DER PHYSIK UND CHEMIE.

NEUE FOLGE. BAND XIII.

I. Experimentelle Untersuchung der Töne, welche beim Durchströmen von Gasen durch Spalten entstehen; von W. Kohlrausch.

Die Bewegung von Gasen an den Oberflächen sie begrenzender Körper sowie beim Austritt aus engen Oeffnungen oder Röhren scheint in verschiedener Weise erfolgen zu können. Beim Ausströmen aus engen Oeffnungen in dünner Wand, wo die Reibung bekanntlich keine wesentliche Rolle spielt, sowie bei dem andererseits durch die Reibung sehr verzögerten Durchströmen enger Röhren ist jedenfalls die Bewegungsgeschwindigkeit im wesentlichen gleichförmig. Für diese beiden Fälle hat auch die Theorie die Thatsachen hinreichend erklärt. Beim raschen Ausströmen der Gase aus Oeffnungen und Spalten in dickeren Wänden sowie durch weitere Röhren zeigen dagegen die auftretenden Geräusche und Töne, — wir erinnern an das Heulen des Windes in Thürspalten u. dergl. — dass der Austritt mit periodisch sich ändernder Geschwindigkeit erfolgt. Dasselbe gilt für rasche Bewegung dünner fester Körper in ruhender Luft.

An einer umfassenden Erklärung dieser Vorgänge fehlt es bisher gänzlich, auch experimentell ist der Gegenstand erst in neuerer Zeit, und zwar in der letzterwähnten Richtung von Strouhal¹⁾ eingehender untersucht. Aus früheren Jahren liegen Beobachtungen von Sondhauss²⁾ über Töne vor, die entstehen, wenn man Wasser aus einer langen weiten Glasröhre durch die kreisrunde Oeffnung einer dicken unten angekitteten Metallplatte ausströmen lässt. Während die

1) Strouhal, Wied. Ann. 5. p. 216. 1878.

2) Sondhauss, Pogg. Ann. 124. p. 1 u. 235. 1865.

Wassersäule im Rohr sinkt, entstehen abwechselnd hohe und tiefe sehr reine Töne, die sich, wenn man die Höhe der Wassersäule constant hält, auch einzeln längere Zeit erhalten lassen, wie ich mich durch Wiederholung der Sondhauss'schen Versuche überzeugete. Es sind dies ohne Zweifel Eigentöne der Wassersäule, die aber höchstwahrscheinlich ähnlich den bei Strouhal durch Reibungstöne angeregten Eigentönen der Drähte, ihre Entstehung den Reibungstönen an der Ausflussstelle verdanken. Eine Arbeit von A. Masson¹⁾ behandelt Töne, die beim Austritt von Luft aus engen kreisförmigen Oeffnungen in mehr als 2 mm dicken Platten entstehen. Masson findet die Schwingungszahl dieser Töne proportional der Ausströmungsgeschwindigkeit. Wenn nicht gleichen, so doch verwandten Ursprungs sind Töne, die ebenfalls Sondhauss²⁾ beobachtete, wenn er einen starken Luftstrom gegen Flächen fester Körper stossen liess; auch er fand die Tonhöhe der Ausströmungsgeschwindigkeit direct, dem Abstand der Flächen von der Ausströmungsöffnung umgekehrt proportional. Ich konnte, indem ich etwa den Finger vor den aus einem Spalt kommenden Luftstrom hielt, diese Töne neben den später zu behandelnden Spalttönen deutlich wahrnehmen. W. Thomson und J. P. Joule³⁾ constatirten gelegentlich ähnlicher Versuche zu anderen Zwecken neben dem Auftreten sehr hoher Töne bedeutende Erwärmung der in den austretenden Luftstrom gehaltenen Körper. Auf die erwähnte Arbeit von Strouhal kommen wir später zurück.

Inwiefern für die musikalische Technik eine eingehende Untersuchung der Reibungstöne der Gase wichtig werden kann, zeigen die Vorgänge beim Anblasen der Orgelpfeifen am schlagendsten. Die Orgelbauer wissen sehr wohl, dass allein die passende Wahl der Breite und Tiefe des Kernspaltes, sowie der Breite der Labiumkante ein gutes und sicheres Ansprechen der Pfeife gewährleistet. In England hat man überdies neuerdings den Versuch gemacht, die Saiten eines dem

1) Masson, *Compt. rend.* 36. p. 257 u. 1004. 1853.

2) Sondhauss, *Pogg. Ann.* 91. p. 126 u. 214. 1854.

3) Thomson u. Joule, *Phil. Trans.* 143. p. 361. 1853.

Clavier ähnlichen Instrumentes mit Luftströmen, statt wie bei den Streichinstrumenten mit dem Bogen anzustreichen.

Um der Theorie der soeben besprochenen Vorgänge, sowie der Technik auf diesem Gebiet neue Anhaltspunkte zu liefern, soll ein möglichst einfacher Fall der beim Ausströmen von Gasen entstehenden Töne im Folgenden einer eingehenden experimentellen Untersuchung unterworfen werden. Wir wählen als Ausströmungsöffnungen Spalte und nennen ohne vorläufige Bezugnahme auf ihren Ursprung die Töne Spalttöne. Nach verschiedenen Versuchen, diese Töne mit Spalten in grösseren Dimensionen, ähnlich denen der sie so häufig erzeugenden Thürspalten, zu erhalten — Versuchen, die wohl daran scheiterten, dass bei der grossen Ausflussöffnung nicht der nöthige Druck unter dem Spalt hervorgebracht werden konnte —, bekam ich sie schliesslich bei kleinen, durch Messingplatten gebildeten Spalten.

Der Beobachtungsapparat.

In der Folge soll unter Spaltdicke die Dicke der den Spalt bildenden zwei Messingplatten unter Spaltbreite ihr Abstand von einander verstanden werden. An den Beobachtungsapparat waren folgende Anforderungen zu stellen. Die Spaltbreite und Spaltdicke musste beliebig und leicht geändert und genau gemessen werden können. Eine grössere Gasmenge musste mit constantem und messbarem Druck durch den Spalt getrieben und ihre Ausströmungsgeschwindigkeit bestimmt werden können. Die Dichtigkeit des zum Versuch verwendeten Gases war zu messen und schliesslich die Höhe des beim Ausströmen entstehenden Tones zu bestimmen.

Die Spaltconstruction war folgende (Tafel IV, Fig. 1). Auf den Messingcylinder *a* ist eine Messingplatte *b* geschraubt und mit Leder gedichtet, die bei *c* eine 9 mm breite und ca. 50 mm lange Oeffnung hat. Ueber dieser Oeffnung bilden zwei Messingplatten *pp'* den Spalt. Die Trommel des Spaltes von einem Vierordt'schen¹⁾ Apparat für photometrische Untersuchungen mit der einen Spaltplatte ist auf der Platte *b*

1) Vierordt, Anwendung des Spectralapparates zur Photometrie etc. Tübingen 1873.

befestigt und mit der Armirung ddd verschraubt, deren untere Fläche auf der Platte b beim Drehen der Trommel gleitet. An der vorderen senkrechten Fläche der Armirung liegt die eine Längsseite der Spaltwange p . Nahe dieser Längsseite ist p zweimal durchbohrt. Eine starke Feder e , die durch Anziehen der Schrauben f gespannt wird, greift mit zwei Stiften g und g' in die Löcher der Spaltwange ein und drückt diese stets gegen die Armirung d . Es ist also diese Spaltwange durch die Trommel und deren Schraube verstellbar. Die zweite Spaltwange p' liegt ohne seitliche Führung auf b , und die parallele Stellung der den Spalt bildenden Kanten von p und p' wird dadurch erreicht, dass man p und p' zugleich mit der Trommel eine Strecke auf der Unterlage vorwärts schiebt; die Federn hh und ii , erstere mit der Armirung fest verbunden, drücken die Spaltwangen auf die Platte b . Um luftdichten Schluss zwischen der letzteren und der Spaltwange zu erhalten, bringt man etwas weiches Fett zwischen die mit feinstem Smirgel abgeschliffenen Flächen derselben. Bei dieser Einrichtung lassen sich zugleich durch Einsetzen von Platten verschiedener Stärke die Spaltdicken sehr leicht und einfach wechseln. Alle Spalte waren gerade, d. h. Spaltdicke und Spaltbreite bildeten stets ein Rechteck.

Als Ansammlungsapparat für das zu den Versuchen zu verwendende Gas diente ein ca. 90 Liter haltendes Glockengasometer a (Taf. IV, Fig. 2) mit zwei Hähnen b und c durch deren ersteren die getrocknete Luft oder andere Gase einströmten. Von ihm aus ging zugleich ein Schlauch zum Manometer d , das der Empfindlichkeit halber mit Petroleum gefüllt war. Nach Absperrung des Zuleitungsschlauches gab also dieses Manometer den Ueberdruck des Gases im Gasometer an. Durch den zweiten Hahn c und einen Schlauch von ca. 1,4 qcm innerem Querschnitt strömte die Luft in ein Glasgefäß e , auf welchem die Spaltvorrichtung luftdicht befestigt war. In das Glasgefäß ragt das offene Ende f eines mit einem zweiten Petroleummanometer g in Verbindung stehenden Glasrohres. Dieses Manometer misst also den Ueberdruck des Gases unter dem Spalt. Eine Annäherung

oder Entfernung der Rohröffnung von dem Spalt zeigte sich ohne Einfluss auf die Angaben des Manometers. Das Gasometer wurde, um beliebige Drucke zu erzielen, einfach mit Gewichten belastet. Den zunehmenden Auftrieb des Gasometers beim Einsinken in die Sperrflüssigkeit äquilibrte eine gleichzeitig abrollende Kette, sodass während der ganzen Dauer des Ausströmens der Druck so gut wie constant blieb.

Die Ausströmungsgeschwindigkeit musste aus dem in der Zeiteinheit ausströmenden Volumen und dem Querschnitt der Ausströmungsöffnung bestimmt werden, das Volumen aus Querschnitt und Senkung des Gasometers. Um letztere zu messen, war auf der Decke der Glocke ein Glasstab *q* befestigt, der von 5 zu 5 cm leicht sichtbare Marken trug. Zwei weitere feste Marken auf dem Gestell des Gasometers und an der Wand legten eine horizontale Visirlinie fest, und es wurden die Zeiten beobachtet, zu denen die Marken am Glasrohr die Visirlinie passirten. Ein zweiter Schlauch führte von dem Hahn *c* zu einem grossen Kautschuksack *h*. Sollten nämlich Gemische verschiedener Gase zur Beobachtung verwendet werden, so wurden dieselben nach Volumentheilen ins Gasometer, das zugleich zu ihrer Messung diente, zusammengeführt und, um bei möglichst geringem Zeitverlust ihrer innigen Vermengung sicher zu sein, in den Sack geleitet, dort durch Klopfen gemischt, und ins Gasometer zurückgesaugt.

Die Bestimmung der Dichtigkeit der Gase geschah durch Wägung derselben in einem Glasballon *i* von ziemlich genau 1 Liter Inhalt. Alle Gase wurden vor dem Eintritt in das Gasometer durch Schwefelsäure in einer Wulff'schen Flasche, durch vier Trockenröhren mit Glasperlen und Schwefelsäure und ein Rohr mit wasserfreier Phosphorsäure geleitet. Als Sperrflüssigkeit im Gasometer diente, seiner sehr geringen Dampfspannung wegen, Oel. Der Glasballon, der durch eine Glasfeder¹⁾ mit einer Jolly'schen Quecksilberluftpumpe in Verbindung stand, wurde ausgepumpt und dann der Hahn *k* geschlossen. Durch den Schliff *l* liess man aus dem Gasometer etwas Gas austreten, um den Schlauch damit zu

1) Kundt u. Warburg, Pogg. Ann. 155. p. 364. 1875.

füllen, setzte den Schliff an den Ballon und füllte unter stetigem Ueberdruck im Gasometer denselben durch den Hahn *m*. Dann wurde abermals ausgepumpt, bis das Manometer der Pumpe bei einem neuen Stoss keine Aenderung mehr zeigte, und nun die zur Wägung bestimmte Füllung gemacht. Die Bestimmung der Tonhöhe geschah nach der schon in einer früheren Arbeit¹⁾ beschriebenen Methode mit dem Monochord.

Ermittlung der Versuchsconstanten.

Die Ganghöhe der Trommelschraube am Vierordt'schen Spalt wurde auf zwei verschiedenen Wegen bestimmt. Die Messung der Länge, um welche sich bei zehn Trommelumgängen eine Marke an der Spaltwange verschob, ergab mit einem guten Comparator vorgenommen für einen Trommelumgang 0,2492 mm. Andererseits verglich man ein Sphärometer, dessen Ganghöhe erst zu ermitteln war, mit dem Kathetometer und bestimmte mit dem Sphärometer und mit der Trommelschraube die Dicke derselben Glasplatten nach der von Koch²⁾ angegebenen Methode. Diese Messung ergab einen Umgang der Trommel zu 0,2494 mm. Die Spaltdicke wurde durch Messung der Dicke der allseitig gut abgeschliffenen Spaltwangen ebenfalls mit dem Sphärometer bestimmt. Die Länge des Ausschnitts in der Platte, auf der die Spaltwangen gleiten, und somit die Spaltlänge selbst betrug 50,4 mm.

Der Umfang des Gasometers wurde an fünf verschiedenen Stellen mittels Papierstreifen gemessen und daraus der Radius unter Abzug der Blechdicke von 238,4 mm bis 238,8 mm veränderlich gefunden. Dieselbe Grösse bestimmte man noch nach folgendem Princip. Sei f die kreisförmige belastete Oberfläche der Sperrflüssigkeit, a_0 das unbekannte Gewicht der Gasometerglocke, $a_1, a_2, a_3 \dots$ bekannte Gewichte, $d_0, d_1, d_2, d_3 \dots$ die den Belastungen $a_0, a_0 + a_1, a_0 + a_2, a_0 + a_3 \dots$ entsprechenden, am Manometer d abzulesenden Ueberdrucke im Gasometer, so ist der gesuchte Radius r der Fläche f :

1) W. Kohlrausch, Wied. Ann. 10. p. 1. 1880.

2) Koch, Wied. Ann. 3. p. 611. 1878.

$$r = \sqrt{\frac{a_n}{d_n \pi} \left(1 + \frac{d_0}{d_n - d_0} \right)}.$$

Beobachtungen mit möglichst verschiedenen bekannten Gewichten ergaben für r den Mittelwerth 240,1 mm.

Die Angaben der Manometer in Petroleum von wechselnder Temperatur waren in Quecksilber von 0° umzurechnen. Zu dem Ende wurde das specifische Gewicht des Petroleums bei verschiedenen Temperaturen mit dem Pyknometer bestimmt. Es ergaben sich bei den

Temperaturen	13,0°	20,0°	29,7°
die spec. Gewichte	0,80398	0,79907	0,79229

Daraus berechnet sich der Ausdehnungscoëfficient des Petroleums merklich gleichförmig zwischen 13° und 30° zu 0,000875. Diese Angaben sind in genügender Uebereinstimmung mit den von Marek¹⁾ ermittelten Zahlen.

Das innere Volumen des Glasballons, der zu den Bestimmungen der Gasdichten diente, fand sich durch Auswägen mit Wasser von bekannter Temperatur gleich 996,85 ccm, das äussere, welches bei Reduction der Wägungen auf den leeren Raum in Rechnung kommt, nach Addition des durch 2,6 dividirten Glasgewichts zu 1068,70 ccm. Zwei zur Controlle der Methode und Volumenbestimmung ermittelte Werthe für die Dichtigkeit der Luft bei 0° und 760 mm lieferten die Zahlen 0,001291 und 0,001296.

Versuchsanordnung.

Nehmen wir den allgemeinen Fall der Untersuchung eines Gemisches aus 2 Gasen. Zunächst wurde vor jedem Einfüllen eines neuen Gases, wenn vorher ein anderes Gas im Gasometer gewesen war, dieses und der Kautschuksack einigemal mit je etwa 10 Litern der neuen Füllung ausgespült. An dem Gasometer war eine einfache Vorrichtung angebracht, die dasselbe beim Füllen mit Gas an einem vorher fixirbaren Punkte anhielt. Entsprechend der gewünschten Dichte wurde bis zu einem bestimmten Volumen mit einem Gase, dann mit dem anderen der Rest des Gasometers gefüllt, die beschriebene Mischung

1) Marek, Carl Rep. 16. p. 119. 1880.

im Kautschuksack bewerkstelligt und das Gasometer durch Gewichte belastet. Dann wurde der Ballon in oben erwähnter Weise gefüllt und durch den Hahn *n* eine Zeit lang mit der Aussenluft in Verbindung gesetzt. Diffusion derselben in den Ballen hinein konnte bei der langen Leitung von *n* bis *k* nicht so schnell stattfinden. Die Temperatur des Gases lieferten zwei an beiden Seiten des Ballons hängende Thermometer, den Barometerstand ein auf Normalangaben reducirbares Barometer.

Die Einstellung des Spaltes geschah in folgender Weise. Zunächst schob man mit der Trommel die mit ihr verbundene Spaltwange gegen die zweite Wange, dann beide noch so weit, dass der Nullpunkt der Trommeltheilung mit dem Index zusammenfiel. Um sodann den todten Gang der Schraube oder auch das nicht vollständige Mitnehmen der ersten Spaltwange zu vermeiden, öffnete man stets den Spalt um etwa zwei Trommelumgänge weiter als die beabsichtigte Spaltbreite und schob auf die gewünschte Breite zusammen. Wie man sich durch häufige Versuche überzeugete, schloss der von neuem auf Null gestellte Spalt so weit, dass bei den anzuwendenden Drucken das Gasometer im Verlauf einer Stunde nur um einige Millimeter sank.

Demnächst wurde behufs Reduction des Petroleummanometers die Lufttemperatur abgelesen, der Hahn *c* geöffnet und während des Ausströmens ausser den Durchgangszeiten der Marken am Glasstabe *q* die Druckhöhe unter dem Spalt und möglichst oft die Tönhöhe bestimmt. Zum Schluss geschah die Wägung des Ballons unter Beobachtung der Temperatur im Wagekasten und des Barometerstandes. Die Temperatur, bei welcher beobachtet wurde, lag selten ausserhalb der Grenzen 17° und 23° , meist sehr nahe bei 20° . Die Abkühlung der Gase beim Austritt ist natürlich um so grösser, je grösser der Ueberdruck unter dem Spalt ist. Bei den definitiven Beobachtungen blieb derselbe stets kleiner als 10 mm Quecksilber, also dementsprechend die Temperaturänderung beim Austritt der Gase geringer als 4° .

Ich lasse zur Orientirung eine vollständige Beobachtungsreihe folgen:

Versuch Nr. 225.

Spaltbreite 0,249 mm. Spaltdicke 4,96 mm.

Gleiche Volumina Kohlensäure und Luft.

Lufttemperatur 16,7°.

Ablesungen am Manometer g.

753,0	752,7	753,3	753,0
661,0	661,2	660,3	661,0
<u>92,0</u>	<u>91,5</u>	<u>93,0</u>	<u>92,0</u>

Mittel 92,1 mm.

Marken	0	1	2	3	4	5	6
Durchgangszeiten . .	25 ^m 43'	26 ^m 20'	26 ^m 57,5'	27 ^m 34,8'	28 ^m 12,3'	—	30 ^m 26,0'
Differenzen		37,0'	37,5'	37,3'	37,5'	73,7'	

d. h. eine Senkung des Gasometers um 10 cm erfolgt im Mittel in 74,33 Sec.

Länge der Saite am Monochord

181	179	183	180,5	181	180	179	180
-----	-----	-----	-------	-----	-----	-----	-----

Mittel 180,4 mm, dazu $n = 2614$.

Temperatur des Ballons	Barometerstand
beim Füllen 15,9° 16,3°	747,2 mm
beim Wägen 14,6°	

Gewicht des leeren Ballons 186,5425 g

Gewicht des gefüllten Ballons 186,7420 g.

Das Gewicht des luftleeren Ballons ist bereits wegen Gewichtsverlustes in der Luft corrigirt, das andere noch nicht.

Aus diesen Daten ergibt sich, dass bei einer Spaltbreite (-dicke) von 0,249 mm (4,96 mm) ein Gemisch von Kohlensäure und Luft von der Dichte 1,244, wenn es unter einem Drucke von 5,43 mm Quecksilber austritt, bei einer Ausströmungsgeschwindigkeit von 2060 cm/sec einen Ton von 2614 Schwingungen per Sec. erzeugt. Ueber die Grenze der Beobachtungsgenauigkeit braucht wenig gesagt zu werden. Sie ergibt sich genügend aus den vorstehenden Beobachtungen.

Zur Orientirung über die Ausdehnung der Versuche sei erwähnt, dass während die Drucke zwischen 1 mm und 10 mm Quecksilber die Spaltbreiten zwischen 0,1 und 1 mm, die

Spaltdicken zwischen 1 und 10 mm lagen, bei Gasen, deren Dichtigkeiten bei 0° und 760 mm von 0,7 bis 1,5 variirt wurden, sich Ausflussgeschwindigkeiten zwischen 1000 und 3000 cm/sec und Schwingungszahlen zwischen 300 und 4000 per Secunde ergaben.

Beobachtungsergebnisse.

Die Untersuchung der Abhängigkeit der Tonhöhe von Ausströmungsgeschwindigkeit, Spaltbreite, Spaltdicke, Oberflächenbeschaffenheit der Spaltwangen, und schliesslich Dichte und Art der Gase hat zu folgenden Resultaten geführt. Zu jeder Ausströmungsgeschwindigkeit gehört *ceteris paribus*, d. h. für eine bestimmte Spaltbreite, Spaltdicke und Gassorte, ein bestimmter Druck unter dem Spalt. Die genauere Besprechung der Abhängigkeit der ersteren vom letzteren bei Austritt aus Spalten gehört jedoch nicht in den Kreis unserer Betrachtungen. Es genügt zu bemerken, dass c. p. die Ausflussgeschwindigkeiten den Quadratwurzeln aus dem Ueberdruck angenähert proportional sind.

Zwischen Ausflussgeschwindigkeit und Tonhöhe besteht eine sehr einfache Beziehung. Es lässt sich nämlich die Schwingungszahl n als lineare Function der Geschwindigkeit u von der Form:

$$n = k(u - u_0)$$

darstellen, wo die Grössen u_0 und k für eine bestimmte Spaltbreite und Gassorte constant sind. Denken wir uns also die u als Abscissen, die n als Ordinaten graphisch aufgetragen, so ist der Ort der Punkte, in denen die zu verschiedenen u gehörigen n liegen, soweit die Beobachtungsgenauigkeit reicht, eine Gerade. Diese bildet mit der u -Axe einen Winkel, dessen Tangente k ist, und schneidet die u -Axe in einem Abstände $u = u_0$ vom Nullpunkt des Systems (cf. Tafel IV, Fig. 3)¹⁾. Dies Gesetz gilt für alle Spalt-

1) Die oben an den Geraden der Fig. 3 befindlichen Zahlen bedeuten Spaltbreiten in 0,1 Trommelumgängen. Dieselben Zahlen befinden sich an den Schnittpunkten der verlängerten Geraden mit der u -Axe für Luft oben, für CO₂ auf der Axe, für CO₂ + Luft unten. Die Geraden sind nur für die beobachteten Strecken gezogen.

breiten über 0,2 mm und für alle untersuchten Gase und Gemische. Für geringere Spaltbreiten liegen die n nicht mehr auf einer Geraden, sondern auf einer schwach gegen die u -Axe convexen Curve, sodass dann mit zunehmendem u und n für ein Curvenelement auch u_0 und k wachsen, ein Umstand, auf den wir später zurückkommen. Die nachfolgende Zusammenstellung bestätigt das obige Gesetz beispielsweise für eine Spaltbreite von 0,498 mm, eine Spaltdicke von 5 mm und Luft als austretendes Gas.

	$u_0 = 580$			$k = 1,187$			
u	= 1368	1654	1774	1835	2071	2276	2458
n beob.	= 948	1270	1405	1500	1781	2030	2204
n berech.	= 935	1275	1417	1489	1769	2013	2229

Ausgedehnte Belege finden sich in den grösseren Tabellen auf p. 557 und 558. Die Aenderung der u_0 und k mit den übrigen Versuchsbedingungen soll im Folgenden an Stelle der Aenderungen der Tönhöhen betrachtet werden. Letztere ergeben sich aus ersteren dann ohne weiteres.

Mit der Spaltbreite ändern sich die u_0 und k für alle Spaltdicken und alle Gasdichten qualitativ in derselben Weise (cf. Tafel IV, Fig. 3, 4 und 5). Mit zunehmender Spaltbreite nimmt sowohl u_0 wie k ab (cf. Tab. I), d. h. die Neigung der Geraden $n = k(u - u_0)$ gegen die u -Axe wird geringer, und sie schneidet dieselbe näher am Nullpunkt. Bei den angestellten Versuchen variirt u_0 von 144 bis 1060, k von 0,69 bis 2,09.

Die Untersuchung mit verschiedenen Spaltdicken bei Luft führte zu dem im hohen Grade bemerkenswerthen Resultat, dass die Aenderung der Spaltdicke auf die Constanten u_0 und k von fast verschwindendem Einfluss ist, obgleich zu denselben Ausflussgeschwindigkeiten bei den dicken Spalten, wie zu erwarten war, weit grössere Drucke erforderlich sind, als bei dünneren Spalten. Ein regelmässiger Gang in den u_0 und k mit der Aenderung der Spaltdicke ist kaum festzustellen (cf. Tab. I). Für Kohlensäure scheint diese Unabhängigkeit der u_0 und k von der Spaltdicke nicht mehr in dem Maasse zu gelten. Während

die u_0 fast constant sind, nehmen die k besonders bei breiten Spalten mit der Spaltdicke ein wenig zu. Jedoch bei einer Spaltbreite von 0,25 und 0,37 mm zeigt sich auch hier gar keine Aenderung.

Ehe die vorstehenden Resultate durch Beobachtungsmaterial belegt werden, besprechen wir kurz den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Spalte. Der Spalt von etwa 1 mm Dicke wurde mit größerem Smirgel nachgeschliffen. Mit der Lupe sah man deutlich die grössere aber völlig regelmässige Rauheit der Flächen. Auf Null gestellt, dichtete der Spalt jetzt bei weitem nicht mehr so gut, als mit glatteren Flächen, d. h. die Spaltbreite war jetzt nicht wirklich Null, sondern grösser. Die Versuche zeigten dementsprechend bei scheinbar gleichen Spaltbreiten grössere u_0 — die k sind wenig geändert — als bei glatten Flächen, da die Messung zu kleine Spaltbreiten ergeben musste (cf. Tab. I).

Ich lasse zunächst zwei Tabellen folgen, die das Gesetz $n = k(u - u_0)$ für alle beobachteten Gase bestätigen und einen Ueberblick über die Aenderung der u_0 und k mit der Spaltbreite s geben. Die erste zeigt ausserdem die Unabhängigkeit der u_0 und k von der Spaltdicke d , die zweite für eine Spaltdicke den später zu besprechenden Gang in der Aenderung der u_0 und k mit der Spaltbreite bei den verschiedenen Gasen und Gemischen. In den Tabellen sind von allen Beobachtungen für jede Spaltbreite nur drei für meist drei bestimmte Belastungen des Gasometers herausgegriffen. Die letzte Columnne enthält die Beobachtungen an dem mit größerem Smirgel geschliffenen Spalt. Von den je drei in der zweiten bis sechsten Columnne unter einander stehenden Zahlen ist die erste die Ausströmungsgeschwindigkeit, die zweite die beobachtete, die dritte die nach der erwähnten Formel berechnete Schwingungszahl des zugehörigen Tones. Alle sind mit dem Factor 10^{-1} multiplicirt, da die letzte Stelle der vierziffrigen Zahlen doch keinen Anspruch auf Richtigkeit haben würde.

I. Luft.

$d =$						$d =$					
9,5mm 5mm 3mm 1mm 1mm*						9,5mm 5mm 3mm 1mm 1mm*					
$s = 0,249$ mm						$s = 0,498$ mm					
$u_0 =$	890	867	888	868	967	$u_0 =$	572	580	616	616	700
$k =$	1,58	1,75	1,75	1,79	1,74	$k =$	1,19	1,19	1,12	1,12	1,16
u n beob. n ber.	—	124	142	161	166	u n beob. n ber.	131	137	143	150	152
	—	65	90	135	122		86	95	94	100	94
	—	66	94	133	123		88	94	91	99	95
	149	167	188	210	217		174	177	188	193	196
	93	138	163	218	205		138	141	137	144	145
	97	138	163	220	209		139	142	141	147	147
	200	217	243	266	274		223	228	237	245	247
	178	228	270	326	314		202	203	193	209	209
	176	228	271	320	309		197	201	197	205	206
$s = 0,373$ mm						$s = 0,622$ mm					
$u_0 =$	705	731	750	750	818	$u_0 =$	437	436	480	470	496
$k =$	1,44	1,53	1,42	1,42	1,39	$k =$	0,96	0,94	0,88	0,88	0,88
u n beob. n ber.	123	134	147	160	162	u n beob. n ber.	126	129	136	138	137
	81	96	102	120	113		76	82	77	81	78
	76	93	102	121	111		79	80	78	80	77
	172	184	194	204	209		166	170	174	179	180
	141	166	167	185	176		113	117	107	114	115
	146	169	169	184	177		117	119	112	116	115
	223	231	210	260	265		211	215	210	206	226
	222	245	190	262	260		164	164	149	145	156
	219	242	192	263	254		160	162	144	140	155

$d =$					
9,5 mm 5 mm 3 mm 1 mm 1 mm*					
$s = 0,747$ mm					
$u_0 =$	315	303	—	—	—
$k =$	0,76	0,74	—	—	—
u n beob. n ber.	120	122	—	—	—
	65	67	—	—	—
	67	67	—	—	—
	158	156	—	—	—
	94	93	—	—	—
	96	93	—	—	—
	198	200	—	—	—
	130	125	—	—	—
	126	126	—	—	—

II. Spaltdicke 5 mm.

Es bedeutet: L = Luft; G = Leuchtgas; Δ = Gasdichte.

Δ =	CO ₂	CO ₂ + L	O ₂	Luft	CO ₂ + G	L + G
	1,515	1,247	1,105	1,000	0,992	0,716

 $s = 0,249$ mm

$u_0 =$	618	812	800	867	905	1060
$k =$	2,02	2,09	1,69	1,75	1,89	1,53
$\left. \begin{array}{l} u \\ n \text{ beob.} \\ n \text{ ber.} \end{array} \right\}$	114	118	110	124	136	145
	100	82	54	65	87	62
	106	77	51	66	85	59
	149	159	153	167	181	196
	182	152	120	138	168	136
	176	162	124	138	171	139
	195	206	206	217	236	255
	262	261	225	228	277	231
	268	260	213	228	274	229

 $s = 0,373$ mm

$u_0 =$	515	602	679	731	700	874
$k =$	1,78	1,65	1,53	1,53	1,51	1,34
$\left. \begin{array}{l} u \\ n \text{ beob.} \\ n \text{ ber.} \end{array} \right\}$	123	120	128	134	146	163
	127	99	93	96	116	101
	127	99	91	93	115	101
	158	164	170	184	188	206
	186	173	156	166	181	162
	189	171	156	169	179	159
	200	213	219	231	246	274
	265	250	235	245	265	248
	265	253	231	242	265	250

 $s = 0,498$ mm

$u_0 =$	466	450	520	580	520	700
$k =$	1,39	1,24	1,19	1,19	1,14	1,04
$\left. \begin{array}{l} u \\ n \text{ beob.} \\ n \text{ ber.} \end{array} \right\}$	121	122	125	137	145	158
	105	93	87	95	103	95
	106	95	86	94	103	92
	153	164	166	177	186	212
	143	147	136	141	149	142
	148	147	135	142	153	149
	193	207	211	228	236	266
	203	199	190	203	210	207
	203	200	190	201	207	204

$\Delta =$	CO ₂	CO ₂ + L	O ₂	Luft	CO ₂ + G	L + G
	1,515	1,247	1,105	1,000	0,992	0,716
$s = 0,622 \text{ mm}$						
$u_0 =$	340	257	385	436	300	580
$k =$	1,05	0,90	0,93	0,94	0,83	0,83
$\left. \begin{array}{l} u \\ n \text{ beob.} \\ n \text{ ber.} \end{array} \right\}$	110	110	119	129	138	154
	81	77	77	82	87	82
	80	76	76	80	90	80
	143	153	159	170	175	201
	112	113	110	117	121	118
	114	115	112	119	120	119
	178	193	201	215	215	234
	152	153	153	164	151	148
	151	151	152	162	153	146
$s = 0,747 \text{ mm}$						
$u_0 =$	215	144	253	303	—	—
$k =$	0,80	0,69	0,74	0,74	—	—
$\left. \begin{array}{l} u \\ n \text{ beob.} \\ n \text{ ber.} \end{array} \right\}$	104	114	113	122	—	—
	67	67	64	67	—	—
	66	69	65	67	—	—
	182	149	—	156	—	—
	87	91	—	93	—	—
	88	91	—	93	—	—
	147	169	182	200	—	—
	101	107	116	125	—	—
	101	107	117	126	—	—

Die Dichtebestimmungen der Gase, mit verschiedenen Füllungen des Gasometers ausgeführt, ergaben folgende Werthe:

Kohlensäure	Kohlensäure + Luft	Kohlensäure + Leuchtgas	Sauerstoff	Luft + Leuchtgas	Leuchtgas
1,519	1,244	0,982	1,103	0,716	0,420
1,524	1,252	0,998	1,102	0,719	0,415
1,514	1,244	0,984	1,105	0,714	0,426
1,512	1,247	1,002	1,108	0,716	0,421
1,504	—	—	—	—	0,415
1,517	—	—	—	—	0,420
—	—	—	—	—	0,412
Mittel 1,515	1,247	0,992	1,105	0,716	0,420

Die grössten Differenzen zeigen sich in den Dichten der Gemische und des Leuchtgases selbst. Es beruht dies höchst wahrscheinlich darauf, dass die Zersetzung der im Leuchtgas vorhandenen schweren Kohlenwasserstoffe durch die

Schwefelsäure der Trockenapparate nicht immer in derselben Ausdehnung stattfand, obgleich die letzte Perlröhre nur noch wenig von ausgeschiedener Kohle gefärbt wurde. Auch kann die wechselnde Zusammensetzung des Leuchtgases selbst die Schuld tragen.

Was den Einfluss der Gasdichten auf unsere Constanten anlangt, so geht aus der Tabelle II im allgemeinen hervor, dass mit abnehmender Dichtigkeit der Gase die u_0 zunehmen, dagegen die k abnehmen. Fig. 3, Taf. IV zeigt diesen Gang beispielsweise für Kohlensäure, Kohlensäure + Luft und Luft. Die Geraden des ersten Gases sind ausgezogen, die des zweiten strichpunktirt —○—○—○—, die des letzten punktirt. Ebenso die Schnitte ihrer Verlängerungen mit der u -Axe.

Aber abgesehen von der Dichtigkeit ist auch der Einfluss der Art des Gases auf die Aenderung der u_0 und k mit der Spaltbreite unverkennbar. Fig. 4 und 5, Taf. IV geben eine graphische Darstellung der Aenderung der u_0 und k als Ordinaten mit der Spaltbreite in Trommeltheilen als Abscissen bei einer Spaltdicke von 5 mm für die verschiedenen Gase und Gemische. Diejenigen Gasgemische, deren Constituenten selbst grosse Dichtigkeitsunterschiede besitzen, zeigen durchgehends eine grössere Aenderung der u_0 und k mit der Spaltbreite. Während z. B. die Dichtigkeit des Gemisches von Kohlensäure und Leuchtgas sich nur um 1% von der der Luft unterscheidet, zeigen die Curven für die u_0 und k einen ganz verschiedenen Verlauf. Ferner sollten die Curven der u_0 und k für das Gemisch aus Kohlensäure und Luft von der Dichte 1,25, wenn c. p. nur die Dichte des Gases die Tonhöhe bestimmte, ganz zwischen den Curven für Kohlensäure und Luft liegen. Die graphische Darstellung zeigt sofort, inwiefern das infolge der stärkeren Neigung der Curven nicht der Fall ist. Für breite Spalten liegen die u_0 und k des Gemisches bedeutend unterhalb der Curven für Kohlensäure, resp. Luft.

Die Curve der Constante k für Sauerstoff fällt mit der für Luft fast genau zusammen, während die der u_0 mit der für Luft parallel geht, aber stets kleinere u_0 ergibt. Ausser-

dem lehrt ein Blick auf die horizontalen Reihen der u und n der Tabelle II, dass, während die u allgemein mit abnehmender Gasdichte zunehmen, ein solcher regelmässiger Gang in den n keineswegs vorhanden ist.

Es sind also ausser der Dichtigkeit der Gase unzweifelhaft noch andere die Tonhöhe bestimmende Factoren vorhanden. Vorzugsweise dürfte der Reibungscoëfficient von Einfluss sein, demnächst die Wärmeeigenschaften der Gase. Das vorliegende Beobachtungsmaterial erlaubt jedoch noch nicht den Versuch, gesetzmässige Beziehungen in dieser Richtung aufzustellen.

Es erübrigt, noch einige allgemeine Daten über die Versuche anzufügen. Zunächst ist erwähnenswerth, dass innerhalb der Beobachtungsfehler bei gleicher Belastung des Gasometers und gleicher Spaltbreite und Dicke der Druck unter dem Spalt von der Gassorte unabhängig war, obgleich die Ausströmungsgeschwindigkeit mit abnehmender Gasdichte ganz bedeutend wächst. Wie die Tab. II, p. 558 zeigt, ist c. p. dieselbe bei der Dichte 0,716 gelegentlich etwa $\frac{3}{2}$ von der der Kohlensäure.

Zufällig begann ich die Untersuchung verschiedener Gase — Sauerstoff wurde erst später verwendet — mit einer Spaltbreite von 0,498 mm, einer Dicke von 5 mm und dem Druck 2,67 mm. Während nun die Ausströmungsgeschwindigkeiten mit den Gasdichten von 1525 cm/sec bis 2300 cm/sec schwankten, lagen alle beobachteten Schwingungszahlen zwischen 1305 und 1520. Unter diesen Umständen ist also die Gasdichte von geringem Einfluss auf die Tonhöhe. Spätere Versuche zeigten jedoch, wie wir gesehen haben (cf. Tab. II, p. 558), dass die Tonhöhen bei verschiedenen Gasen und gleichem Druck nur bei breiten Spalten annähernd von der Gasdichte unabhängig sind. Auch für den grossen Querschnitt der Spaltöffnung von ca. 25 qmm ergaben die Producte aus den Dichten in die Quadrate der Ausflussgeschwindigkeiten Werthe, die nur zwischen 314 und 353 schwankten. Wie zu erwarten war, wächst das Product mit der Gasdichte.

Nach den Tabellen und Fig. 3, Taf. IV könnte es

scheinen, als ob breite Spalte überhaupt nicht so hohe Töne als schmale gäben. Dies liegt jedoch nur daran, dass bei der vorliegenden Methode der Versuche die mögliche Belastung des Gasometers nicht ausreichte, die für hohe Töne bei weiten Spalten erforderlichen grossen Ausflussgeschwindigkeiten zu erhalten.

Aus einer grossen Zahl von Versuchen wurde graphisch die Aenderung der Schwingungszahl n ermittelt, wenn man bei constant gehaltener Ausflussgeschwindigkeit die Spaltbreite stetig verkleinert. Bei Spaltbreiten von mehr als ca. 1,2 mm hört man nur das tonlose Sausen der austretenden Luft. Verkleinert man stetig die Breite, so hört man plötzlich einen tiefen noch stark von Geräusch begleiteten Ton, der ohne Aenderung der Spaltbreite noch häufiger in reines Sausen umschlägt und wieder einsetzt. Bei weiterer Verengerung wird der Ton besser, stärker und zugleich höher, so zwar, dass die Schwingungszahl ziemlich gleichmässig mit abnehmender Breite des Spaltes zunimmt. Bei Breiten zwischen 0,3 und 0,4 mm erreicht die Tonhöhe ein Maximum, und dann tritt bei fernerer Spaltverengerung eine schnelle Abnahme derselben ein, die schliesslich so rapide wird, dass der Ton bei einer Aenderung der Breite von 0,12 mm in 0,09 mm in seine tiefere Octave übergeht. Bei derselben Ausflussgeschwindigkeit erhält man daher alle Töne, die zwischen dem zuerst auftretenden tiefsten und dem für diese Geschwindigkeit charakteristischen höchsten Tone liegen, zweimal bei verschiedenen Spaltbreiten. Die tiefsten hörbaren Töne bei engem Spalt sind weit tiefer als diejenigen bei weitem Spalt und gleicher Geschwindigkeit. Die Grenzen, innerhalb deren man überhaupt Töne erhält, liegen sowohl bezüglich der Spaltbreite als der Ausströmungsgeschwindigkeit bei dichteren Gasen bedeutend weiter auseinander als bei weniger dichten, ebenso bei dickeren Spalten weiter als bei dünneren. Auch sind die Töne der dichteren Gase und dickeren Spalte schöner und ihre Höhe leichter zu bestimmen, als die der übrigen. Mit unvermischem Leuchtgas erhielt ich überhaupt keine sicher erkennbaren Töne mehr.

Die Lage des obenerwähnten Maximums der Tonhöhe auf der Scala der Spaltbreiten bei constanter Ausflussgeschwindigkeit ändert sich mit Spaltdicke, Belastung des Gasometers und Gasdichte. Es rückt mit von 1 mm bis 9 mm zunehmender Spaltdicke für Luft von der Spaltbreite 0,27 mm bis 0,32 mm vor, bewegt sich mit abnehmendem Druck langsam gegen grössere Spaltbreiten und liegt z. B. bei gleicher Spaltdicke für Kohlensäure bei 0,30 mm, für Luft bei 0,35 mm Spaltbreite. Mit dem Auftreten dieses Maximums hält die Erscheinung gleichen Schritt, dass bei constant gehaltenem Druck bei weiten Spalten die Ausströmungsgeschwindigkeit sehr langsam mit abnehmender Spaltbreite abnimmt, bei Spaltbreiten von etwa 0,3 mm diese Abnahme wächst und sich nun sehr schnell bei weiter verengertem Spalt steigert.

Nach dem oben Gesagten gibt es bei gegebener Gasart und Spaltdicke für jede Ausströmungsgeschwindigkeit ein charakteristisches Maximum der Tonhöhe, welches bei einer bestimmten Spaltbreite auftritt, und wir sehen, dass, so weit die Beobachtungen reichen, mit abnehmendem Druck, also abnehmender Ausflussgeschwindigkeit, das Maximum sich gegen grössere Spaltbreiten bewegt. Daher stammt der Schnittpunkt der 2 Geraden $n = k(u - u_0)$ Taf. IV, Fig. 3 für die Spaltbreiten 0,25 mm und 0,37 mm. Wir denken uns nun auch die Geraden der grösseren Spaltbreiten gegen die u -Axe hin verlängert. Mit zunehmender Spaltbreite nimmt die Neigung der Geraden gegen die u -Axe ab, und ihr Schnittpunkt mit dieser Axe nähert sich dem Nullpunkt des Systems. Betrachten wir also die Geraden nach zunehmender Spaltbreite geordnet, so schneidet jede derselben die vorhergehende, die Schnittpunkte rücken dem Nullpunkte immer näher, und der Theil der verlängerten Geraden zwischen diesem Schnittpunkt und der u -Axe liegt für die ihm entsprechende Geschwindigkeit höher, als alle vorangehenden Geraden. Also eine Curve, für welche die verlängerten Geraden Tangenten sind, d. h. die Enveloppe derselben, repräsentirt die für jede Geschwindigkeit grösstmöglichen Tonhöhen. Zwischen ihr und der n -Axe können demnach keine

Beobachtungspunkte mehr liegen. Wie sich aus den der Beobachtung zugänglichen Geschwindigkeiten und Tonhöhen schon zu ergeben schien, tritt demnach bei stets kleiner werdender Ausströmungsgeschwindigkeit das für diese charakteristische Maximum der Tonhöhe bei stets grösserer Spaltbreite ein. In Taf. IV, Fig. 3 ist die Curve der Maximaltonhöhen für das Gemisch aus Kohlensäure und Leuchtgas ausgezogen. Dem Aussehen nach ähnelt sie am meisten der Hälfte eines Hyperbelastes, und ich habe daher versucht, sie durch eine Hyperbelgleichung darzustellen. Weitgehende Uebereinstimmung lässt sich bei der complicirten Entstehung der Curven aus den zum grossen Theil ganz ausser ihrem Bereich liegenden Beobachtungen natürlich nicht erwarten. Aus der Hyperbelgleichung:

$$n = \sqrt{(u^2 + b^2) \frac{a^2}{b^2}} - a$$

ergibt sich bei $a = 2280$, $b = 1150$ nahezu die Curve der Maximaltonhöhen für das Gemisch aus Kohlensäure und Leuchtgas, bei $a = 2720$, $b = 1440$ genähert die für Luft.

Bemerkenswerth ist jedenfalls die Thatsache, die sich keineswegs voraussehen liess, dass für jede Ausflussgeschwindigkeit eine grösste Tonhöhe bei bestimmter Spaltbreite existirt, und dass diese grösste Tonhöhe bei um so grösseren Spaltbreiten auftritt, je kleiner die Ausflussgeschwindigkeiten sind.

Fassen wir noch einmal die wesentlichsten Versuchsergebnisse zusammen, so ergibt sich Folgendes:

1) Für alle Spaltbreiten zwischen 0,2 mm und 1 mm und alle untersuchten Gasdichten lassen sich die Tonhöhen n als lineare Function der Ausflussgeschwindigkeiten u durch die Formel:

$$n = k(u - u_0)$$

darstellen, wo u_0 und k für eine gegebene Spaltbreite und Gassorte constant sind.

2) Mit zunehmender Breite des Spaltes — 0,2 mm bis 1 mm — nehmen die u_0 ab, die k zu.

3) Von der Dicke des Spaltes — 1 mm bis 9 mm — sind die u_0 und k (für Luft) so gut wie unabhängig.

4) Mit zunehmender Dichte des Gases — 0,7 bis 1,5 — nehmen im allgemeinen die u_0 ab, die k zu, d. h. die Töne werden c. p. höher.

5) Ausser von der Dichte sind die u_0 und k von anderen Eigenschaften der Gase in nicht geringem Maasse abhängig.

6) Geht man von weiten Spalten aus, so nimmt bei constanter Ausflussgeschwindigkeit die Tonhöhe mit Verengerung des Spaltes ziemlich gleichförmig zu, erreicht ein Maximum bei Spaltbreiten zwischen 0,35 mm und 0,27 mm — bei dickeren Spalten, kleineren Drucken und weniger dichten Gasen eher als in den entgegengesetzten Fällen — und nimmt weiterhin mit der Spaltbreite immer schneller und schneller ab.

7) Diese für jede Ausflussgeschwindigkeit charakteristische grösste Tonhöhe tritt bei um so grösserer Spaltbreite auf, je kleiner die Ausflussgeschwindigkeit selbst ist.

Vergleichung der Erfahrungen über Spalttöne und Drahtreibungstöne.

Die Resultate der vorliegenden Versuche, sowie ihre Bedingungen zeigen eine auffallende Aehnlichkeit mit denen der Arbeit von Strouhal, welcher die durch Bewegung cylindrischer Körper in Luft erregten Töne untersuchte. Denken wir uns bei Strouhal statt der Drähte die Luft bewegt und die Drähte in Ruhe, so haben wir genau den umgekehrten Fall, wie bei unseren Versuchen. Dort wird die Bewegung der Luftmasse an dem ihr entgegengesetzten Längsschnitt des Drahtes gehindert, bei uns wird durch den Querschnitt des Spaltes hindurch, der in seiner Form dem Längsschnitt des Drahtes entspricht, eine Luftlamelle in Bewegung gesetzt. In beiden Fällen handelt es sich um die Reibung bewegter Luft an festen Körpern oder den ihnen anhaftenden Luftschichten.

Dem entsprechend ist auch die Abhängigkeit der Tonhöhe von den sie bedingenden Umständen bei Strouhal's Drahtreibungstönen und den hier untersuchten Spalt-

tönen qualitativ fast durchgehends¹⁾ dieselbe. Die Drahttöne wie die Spalttöne liegen bei gleichen Drahtdicken, bezüglich gleichen Spaltbreiten, in dem aus Bewegungsgeschwindigkeit u und Schwingungszahl n gebildeten Coordinatensystem auf einer Geraden, deren Verlängerung nicht durch den Nullpunkt geht, sondern die u -Axe schneidet. In beiden Fällen weist der Uebergang dieser beiden Geraden bei dünnen Drähten, resp. engen Spalten (cf. p. 555), in eine nach unten gekrümmte Curve darauf hin, dass die Geraden nur Asymptoten von naturgemäss den Nullpunkt des Systems enthaltenden Curven sind. Diese schmiegen sich den Geraden bei um so geringeren Geschwindigkeiten an, je grösser Drahtdicken und Spaltbreiten sind. Demgemäss rücken auch die Schnittpunkte der verlängerten Geraden mit der u -Axe bei Vergrösserung von Drahtdicke, resp. Spaltbreite immer näher an den Nullpunkt heran.

Wenn die gedachten Curven den Nullpunkt wirklich enthalten, so ist damit noch nicht gesagt, dass auch bei sehr kleinen Geschwindigkeiten — bei 600 cm/sec wurden noch Töne beobachtet — das Ausströmen periodisch oder discontinuirlich erfolgen müsste, und das ist doch wohl allgemein die Bedingung für die Bildung eines Tones. Die hier in Frage kommende Periodicität der Bewegung ist vielleicht als eine sprungweise Aenderung der relativen Geschwindigkeit ganzer Schichten benachbarter Molecüle zu denken. Aehnliche Erscheinungen beobachten wir, wenn wir mit einigem Druck z. B. den nassen Finger über eine glatte, nasse Glasscheibe gleiten lassen. Beim langsamen Gleiten bewegt er sich stetig; suchen wir die Geschwindigkeit zu vergrössern, so tritt sehr leicht ein regelmässig sprungweises Gleiten ein, ohne dass dabei die Berührung zwischen Flüssigkeit und dem Glas einerseits, dem Finger andererseits aufhört. Bekannt ist, wie man ein Weinglas durch Reiben des nassen Randes

1) Das Maximum der Tonhöhe, welches bei constant gehaltener Ausströmungsgeschwindigkeit für eine bestimmte Spaltbreite eintritt, findet bei den Drahtreibungstönen kein Analogon. — Der Einfachheit halber mögen die beiden Arten der Töne als Drahttöne und Spalttöne im Folgenden unterschieden werden.

mit dem Finger leicht in regelmässige Schwingungen versetzen kann. Ich möchte den Vorgang eine schnelle Abwechselung von Reibung und Gleitung nennen, wenn der letztere Ausdruck nicht schon anderweitig gebräuchlich wäre.

Es gibt solche Beispiele periodischer Ueberwindung von Reibungswiderständen bei Berührung fester und flüssiger Körper in grosser Menge, und fast immer erfolgt der Uebergang aus gleichförmiger in periodische Bewegung plötzlich, und die Sprünge treten gleich regelmässig und in rascher Folge auf. Dass das eingangs der Arbeit erwähnte Tönen ausfliessender Wasserstrahlen seinen Grund in Sprüngen der Ausflussgeschwindigkeit hat, folgt schon aus der bereits von Sondhauss gemachten Beobachtung, dass der bisher glatte Strahl, sobald ein Ton auftritt, rauh wird. Das hier unverkennbare Mitschwingen der Wassersäule im Rohr trägt allerdings dazu wesentlich bei.

Diesen Analogieen zufolge ist es sogar einigermaßen wahrscheinlich, dass das periodische Ausströmen bei stetiger Verkleinerung der Ausströmungsgeschwindigkeit bei einer noch wesentlichen Grösse derselben in gleichförmigen Austritt des Gases umschlägt, und somit der Ton verschwindet, ehe die Abnahme der Schwingungszahl sein Erlöschen bedingt. Leider sind die tieferen Töne ihrer geringen Intensität halber schliesslich nicht mehr wahrnehmbar, sodass sich experimentell darüber nichts entscheiden lässt. Aber ein ganz ähnliches plötzliches Auftreten der Töne ist ja beobachtet, wenn man sehr weite Spalte allmählich verengert (cf. p. 562).

Was die Neigung der Geraden gegen die u -Axe anlangt, so ist sie bei den Drahttönen ausser für kleine Drahtdicken d denselben umgekehrt proportional, d. h. es ist $k \operatorname{tg} \alpha = \text{Const.}$ Dass dies auch für die Spalttöne sehr nahezu der Fall ist, beweist folgende Tabelle, in der bei den verschiedenen Gasen für die vorn gegebenen Spaltbreiten s das Product aus Spaltbreite und $k = n(u - u_0) = \operatorname{tg} \alpha$ gegeben ist.

Die Spaltbreiten sind hier in Trommelumgängen (cf. p. 550) angegeben.

S	Kohlensäure	Kohlensäure + Luft	Sauerstoff	Luft	Kohlensäure + Leuchtgas	Luft + Leuchtgas
$\Delta =$	1,51	1,247	1,104	1,00	0,992	0,716
1	2,017	2,087	1,688	1,748	1,887	1,532
1,5	2,667	2,478	2,289	2,295	2,268	2,010
2,0	2,784	2,474	2,380	2,374	2,280	2,086
2,5	2,511	2,260	2,335	2,357	2,067	2,080
3,0	2,406	2,073	2,226	2,217	—	—

Die von Strouhal nachgewiesene Unabhängigkeit der Tonhöhe von der Oberflächenbeschaffenheit der Drähte wurde auch für die Spalttöne im wesentlichen constatirt (cf. p. 556).

Es bleibt nun noch die Parallele zu ziehen für die Aenderung der Neigung der besprochenen Geraden mit der Gasdichte. Wir haben gesehen, dass bei abnehmender Gasdichte im allgemeinen die u_0 zu, und die k abnehmen, folglich auch (cf. Taf. IV, Fig. 3) bei gleicher Ausflussgeschwindigkeit die Tonhöhe abnimmt. Strouhal experimentirte nur mit Luft¹⁾, hat aber die Töne mit 2 Drähten bei verschiedenen Temperaturen untersucht, einmal mit einem Intervall von 27,5°, das andere mal von 20°. Denselben entsprechen die nicht unerheblichen Dichtigkeitsänderungen von 10% und 7,5%. Dabei fand er ganz analog den Verhältnissen bei den Spalttönen sowohl die Tonhöhen als auch die Neigung der Geraden gegen die u -Axe für höhere Temperaturen, also für kleinere Dichten, erheblich kleiner.

Demnach kann wohl kaum ein Zweifel sein, dass die Entstehung der Spalttöne wie der Drahttöne auf ähnliche Ursachen zurückzuführen ist. Ob aber die von Strouhal versuchte Erklärung, die auch auf die Spalttöne theilweise übertragen werden kann, die richtige ist,

1) Die Drahttöne ohne grosse Hilfsmittel auch in anderen Gasen zu untersuchen, bietet unser Spaltapparat ein bequemes Mittel. Drahttöne entstehen schon bei viel kleineren Geschwindigkeiten als Spalttöne. Man könnte daher die ersteren untersuchen, indem man in einen weiten Spalt selbst einen Draht zieht. Die Ausströmungsgeschwindigkeit ist dann ebenso regulirbar als messbar. Das Auftreten von Spalttönen in dem so gebildeten Doppelspalt wäre durch passende Wahl von Spaltbreite und Ausflussgeschwindigkeit zu vermeiden.

lässt sich wohl erst mit einiger Sicherheit entscheiden, wenn über den Einfluss der Form des Querschnittes der im allgemeinen prismatisch zu wählenden Körper bei den Drahttönen, und andererseits der Form der Spalte bei den Spalttönen eingehende Untersuchungen vorliegen.

Physik. Inst. der Univ. Strassburg i./E. Febr. 1881.

II. *Ueber die Beobachtung der Luftschwingungen in Orgelpfeifen;* *von Dr. Rudolph Koenig in Paris.*

Wenn man bei Untersuchungen über die Schwingungen von Luftsäulen in Orgelpfeifen Pfeifen von geringen Dimensionen anwendet, so kann man in dieselben keine kleinen Membranen oder anderen nöthige Apparate einführen, ohne die Schwingungen der Luft in ihnen beträchtlich zu stören, auch werden dann die Wellenlängen der höheren Theiltöne sehr klein, gewöhnliche Pfeifen von beträchtlicher Grösse, und besonders gedackte, gestatten aber wieder nicht, jeden beliebigen Punkt ihres Innern mit den ausserhalb derselben befindlichen Untersuchungsapparaten oder dem Ohre des Beobachters auf kurzem Wege in Verbindung zu setzen, und dabei immer die vollständig luftdichte Einschliessung der Luftsäule zu bewahren. Ich habe daher folgenden Apparat construirt, bei dem die angegebenen Schwierigkeiten des Experimentirens fortfallen.

Eine grosse Orgelpfeife von 2,33 m Länge und 0,12 m Breite und Tiefe liegt horizontal in einem Trog auf zwei Füßen, welche mit Stellschrauben versehen sind, sodass sie mit Leichtigkeit in eine vollständig wagerechte Lage gebracht werden kann. In ihrer Hinterwand hat sie in ihrer ganzen Länge eine 0,01 m breite Spalte, die durch einen unter der Pfeife befindlichen Hohlraum mit der neben dieser hinlaufenden und zwischen ihr und der einen Seitenwand des Troges gebildeten Rinne in Verbindung steht. Wird nun Wasser