**I. Ueber die Erzeugung von Klangfiguren in
Orgelpfeifen und über die Wirkung tönender
Luftsäulen auf Flammen;
von Dr. August Kundt.**

In der von mir in diesen Annalen (Band CXXVII, S. 497 bis 523 veröffentlichten Untersuchung: »Ueber eine neue Art akustischer Staubfiguren und über die Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen« habe ich gezeigt, daß die von mir gefundenen und a. a. O. im Allgemeinen beschriebenen Staubfiguren sich mit Erfolg für eine genaue Bestimmung der Schallgeschwindigkeit anwenden lassen. Ich habe mich seitdem, da besonders die möglichst genaue Kenntniß der Schallgeschwindigkeiten der Gase von Wichtigkeit ist, damit beschäftigt, solche Bestimmungen auszuführen und werde ich dieselben später mittheilen. In Folgendem möchte ich nur einige Beobachtungen und Versuche beschreiben, auf die ich bei dieser Gelegenheit geführt wurde, die für die Erklärung der Eigenthümlichkeiten der Staubfiguren und für das Studium der Bewegung einer tönenden Luftsäule im Allgemeinen von Interesse seyn dürften.

Da Semen Lycopodii, welches ich bisher zu den Staubfiguren angewandt hatte, mir für genaue Bestimmungen nicht geeignet schien, da man es nicht ausglühen kann, um es von allem an demselben condensirten Wasserdampf und anhaftenden Gasen zu befreien und ich ein Pulver haben wollte, welches durch starkwirkende Gase und Dämpfe nicht angegriffen würde, so bemühte ich mich eine unorganische Substanz zu finden, die die Staubfiguren mit derselben Leich-

tigkeit und Schärfe zeige, wie *Lycopodium*. Ein ganz fein ausgeschlemmter Quarzsand, wie er für Glasuren angewendet wird, erwies sich endlich als geeignet.

Außerdem habe ich eine Menge anderer Pulver durchversucht; die meisten zeigten kleine Verschiedenheiten, die indessen über die Staubfiguren nichts Neues lehrten. Nur ganz feine Kieselsäure zeigte ein eigenthümliches Verhalten.

Als nämlich ganz fein zertheilte Kieselsäure¹⁾ in den Apparat, der a. a. O. S. 512 beschrieben ist, gebracht wurde, wanderte dieselbe, auch wenn die Länge der Luftsäule ein Vielfaches der halben Welle war, bei horizontal gehaltenem Apparat nicht zu den Knotenpunkten, dieselbe wirbelte vielmehr ebenso, wie der Sand, zwischen 2 Knotenpunkten auf und bildete, wie es früher beim Sand beschrieben ist, feine parallele Rippen. Diese Rippen der Kieselsäure unterscheiden sich jedoch merklich von denen des Sandes. Während nämlich diejenigen des Sandes nur am Boden der Röhre vorhanden sind, und der Sand während des Tönens nur wenig vom Boden in die Höhe gehoben wird, bilden die Rippungen der Kieselsäure, so lange der Ton anhält, Querwände in der Röhre, deren Höhe oft über die Hälfte des Durchmessers der Röhre beträgt. Einzelne Schichten erstrecken sich sogar zuweilen über den ganzen Querschnitt der Röhre, so dafs es den Anschein hat, als seien in dieselbe lauter feine Membranen eingespannt. Diese Querwände von Kieselsäure sind außerordentlich dünn, so dünn, wie ein dünnes Blatt Papier, und wenn der Apparat horizontal liegt, stehen sie oft in einer ganzen Aus-

1) Die Kieselsäure wurde auf bekannte Weise aus Flusspath, Quarzsand und Schwefelsäure dargestellt, indem das entwickelte Kieselfluorgas unter Quecksilber in Wasser geleitet wurde, wobei sich die Kieselsäure in äußerst fein zertheiltem Zustande ausscheidet. Sie wurde alsdann getrocknet, ausgeglüht, in einer Reibschale nochmals gerieben und dann durch ein feines Gewebe durchgeseiht. Die so dargestellte Kieselsäure ist für die Versuche die bei weitem geeignetste Substanz. Weniger gut lassen sich die Versuche allerdings auch mit Kieselsäure, die aus einem Silicat ausgefällt ist, ja selbst mit anderen leichten Pulvern, wie fein geriebene Magnesia anstellen.

dehnung, so lange der Ton anhält, ganz still. Fig. I. Taf. X. giebt ein, wenn auch nur unvollkommenes Bild eines Stückes der tönenden Luftsäule, wenn Kieselsäure sich in derselben befindet. Neigt man den Apparat etwas, so fangen meist die sämtlichen Querwände an zu wandern und wandern langsamer oder schneller zu den Knotenpunkten. Der Abstand der einzelnen Schichten von einander ist verschieden, im Allgemeinen läßt sich nur sagen, daß der Abstand der Schichten von einander an den Stellen am größten ist, an denen sich vor dem Tönen die größte Masse Kieselsäure befand. — Wenngleich die vollkommnere Erzeugung der Schichten mittelst Kieselsäure noch keinen Aufschluß über das Zustandekommen derselben giebt, so folgt doch daraus, daß die dünnen Schichten von Kieselsäure durch den ganzen Querschnitt der Röhre gehen, daß die Ursache, durch die die Rippungen überhaupt, z. B. die von Sand und Samen *Lycopodii*, entstehen, im ganzen Querschnitt der tönenden Luftsäule in gleicher Weise vorhanden ist.

Die außerordentliche Schärfe und Regelmäßigkeit der Erscheinung bei Kieselsäure läßt auch keinen Zweifel, daß dieselbe durch eine eigenthümliche complicirte Bewegung der Luft bedingt seyn muß und nicht durch ein Mitnehmen der Theilchen des Staubes beim einfachen pendelartigen Hin- und Hergang der Luft erzeugt werden kann.

Das eigenthümliche Verhalten und die außerordentlich leichte Beweglichkeit der Kieselsäure veranlaßten mich in-
deß, nochmals die früher mißlungenen Bemühungen wieder aufzunehmen, in Orgelpfeifen den beschriebenen ähnliche Klangfiguren zu erhalten. Als demzufolge auf den unteren Theil einer runden Orgelpfeife ein Glasrohr gesetzt wurde, etwas Kieselsäure in die Röhre geschüttet und das Rohr oben mit einem Kork verschlossen war, so bildete in der That, als die Pfeife auf ihren Grundton angeblasen wurde, die Kieselsäure zarte aufrechtstehende Querwände, die, so lange der Ton anhielt, still standen oder langsam wanderten. Wurde die Pfeife so angeblasen, daß mehrere Knotenpunkte in derselben waren, so marquirten sich diese

durch die Kieselsäure ebenfalls sehr gut. Zu dem Ende mußte die Kieselsäure durch Schütteln möglichst gleichmäßig in der Pfeife vertheilt, diese horizontal gehalten und der entsprechende Ton kurz und bestimmt angeblasen werden. Alsdann entstand in der Pfeife eine Figur, die derjenigen von Samen *Lycopodii* ähnlich ist, wie sie in der oben angeführten Untersuchung S. 514 beschrieben und Fig. 2 abgebildet ist. Zwischen zwei Knotenpunkten legt sich die Kieselsäure in lauter parallele Rippen, nach den Knotenpunkten selbst wandert dieselbe nicht. An diesen bleibt der wenige Staub, der dort gelegen, ruhig liegen und dieselben sind von einem Ring von Kieselsäure umgeben. Fig. 2 a Taf. X. zeigt ungefähr die Anordnung der Kieselsäure in einer Pfeife, die mit drei Knotenpunkten tönt.

Ich wendete zu meinen Versuchen 2 Orgelpfeifen an, die ursprünglich *C* und *c* gaben. Von diesen wurden die Röhren, die aus Pappe bestanden, abgenommen und mittelst Kork Glasröhren aufgesetzt, deren Länge zwischen 1 und 5 Fuß variierte und deren Durchmesser $\frac{1}{2}$ —2 Zoll betrug. Waren die aufgesetzten Röhren über $1\frac{1}{2}$ Fuß lang, so war es schon schwer, den Grundton zu erhalten, die Pfeifen gaben mit Leichtigkeit und Stärke meist nur die Obertöne an, etwa den 3ten bis 7ten, alsdann war es aber sehr leicht die beschriebene Figur von Kieselsäure zu erhalten.¹⁾

Die Viertelwelle, die zunächst dem Labium lag, zeigte selten scharfe Lagerung des Staubes, derselbe wirbelt dort allzusehr auf. Die späteren Wellen werden jedoch alle gleichmäßig gut ausgebildet. Man kann die Länge dieser

1) Die Figuren entstehen außerordentlich scharf, wenn die Kieselsäure richtig in der Pfeife vertheilt ist und der betreffende Ton kurz und klar angeblasen wird. Am vollständigsten werden dieselben, wenn die Kieselsäure durch Schütteln so vertheilt ist, daß sie überall an der Röhre haftet. Leichter jedoch erhält man die Figur, wenn man durch Klopfen die Kieselsäure an den Boden der Pfeife bringt, dann dieselbe etwas dreht, so jedoch, daß die Kieselsäure am Glase haften bleibt. Tönt nun die Pfeife, so fällt der Staub von der Seite an den Boden und zeigt meist die Figur sehr klar.

Halbwellen ¹⁾ mit ziemlicher Genauigkeit messen, da sich die Mitte eines Knotenpunktes in der Kieselsäurefigur ganz wohl angeben läßt.

Bei Messungen, die ich bei verschiedenen Pfeifenlängen angestellt habe, ergaben sich alle diese Wellen, wie nothwendig, als von durchaus gleicher Länge; die Länge der ersten Viertelwelle, die dem Labium zunächst liegt, war, wie vorausszusehen, verschieden von der der späteren Wellen. Oft war es indessen nicht möglich, den ersten Knotenpunkt, der zunächst dem Labium lag, scharf zu bestimmen, die Bewegung der Luft und daher die Anordnung der Kieselsteine ist hier nicht immer schon regelmäfsig genug.

Wie gut sich aber die Wellenlänge des Tons aus der Länge der entfernteren Wellen bestimmen läßt, mögen folgende Messungen zeigen.

Auf den unteren Theil der Pfeife, die *c* gab und einen Durchmesser von 28^{mm} hatte, war ein Glasrohr von etwa 1040^{mm} Länge und 20^{mm} Durchmesser gesetzt.

Die Pfeife wurde gedeckt angeblasen, so dafs dieselbe 7 halbe und 1 Viertelwelle enthielt, also ihren 8ten Ton gab, — die Länge der Pfeife von ihrem gedeckten Ende bis zum Labium betrug 1090^{mm}.

Es wurde nun in vier Versuchen gefunden:

I. Versuch:

Die erste Halbwelle vom gedeckten Ende aus gerechnet

$$= 153.3$$

$$\text{die 2te} \quad . \quad . \quad . \quad = 149.3$$

$$\text{die 3te} \quad . \quad . \quad . \quad = 151.4$$

$$\text{die 4te} \quad . \quad . \quad . \quad = 148.3$$

$$\text{die 5te} \quad . \quad . \quad . \quad = 152.8$$

$$\text{die 6te} \quad . \quad . \quad . \quad = 151.6$$

1) Der Raum zwischen zwei Knotenpunkten ist auch hier, wie früher, als Halbwelle genommen, wo jedoch kein Irrthum möglich war, ist zuweilen der Kürze wegen, statt Halbwelle, einfach Welle geschrieben.

II. Versuch:

1ste Halbwelle	. . .	= 151 . 6
2te	- . . .	= 153 . 6
3te	- . . .	= 150 . 2
4te	- . . .	= 152 . 1
5te	- . . .	= 154 . 2
6te	- . . .	= 152 . 2.

III. Versuch:

Gesamtlänge der 3 ersten Halbwellen = 450 . 1
 der 4ten bis 6ten = 455 . 4.

IV. Versuch:

Gesamtlänge der 3 ersten Halbwellen = 453 . 6
 der 4ten bis 6ten = 453 . 8.

Daraus findet man im Mittel die Länge der Halbwelle für die angewandte Pfeife von 1090^{mm} Länge bei ihrem 8ten Ton.

- 1) 150 . 9
- 2) 152 . 3
- 3) 150 . 9
- 4) 151 . 2

Also das Gesamtmittel 151 . 3.

Die Länge der 8ten Halbwelle plus der letzten Viertelwelle am Labium beträgt demnach

$$1090 - 6 \cdot 151,3 = 182,2^{mm}.$$

Rechnet man die 8te Halbwelle, die ich nicht gut messen konnte, da der unterste Theil der Pfeife aus Holz war und den letzten Knoten halb verdeckte, ebenfalls zu 151 . 3, so bleibt für die letzte Viertelwelle nur 30 . 9, also ein bedeutend zu kleiner Werth. Da der hölzerne Theil der Pfeife einen 8^{mm} größeren Durchmesser hatte, als das aufgesetzte Glasrohr, so darf diese bedeutende Abweichung nicht wundern.

Mit einer anderen Pfeife von ganz kleinem Durchmesser wurde die Wellenlänge ihres 8ten Tones in zwei Versuchen zu 58 . 4 und 58 . 8 bestimmt, die des 7ten Tones ergab sich zu 66 . 5. Berechnet man aber aus der Länge des 8ten

Tons die Wellenlänge des 7ten, so ergibt sich $58,6 \cdot \frac{17}{15} = 66,2$. Man sieht also, daß man aus den Staubfiguren die Wellenlänge des Tons einer gedeckten Pfeife, wenn sie einen Oberton giebt, gut bestimmen kann. Ueberdies werden die Staubfiguren dazu dienen können, die Länge der ersten, dem Labium zunächst liegenden Viertelwelle und deren Verhältniß zu der wirklichen Viertelwelle des Tones zu bestimmen. Man erhält übrigens die Staubfiguren nicht nur in *gedeckten*, sondern auch in *offenen* Orgelpfeifen, sie entstehen nur in den ersteren leichter und schärfer, da der durchgehende Luftstrom bei den offenen Pfeifen die Lagerung der Kieselsäure etwas stört.

Mit großer Schärfe erhält man die Staubfiguren nicht bloß in Pfeifen mit tieferen Tönen, sondern auch in Pfeifen, die so construirt sind, daß sie eine ganze Reihe höherer Töne geben können. Ich verschaffte mir solche, indem ich kleine Pfeifen, wie man sie als Signal- oder Lockpfeifen oder als Spielzeug für Kinder überall findet, etwa 1 Zoll über dem Labium abschnitt und dann mittelst Kautschuckröhren Glasröhren von geringerem Querschnitt und verschiedener Länge auf dieselbe aufsetzte. Wird in eine solche Pfeife etwas Kieselsäure gestreut, das Glasrohr dann am oberen Ende mit einem Kork geschlossen und die Pfeife angeblasen, so bildet die Kieselsäure in derselben die oben beschriebenen Querwände in großer Anzahl. Aus der Gruppierung derselben läßt sich schon die Zahl der Wellen in den Röhren erkennen. Neigt man alsdann die Pfeife etwas, so fangen die Schichten an zu wandern und die Kieselsäure legt sich in lauter kleinen Häufchen auf die Knotenpunkte. In dem Robre bildet sich die, Bd. CXXVII, S. 513 beschriebene und dort Fig 3. Taf. V. abgebildete Punktfigur. Giebt man einen andern Ton der Pfeife an, so beginnen die früheren Staubbäufchen sich zu bewegen und legen sich in anderer Anzahl und an anderen Stellen wieder nieder. Eine kleine gedeckte Pfeife dieser Art von etwas über 1 Fuß Länge bildete 3—9 Knotenpunkte mit Leichtigkeit; eine andere von

etwa 4 Fuß Länge und $\frac{1}{2}$ Zoll Breite bildete 8 — 30 Knotenpunkte. Auch in ungedeckten Pfeifen dieser Art erhält man mit Vorsicht die Knoten hinreichend scharf. — Die Staubbäufchen entstehen, wie angegeben, nur wenn die Pfeife etwas geneigt wird; liegt dieselbe ganz horizontal, so bilden sich nur in der ganzen Länge des Rohrs die Querschichten. Dasselbe findet nun auch in den oben angewandten Pfeifen mit tieferen Tönen statt. Hat man in einer Orgelpfeife die Staubfigur erzeugt, wie sie in Fig. 2 gezeichnet, und neigt dann das gedeckte Ende derselben, während man die Pfeife constant anbläst, etwas nach unten, so fangen die Schichten der Kieselsäure an nach unten zu wandern und begeben sich nach den Knotenpunkten. Der Staub wandert jedoch nicht bis in die Mitte der Löcher, die in Figur 2a die Knotenpunkte bezeichnen, an welcher Stelle man doch den eigentlichen Knotenpunkt, d. i. die geringste Bewegung vermuthen sollte. Der Staub wandert nun bis an den Staubring, der anfangs die Knotenstelle umgab. In Fig. 2b ist die Lage der Staubbäufchen gezeichnet, wenn das gedeckte Ende während des Tönens nach unten geneigt war; in Fig. 2c sind die Staubbäufchen gezeichnet, wie sie sich bilden, wenn das gedeckte Ende während des Tönens in die Höhe gehalten war. Es ergiebt sich also, daß der Staub zwar von beiden Seiten zu den Knotenpunkten hingeführt wird, derselbe selbst aber frei vom Staube bleibt. Welche eigenthümliche Bewegung der Luft in den Knotenpunkten den Staub hindert, sich dort anzusammeln, muß für den Augenblick unerörtert bleiben.

Ich unterlasse es auch, die Messungen hier mitzutheilen, die ich bisher über die Größe des Raumes ausgeführt, in den hinein der Staub sich bei verschiedenen Pfeifen nicht bewegte, da sich ein Zusammenhang dieser Größen mit der Wellenlänge des Tons bisher nicht ergeben hat. Nur das läßt sich mit Bestimmtheit sagen, daß, je größer die Wellenlänge ist, um so größer ist auch die Stelle am Knotenpunkt, in die hinein der Staub nicht bewegt wird.

Als z. B. eine der oben angewandten gedeckten Orgel-

pfeifen ihren 5ten Ton gab, war die Länge dieses Raumes etwa 95^{mm}, als dieselbe ihren 7ten Ton gab, war der Raum 25^{mm}; als sie ihren 8ten Ton gab, nur 14^{mm}.

Die bei Pfeifen sehr augenfällige Erscheinung, daß sich der Staub von beiden Seiten an die Knotenstellen nur heranbewegt, nicht auf dieselben, zeigt sich auch bei dem früheren Apparat zur Erzeugung der Staubwellen. Ist die Länge der Luftsäule gleich $\frac{n}{4}$ der entstehenden Luftwelle, so daß also die Figur mit den Löchern entsteht, so wandert der Staub beim Neigen des Apparats nach oben oder unten, von der einen oder anderen Seite an die Knotenpunkte heran, ohne jedoch sich auf dieselben zu bewegen. Sehr schön sieht man aber, daß das Semen *Lycopodii* sich nicht auf den Knotenpunkten selbst ansammelt, wenn die Länge der Luftsäule = $\frac{n}{2}$ der entstehenden Welle ist und man *sehr wenig* Semen *Lycopodii* in den Apparat bringt. Als dann bildet sich nicht, wie früher abgebildet, ein Staubhäufchen auf dem Knotenpunkt, sondern es erscheint eine Anordnung des Staubes, wie sie in Fig. 3 Taf. X gezeichnet. Das Semen *Lycopodii* hat sich von beiden Seiten in einer scharfen Linie an den Knotenpunkten heranbewegt, zwischen diesen Linien ist jedoch die Stelle staubfrei.

Außer den Erscheinungen in den Knotenpunkten ist in den Orgelpfeifen besonders die Bewegung der Luft zunächst dem Labium von Interesse. Mit Kieselsäure läßt sich wenigstens Einiges dieser Bewegung erkennen. Bekanntlich hat Fermond¹⁾, als er eine Pfeife mit Tabaksrauch anblies, beobachtet, daß dieser sich in einer Spirale in der Pfeife bewegte. Schüttet man in eine gedeckte Pfeife mit Glasrohr etwas Kieselsäure, hält die Pfeife anfangs horizontal und richtet sie dann während des Tönens allmählig auf, so daß der Kieselsäurestaub nach unten fällt, so bleibt derselbe zum großen Theil oberhalb des Labiums in der Pfeife schweben und bewegt sich hier in spiralförmiger Bahn. Man kann

1) Diese Ann. Bd. LXII. S. 576 u. 580.

oft zwei, auch mehr Umgänge der Spirale erkennen. Nach oben hin erweitern sich die Umgänge derselben. Der Sinn, in welchem die Spirale gewunden ist, hängt ab von der Beschaffenheit des Labiums. Entfernt man während des Tönsens den die Pfeife oben deckenden Kork, so zieht sich die Spirale bedeutend in der Pfeife in die Höhe. In den oberen Theilen des Pfeifenrohrs ist aber weder bei offenen, noch bei gedeckten Pfeifen von Spiralbewegung Etwas zu erkennen. Diese Erscheinungen bedürfen noch einer genaueren Untersuchung.

Was übrigens die Bewegung in den vom Labium entfernten Theilen der Pfeife anlangt, so zeigt schon der Umstand, daß dort die Schichten von Kieselsäure ganz regelmäßig sind und als ebene Flächen durch den Querschnitt gehen, daß die Bewegung dort im ganzen Querschnitt eine ziemlich gleichmäßige seyn muß. —

Ich habe es oft versucht, die Abstände dieser Querrippungen von einander zu messen, und oft sind auch wirklich in einer Halbwelle die Abstände der einzelnen Schichten von einander sehr nahe gleich, aber sobald man etwas mehr, etwas weniger Kieselsäure in die Pfeife schüttet, so oft der Staub anders in derselben vertheilt ist, so oft ändern sich die Abstände und Anordnungen der Schichten. Nur ein Umstand ist bemerkenswerth: Wenn eine Pfeife so angeblasen wird, daß sie neben dem Grundtone auch noch die Octave schwach anzieht, so zeigen sich in der Mitte zwischen den größeren Schichten, die offenbar durch den Grundton hervorgebracht werden, kleinere Schichten, die anscheinend der Octave zugehören.¹⁾

Da ich durch Messungen also keinen Aufschluß über die Natur und Entstehung der Schichten erhalten konnte,

1) Alle bisher angegebenen Versuche wurden mit runden Pfeifen angestellt, ich habe dieselben zum Theil mit Pfeifen von quadratischem Querschnitt wiederholt. Die Erscheinungen waren den obigen sehr ähnlich. Genauere Vergleichen werden mir erst mit geeigneten quadratischen Pfeifen, die ich mir zu dem Ende anfertigen lasse, möglich seyn.

so suchte ich sie mit anderen verschiedenen Körpern darzustellen, um dadurch vielleicht neue Gesichtspunkte zu gewinnen. Besonders kam es mir darauf an, eine noch leicht beweglichere Materie als die Kieselsäure anzuwenden, die doch andererseits möglichst gleichmäßig, wenigstens an einem Orte der Pfeife beharre. Als solcher Körper schien mir eine leuchtende Gasflamme geeignet und ich versuchte demgemäß innerhalb einer aufrechtstehenden Orgelpfeife eine Gasflamme anzubringen. Um die Bewegungen der Luft einer tönenden Pfeife sichtbar zu machen, hat bekanntlich König schon die Gasflammen angewandt. Sie dienen ihm jedoch nur dazu, die Oscillationen des Tons der Pfeife im rotirenden Spiegel sichtbar zu machen und durch die Flammen die Stellen, der Knotenpunkte nachzuweisen. Mein Zweck war, durch die Flamme die kleinen, in den Schichten der Pulver sich kundgebenden Bewegungen der Luft zu studiren und ich brachte daher nicht, wie König, die Flammen außerhalb der Pfeife an, sondern führte Flammen direct in die Pfeife ein. Die Resultate waren folgende:

Bringt man eine Gasflamme auf irgend eine Weise in eine vertical stehende Pfeife, läßt dieselbe etwa 1 bis $1\frac{1}{2}$ Zoll hoch brennen und die Pfeife tönen, so zeigt die Flamme während des Tönens die in Fig. 4 Taf. X gezeichnete Form.

Man erkennt in der Figur bereits deutlich eine schichtenweise Abtheilung der Flamme. Bringt man dieselbe alsdann aus der Mitte der Pfeife mehr an die Wandungen derselben, so tritt die Schichtung noch viel klarer hervor. Die Flamme theilt sich vollständig in über einander liegende helle und dunkle Schichten, wenn sie die Wandungen des Pfeifenrohres direct berührt. Um die Flamme bequem an jede Stelle der Pfeife bringen zu können und das Springen des gläsernen Pfeifenrohres zu verhüten, habe ich dieselbe glühender Massen eingerichtet.

Auf den untern hölzernen Theil *aa* der Pfeife (Taf. X, Fig. 5), der etwa 50^{mm} im Durchmesser hat, ist ein etwa 430^{mm} langes starkes Glasrohr *bb* gesetzt. Die Hälfte der inne-

ren Wandung dieses Glasrohres ist der ganzen Länge nach mit einem rund gebogenen dünnen Messingblech *cc*, bedeckt, das oben und unten durch kreisrunde angeniethete Blechstreifen, die etwas federn, an die Glaswand angedrückt wird. Bringt man eine Flamme dicht an dies Blech oder läßt sie direct gegen dasselbe brennen, so springt die Glasröhre nicht, da das Blech das Glas nicht vollkommen berührt.

Oben auf das Rohr *bb* ist ein Ring von Messing *d* aufgesetzt, der mit einem kleinen vorstehenden Rand auf den Rand des Glasrohrs paßt und mit kleinen Federn, die innerhalb desselben angebracht sind, auf dem Glasrohr festgehalten ist.

Oben an der innern Seite dieses Ringes ist eine kleine Hülse *e* angelöthet. Durch diese geht mit Friction ein dünnes Gasleitungsrohr *ff'*. Bei *f* ist der Schlauch, der das Gas zuführt, angebracht, bei *f'* ist das Kniestück *g* auf das Rohr gesetzt und auf dieses ist mit einem Kautschuckröhrchen die eigentliche Brennspitze *h* aufgesetzt. Diese Spitze ist aus Glas gefertigt und in der in der Figur gezeichneten Weise gebogen. Auf die Beschaffenheit dieser Spitze kommt sehr viel an, und habe ich daher die Form derselben noch besonders in Fig. 6 gezeichnet. Man kann sich sehr leicht eine Anzahl solcher Spitzen aus Glasrohr verfertigen und dann die passendste aussuchen. Die ganze Pfeife ist der Bequemlichkeit wegen von einem Stativ gehalten. Indem man nun das Rohr *ff'* in der Hülse *e* bewegen, ferner den ganzen Ring *d* drehen und endlich noch das Kniestück *g* drehen kann, ist man im Stande die Flamme an jede beliebige Stelle der Pfeife zu bringen. Stellt man sie an irgend einer Stelle so ein, daß, wie es in der Figur gezeichnet, die etwa $1\frac{1}{4}$ Zoll hohe Flamme direct gegen das Blech *cc* brennt, bläst dann die Pfeife durch den Schlauch *h* mit dem Munde oder mit einem Blasetisch an, so wird man die Schichtung der Flamme sehr deutlich sehen. Fig. 7a giebt ein Bild ihrer Erscheinung. Ist die Flamme richtig eingestellt und die Größe derselben passend abgeglichen, so kann man es erreichen, daß die dunk-

leren Stellen zwischen zwei hellen Schichten in der That beinahe vollständig schwarz erscheinen und die hellen Schichten ganz isolirt von einander, eine über der andern, stehen. Eine genauere Untersuchung des Verhaltens der Schichten hat folgendes ergeben:

a) Die übereinander liegenden hellen Schichten der Flamme stehen, so lange der Ton anhält, vollkommen still; man erhält die Schichten in jeder Höhe der Pfeife, sowohl in Knotenpunkten, wie zwischen denselben, nur zunächst dem Labium werden sie unregelmässig, undeutlich und zeigen sich zuweilen dort gar nicht.

b) Der Abstand der einzelnen Schichten unter einander ist ziemlich gleich, im obern Theil der Flamme liegen sie etwas enger als im untern und in der Mitte. Giebt man bei ein und derselben Pfeife den Grundton und dann die Octave an, so sind die Schichten bei der Octave etwa halb so groß als beim Grundton. Bei Pfeifen von verschiedener Länge nimmt der Abstand der hellen Schichten von einander mit der Länge der Pfeifen zu. Genaue Messungen anzustellen ist nicht leicht, das Gesagte erhellt aber aus folgenden Zahlen, die die Mittel einer Reihe von Bestimmungen sind.

Länge der Pfeife.	Abstand der hellen Schichten von einander.
1) 385 ^{mm}	5 ^{mm}
2) 595 ^{mm}	8 ^{mm}
3) 809 ^{mm}	11 ^{mm}

Daraus ergibt sich die Zahl der Schichten für die ganzen Pfeifenlängen

im ersten Fall . . .	= 77,5
im zweiten - . . .	= 71,7
im dritten - . . .	= 68,4

Die Größe der Schichten hängt übrigens in einer Pfeife und an einer und derselben Stelle etwas von der Größe der Flamme ab.

c) Beobachtet man, während die Pfeife tönt, die ge-

geschichtete Flamme in einem rotirenden Spiegel, so sieht man, ebenso wie bei der chemischen Harmonika und wie bei den von König an Orgelpfeifen angebrachten Flammen ein Alterniren der ganzen geschichteten Flamme. Während man jedoch in jenen Fällen eine Anzahl neben einander liegender, etwas nach der Richtung der Drehung schief gezogener Flammenbilder sieht, ist hier die Erscheinung eine etwas andere. Stellt Fig. 7a die geschichtete Flamme dar, so sieht man im rotirenden Spiegel die Flammenbilder *b*, *c*, *d* u. s. w.

Aus dem Alterniren der Erscheinung und der eigenthümlichen treppenartigen Form der einzelnen Bilder ergibt sich, daß einmal die Flamme abwechselnd erlischt und in die Höhe brennt, wobei dieß in die Höhebrennen in der Art vor sich geht, daß die Flamme durch die dunklen Stellen $\alpha\alpha'$ außerordentlich schnell geht, so daß die Intensität derselben hier gar nicht vom Auge wahrgenommen wird. Man könnte meinen, es trete auf dieser Strecke durch einen stärkeren Zug eine Verbrennung des Kohlenstoffs ein, so daß die Flamme an dieser Stelle überhaupt weniger leuchtet. Ist die Spitze der Flamme aber nach α' gekommen, so bleibt sie hier, wie man aus dem Bilde *b* sieht, bei β' eine Zeit lang in gleicher Höhe: es muß also ein Gegendruck gegen dieselbe vorhanden sein, der das schnelle in die Höhebrennen für einen Augenblick hindert; dabei könnte vielleicht eine weniger vollständige Verbrennung eintreten und die Flamme in Folge dessen intensiver leuchten. Dieß wiederholt sich so lange, bis eine halbe Oscillation des Tones der Pfeife beendet, indem alsdann durch die eintretende Verdichtung oder den Druck der bewegten Lufttheilchen die Flamme plötzlich fast ganz erlischt.

Der Raum $\beta\beta'$ ist aber in dem Spiegelbild ziemlich hell leuchtend und dieß zeigt, daß die dunklen Stellen der geschichteten Flamme doch nicht allein dadurch entstehen, daß durch stärkeren Zug eine sehr vollständige Verbrennung eintritt, sondern daß nur das in die Höhebrennen der Flamme hier so schnell geschieht, daß der Lichteindruck

auf unser Auge gegenüber den länger leuchtenden Stellen β', β'' verschwindet.

d) Statt mit dem rotirenden Spiegel kann man die geschichtete Flamme auch mit einer rotirenden Scheibe, in der einige enge Schlitzze eingeschnitten sind, beobachten. Man sieht dann bei dieser momentanen Beobachtung die Flamme in den verschiedenen Stadien des in die Höhe Brennens, und der Erfolg ist, daß die hellen Schichten nicht ruhen, sondern auf und ab hüpfen.

Mit der rotirenden Scheibe und mit dem rotirenden Spiegel kann man sich auch noch überzeugen, daß in der Nähe des Labiums, wo man die Schichten nur sehr undeutlich und oft gar nicht beobachtet, dieselben doch vorhanden sind. Dadurch daß sie aber hier, wo, wie schon oben gesagt, die Bewegung der Luft eine sehr unregelmäßige ist, immerwährend ihren Ort wechseln, entziehen sie sich dem bloßen Auge.

e) Man erhält die Flammenschichten nicht bloß in Orgelpfeifen, sondern auch in Luftsäulen, die auf andere Weise ins Tönen gebracht sind. In einem Glasrohr, in dem die Luft durch eine kleine aufschlagende Zunge ertönte, zeigten sich die Schichten sehr gut, ebenso in der chemischen Harmonika. Ich werde überdieß in einem im nächsten Heft dieser Annalen erscheinenden Aufsatz einige Arten der Erzeugung von Tönen mittheilen, bei denen sich die Flammenschichten sehr schön zeigen.

Daß die Schichten in der Flamme den Rippungen des Sandes und der Kieselsäure analog sind, daß beide Erscheinungen auf denselben oder wenigstens sehr ähnlichen Ursachen beruhen müssen, kann nicht bezweifelt werden. Gelingt es, eine Erklärung der Schichten der Flamme zu gewinnen, bei welcher die Erscheinung regelmäßig ist und genauer untersucht werden kann, so muß damit auch wenigstens ein Theil der Erklärung der Rippungen des Staubes gegeben sein.

Die Ansicht aber, die ich mir aus den mitgetheilten Ver-

suchen über die Entstehung der Flammenschichten gebildet habe, ist folgende: Wenn eine Luftsäule einen bestimmten Ton giebt, so ist im Allgemeinen die Bewegung eines Lufttheilchens nicht eine einfach pendelnde, dieselbe ist vielmehr eine sehr complicirte, da fast immer neben dem Hauptton noch eine ganze Menge Obertöne vorhanden sind. Gesezt alle die diesen Tönen zugehörigen Oscillationen gingen zu gleicher Zeit durch, ihre Gleichgewichtslage und die Wellenlängen und Amplituden derselben wären gegeben, so könnte man sich die Bewegung eines einzelnen Lufttheilchens — seine Schwingungsform — construiren. Sind eine ganze Menge Obertöne von nicht allzu geringer Intensität vorhanden, so stellt die Schwingungsform, in bekannter Weise geometrisch construirt, eine große Welle dar, auf der sich eine Anzahl kleiner sekundärer Wellen befinden. Diese secundären Wellen können sich auf der ganzen Hauptwelle befinden oder es kann der aufsteigende Theil der Welle eine gerade Linie bilden und sämtliche kleinen Ein- und Ausbiegungen nur auf dem abwärts gehenden Theil vorhanden sein, darauf kommt es jedoch hier nicht an.

Wenn nun eine solche Wellenbewegung in einer Pfeife auf eine Flamme innerhalb derselben wirkt, so ist klar, daß die Hauptwelle, als Ganzes betrachtet, die Flamme wird erlöschen und in die Höhe breunen lassen, je nachdem die Bewegung der Luft von oben nach unten oder von unten nach oben gerichtet ist, oder je nachdem Verdichtung oder Verdünnung stattfindet. Außerdem werden aber auch die secundären Wellen die Flammen bewegen, und wenn für eine Zeit lang das Erlöschen durch die Hauptwelle aufhörte, so würden sie die Flamme in stehende Schwingungen versetzen müssen, ebenso wie eine Luftsäule durch die Oscillationen einer longitudinal tönenden Röhre in stehende Schwingungen geräth. In der Flamme müßten sich Knotenpunkte bilden und an diesen würde sich der leuchtende Kohlenstoff anhäufen, ebenso wie der Staub in den tönenden Luftsäulen. Der Abstand der Knotenpunkte von einander wäre

bedingt durch die Oscillationsdauer der kleinen Wellen und durch die Schallgeschwindigkeit in der Flamme.

Dadurch aber, daß die ganze Flamme durch die Hauptwelle abwechselnd erlischt, kann nur die Hälfte dieser Bewegungen zu Stande kommen. Nur während die Flamme in die Höhe brennt, wirken auch zugleich die kleinen Wellen und zwar, wenn die Bewegung in den kleinen Wellen nach oben gerichtet ist oder eine Verdünnung stattfindet, brennt die Flamme schnell in die Höhe, wir sehen eine dunkle Stelle; wenn die Bewegung in den kleinen Wellen von oben nach unten gerichtet ist oder eine Verdichtung stattfindet, kann die Spitze der Flamme für einen Moment nicht höher brennen, sie steht still, der glühende Kohlenstoff sammelt sich an und wir sehen eine helle Schicht.

Die geschichtete Flamme giebt uns also gewissermaßen ein Bild der Klangfarbe der Pfeife und konnten wir die Schallgeschwindigkeit in der Flamme, so würden wir den Abstand zweier Schichten auf die Luft reduciren können, und danach die Schwingungsform der Luft in der Pfeife, wenigstens zur Hälfte, construiren können. Daß die Schichten durch die Schwingungsform der Luft in den Pfeifen bedingt sind, dafür spricht auch der Umstand, daß der Abstand derselben nahezu den Pfeifenlängen proportional ist, und bei der Octave die Hälfte von demjenigen beim Grundton ist. Die Schwingungsform ist bei verschiedenen langen Pfeifen von gleicher Bauart dieselbe, nur die sämtlichen Obertöne haben im Verhältniß zu der Pfeife an Wellenlänge zugenommen, daher auch die secundären Wellen auf der Hauptwelle, und mithin müssen auch die Schichten eben so an Größe zunehmen.

Eigenthümlich ist es, daß die Schichten so sehr viel deutlicher an den Wandungen der Pfeife als in der Mitte derselben sich zeigen. Es wäre indess wohl möglich, daß an den Wänden die Schwingungsform der Luft zusammengesetzter, oder wenigstens die Amplituden der Obertöne dort größer wären als in der Mitte.

Dafs die gegebene Erklärung der Flammenschichten sich wenigstens im Wesentlichen bei weiteren Untersuchungen bewähren wird, glaube ich, für die Querschichten von Kieselsäure und Sand bietet die Anwendung derselben aber manche Schwierigkeit. Vor Allem ist schwer einzusehen, wie nach derselben die Abstände zwischen den einzelnen Rippungen so variabel sein können, und wie diese Abstände von der Menge des vorhandenen Staubes abhängen können.

Erst mannigfach angestellte Versuche und eingehende theoretische Betrachtungen werden über die Rippungen und über die andern eigenthümlichen Bewegungszustände tönender Luftsäulen, wie sie sich in den feinen Pulvern und in den Flammen aufzeichnen, Aufschluß geben können.

Das Ergebnifs der bisher angestellten Beobachtungen läfst sich folgendermassen zusammenstellen.

1) Ebenso wie Samen *Lycopodii* in den Luftsäulen, die durch longitudinal tönende Stäbe in stehende Schwingung versetzt sind, Staubfiguren bildet, bildet feine Kieselsäure in horizontalen Orgelpfeifen, gedeckten oder offenen, Figuren, die die Knotenpunkte der Pfeifen deutlich erkennen lassen.

2) Zwischen zwei Knotenpunkten bildet während des Tönens die Kieselsäure dünne Querwände, die bei geneigter Pfeife zu den Knotenpunkten wandern.

3) An den Knotenpunkten selbst bleibt eine Stelle von bestimmter Gröfse immer frei vom Staub, und selbst bei geneigter Pfeife wandern die Rippungen nicht in diesen Raum hinein, sondern nur an denselben heran. Die Gröfse dieses Raumes, in den hinein sich der Staub nicht bewegt, nimmt mit der Wellenlänge des Tones im Allgemeinen zu.

4) Aus den in einer Pfeife gebildeten Figuren von Kieselsäure kann man die Wellenlänge des angeblasenen Tones bestimmen. Die Figuren werden sich daher besonders eignen für eine Aufsuchung der Knotenpunkte bei Pfeifen mit verschiedener Art des Anblasens und mit Röhren von verschiedenem Querschnitt und mit Seitenöffnungen.

5) Mit Kieselsäure läfst sich die, von Fermond zuerst

beobachtete Spiralbewegung der Luft in Pfeifen in der Nähe des Labiums beobachten; in offenen Pfeifen erstreckt sich die durch Kieselsäure sichtbare Spiralbewegung weiter in das Rohr der Pfeife hinein, als bei gedeckten.

6) Eine in eine Orgelpfeife auf geeignete Art eingeführte leuchtende Gasflamme zeigt ebenso wie der Staub eine Schichtung. Die Gröfse der hellen und dunklen Schichten ist bei verschiedenen langen Pfeifen nahezu proportional der Länge der Pfeifen.

7) Die Schichtung der Flamme ist wahrscheinlich bedingt durch die aus der Gesamtheit der Obertöne resultirende Schwingungsform der tönenden Luftsäule. *)

*) Siehe die Note am Schluss des Hefts.

II. *Optische Experimental-Untersuchungen;* *von G. Quincke.*

(Fortsetzung von Bd. 127, S. 1—29 und S. 199—237.)

III. Ueber die elliptische Polarisation des Lichtes bei gewöhnlicher Reflexion.

26.

Schon Brewster¹⁾ hat darauf aufmerksam gemacht, daß das Licht durch Reflexion unter dem sogenannten Polarisationwinkel nicht vollständig polarisirt wird. Diese unvollständige Polarisation des Lichtes ist besonders bei stark brechenden Substanzen zu bemerken. Brewster sieht jedoch den Grund nicht sowohl in der stärkeren Brechung als in der stärkeren Zerstreuung (Dispersion) des Lichtes. Biot²⁾ schloß aus Versuchen von Arago über das Auftreten oder Ausbleiben von Farben, wenn Licht unter einem Winkel reflectirt wurde, der nahezu gleich dem Pola-

1) *Phil. trans.* 1815 p. 125 *sqq.* *Abr. I*, p. 15.

2) Biot, *traité de physique IV*, p. 292, 1816.