

Ueber das Ausströmen brennbarer Gase.

I.

Im Jahre 1777 beobachtete der Engländer Bryan Higgins ¹⁾, daß, wenn man Wasserstoffgas aus einer Röhre mit feiner Oeffnung strömen läßt, dasselbe dann anzündet, und über die Flamme ein weites Glasrohr senkt, ein Ton entsteht, der sich mit den Dimensionen des weiten Rohrs und der Stärke der Gasentwicklung ändert. Anfangs war man geneigt das Glasrohr als den tönenden Körper anzusehen, allein Puschkin ²⁾ zeigte, daß dies nicht möglich sei, da der Ton fortbauere, wenn man das Rohr umwickelt. Er nahm deshalb an, daß sich durch den austretenden Wasserstoff beständig Knallgas bilde, welches sofort nach seiner Entstehung explodire, und daß diese regelmäßig und schnell sich folgenden Explosionen den Ton hervorbrächten. Daß in der That die Röhrenwandung keinen Antheil an der Tonbildung habe, bewies Chladni ³⁾ sehr überzeugend auch dadurch, daß sie gleichfalls eintritt, wenn man statt des Rohres aus Glas ein solches aus klinglosen Stoffen anwendet; zugleich aber erkannte er, daß der Ton allein durch die in dem Rohr schwingende Luftsäule erzeugt werde, und derselbe sei, den man beim Blasen gegen den Röhrenrand hört, das Geschäft der Flamme also nur in dem Anblasen des Tones bestehe. Später fand Faraday ⁴⁾, daß das Tönen zwar am leichtesten mit Wasserstoff erfolgt, aber auch mit jedem andern rasch verbrennenden Gas, wie Kohlenoxyd, Kohlenwasserstoff, ja selbst mit Dämpfen z. B. von Aether und Alkohol gelingt. Eine für die Erklärung des Vorganges sehr beachtenswerthe Beobachtung machte ferner Wheatstone ⁵⁾, indem er fand, daß, wenn man das Licht einer tönenden Flamme auf einen schnell rotirenden Spiegel fallen läßt, sich regelmäßige Unterbrechungen der Lichtstärke zeigen, welche andeuten, daß die Flamme Contractionen und Dilatationen erleidet, entsprechend den Schallschwingungen der Luft.

Nach diesen bereits in früherer Zeit gewonnenen Resultaten wurde neuerdings dem Gegenstand wieder eine regere Aufmerksamkeit durch eine Reihe von Versuchen zugewendet, welche der Graf Schaffgotsch ⁶⁾ anstellte, zu denen auch der gehörte, daß die Flamme, noch ehe sie in dem Rohre tönt, durch Anstimmen des von ihr erwarteten Tones oder dessen Octave zum Tönen, so wie andererseits, wenn sie bereits tönt und nicht zu groß ist, durch ein kräftiges Anstimmen desselben Tones zum Schweigen gebracht werden könne. Auch wurden die Mittel, durch welche man die von Wheatstone entdeckte Intermission tönender Flammen leicht wahrnehmbar macht, vereinfacht und

¹⁾ Nicholson's Journal of Nat. Phil. New Ser. 1. 129; IV. 33.

²⁾ Götting's Almanach für Scheidekünstler 1795 pag. 18.

³⁾ Schriften der Gesellschaft naturforsch. Freunde zu Berlin 1795. I. 125.

⁴⁾ Journ. of science and the arts Vol. V. Nr. 10. pag. 274.

⁵⁾ Poggendorff's Annalen XXXIV. 470.

⁶⁾ Pogg. Ann. C. 352, CI. 471, CII. 627.

vermehrt. In Folge dieses erneuten Interesses beschäftigte sich hierauf Tyndall¹⁾ mit der chemischen Harmonika und zeigte, wie sich in einer Röhre durch verschiedene Stärke der Flamme außer dem Grundton auch seine Obertöne, so wie mittelst der Sirene, Stimmgabel u. s. w. Schwebungen oder Stöße hervorbringen ließen, welche sonst schon zufällig wahrgenommen waren, und durch das gleichzeitige Zucken der Flamme sich auch sichtbar machen.

Während nun die vorstehenden Arbeiten das Gebiet der Thatfachen erheblich vergrößert hatten, blieb hinsichtlich der Entstehung der Luftschwingungen in dem Glasrohr noch manche Unklarheit, welche Schrötter²⁾ durch aufmerksame Beobachtung einer tönenden Wasserstoffgasflamme im Dunkeln zu beseitigen suchte. Er nahm hierbei wahr, daß sich an der Oeffnung der Gasröhre zwei Flammen vorfinden, eine äußere gelbe, und eine innere blaue, denen beide die Oeffnung als gemeinschaftliche Basis dient. Ihre Entstehung erklärt Schrötter folgendermaßen: Durch den heißen rasch aufsteigenden Luftstrom wird nahe der Mündung der Gasröhre ein luftverdünnter Raum erzeugt, gegen welchen die umgebende Luft sogleich nach seiner Entstehung vorrückt, und die Flamme dabei in die Röhre zurückdrängt. Indem hierdurch auf kurze Zeit die Gasausströmung gehemmt wird, erlangt der innere Gasdruck wieder das Uebergewicht; die Ausströmung erfolgt aufs Neue, und ruft die eben beschriebenen Erscheinungen abermals hervor, so daß aus der steten und schnellen Wiederkehr dieser Vorgänge die in Rede stehenden Oscillationen hervorgehen, und sich umgekehrungen in Uebereinstimmung mit dem Versuche befinden. Man erkennt übrigens sogleich, daß die äußere Flamme durch den austretenden Gasstrom, die innere durch den Rückschlag gebildet wird³⁾.

Bei der Wiederholung mehrerer der obenerwähnten Versuche drängte sich mir die Frage auf, ob unter sonst gleichen Umständen eine tönende Flamme mehr oder weniger Gas verzehrt, als eine ruhig brennende, und ob die Tonhöhe dabei einen Einfluß übe. Diese Frage führte dann auf die andere, in welchem Verhältniß der Gasverbrauch steht, wenn das Gas einfach ausströmt oder dabei brennt, und wie ein Schornstein (Lampencylinder) über der Flamme wirkt. Da die hierüber von mir angestellten Versuche in allen diesen Fällen Unterschiede und mitunter recht erhebliche auswiesen, so schien mir eine Veröffentlichung der Resultate um so mehr gerechtfertigt, als Beobachtungen über die fraglichen Punkte noch fehlen.

Die im Folgenden beschriebenen Versuche sind mit dem zur öffentlichen Beleuchtung hier dienenden Gase angestellt und nach zwei Methoden ausgeführt. Bei der ersten wurde das Gas in eine getheilte mit Wasser gesperrte Glocke gebracht, aus welcher es durch eine kleine Oeffnung ausströmte, bis sich seine anfänglich höhere Spannkraft um eine bestimmte Größe vermindert hatte. Indem nun die dazu erforderliche Zeit beobachtet und der Druck zu Anfang und zu Ende eines jeden Versuchs notirt wurde, ließ sich hieraus ein Schluß auf die Ausströmungsgeschwindigkeit herleiten. Dieses Verfahren ist zwar einfach und unabhängig von complicirten Apparaten, gestattet aber immer nur mit sehr kleinen Mengen zu experimentiren, und giebt daher in mehreren Fällen nur unbestimmte, in anderen gar keine Resultate. Umfassende Versuche lassen sich nur mit einem Gasmesser anstellen, der Genauigkeit mit der Einrichtung verbindet, auch kleinere Gasvolumina zu

1) Phil. Mag. XIII. 473.

2) Sitzungsber. d. math. naturwiss. Classe d. kais. Acad. zu Wien XXIV. 18.

3) Die älteren Arbeiten über die chemische Harmonika von Hermbstädt (Crel's chem. Ann. 1793. I. 355), Scherer (Gren's Journ. VIII. 375), de la Rive (Journ. de Phys. LV. 165), Zened (Schweigg. Journ. XIV. 14) enthalten wohl manche Erweiterung des bereits Bekannten, aber nichts wesentlich neues, und sind deshalb oben übergangen.

messen. Ein solches Instrument verdanke ich der großen Gefälligkeit des Herrn Schäffer (Firma Schäffer und Walker hier selbst), der mir die unten beschriebene Gasuhr, die wegen ihres leichten und präzisen Ganges die wesentlichsten Dienste leistete, auf das Freundlichste zu meinen Versuchen überließ, wofür ich mich ihm zum lebhaftesten Danke verpflichtet fühle.

II.

Zu den Versuchen nach der ersten Methode diente ein sehr weiter mit Wasser angefüllter Glaszylinder, und eine tubulirte Glocke, durch deren Tubulus luftdicht eine Glasröhre mit feiner Oeffnung ging. Der cylindrische Theil der Glocke wurde von unten auf in Pariser Zolle getheilt, der oberste Theilstrich mit 0, und die folgenden abwärts mit 1, 2, 3 u. s. w. bezeichnet. Zunächst ließ ich atmosphärische Luft ausströmen, um an ihr mittelst Rechnung die Zuverlässigkeit des Verfahrens zu prüfen, welches auf folgende Arten ausgeführt wurde.

A. Die Glocke wurde senkrecht so tief in das Wasser des weiten Cylinders gesenkt, daß der äußere Wasserspiegel bis zum Nullstrich reichte. Während nun die im Innern comprimirte Luft zur Oeffnung ausströmte, stieg das Wasser im Innern der Glocke, welche behutsam so herabgeführt wurde, daß der Nullstrich im Niveau des äußeren Wassers blieb. Die Zeit, während welcher das Wasser von 3 auf 2 oder 1 stieg, wurde durch die Schläge eines Pendels gemessen, die Beobachtung aber nie bis zur Einstellung beider Wasserspiegel fortgesetzt, weil dieser Moment wegen der zu langsamen Bewegung am Ende sich nicht scharf genug wahrnehmen ließ. Es heiße nun

t_3 die Zeit, während welcher das Wasser von 3 auf 2 stieg.

$$t_{3+h} = \quad = \quad = \quad = \quad = \quad = \quad 3 = 1\frac{1}{2} =$$

$$t_{3+2} = \quad = \quad = \quad = \quad = \quad = \quad 3 = 1 =$$

$$t_2 = \quad = \quad = \quad = \quad = \quad = \quad 2 = 1 =$$

$$t_{2+h} = \quad = \quad = \quad = \quad = \quad = \quad 2 = \frac{1}{2} =$$

Als Mittel vieler Versuche, die selten um mehr als 2 Secunden differirten, ergab sich

	t_3	t_2	Temp.	Barometer.
für Luft	49,0"	64,3"	10° R	339,2"
Gas	31,3	43,2	11°	337,5

und hieraus das Verhältniß der Ausströmungszeit

$$\frac{t_3}{t_2} = \frac{64,3}{49} = 1,31 \quad \text{für Luft} \quad \frac{43,2}{31,3} = 1,38 \quad \text{Gas}$$

B. Um die Beobachtungsweise zu erleichtern, wurde der weite Cylinder während des Versuchs durch Wasserzufluß bis zum Ueberlaufen voll erhalten, und die Glocke so auf eine passende Unterlage gestellt, daß ihr Nullstrich im Wasserspiegel lag; zur Zeitmessung diente eine Uhr mit Arretirung. Es fand sich

	t_3	t_{3+2}	t_2	t_{2+h}	Temp.	Bar.
für Luft	45,7"	106,8"	61,1"	105,6"	14° R	338,8"
Gas			47	83,6		

Hiernach sind die Verhältnisse der Ausströmungszeit:

$$\frac{t_2}{t_3} = \frac{61,1}{45,7} = 1,33 \quad \text{(vergl. A)}$$

$$\frac{t_{2+h}}{t_2} = \frac{83,6}{47} = 1,78$$

$$\frac{t_{3+2}}{t_{2+h}} = \frac{106,8}{105,6} = 1,01$$

Da diese Versuchsart sich wegen ihres großen Wasserverbrauchs sehr lästig erwies, so blieb ich bei folgender als der zweckmäßigsten stehn.

C. Die Glocke wurde auf eine Unterlage so gestellt, daß ihr Nullstrich beim Beginn des Versuchs im Wasserpiegel des Cylinders lag, was sich am besten durch einen Einschnitt in der Cylindermwandung erreichen ließ, mit dessen unterem Rand der Nullstrich in eine wagerechte Ebene gebracht wurde, welche die des Wasserpiegels zu Anfang war. Sobald nun das Wasser in der Glocke an den Strich 3, oder 2 oder wo sonst die Beobachtung anfangen sollte, trat, wurde auf die Erhaltung des Niveaus in vorgedachter Ebene nicht weiter gesehen, sondern die Uhr in Gang gesetzt, und so lange darin erhalten, bis das Wasser in der Glocke einen höher liegenden ausgewählten Theilstrich erreicht hatte. Da inzwischen das äußere Wasser, nicht wie in A und B dieselbe Höhe beibehalten hatte, sondern etwas gesunken war, so lassen die hier erhaltenen Zahlen sich nur unter sich aber nicht mit den obigen vergleichen. Zunächst ließ ich wieder atmosphärische Luft, dann Gas ausströmen, dann zündete ich dieses an, und schließlich brachte ich die Flamme wie bei der chemischen Harmonika zum Tönen. Die Zeiten, in denen die nachbenannten Volumina ausströmten, waren für

	t_{3+2}	t_{3+h}	t_2	Temp.	Barom.
Luft	135,8"	91"	75,5"	17° R	340,6"
Gas	89,5	59,5	53,3	18,5	337
Gas brennend	124,3	78,5	71	15	335
Die Flamme tönend	128,5		76	18,5	337

Um zu übersehen, in wie weit diese Zahlen unter einander stimmen, sind im Folgenden wieder die Verhältnisse der Ausströmungszeiten für bestimmte Volumina berechnet, die hier, wie bereits erwähnt, von den entsprechenden unter A und B abweichen müssen, da die Druckgrößen dort ganz andere sind. Es ist

	$\frac{t_{3+2}}{t_2}$	$\frac{t_{3+h}}{t_2}$	$\frac{t_{3+2}}{t_{3+h}}$
für Luft	1,80	1,20	1,49
Gas	1,68	1,12	1,50
Gas brennend	1,75	1,11	1,58
Flamme tönend	1,69		

Diese Zusammenstellung ergibt, daß, wenn bei einem brennbaren Gase Volumen und Druck ein bestimmtes Verhältniß zu einander haben, auch das Verhältniß der ausströmenden Mengen ein nahe (vielleicht genau) gleiches ist, die verglichenen Volumina mögen frei ausströmen oder beide mit Flammen brennen oder diese tönen. — Vergleicht man ferner in der die Beobachtungen enthaltenen Tafel die Zahlen, welche in einer Verticalreihe stehen, so hat man an ihnen die Zeiten, welche unter den angegebenen Umständen (d. h. brennend, tönend u. s. w.) dasselbe Gasvolumen bei demselben Druck zum Ausströmen gebraucht. Wird das Verhältniß dieser Zeiten umgekehrt, so geht daraus das Verhältniß der Geschwindigkeiten hervor, und setzt man diese für das frei ausströmende Gas = 1, so findet man

bei	t_{3+2}	t_{3+h}	t_2	Mittel.
für Gas	1	1	1	1
Gas brennend	$\frac{89,5}{124,3} = 0,72$	$\frac{59,5}{78,5} = 0,75$	$\frac{53,3}{71} = 0,75$	0,74
Flamme tönend	$\frac{89,5}{128,5} = 0,70$		$\frac{53,3}{76} = 0,70$	0,70

Hieraus folgt also, daß wenn man ein brennbares Gas aus einem Glasrohr erst frei und dann angezündet gleich lange strömen läßt, im letzten Fall etwa 26 Procent weniger ausfließen und noch weniger, nämlich ungefähr 30 Procent,

wenn man die Flamme zur chemischen Harmonika benutzt. Nachdem sich diese Unterschiede herausgestellt hatten, war ich bemüht, den Versuchen mittelst eines Gasmessers mehr Umfang und Mannichfaltigkeit zu geben, um den Zusammenhang in den Erscheinungen aufzufinden.

III.

Der Gasmesser, welcher zu den im Folgenden beschriebenen Versuchen diente (vergl. pag. 5) hat zwei Zeiger, einen großen, nach dessen Umlauf 4 Kubikfuß Gas verbraucht sind, und einen kleinen, der sich 40 mal schneller dreht, bei einem Umlauf also $\frac{1}{10}$ Kubikfuß anzeigt. Der Kreis, den die Spitze des kleinen Zeigers beschreibt, ist in 60 Theile¹⁾ getheilt, so daß ein Theilstrich $\frac{1}{600}$ Kubikfuß anzeigt; ich habe jedoch fast immer nur die Dauer ganzer Umläufe, d. h. die Zeit des Verbrauchs von $\frac{1}{10}$ Kubikfuß beobachtet, damit der Bewegungsapparat bei allen Versuchen denselben Weg zurücklege, und etwaige Unregelmäßigkeiten desselben überall den nämlichen Einfluß üben. Mit dem Ausflußrohr steht ein Manometer in Verbindung, um den jedesmaligen Druck anzuzeigen, und da dieser in der Gasleitung steten Schwankungen unterworfen ist, so befindet sich unter dem Manometer noch ein Hahn, durch welchen man das zur Ausflußöffnung strömende Gas auf möglichst gleichem Druck erhalten kann. Dies ist auch innerhalb nahe liegender Grenzen leicht, mit Genauigkeit aber vielleicht gar nicht zu erreichen, da die unaufhörlichen Veränderungen des kaum einige Minuten constanten Druckes erst eine Correction mittelst des Hahnes zulassen, wenn sie auf eine bestimmte Größe gekommen sind, die kleineren sich aber der Messung entziehen. Hierin liegt die Ursache der kleinen Abweichungen, welche zwischen Versuchen auftreten, die unter scheinbar ganz gleichen Bedingungen angestellt sind. Uebrigens machen sich die erwähnten Schwankungen selbst hörbar, wenn man eine kleine Flamme in einem Rohre tönen läßt, und dabei auf die nicht seltenen Modulationen des Tones achtet.

Temperatur und Barometerstand änderten sich während dieser in rascher Folge angestellten Versuche nur wenig; erstere lag zwischen 14,6 und 16,2° R, letzterer zwischen 336 und 342 parisi. Linien.

Zunächst ließ ich das Gas aus einem gewöhnlichen Fledermausbrenner strömen, und zwar anfangs frei, dann angezündet, wobei sich sehr bald der Einfluß, den die Erhitzung des metallenen Zuleitungsrohres ausübt, bemerklich machte. In dem Grade nämlich als das Messingrohr und mittelst desselben auch das hindurchgehende Gas sich erwärmten, wuchs die Spannkraft des letzteren, wodurch die Ausströmung des andringenden Gases gehemmt wurde. Dies währte so lange als die Erhitzung des Rohres stieg, worauf die Ausflußgeschwindigkeit constant wurde, um nach dem Auslöschen der Flamme allmählich wieder schneller zu werden und zu der ursprünglichen des frei ausströmenden Gases zurückzukehren.

Die folgenden Zahlen geben die Zeit in Secunden an, welche das Ausströmen von 0,1 Kubikfuß Gas erfordert; die eingeklammerten gelten für Versuche, bei denen Erwärmung oder Abkühlung noch im Zunehmen begriffen waren, und deshalb bei der Berechnung des Mittels ausgeschlossen blieben, für welches nur diejenigen Versuche benützt sind, welche hinter einander nahe gleiche Werthe ergaben, und damit anzeigen, daß die Temperatur bereits constant geworden sei. Der Uebergang in diesen Zustand geschah jedoch nicht ganz so schnell, als es nach den wenigen eingeklammerten Zahlen scheint, indem zwischen den einzelnen Versuchen eine kurze Zeit verstrich, und außerdem mitunter zwischenliegende fortgelassen sind, da die ausgeführten ausreichen, den Gang der Veränderung deutlich zu machen.

¹⁾ Diese Theilung hat für die Praxis den Vortheil, aus dem Verbrauch einer Minute sofort auf den einer Stunde schließen zu können; bewegt sich nämlich der kleine Zeiger in 1 Minute über n Theilstriiche, so sind $\frac{1}{10,00} n$ Kubikfuß Gas verbraucht, es würden also in 1 Stunde 60mal mehr, d. i. $\frac{n}{10}$ Kubfß. ausströmen.

Es dauert der Ausfluß von 0,1 Kubikfuß Gas bei 4 Linien Wasserdruck:

Frei ausströmend.	Nach dem Anzünden.	Nach dem Auslöschen der Flamme.
73"	(109)	(93)
73	(116)	(85)
72,5	133	(84)
73,5	130	73
73,	130	72,5
73,5	129	75
Mittel 73,25	130,5	73,5

Ähnliches ergab eine zweite unter nahe gleichen Verhältnissen angestellte Beobachtungsreihe, wo die Flamme erst einige Zeit brannte, dann ausgelöscht und hierauf wieder angezündet wurde. Die Ausströmungszeit von 0,1 Kubikfuß war:

Während des Brennens.	Nach dem Auslöschen.	Nach abermaligem Anzünden.
122"	(85)	(90)
127	(77)	(108)
121	71	(109)
121	70,5	122
122,75	71	127
124,6	70	125
Mittel 123,7	70,6	124,6

Es verhalten sich also die Zeiten, welche gleiche Gasmenngen erfordern, wenn sie aus einem Fledermausbrenner mit Metallrohr einmal frei und dann brennend ausströmen, nach der

ersten Versuchsreihe wie 73,25 : 130,5; mithin die Geschwindigkeiten wie 1 : 0,56
 zweiten = = 70,6 : 123,7 = = = = 1 : 0,57

Demnach ist hier die Verzögerung, welche die Ausströmung des brennenden Gases erfährt, noch weit bedeutender als in den oben beschriebenen Versuchen, wo das Gasrohr aus Glas, also einem schlechten Wärmeleiter bestand, und der Winderverbrauch 26 Procent betrug, während er bei einem Metallrohr auf 44 steigt. Wie erheblich der Temperatureinfluß des Rohres ist, erhellt aus einem Versuch, bei welchem erst die Flamme auf einem kalten Glasrohr brannte, und hierauf dasselbe mit einer Spirituslampe stark erhitzt wurde; während in jenem Fall 0,1 Kubikfuß in 11½ Minute ausfloß, geschah dies aus dem erhitzten Rohr erst in 16 Minuten. — Alle diese Erfahrungen zeigen, daß, wenn ein Gas unter den gewöhnlichen Umständen brennt, der im Innern der Flamme befindliche noch nicht brennende Theil des Gases, welcher den dunklen Kern derselben ausmacht, von der umgebenden glühenden Hülle stark erhitzt wird, und in Folge dessen einen allseitigen Druck ausübt, welcher die Ausströmung verzögert. Dieser Gegenruck wird desto mehr verstärkt, je leichter und bedeutender sich das Gasrohr erhitzt, welches gewissermaßen eine Fortsetzung des Flammenkernes ist, und seine Erwärmung mit diesem aus derselben Quelle bezieht.

Hierauf suchte ich die Wirkung eines über die Flamme gesteckten Glaschylinders zu ermitteln, wobei ich mich eines Argand'schen Brenners mit 16 Löchern bediente, welcher die Form einer Schiebelampe hatte. Es zeigte sich hier sogleich wieder der Einfluß der Erwärmung und Abkühlung des metallenen Zuleitungsrohres, den wie oben wiederum die eingeklammerten Zahlen angeben. 0,1 Kubikfuß strömte aus bei 4 Linien Druck:

Nicht angezündet.	Nach dem Anzünden.	Nach Aufsetzen des Cylinders.	Nach Abnahme des Cylinders.
73"	(88)	102,5	109
75,5	(102)	101	114
74	110,5	99,5	111
73	114	99,5	108,5
73,9	108	102,5	110,6
	109	101	
	110		
	108		
	110		
	112		
	110,2		

Eine andere bei 6^{mm} Druck angestellte Versuchsreihe ergab den Ausfluß von 0,1 Kubikfuß:

Nicht angezündet.	Nach dem Anzünden.	Nach Aufsetzen des Cylinders.	Nach d. Auslösen d. Flamme.
in 57"	(70)	76,5	(74)
57	(79)	77	(68)
55,5	86	76,8	(62)
55	84	76,5	(59)
58	82	76,7	
56,5	83		
	84		
	83,8		

Berechnet man wieder aus dem Verhältniß der Zeiten das der Geschwindigkeiten, und setzt die Geschwindigkeit bei dem nicht angezündeten Gase als Einheit, so erhält man für das

	Nicht angezündete.	Angezündete.	Mit dem Cylinder brennende.
aus der ersten Reihe	1	0,67	0,73
aus der zweiten Reihe	1	0,67	0,73

Der Cylinder beschleunigt also die Ausströmung und zwar dadurch, daß er einen kräftigen Luftzug in die Höhe erzeugt, welcher dem zuvor erörterten im Innern der Flamme gebildeten Druck Raum nach oben verschafft, so daß das ausfließende Gas in der Flamme einer minder starken Spannung begegnet als bei fehlendem Cylinder. Ist die Flamme im Verhältniß zum Cylinder klein, wie dies bei der zur chemischen Harmonika dienenden der Fall sein muß, so bewirkt der Cylinder, so lange seine Stellung kein Tönen zuläßt, ebenfalls eine Vermehrung der Gasausströmung, aber wegen der geringeren Erhitzung der ganzen Luftsäule nicht in demselben Grade wie bei dem Argand'schen Brenner. Dies ergab sich auch aus mehreren mit derartigen kleinen Flammen ausgeführten Versuchen, die unter sich zwar schwankten, aber in dieser Beziehung übereinstimmten. Endlich verdient der Umstand noch eine Erwähnung, daß der Minderverbrauch des brennenden Gases, der beim Fledermausbrenner bis auf 44 Procent stieg, hier nur 33 Procent beträgt; es hat dies offenbar seinen Grund darin, daß die vielen Metalltheile, welche sich in der Nähe des Brenners an der Schiebelampe befinden, eine erhebliche Menge der von der Flamme ausgehenden Wärme ableiten, wodurch die Erhitzung des Gasrohrs und damit auch die Verzögerung der Gasausströmung geringer ausfallen.

Die nun folgenden Versuche hatten endlich den Zweck festzustellen, wie sich der Gasverbrauch einer tönenden Flamme zu dem der übrigen Arten der Ausströmung verhalte. Da hierbei das Gas aus einer Glasröhre mit sehr kleiner Oeffnung strömen mußte, so wurde die Bewegung des Zeigers so langsam, daß sich sein Umlauf nur noch in Minuten mit Sicherheit angeben ließ, wes-

halb die nun folgenden Zeiten in diesem Zeitmaaf ausgedrückt sind. Ein weit erheblicherer Uebelstand aber als dieser stellte sich dadurch heraus, daß in Folge der längeren Dauer eines jeden Versuchs die Mündung der Glasröhre sich allmählich änderte, indem sich theils ein feiner kohligter Beschlag darin absetzte, theils, wenn der Rand der Röhre glühend wurde, die Oeffnung sich verkleinerte. Es sind daher nur die unmittelbar sich folgenden Versuche vergleichbar, während die weiter auseinander liegenden sich verhalten, als ob sie mit verschiedenen Röhren angestellt wären. Bei einer solchen Versuchsreihe ließ ich deshalb das Gas erst frei ausströmen, zündete es dann an, und brachte endlich die Flamme auf die bekannte Art zum Tönen, worauf ich dieselben Versuche meist in umgekehrter Ordnung wiederholte; wenn ich dann die zuvor erhaltenen Zahlen wieder bekam, so war dies ein Beweis, daß die Oeffnung inzwischen keine wesentliche Veränderung erlitten hatte. Die folgenden in einer Horizontalreihe stehenden Zahlen gehören jedesmal zu einer und derselben Folge von Versuchen, deren Mittel sie angeben; außerdem diente zu den unter 6''' Druck ausgeführten Messungen eine Röhre mit etwas weiterer Mündung als zu den übrigen. Es betrug nun die Ausflußzeit von 0,1 Kubikfuß

Druck.	Nicht angezündet.	Angezündet.	Die Flamme tönen.
6'''	8,7 Min.	11,5	12,4
7'''	14,3	18,6	19,8
	14,6	19,3	20,8
		22,1	23,6
9'''		21,5	22,2
		22,5	23,3

Berechnet man wieder, aus diesen Zeiten das Verhältniß der Geschwindigkeit, so findet man in derselben Reihenfolge fortschreitend

6'''	1	0,76	0,70
7'''	1	0,77	0,72
	1	0,76	0,70
		1	0,94
9'''		1	0,97
		1	0,96

Alle diese Zahlen weisen bei der tönenden Flamme eine Verminderung der Geschwindigkeit nach, die eigentlich bedeutender ist als sie erscheint, da der Cylinder an sich, wie oben bemerkt wurde, eine Beschleunigung des Ausflusses bewirkt, die nun durch den Vorgang beim Tönen nicht allein aufgehoben, sondern in's Gegentheil umgewandelt wird. Diese Verzögerung ist aber nicht für alle Röhren gleich, sondern wächst mit der Tonhöhe. Zu diesem Resultat führten vier abgestimmte Röhren, deren Grundton der Reihe nach c e g c' ist; sie haben sämmtlich 10 Linien im Durchmesser, und die längste von ihnen mißt 22 Zoll. Leider lassen sich nicht alle durch dieselbe Flamme zum Tönen bringen, sondern die längeren verlangen dazu eine stärkere als die kürzeren. Um dennoch einen Vergleich möglich zu machen, gab ich der Flamme eine solche Größe, daß dadurch die Röhren c e g angeblasen wurden, worauf dasselbe durch eine schwächere Flamme mit den Röhren c g c' geschah. Da im letzten Fall die Ausströmung überaus langsam geschah, so wurde nicht mehr die Zeit eines ganzen Zeigerumlaufs, sondern nur die des dritten Theils desselben gemessen. In der folgenden Uebersicht sind wieder die zusammengehörigen vergleichbaren Versuche, die sämmtlich unter 7 Linien Druck statt fanden, in einer Horizontalreihe enthalten, und daneben die aus den Zeiten berechneten Verhältnisse der Geschwindigkeiten. Es strömte 0,1 Kubikfuß aus den Röhren

\bar{e}	\bar{e}	\bar{g}	Verhältniß der Geschwindigkeit.	
in 19 Min.		23	1	0,83
22		24,5	1	0,89
20,8	22,6		1	0,92
23,6	24,8	27,6	1	0,95
22,1	23,1	23,9	1	0,95
0,033 Kubikfuß aus den Röhren				
\bar{e}	\bar{g}	\bar{e}		
in 16,1 Min.	18	19,8	1	0,89
	18,2	21,3		0,81

$$\bar{g} : \bar{e} = \frac{1 : 0,90}{1 : 0,85} \text{ und}$$

Obgleich diese Zahlen nicht die Uebereinstimmung zeigen, die ich ihnen wünsche, und genauer konnte ich sie mit meinem Apparate nicht erhalten, so lassen sie doch unzweideutig erkennen, daß die Geschwindigkeit der Ausströmung mit der Tonhöhe abnimmt. Es findet diese Wahrnehmung einen befriedigenden Grund in der Erklärung, welche Schrötter von der Entstehung der Schwingungen in der Röhre gegeben hat. Gehen diese aus regelmäßigen Unterbrechungen des Gasausflusses hervor, so muß die Ausströmung desto mehr verlangsamt werden, je häufiger die Unterbrechung erfolgt, d. h. je höher der Ton ist, und es ist wohl möglich, daß sich mit hinreichend feinen Meßwerkzeugen auch ein constantes Verhältniß zwischen der Ausfluggeschwindigkeit und den Tonintervallen wird nachweisen lassen. Was schließlich die von Schrötter beim Wasserstoff beobachtete Erscheinung einer Doppelflamme betrifft, so konnte ich eine solche an dem von mir angewandten Leuchtgas nicht wahrnehmen, denn auch im dunklen Zimmer erschien mir die tönende Flamme, wie wohl in der bekannten und oft beschriebenen Weise verändert, stets einfach. Betrachtet man sie mit einer schnell vor dem Auge hin und her bewegten Linse, so erscheint sie anfangs wie ein blaues Band mit welligem leuchtendem Saum, dessen Einsenkungen von der Verdichtung des brennenden Gases herrührend, desto tiefer werden, je mehr die Stärke des Tones wächst. Bei einem bestimmten Punkte zertheilt sich dann der schmale helle Rand, und es bleiben an dem regelmäßig zerstückelten Band nur noch die Spitzen leuchtend. Bei kleinen Flammen wird, besonders wenn man sie etwas vergrößert, der Ton nicht selten schrillend laut, und die Schwingung der Luft dann so heftig, daß sie oft das ausströmende Gas bis in seine Mündung zurückstößt, wo die Flamme dann sofort wegen Mangel an Sauerstoff ausgeht. Man sieht in diesem Falle die Einschnitte das Band so tief zertheilen, daß die Querstriche nur noch von einem dunkelblauen Faden zusammengehalten werden, der in dem Augenblick zerreißt, wo die Flamme erlischt.

Aus dem Ganzen ergibt sich also, daß, wenn ein brennbares Gas ausströmt und angezündet wird, der in der glühenden Hülle befindliche Gaskern sich erhitzt und durch seine allseitige Expansion den Ausfluß des Gases verzögert. Ist das Zuleitungsrohr ein guter Wärmeleiter, so wird es heiß und verstärkt dadurch die Wirkung des von der Flamme umgebenen Gases. Während auf diese Weise bei einem Glasrohr die Geschwindigkeit um circa 26 Procent vermindert wird, geschieht dies bei einem Messingrohr bis zu 44 Procent. Umgibt man die Flamme mit einem Schornstein, so findet in Folge des vermehrten Zuges das heiße sich ausdehnende Gas nach oben mehr Raum, die Geschwindigkeit wächst wieder bis auf 6 Proc., bleibt aber noch immer weit hinter der des nicht angezündeten Gases zurück. In der chemischen Harmonika endlich wird die Geschwindigkeit des Ausflusses außer der Hitze der Flamme auch von der Schwingung der Luft gehemmt, und zwar desto mehr, je höher unter sonst gleichen Umständen der Ton ist; beide Wirkungen übertreffen den beschleunigenden Einfluß des aufgesetzten Cylinders, so daß die tönende Flamme weniger Gas verzehrt als die ruhig brennende.

Anmerkungen.

1) Um zu ermitteln, welche Resultate die Rechnung für die unter II. beschriebenen Versuche ergibt, ging ich bei denselben von Navier's Formel¹⁾ für die Ausfließgeschwindigkeit verdichteter Luft aus, da die Art, wie die Versuche ausgeführt wurden, eine unmittelbare Anwendung der Formel nicht gestattete.

Es enthalte der Querschnitt eines unten verschlossenen Cylinders n Quadratfuß; einen Fuß über dem Boden befinde sich ein beweglicher Kolben und die von ihm abgegrenzte Luft stehe unter dem Druck P . Wird der Kolben durch die Spannkraft der eingeschlossenen Luft um s Fuß gehoben, und geht der Druck dabei in den niedrigeren p über, so ist wegen $P : p = n(1+s) : n$

$$P = \frac{P}{1+s}.$$

Denkt man sich diesen Druck constant, während der Kolben den unendlich kleinen Weg ds zurücklegt, so beträgt die Leistung $np ds = nP \frac{ds}{1+s}$, mithin für den Weg s

$$\int_0^s nP \frac{ds}{1+s} = nP \log. \text{ nat. } (1+s) = nP \log. \frac{P}{p}.$$

Strömen dagegen die unter dem Druck P befindlichen n Kubikfuß mit der Geschwindigkeit v aus, und ist γ das Gewicht eines Kubikfußes, so ist ihre lebendige Kraft $\frac{\gamma v^2}{2g}$, und diese muß gleich ihrer Leistung sein, d. h. es ist

$$n\gamma \frac{v^2}{2g} = nP \log. \frac{P}{p}, \text{ und daraus}$$

$$v = \sqrt{2g \frac{P}{\gamma} \log. \text{ nat. } \frac{P}{p}}.$$

Es ist aber $\frac{P}{\gamma}$ constant und beträgt für atmosphärische Luft bei T° nach dem jetzigen Gewicht $\frac{2036,30}{2,4} = 25450 (1 + 0,00366 T)$, was mit k bezeichnet sein mag; p ist ferner in den Versuchen der Barometerstand b , und P der um den Manometerdruck d vergrößerte Luftdruck, also $b+d$. Hiernach wird

$$v = \sqrt{2gk \log. \text{ nat. } \frac{b+d}{b}} = \sqrt{2gk \log. \text{ nat. } \left(1 + \frac{d}{b}\right)}.$$

Da nun durchschnittlich $b = 384''$ dagegen d höchstens $3''$ beträgt (vergl. pag. 5.), so ist $\frac{d}{b}$ sehr klein, und man hat deshalb nach dem Taylorschen Satz

$$\log. \text{ nat. } \left(1 + \frac{d}{b}\right) = \frac{d}{b} - \frac{d^2}{2b^2} + \dots = \frac{d}{b}, \text{ und folglich}$$

$$v = \sqrt{2gk \frac{d}{b}}.$$

Hat nun die Ausströmungsöffnung die Größe a , so ist die in 1 Secunde ausfließende Luftmenge

$$av = a \sqrt{2gk \frac{d}{b}}.$$

In unsern Versuchen ist aber die Geschwindigkeit keine gleichförmige, sondern wie der Druck stetig abnehmend; setzt man daher die Manometerhöhe zu Anfang H am Ende h , und die entsprechenden Geschwindigkeiten V und v , so ist $\frac{V+v}{2} = c = \frac{\sqrt{H} + \sqrt{h}}{2} \sqrt{\frac{2gk}{b}}$, und die ausströmende Luftmenge gleich derjenigen, die mit dieser mittleren Geschwindigkeit ausgestossen wäre, also

$$ac = a \frac{\sqrt{H} + \sqrt{h}}{2} \sqrt{\frac{2gk}{b}}.$$

Ebenso läßt sich auch die stetig abnehmende Spannung auf die mittlere zurückführen; sie ist zu Anfang $b+H$, am Ende $b+h$, im Mittel also $b + \frac{H+h}{2}$. Hat nun während des Versuchs das Wasser den Raum m

¹⁾ Ueber die Genauigkeit und Entwicklung derselben s. Weissbach in Pogg. Ann. 51. pag. 449.

eingenommen, so würde die daraus verdrängte und unter der mittleren Spannung gedachte Luft, wenn man sie auf den äußeren Druck reducirt, den Raum

$$b + \frac{H+h}{2} m = M \text{ einnehmen,}$$

und die zu ihrer Ausströmung erforderliche Zeit t würde sein

$$t = \frac{M}{ac}$$

In einem andern Fall, in welchem man die Druckhöhen H' und h' , den Barometerstand b' und den Raum m' hätte, wäre dann

$$\text{die Geschwindigkeit } c' = \frac{\sqrt{H'+Vh'}}{2} \sqrt{\frac{2gk}{b'}}$$

$$\text{der reducirte Raum } M' = \frac{b' + \frac{H'+h'}{2}}{b'} m'$$

$$\text{die Ausflußzeit } t' = \frac{M'}{a'c'}$$

$$\text{Mitbin } t : t' = \frac{M}{c} : \frac{M'}{c'} = \frac{b + \frac{H+h}{2}}{bc} m : \frac{b' + \frac{H'+h'}{2}}{b'e'} m'$$

oder wenn man für c und c' ihre Werthe substituirt, und $b = b'$ setzt, da die zu vergleichenden Versuche stets hintereinander angestellt wurden:

$$t : t' = \frac{b + \frac{H+h}{2}}{\sqrt{H+Vh}} m : \frac{b' + \frac{H'+h'}{2}}{\sqrt{H'+Vh'}} m'$$

In den unter A und B aufgeführten Versuchen mit atmosphärischer Luft ist nun:

b	H	h	H'	h'
285,4"	3	2	2	2
383,9	3	1	2	1
383,9	3	1	2	1/2

Diese Werthe in die letzte Formel gesetzt ergeben, wenn t_1 , t_2 u. s. w. wiederum die pag. 5 angeführte Bedeutung haben:

$$\begin{aligned} \frac{t_2}{t_1} &= \frac{160,3}{123,2} = 1,30 \\ \frac{t_3 + 2}{t_2} &= \frac{282,4}{159,6} = 1,77 \\ \frac{t_3 + 2}{t_2 + h} &= \frac{282,4}{272,4} = 1,03 \\ \frac{t_2 + h}{t_2} &= \frac{272,4}{159,6} = 1,71 \end{aligned}$$

Die Versuche gaben

1,32

1,75

1,01

1,73

2) Berechnung der Versuche unter C. Man setze den Halbmesser des Cylinders R , den der Glocke r , die Steighöhe des Wassers in der Glocke m , die Größe um welche das Wasser im Cylinder gefallen ist x ; so ist das Volumen des aus dem Cylinder getretenen Wassers $x(R^2 - r^2)\pi$, und das Volumen des in die Glocke gestiegenen Wassers $m r^2 \pi$, folglich, da beide gleich sind

$$x = \frac{r^2}{R^2 - r^2} m.$$

Ist nun die Druckhöhe zu Anfang H , am Ende h , so beträgt die Annäherung der beiden Wasserspiegel $H - h = m + x = \frac{R^2}{R^2 - r^2} m$, woraus

$$h = H - \frac{R^2}{R^2 - r^2} m.$$

Es betrug $R = 4,833''$; $r = 1,833''$ mithin $h = H - 1,168m$

für H	m	h	b
2	und 1	wird 0,832	385,6''
3	1 1/2	1,248	
3	2	0,664	

Diese Werthe in die Schlussformel der Anm. 1 so gesetzt, daß die Zahlen der ersten Horizontalreihe für H und h, die von einer der folgenden für H' und h' stehen, ergibt:

	Der Versuch gab
$\frac{t_{3+2}}{t_2} = \frac{304,6}{166,5} = 1,83$	1,80
$\frac{t_{3+h}}{t_2} = \frac{204,3}{166,5} = 1,22$	1,20
$\frac{t_{3+2}}{t_{3+h}} = \frac{304,6}{204,3} = 1,49$	1,49

3) Der Ausflußcoefficient für Luft ist bekanntlich sehr veränderlich und vom Druck abhängig; ich habe deshalb die unter II. C. aufgeführten drei Versuchsreihen zur Bestimmung desselben für den kleinen Druck von 3 Zoll und darunter benutzt, und wie die nachstehende Rechnung zeigt, drei Werthe erhalten, welche gut miteinander stimmen.

Die ziemlich kreisrunde Ausflußöffnung hatte einen Durchmesser von $0,2''$, mithin

$$a = 0,00021816 \text{ Quadrat Zoll;}$$

$$b = 385,96'';$$

$$\sqrt{\frac{2gk}{b}} = 768,82''; \text{ der cylindrische Raum der Glocke für die Höhe } l'$$

$$m = 10,555 \text{ Quadrat Zoll. Hiernach wird}$$

1) für $H = 2$ und $h = 0,832$, (vergl. Anm. 2).

$$M = \frac{b + \frac{H+h}{2}}{b} m = \frac{387,37}{385,96} 10,555.$$

$$c = \frac{\sqrt{H} + \sqrt{h}}{2} \sqrt{\frac{2gk}{b}} = 1,1631.768,82.$$

$$t_2 = \frac{M}{ac} = \frac{387,37.10,555}{385,96.1,1631.768,82.0,00021816} = 54,302.$$

Durch den Versuch ergab sich aber

$$t_2 = 75,5$$

$$\text{folglich der Coefficient } \frac{54,302}{75,5} = 0,72.$$

2) für $H = 3$ und $h = 1,248$; $m = \frac{3}{2} 10,555 = 15,833$.

$$M = \frac{388,084}{385,96} 15,833; c = 1,424.768,82.$$

$$t_{3+h} = \frac{388,084.15,833}{385,96.1,424.768,82.0,00021816} = 66,654.$$

Der Versuch ergab

$$t_{3+h} = 91;$$

$$\text{daher der Coefficient } \frac{66,654}{91} = 0,73.$$

3) für $H = 3$ und $h = 0,664$; $m = 2.10,555 = 21,11$.

$$M = \frac{387,792}{385,96} 21,11; c = 1,273.768,82.$$

$$t_{3+2} = \frac{387,792.21,11}{385,96.1,273.768,82.0,00021816} = 99,336.$$

Beobachtet wurde

$$t_{3+2} = 135,8;$$

$$\text{mithin der Coefficient } \frac{99,336}{135,8} = 0,73.$$

Die drei Werthe desselben sind hiernach 0,72; 0,73; 0,73; es strömt also unter den bezeichneten Umständen nur nahe $\frac{3}{4}$ der theoretischen Ausflußmenge aus.

W. Garentin.