die Spaltung der Lamelle und ihren weiteren Verlauf. Uebrigens genügt ein Versuch mit einer Gasflamme, nur dass hier der Abstieg durch die Hitze des Gases etwas behindert wird. *Die Luftlamelle verhält sich also wie die Lamelle einer incompressiblen Flüssigkeit.* Die Mittelebenen der Lamelle haben eine mehrfach grössere Geschwindigkeit, wie die Seitenlamellen, innerhalb wenigstens der hier in Betracht kommenden Entfernungen. Stösst die Lamelle auf eine schräge Ebene, so müssen die Seitenlamellen immer nach ihrer Seite hin umbiegen, selbst wenn sie dabei ihre Stromesrichtung fast völlig umkehren müssten.

der Welle ausgeführt werden. Jede mit dem Stimmgabelton streng harmonische Wellenbewegung kommt zum scheinbaren Stillstand, einerlei ob die Welle steht oder geht. Der Abstand der Gipfel hängt von der Elongation der Stimmgabel ab. Die Länge der Wellen ergibt sich aus der Länge einer Einlage, die hinter den Wellen liegt und an der man zählen kann, wie viele Wellen sie bedecken.

Stosse eine Lamelle mit $\frac{2}{3}$ ihrer Dicke auf die Fläche einer Einlage, gehe $\frac{1}{3}$ an der Kante der Einlage vorbei, so geht ein Teil der aufprallenden Lamelle als „Transversallamelle“ in die Masse der seitlich vorbei passirenden Luft („Ortholamelle“) hinein und behindert deren Abfluss, bewirkt periodische Bewegungen. Dass dem so ist, lässt sich demonstrieren. Fig. 11, Taf. V stellt einen Doppelspalt vor, von im ganzen 0,5 mm Dicke, er ist so eingerichtet, dass durch den einen CO_2 , durch den anderen Luft geblasen werden kann. Die Einlage *E* ist flach und so gestellt, dass bei bezüglichem Druck weder das eine noch das andere Gas *für sich allein* tönt und dass die CO_2 nur die Fläche trifft, die Luft frei an der Kante vorbeistreicht. Beide Gase zusammen geben einen Ton. Es geht hier eine transversale Kohlensäurelamelle in den Luftstrom hinein; sie ändert sofort ihr, durch totale Reflexion kenntliches Aussehen, sobald der Ton entsteht. Man sieht dann die beiden divergenten Contouren, die die Abbildung zeigt, während vorher die Lamelle sich so zeigte, wie sie rechts von der Einlage gezeichnet ist. Der obere Contour ist die Grenzlinie der stärksten Verdrängung; bei dieser Stellung kann der Wellenbergklumpen der Luft frei entweichen. Der untere Contour giebt die Stellung, durch die der Luft der freie Abfluss am stärksten verlegt ist.

Endlich entsteht die Frage: schwingt die Transversallamelle hin und her, oder wird sie periodisch fortgeweht? Eine directe Antwort würde vielleicht der Schlierenapparat geben, den ich nicht habe; indessen gelingt es auch in anderer Weise, die Frage zu lösen. Es erschien notwendig, beide Lamellen sichtbar zu machen, also gefärbte Gase zu verwenden. Ganz einwandfrei sind die folgenden Versuche wohl nicht, weil Hitze und Verbrennung nicht vermieden wurden, doch sehe ich davon keinen Nachteil. Früher wurde, wie erinnerlich, die Gasflamme mit Luft als *O*-Lamelle durchblasen, man kann aber das Verfahren umkehren, indem man den Luftstrom genügend schwächt. Die Gasflamme wird zur *O*-Lamelle und tönt dann recht gut in beliebiger Tonhöhe, hat aber arge Launen, die ich ihr leider noch nicht ganz ablehren konnte. Die Analyse durch Stimmgabel der sehr ausgezeichneten Schwingungsfiguren war wegen der zu raschen Schwankungen der Tonhöhe nicht befriedigend

zu machen. Die Flamme ist gelb, bez. blau, die Luft sieht man *vor* der Flamme als farblose Lamelle recht gut, wohl weil der Spalt etwas warm wird, in den blauen Teilen der Flamme glüht, wie ich glaube, der Stickstoff mit *grünblauer* Farbe, im gelben Teil zeigt die *T*-Lamelle keine Farbe.

Es ist paradox, dass man das Gas ohne Störung der Flamme *durchblasen* kann, während doch, wie gezeigt (Fig. 2 bis 5, Taf. V), das Gas an einer Luftlamelle hinkriecht, als wenn diese ein fester Körper wäre. Figg. 10 A u. 10 B geben die Photographie des Verhaltens beim Durchblasen. Die Luftlamelle geht unmittelbar über dem Loch eines Rundbrenners für sensitive Flamme quer durch den Gasstrom, darüber steht die Flamme in fast unveränderter Höhe. Eine Vergleichung mit Fig. 12, Taf. V, wo höher oben die Flamme halb durchblasen ist und Fig. 18 B giebt die Erklärung. Die Geschwindigkeit des Gases und der Luft haben sich so combinirt, dass das Gas in der Diagonale durchgegangen ist, man sieht, dass die durchblasene Flamme dementsprechend *verlegt* worden ist. Die Basis der mit Luft durchblasenen Flamme hat stärker auf die photographische Platte gewirkt, hier leuchtete der mitgerissene Stickstoff. Die Lamelle kann also von dem Gas durchsetzt werden und dabei wird Luft mit fortgerissen. Die Flamme tönt nicht, falls sie ganz durchschnitten worden ist. Mit Luftlamelle kann man den Abstand zwischen Brenner und Flamme nicht sehr viel grösser machen, dagegen wird der Abstand bei Verwendung eines CO_2 -Stromes sehr gross (Fig. 10 B, Taf. V). Hier fehlt der Stickstoffrand, die Versetzung der Flamme ist recht stark, namentlich an der langsam fliessenden Flammenperipherie. Die N-Linie fehlt, nur liegt vorn auf der Flamme der blaugrüne, photographisch stark wirkende N-Streifen, der oberen *secundären* Luftlamelle angehörig.

Weiter hinauf angeblasen giebt die Flamme das Bild Fig. 12, Taf. V, wobei sie hoch und rein tönt. Die *T*-Lamelle kann die grössere Geschwindigkeit der mittleren Flammteile nicht überwinden, hier biegt sich daher die Lamelle um. Der Spalt ist von glühendem N umrandet. Das am freien Lauf gehinderte Gas staut sich unter der *T*-Lamelle an und drängt diese in periodischer Bewegung nach oben und zurück. Die Tonbewegung

entsteht durch Verdickung und Verdünnung der *restirenden* *Flammenbrücke*. Man sieht einen dunklen Raum, weil die Rinde der Flamme nur sehr schwach leuchtet und durch den Luftstrom (der freilich warm ist, da man ihn sehen kann) zu stark abgekühlt wird. Entsteht ein Klang, d. h. Knotenpunkte der Obertöne in der schwingenden *T*-Lamelle, so füllt sich der Spaltraum mit schwach leuchtendem Gas, wie Fig. 13, zeigt.

Weiter oben, wenn die Flamme beginnt gelb zu brennen, entsteht ein stehendes Bild, Fig. 14, das den Vorgang am besten erkennen lässt. Man sieht die untere *N*-Grenze der Lamelle schräg in die Gasflamme hinein gehen. Unter dieser Grenze wulstet sich die Gasflamme und geht mit einer Zunge schräg aus der Bahn der Hauptflamme hinaus. Die zweite *N*-Grenze liegt aussen auf der Flamme, parallel mit dieser, also fast vertical. Sie ist weniger gut sichtbar, weil hier die Hitze nur eben genügt, den *N* glühend zu machen. Wenn man, etwa durch Vermehrung des Luftdruckes, die die Obertöne vermehrt, so sieht man, dass die innere *N*-Grenze zu zittern beginnt und sich verdoppelt, das Gleiche sieht man dann auch an der äusseren *N*-Grenze und überzeugt sich dadurch völlig sicher von deren Vorhandensein, sowie von deren Beteiligung an der Schwingung. Der Vorgang ist also der, dass das Gas sich unter der *T*-Lamelle anhäuft, weil es diese nicht genügend durchdringen kann. Mit dem Anwachsen dieser Anhäufung wächst der Druck im Gas und drängt die Lamelle seitwärts fort. Dabei entweicht die im Wulst befindliche Gasmasse als positive Massenwelle und jetzt kehrt die vertical umgebogene *T*-Lamelle wieder in die ursprüngliche Lage zurück. Die Fig. 15, Taf. V giebt das Bild der tönenden Flamme, wenn sie nahe der Spitze angeblasen wird. Der *N* der *T*-Lamelle ist nicht mehr sichtbar, jedoch lässt sich das Bild deuten. Die peripherischen Teile der Flamme strömen so langsam, dass sie ganz durchblasen werden und sich daher unter der *T*-Lamelle bei *W* anhäufen, zugleich als kurze, in der Mitte hinter der Flamme zusammenfliessende Zunge *Z* vorspringend. Der Kern der Flamme scheint unverändert durch die Lamelle hindurch zu gehen und brennt als gerade aufsteigender Flammen-*teil F* (Fig. 15) weiter. Die Stimmgabelanalyse ergibt an

ihm nur geringe Einbuchtungen. Zwischen diesen beiden Flammenteilen findet eine Vibration statt, hier leuchtet die Flamme bedeutend weniger intensiv. Die Grenze, wo die Luftlamelle sich ganz im Gas verliert, scheint durch die schräge Linie *G* angedeutet zu werden. Je mehr die *T*-Lamelle dem Gasstrom parallel läuft, desto rascher wird ihre Bewegung sein, daraus erklärt sich der schräge Verlauf der Grenze. Der Wulst gegenüber dem Spalt *B*, der nur bei ganz bestimmten Stellungen eintritt, erscheint sehr auffallend. Er entspricht der Breite der halben Welle, denn wenn Obertöne entstehen, treten, wie die Stimmgabelanalyse zeigt, *innerhalb* dieses Wulstes entsprechende kleinere Vorbuchtungen auf. Der Wulst findet seine Erklärung in der Fig. 18C, Taf. V, Flamme mit CO_2 durchblasen. Man sieht hier, dass der Kern der Flamme unter ziemlich starker Verschiebung den CO_2 -Strom durchsetzt, dass aber der langsamer fließende Mantel der Flamme von der Lamelle abprallt und sich zunächst unter ihr aufwulstet. Dieselbe Sache bewirkt den vom Flammenmantel gebildeten Vorsprung gegen den *T*-Lamellenstrom in Fig. 15, der bei CO_2 -Strom sogar noch etwas stärker werden kann. Die Vorsprünge oben und unten entsprechen den Schwingungszeiten $\pi/2$ und $3\pi/2$. Dabei bleibt noch unklar, wie sich die *T*-Lamelle in der Luft *vor der Flamme* verhält. Sie wird zwar etwas durch die unsichtbare secundäre äussere *O*-Lamelle gehoben werden können, aber sicher nur wenig. Aufschluss giebt das Verhalten der Gasflamme zu einer sehr langsam fließenden Wasserlamelle aus hohem Spalt von 0,05 mm Dicke. Das Gas durchsetzt die Lamelle nicht, punzt sie aber erheblich in die Höhe. Von obenher sieht man ein erhabenes Dreieck *mit scharf abwärts gebogenen Kanten*. Die Fläche dieses Dreiecks liegt allerdings parallel den ungestört fließenden Seitenteilen der Lamelle, aber das muss auf der starken Oberflächenspannung des Wassers beruhen und dürfte für die Luftlamelle nicht zutreffen. Also wenn sich Gas unter der *T*-Lamelle anhäuft, ist es für diese nicht gleichgültig, sondern sie wird durch das angehäuften Gas mehr oder weniger scharf *gehoben*.

Dass eine schwingende Transversallamelle und nicht Reibung die Bedingung des Tönens ist, kann nach allen diesen Thatsachen keinem Zweifel unterliegen. Wenn man die Ein-

lage (Fig. 6, Taf. V) mit einem Rand von feinem Seidenpapier versieht, so bringt die dagegen strömende *O*-Lamelle unter Umständen diesen Rand zum Schwingen und Tönen. Dabei wird also die *T*-Lamelle durch einen festen, steifen und wenig elastischen Körper gebildet. Kann eine Luftlamelle gleiche Eigenschaften annehmen? Das scheint nicht möglich, obgleich die Lamelle im Munde der Labialpfeife schwingt. Das Verhalten dürfte folgendes sein. Im Maximum ihrer Elongation nach oben liegt die *T*-Lamelle fast parallel der *O*-Lamelle, letztere ist so verdichtet, dass sie den Druck und Stoss der *T*-Lamelle fast ganz überwindet. Da dann der *O*-Lamelle freier Abfluss gewonnen ist, vermindert sich die Dichte derselben und die *T*-Lamelle gewinnt die Ueberhand und nähert sich mehr und mehr der horizontalen Richtung, kann diese aber nicht ganz erreichen, weil die Stauung in der *O*-Lamelle entsprechend wieder anwächst und schliesslich den Gang der *T*-Lamelle zum Stillstand bringt, weiterhin sie wieder in die Ausgangslage zurücktreibt. Die *T*-Lamelle drückt also fortwährend, wenn auch mit wechselnder Kraft, gegen die *O*-Lamelle. Letztere wechselt gleichfalls fortwährend den Druck, den sie gegen die *T*-Lamelle ausübt, und zwar drückt sie am stärksten, wenn die *T*-Lamelle am schwächsten drückt und umgekehrt, daher muss die Vibration erfolgen. Weshalb sich keine Gleichgewichtslage herstellt, ist nicht ersichtlich. Ich vermute, dass sich die, bei der Labialpfeife besprochene innere, secundäre Lamelle unter der *T*-Lamelle in solcher Gleichgewichtsstellung mehr und mehr anhäufen würde, womit die Ruhestellung verhindert wäre. Vielleicht macht überhaupt die Ungleichheit der Geschwindigkeiten in den Lamellenebenen die Gleichgewichtslage unmöglich.

Damit wäre die Entstehungsgeschichte der Lamellentöne gegeben. Es besteht indessen noch eine Schwierigkeit bezüglich der Tonentstehung bei ganz scharfer Schneide (Fig. 16, Taf. V). Der akustische Eindruck ist dabei übrigens unverändert. Die Transversallamelle kommt in solchem Fall von beiden Seiten des Keiles herunter und beide Lamellen müssen in der Mittellinie aneinander stossen, sodass sie kaum scheinen schwingen zu können. Ich sehe sie nicht, sondern sehe mit CO_2 nur eine bilaterale Verdickung unter der Scheide und

dann an der Seite des Keiles die beiden in der Figur gezeichneten Linien. Mein Doppelspalt war etwas unvollkommen eingerichtet, sodass ich der Sache nicht näher getreten bin. Falls die Frage Interesse erwecken sollte, wird sie voraussichtlich leicht mit dem Schlierenapparat zu erledigen sein.

Es sollen jetzt nur noch einige Thatsachen über die Tongebung der Lamelle mitgeteilt werden. Der Tonbereich umfasst wahrscheinlich alle hörbaren Töne. Die ganz hohen Töne entstehen, wenn man den Spalt möglichst eng (0,12 mm) macht, die Einlage bis auf 0,66 mm nähert und sehr hohen Druck, über 100 mm H_2O giebt. Für die tiefsten Töne macht man den Spalt 2 mm weit, entfernt die Einlage über 17 mm vom Spalt und ermässigt den Winddruck auf 1,5 mm. Dabei werden die sehr tiefen Töne schon etwas stossend, zugleich sehr leise. Die Tonhöhe wird also durch mehrere Factoren beeinflusst. Strouhal hatte bereits bei den Hiebversuchen gefunden, dass sich die Tonhöhen zu einander verhalten, wie die zugehörigen, erzeugenden Geschwindigkeiten eines Stabes in der Luft. Er findet jedoch, dass die Tonhöhen um etwa 1 Proc. rascher zu steigen scheinen, als die Geschwindigkeiten. Ich habe gegen 20 Bestimmungen gemacht, von 3520 Schwingungen mit 46,6 m Geschwindigkeit bis herab zu 466 Schwingungen mit 5,3 m Geschwindigkeit und komme dabei zu dem gleichen Resultate. Die Tonhöhen stiegen im Mittel um 1,66 Proc. rascher als die Geschwindigkeiten. Im Mittel muss die Geschwindigkeit um 10,8 mm verändert werden, um eine Schwingung mehr oder weniger zu erhalten, und zwar um 12 mm für die höheren, um 9,5 mm für die tieferen Tonlagen.

Den Einfluss des Schneidenabstandes von dem Spalt zu der Tonhöhe möge nachfolgende kleine Tabelle erläutern.

Keileinlage.

Tonhöhe	Schneiden- abstand mm	Tonhöhe	Schneiden- abstand mm	Tonhöhe	Schneiden- abstand mm
4096	2,2	1534	6,59	512	15,05
3068	2,6	1024	10,68	384	18,72
2043	3,89	767	11,75	256	24,57

Es kamen mittlerer Druck und Spaltweite zur Verwendung, doch habe ich keine genauen Maasse notirt. Die Tabelle soll nur einen allgemeinen Einblick in das Verhalten gewähren, je nach Druck und Spaltweite ändern sich die Zahlen. Ueberhaupt wird es sehr schwer sein, ganz genaue Zahlen zu erhalten, weil kleine Verschiebungen der Schneide aus der Mittelebene wie kleine Druckschwankungen schon erheblichen Einfluss auf die Tonhöhe gewinnen.

Sehr kleine Veränderungen des Abstandes der Einlage geben schon beträchtliche Unterschiede der Tonhöhen. Zwischen 1024 und 512 Schwingungen genügt, eine Verschiebung von 0,0086 mm um die Tonhöhe um eine Schwingung zu verändern, zwischen 512 und 256 wird eine Verschiebung von 0,037 mm erforderlich. Die Tonhöhen ändern sich nicht einfach der Abnahme der Geschwindigkeit in der Lamelle proportional, denn diese ändert sich in den mittleren Ebenen in einer Strecke bis 8 mm Entfernung nicht, dagegen nimmt auf dieser Strecke die *Dichtigkeit der Luft nicht unerheblich ab*, was gleichfalls für die Tonhöhe in Rechnung zu ziehen ist.

Die Richtung der O-Lamelle wird ziemlich genau festgestellt durch ein Lineal, das zwischen den Wangen des Spaltes festgeklemmt wird, nach dessen Richtung wird dann die Führung der Einlage gestellt. Eine entfernte Gasflamme zeigt an, dass die Lamelle wirklich in Richtung des Lineales verläuft. Hinderlich für die genaue Feststellung der Tonhöhe sind kleine Druckschwankungen je nach Füllung des Balges, ich habe sie bisher nicht völlig beseitigen können.

Bei der Hebung der Einlage entstehen vielerlei *Klänge*: weiche Flötentöne, weicher Pfiff, harter Pfiff, Doppelklänge und Windtöne; daneben oft auch Brausen, Blasen und rasche oder langsame Interferenzen bez. Rauigkeiten. Je nach Druck und Spaltweite gestaltet sich dies verschieden. Bei starkem Druck ändert sich zwar die Tonhöhe, aber der Klang nur wenig und selbst gar nicht. Als Beispiel solcher Klangveränderung sei erwähnt, dass bei Druck von 60 mm Wasser, Spaltweite 0,2 mm mit Keileinlage beim Schneidenabstand von 1,7—20,2 mm 8 Klänge, bei Einlage eines geknickten Keiles (Fig. 11), 120 mm Druck, 0,4 mm Spaltweite, Entfernung von 2,23—25 mm 7 Klänge entstehen. Dem Klangwechsel geht

häufig ein Rauwerden des Tones voraus, dann setzt sehr plötzlich mehr oder weniger stark ein harmonischer Oberton Octave oder Duodecime, ein, während der Grundton laut oder leise mit der Entfernung weiter sinkt. Der Ort solchen Wechsels ist insofern inconstant, als er sich im Sinne der Bewegungsrichtung verschiebt. Als die Einlage z. B. continuirlich vom Spalt entfernt wurde, trat ein erster Klangwechsel in 2,8 mm, bei Annäherung erst bei 2,32 mm Entfernung ein. Die einmal vorhandene Bewegungsform wird, unabhängig von der Tonhöhe, möglichst lange beibehalten.

Bewegung der Einlage *quer* durch die Lamelle führt gleichfalls zu Klangwechsel und Veränderung der Tonhöhe, namentlich bei schwachem Druck. Es waren z. B. Druck 12 mm, Spaltweite 0,4 mm, Abstand der Keilschneide vom Spalt 1,92 mm. Beginn des Klanges etwas vor 0 mm von dort bis 0,01 mm: *cis''*, 0,01—0,27 und mit Rauigkeit bis 0,37 mm: *cis'*, von dort bis 0,78 mm: *fis*, dann *g* mit Schwebungen bis 1,31 mm, dann *fis* bis 1,35 mm, endlich *cis'* bis 1,37 mm, zwischen *fis* und *g* finden sich Uebergänge, sodass hier die Abgrenzung etwas willkürlich ist. Wenn man die Bewegung dann umkehrt, so erhält man zunächst auch an dieser Seite *cis''* und zwar bei 1,62 mm, dieser Ton ist übrigens sehr leise. Es erhält sich also in diesem Falle einmal vorhandene Tonhöhe und Klang länger, als der Lage entspricht, was die Bestimmung des Ortes erschwert.

Bei *cis''* wird die Lamelle nur tangirend gestreift, es macht den Eindruck, als wenn die ja nicht absolut scharfe Schneide als *Fläche* wirke und so eine Transversallamelle in die mitgerissene Luft entsende. Sobald der Ton entsteht, trübt sich indessen auch die benachbarte, sonst glasklare Kohlensäurelamelle. Ich hatte erwartet, dass bei excentrischer Lage des Keiles seine beiden Seiten verschieden hohe Töne geben würden, allein der geknickte Keil ergiebt keine bezüglichlichen Unterschiede gegen den doppelseitig tönenden Keil, sodass die Geschwindigkeiten an den beiden Keilflächen sich irgendwie ausgleichen dürften.

Der Ton *cis''* ist *stark sensitiv*. Ein leises Knipsen mit den Finger macht ihn sofort in *cis'* — um bestimmte Tonhöhen zu nennen — umschlagend. Die Erfahrung ist wohl

für Töne neu und bildet eine bemerkenswerte, durch Luftstoss auf die Lamelle und aus deren Beharrungsvermögen erklärliche, Parallele zu den sensitiven Flammen, nur dass jene kein Beharrungsvermögen zu besitzen scheinen.

Ich möchte die Ursache des Klanges in besonderen Schwingungsformen der Transversallamelle suchen. Zwei senkrecht aufeinander blasende Luftlamellen geben mit dieselbe Art von Klang bei den verschiedensten Tönhöhen. Druck und Geschwindigkeit mögen beliebig und unabhängig verändert werden, der Ton bekommt Rauigkeiten, aber keine Klangänderung. Die Leuchtgasflamme (am besten Rundbrenner) giebt Klangwechsel unter verändertem Aussehen und meistens unter Verbreiterung der tönenden Flammenlücke, vgl. Figg. 12 und 13, Taf. V. Zur Erklärung des Vorganges müsste wohl die Structur der Lamelle herbeigezogen werden, weshalb ich auf seine Verfolgung verzichte.

Die Form der Einlage wurde mannigfach modificirt, vgl. Fig. 19, ohne dass Besonderes dabei zur Beobachtung kam. Nimmt man die Einlage breit, so kann an den beiden Kanten ein verschiedener Ton entstehen. Dies war z. B. der Fall in Fig. 17, Taf. V, wo der CO_2 -Strom an beiden Kanten tönte, tiefer an der rechtwinkeligen Kante. Im ganzen ist die Neigung, derartiges Doppeltönen zu erzeugen, nicht gross. Nimmt man eine elastische Einlage und kommt diese zum Schwingen, so entstehen Aeolsharfentöne. An einer gerundeten Kante läuft die sich teilende Lamelle in der Art hin, dass sie sich einem Abschnitte des Kreissegmentes anschliesst, dann aber horizontal abstrahlt.

Die Spaltweite habe ich nur wenig über 2 mm bringen dürfen, wenn die Lamelle tonbildend sein sollte. Dies ist auffallend, weil doch der Wind an Einlagen identisch mit gewissen Lamellenklängen sich anhörende Töne giebt. Dies hindert vorläufig daran, die Windtöne mit den Lamellentönen gleich zu setzen.

Die Assistenten des Institutes, Dr. Klein und Dr. Deetjen, haben mir bei den Untersuchungen ausgezeichnet bereitwillig Hülfe geleistet.

Erklärung der Figuren zu Tafel V.

Fig. 2. Schreiende Flamme von oben gesehen. *Spltr* Spaltrohr, *Br* Stellung des Schnittbrenners unter der Spaltöffnung, *G* gelbbrennende Seitenteile der Flamme im Durchschnitt gesehen, *Bd* blau brennender, tönender Rand der Flamme.

Fig. 3. Dieselbe Flamme von vorn gesehen. Das blau brennende, schreiende Band weiss gezeichnet, daneben die gelb brennenden Seitenteile, die sich in zierlicher Weise winden, dem Luftzuge folgend, ohne doch mit an der Tonbildung beteiligt zu sein.

Fig. 4. Flamme von oben, kaum tönend. *Br* Stellung des Schnittbrenners, von der aus sich die Flamme sowohl dem Luftstrome entgegen nach dem Spalte, als auch mit dem Luftstrome ausbreitet. Erst die Zacken dringen in den Luftstrom ein. *G* gelber Seitenteil, *o* orange Feuerlinie, darunter eine rote Feuerlinie mit glühenden und kreisenden Kohlepartikeln.

Fig. 5. Schreiende Flamme von oben. *Br* Stellung des Brennerschnittes, *Bd* tönendes Band, blau brennend. Die Zacken, gelb brennend, dringen knatternd in die Luftlamelle ein.

Fig. 6. Mit Wasser gefüllte Einlage in die Luftlamelle, die in Richtung des Pfeiles bläst. Dicht an der Schneide ist die Wasseroberfläche glatt, weiterhin entstehen die Wasserbewegungen, die die erste Welle verursacht. (Die Welle liegt an der hinteren Seite der Lamelle weiter von der Schneide entfernt, als an der vorderen Seite.)

Fig. 7. Spalt *A* entsendet die Luftlamelle, die an der Einlage *B* zum Tönen kommt. Die Flamme des Schnittbrenners *S* bildet bei *k* einen Flammenhöcker und wird im ganzen zu der Lamelle hingezogen.

Fig. 8. Stimmgabelanalyse derselben Flamme, die eine Octave höher als die Gabel tönt. Der Höcker *k* erweist sich als die erste Welle, der noch drei andere Massenwellen folgen. Das Spaltrohr im Durchschnitt gezeichnet, dessen optische Verbreiterung daher nicht gezeichnet.

Fig. 9. Construction der optischen Wirkung der parallel mit dem Luftstrom schwingenden Gabel. *A* das Auge, 1, 2,

3 die Welle, $0,1/4$, $1/2$ die Stellungen des schwingenden Spiegels, *B* die Projection der Welle.

Fig. 10. Nicht tönende, durchblasene Flamme. Fig. 10 A. Gasflamme, durch eine Luftlamelle aus dem rechts stehenden Spalt *Sp* mit Luft unterblasen. Der Flammenrand über dem Luftstrom stark grünblau leuchtend von glühendem Stickstoff. Die Flamme seitlich vom Lochbrenner verschoben. Fig. 10 B. Dieselbe Flamme von einem Kohlensäurestrom durchblasen. Der Abstand daher sehr gross, der unterblasene Rand nicht glühend, dagegen die Vorderfläche der Flamme von dem secundären Luftstrom aus mit einer Lage von N belegt, die unten am dicksten ist. Sie liegt innerhalb der äusseren Mantelschicht der Flamme.

Fig. 11. *Dsp* Doppelspalt, *E* die Einlage, CO_2 -Kohlensäurestrom, aus dem anderen Spalt kommt ein Luftstrom. Die Transversallamelle tönt auf der rechten Seite, auf der linken tönt sie nicht. Schwingende Kohlensäurelamelle. *Dsp* Doppelspalt, links CO_2 , rechts Luft blasend, *E* die Einlage. Links nicht schwingende, rechts schwingende *T*-Lamelle.

Fig. 12. Tönende Flamme. *Sp* Spaltrohr, davor der Einschnitt in die Flamme, rings von glühendem N ausgekleidet.

Fig. 13. Tönende Flamme, mit stark entwickelten Overtönen klingend. Der Flammeneinschnitt etwas leuchend, der N-Rand breiter und verwaschen.

Fig. 14. Tönende Flamme an der Grenze zwischen der blau und gelb brennenden Lage angeblasen, nach dem Negativ einer Photographie gezeichnet. Schwingungsbereich liegt zwischen den Punkten *S*. *Sp* blasender Spalt, *w* der unter der *T*-Lamelle entstehende Flammenwulst, *Ni* glühender N im Inneren der Flamme, innere Grenze der Luftlamelle, *Na* äussere N-Linie, äussere Grenze der schwingenden Luftlamelle, Die äussere N-Linie beginnt, zum Unterschiede gegen die nicht tönende Flamme, Fig. 10 B, ziemlich hoch über dem Wulst, sich nach oben etwas verstärkend. Es scheint bei *Ni* eine diffuse Verbindung zwischen der äusseren und der inneren Linie stattzufinden.

Fig. 15. Flamme tönend, im gelben Teil angeblasen. *A* Brenner, *B* blasender Spalt, *w* Wulst unter der *T*-Lamelle, *I'* senkrecht durchblasener, wenig an der Schwingung be-

teiligter Flammenteil, *L* herausgeblasene Flammenzunge, obere Begrenzung des Wulstes, *V* Bereich der Schwingungen, der sich nach oben hin zu verbreitern scheint, *G* eine constant auftretende schräge Linie, die vielleicht als Grenze der ersten Welle anzusehen ist. Sie findet sich auch in der vorigen Figur. In beiden Fällen war die Tonhöhe etwa 160 Schwingungen. Gezeichnet nach dem photographischen Negativ.

Fig. 16. Vor scharfer Keileinlage schwingende CO_2 -Lamelle. *A* blasender Spalt, *B* Keileinlage. Unter dem Keil eine Anschwellung der Lamelle. Die innere Grenze der schwingenden CO_2 -Lamelle ist nicht ganz sicher zu erkennen gewesen.

Fig. 17. Schwingende CO_2 -Lamelle, rechts an der Schneide mit hohem Ton, links mit schwachem tiefen Ton.

Fig. 18 A. Mit CO_2 durchblasene Flamme, nicht tönend. Unterhalb der durchblasenen Lamelle befindet sich eine Wulstung des brennenden Gases der Mantelschicht; hinten sehr stark, vorne etwas fortgeblasen, doch ist sie auch hier oft stärker als ihre Abbildung zeigt. Fig. 18 B. Dieselbe Flamme, in Ruhe brennend.

Fig. 19. Zwei Formen von Einlagen.

(Eingegangen 13. Juni 1900.)

Nachtrag.

Die beiden Thatsachen, dass die Transversallamelle sehr durchlässig ist und dass sie die Ortholamelle absolut reflectiren kann, lassen sich vereinbaren, wenn man die *Divergenz* der Ebenen in der relativ sehr rasch fliessenden *T*-Lamelle in Erwägung zieht. Dann wird aber unverständlich, dass die unter der Lamelle angestaute *O*-Lamelle sich zum Teil dem Strom der *T*-Lamelle *entgegen* ausbreitet. Fig. 4. Für diesen Widerspruch in den Thatsachen habe ich noch keine Erklärung gefunden.