Über schallempfindliche Flammen

Autor(en): **Zickendraht, Hans**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **5 (1932)**

Heft V

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-110172

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Über schallempfindliche Flammen

(Erste Mitteilung)

von **Hans Zickendraht**, Basel.

(17. IX. 32.)

Inhaltsangabe: Es wird eine bequeme Form der schallempfindlichen Flamme entwickelt und nachgewiesen, dass derartige Flammen unter die Gruppe der akustischen Geschwindigkeitsempfänger einzureihen sind, die auf die sogenannte Schallschnelle $J = A \cdot \omega$ reagieren. Die Vorgänge beim Auftreffen eines aërodynamischen Wechselfeldes (Schallfeldes) auf die die Flamme bildenden Gasstrahlen werden näher beschrieben und es wird gezeigt, dass die empfindlichen Flammen ebensogut auch auf elektrische Wechselfelder reagieren. Die Eignung solcher Flammen zu Schallwellen-Messungen wird an mehreren Beispielen bis ins Ultraschallgebiet hinein dargetan.

1. Zweck der vorliegenden Untersuchung.

Die *schallempfindliche Flamme* eignet sich in der hier entwickelten Form so gut für die verschiedensten akustischen Untersuchungen, dass sich ihre Wiederaufnahme unter die Hilfsmittel der Schall-Lehre wohl lohnt. Zwar wird sie längst in den Vorlesungen über Experimentalphysik als Indikator für hohe Töne bis zur Hörgrenze und darüber hinaus gebraucht und hat seit den Zeiten Tyndalls als hübsches Demonstrationsmittel bei verschiedenen akustischen Versuchen gedient, doch ist sie, wie im folgenden gezeigt werden soll, noch weiterer Entwicklung fähig. Zu diesem Zwecke musste der Anordnung zunächst eine zuverlässige, in ihren Einzelheiten jederzeit leicht reproduzierbare Gestalt gegeben werden. Die Lösung dieser Aufgabe ermöglichte es, tiefer in das Wesen der Erscheinung einzudringen und einige noch bestehende Unklarheiten über die Wirkungsweise zu beseitigen.

2. Historisches.

Obwohl an dieser Stelle nicht im entferntesten versucht werden soll, eine erschöpfende Darstellung der Verwendung von Flammen als akustische Indikatoren unter Zusammenstellung der umfangreichen einschlägigen Literatur zu geben, so möge doch kurz auf die Entwicklung dieses interessanten Teilgebietes der Schall-Lehre hingewiesen werden.

Die frei brennende schallempfindliche Flamme wurde von dem amerikanischen Physiker JOHN LECONTE im Jahre 1857 als zuckende Gasflamme gelegentlich einer musikalischen Aufführung entdeckt. In Sillimans American Journal 1) beschrieb LECONTE seine Beobachtungen, brachte sie in Beziehung zu TYNDALLS Untersuchungen über schall*erregende* Flammen und wies auf eine Theorie der Erscheinung an Hand von SAVART's tönenden Wasserstrahlen (1853) und deren Erklärung durch PLATEAU hin. Nach LECONTE soll die schallempfindliche Flamme den direkten Beweis dafür erbringen, dass auch den Gasen Kohäsionskräfte innewohnen.

JOHN TYNDALL, der Nachfolger FARADAY's an der Royal Institution, verwendete im Januar 1867 sowohl die schall*erregende* als auch die schall*empfindliche* Flamme in seinen klassischen Demonstrationen zur Schall-Lehre 2). Seinem Assistenten W. F. BARRETT waren schon Ende 1865 unabhängig von LECONTE die Zuckungen langer Gasflammen aufgefallen, wenn Schall hoher Frequenz auf sie fiel. In einer ersten Arbeit 3) lehrt er die Herstellung empfindlicher Leuchtgasflammen, die aus ausgezogenen Glasröhren oder auch Metalldüsen an der gewöhnlichen Gasleitung brennen, bildet die ruhende und die erregte Flamme charakteristisch ab und gibt in einer zweiten Arbeit 4) eine Theorie der Erscheinung, die auf der Schallempfindlichkeit kalter Gasstrahlen aufgebaut ist, uns heute aber nicht mehr befriedigen kann.

Seit jener Zeit sind viele Anordnungen schallempfindlicher Flammen angegeben worden. LORD RAYLEIGH beschreibt z. B. 1883 eine solche vor Zugwind geschützte Vorrichtung, bei der der Schall unter Vermittlung einer schwingenden Membran auf den Gasstrahl wirkte 5). Allbekannt sind KOENIG's manometrische Flammen, die als Schallindikatoren bei vielen akustischen Demonstrationen wertvolle Dienste leisten. Die von hier abzweigenden Versuche von MARBE und andern gehören nicht mehr in unser Gebiet, doch sei noch einer empfindlichen Flamme gedacht, die HEINRICH MACHE 1919 nach Art der Rayleigh'schen entwickelte 6) und die H. KOST 1920 zu einem Hinweis auf die Untersuchung schall- und geräuschempfindlicher Bunsenflammen am Sloane-Laboratorium der Yale-Universität (1914) veranlasste 7).

3. Entwicklung eines zuverlässigen Brenners für schallempfindliche Flammen.

In Barretts Arbeit 3) findet sich eine Bemerkung, die auch in Waetzmanns Akustik 8) übergegangen ist und die rät, zur Gewinnung einer empfindlichen Flamme die Düsenöffnung (von

etwa 0,15 cm Durchmesser) beidseitig mit einer dreikantigen Kerbe zu versehen. Als anlässlich der vorliegenden Untersuchung diesem Rate gefolgt wurde, ergaben sich sofort höchst empfindliche unter etwa 8 cm Wasserdruck aus Messingdüsen brennende Leuchtgasflammen. *Die Ursache für die Empfindlichkeit konnte aber alsbald in Form der kleinen, ins Lumen der Brenneröffnung einspringenden Braue (bavure) erkannt werden*, mit deren Entfernung auch die Empfindlichkeit verschwand oder doch sehr beträchtlich zurückging.

Damit war nun eine erste Grundlage für weitere Unter-

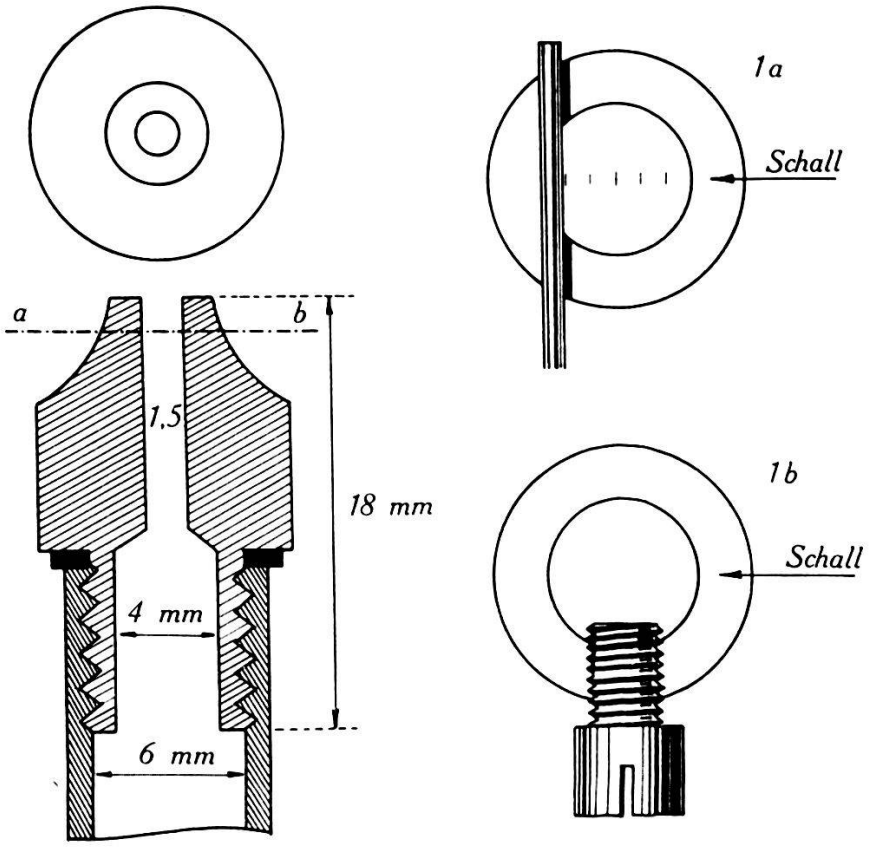

Fig. 1.

suchungen geschaffen. Eine zylindrische, sorgfältigst glatt ausgeriebene und gereinigte Düsenbohrung lieferte beim normalen Gasdrucke (8 bis 9 cm Wasser) höchst unempfindliche Flammen, während eine kleine Unsymmetrie in Form einer Braue im Innern oder an der Austrittskante die Flamme sofort sensibilisierte.

In Fig. 1 sind Grundriss und Längsschnitt sowie die Masse einer Messingdüse wiedergegeben, so, wie sie als Normal für die Untersuchungen diente. An diesem Normal wurden nun verschiedene Modifikationen angebracht und die Wirkung auf Flammenform und Schallempfindlichkeit systematisch studiert.

Eine sehr indifferente Flamme, die aus dieser Normaldüse brannte, wurde sofort höchst empfindlich, wenn ein Platindraht von 0,5 mm Dicke senkrecht zur Richtung des einfallenden Schalles (also parallel zur Wellenebene) als Sehne unmittelbar über die Düsenmündung geschoben wurde (Fig. 1a). Die vorher vollkommen zylindrisch aus der Öffnung brennende Gasflamme von etwa 40 cm Höhe verkürzte sich dabei und wurde gleichzeitig senkrecht zum Schallstrahle verbreitert. Dabei fand eine starke Sensibilisierung statt, die sich auf ein weites Tongebiet von etwa 1500 Hertz bis weit über die Hörgrenze 16000 Hertz hinaus erstreckte.

Empfindliche Flammen erhält man auch mittels einer kleinen

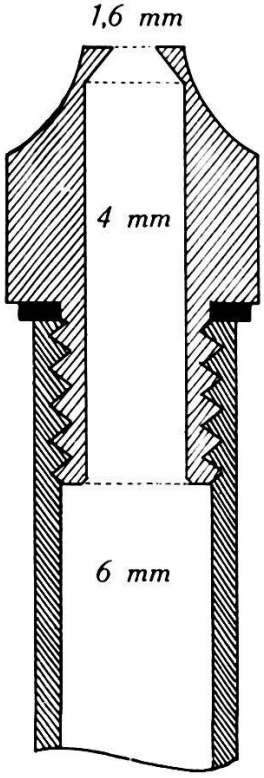

Fig. 2.

Metallschraube, die nach Art der Klemmen für elektrische Drahtverbindungen seitlich (in Richtung *a—b* in Fig. 1 und 1b) in die Düse hineinragend angebracht wird. Auch sie flacht die Flamme je nach der Tiefe des Einsenkens in den Düsenkanal senkrecht zum Schallstrahle ab und erlaubt sogar, verschiedene Empfindlichkeiten einzustellen.

Flachpressen der Düsenöffnung in Richtung *a—b* führt ebenfalls zum Ziele. Wichtig ist somit, dass der Gasstrahl mehr oder weniger bandförmige Gestalt mit der Bandebene in der Wellenebene des auftreffenden Schalles habe.

Schliesslich konnte eine äusserst empfindliche Flamme dadurch erhalten werden, dass die Normaldüse von Fig. 1 bis unmittelbar unter die Austrittsöffnung auf 4 mm Weite aufgebohrt wurde, wobei dann ein Brenner mit messerscharfer ringförmiger Austrittsöffnung (von 1,6 mm Durchmesser) vom Habitus der Fig. 2 entstand. Mit dieser Düse wurden später die meisten der angeführten Messungen angestellt.

Die Brenner konnten unter Verwendung eines Dichtungsringes in ein kleines Standrohr von 20,5 cm Länge eingeschraubt und unter Zwischenschaltung eines Wassermanometers durch Gummischläuche unmittelbar an die städtische Gasleitung angeschlossen werden. (Vgl. später Fig. 4.)

4. Apparatur zur Untersuchung der Flammen.

Zur Untersuchung der verschiedenen Flammen wurde ein einfacher elektrischer *Tongenerator* gebaut. Fig. 3 zeigt die Rückkopplungsschaltung, während Fig. 4 eine Gesamtansicht der Apparatur darstellt. Der Gitterkreis bestand aus einer eisenfrei

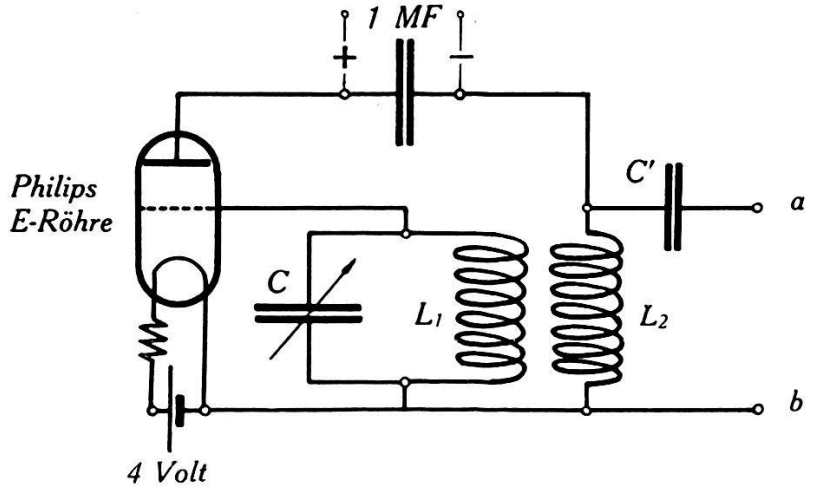

Fig. 3.

gewickelten Spule L_1 von 0,646 Henry Selbstinduktion und einem Drehkondensator C von 0,000·166 bis 0,004·66 Mikrofarad Kapazität, womit bei Vernachlässigung der Röhrenkapazität und der Heizungs- und Anodenpotentialeinflüsse ein Tonbereich von rund 3000 bis 15000 Hertz erhalten werden könnte. Tatsächlich bekam man aber bei 0,6 Ampères Heizstrom der Philips *E*-Röhre und einer Anodenspannung von 120 Volt nur den Frequenzbereich von 2700 bis 9950 Hertz. Seine Ermittlung geschah unter Zuhilfenahme der empfindlichen Flamme in später zu erläuternder Weise.

Die verschiedenen *Lautsprecher* wurden mit oder ohne Zwischentransformator über eine Kapazität C' von 0,014 oder 0,2 Mikrofarad

an die Punkte a und b, also quer über die Anodenrückkopplungs-Spule L_2 (eisenfrei 0,633 Henry) gelegt.

Als Tonerzeuger dienten wechselweise ein englischer „*Amplion*"-*Lautsprecher* (Telephonsystem mit gebogenem Schalltrichter, in Fig. 4 hinten auf der Fensterseite), ein älterer „*Telefunken*" *Falz-Lautsprecher*, ein französischer *Konus-Lautsprecher* von Pathé und ein *elektrodynamischer Lautsprecher* „*Magnavox*" (Topfmagnet unter 120 Volt erregt, Zwischentransformator, in Fig. 4 vorne sichtbar). Die Eigenfrequenzen der Tonerzeuger waren aus Untersuchungen von cand. phil. Werner Lehmann bekannt.

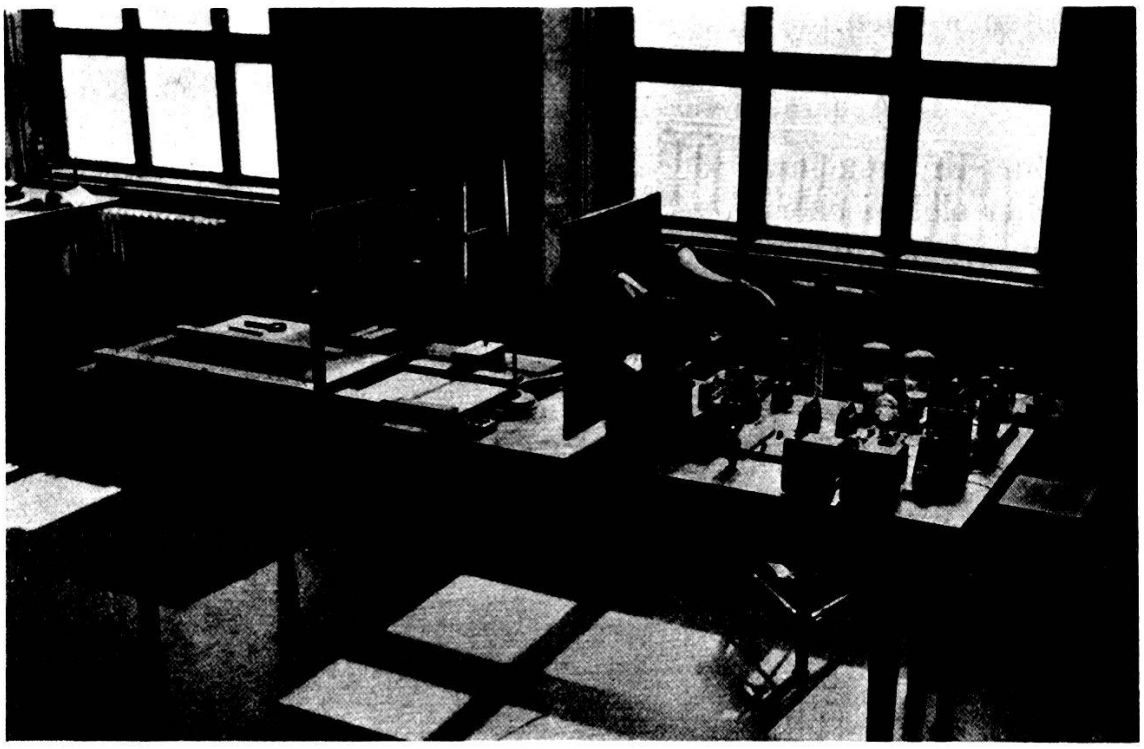

Fig. 4.

Fig. 4 zeigt zwei nach Schema Fig. 3 gebaute gleiche Tongeneratoren, die zu Schwebungsversuchen gleichzeitig benutzt wurden, ferner die unerregte Flamme und eine zur Messung stehender Wellen dienende verschiebbare Glastafel.

5. Die Vorgänge in der ruhenden und der schallerregten Flamme.

Da man sich nur auf Grund genauester Beobachtung der Vorgänge in der ruhenden und der schallerregten Flamme ein Urteil über ihre Arbeitsweise zu bilden vermag, so sei zunächst ein charakteristischer Fall genauer beschrieben:

Aus einer nach Fig. 1 geformten, aufs sorgfältigste ausgeriebenen Messingdüse von 0,16 cm Bohrung brannte eine ungefähr

45 cm hohe spindelförmige Leuchtgasflamme. Gasdruck 7,4 cm Wasser. Gasdichte 0,454 (nach freundlicher Mitteilung des städtischen Gaswerkes). Die ruhige Flamme selbst erweist sich als nahezu vollkommener Rotationskörper von rund 1 cm Durchmesser an der dicksten Stelle. Unterer Teil blau, mit Abnahme der Gasgeschwindigkeit nach oben zunehmende Helligkeit durch das Glühen der ausgeschiedenen Kohleteilchen.

Eine vollkommen symmetrische Flamme ist sehr unempfindlich gegenüber Schall und somit ein schlechter Indikator.

Um die Flamme nun zu sensibilisieren, wurde sie durch einen 0,05 cm dicken Platindraht in der durch Fig. 1a veranschaulichten

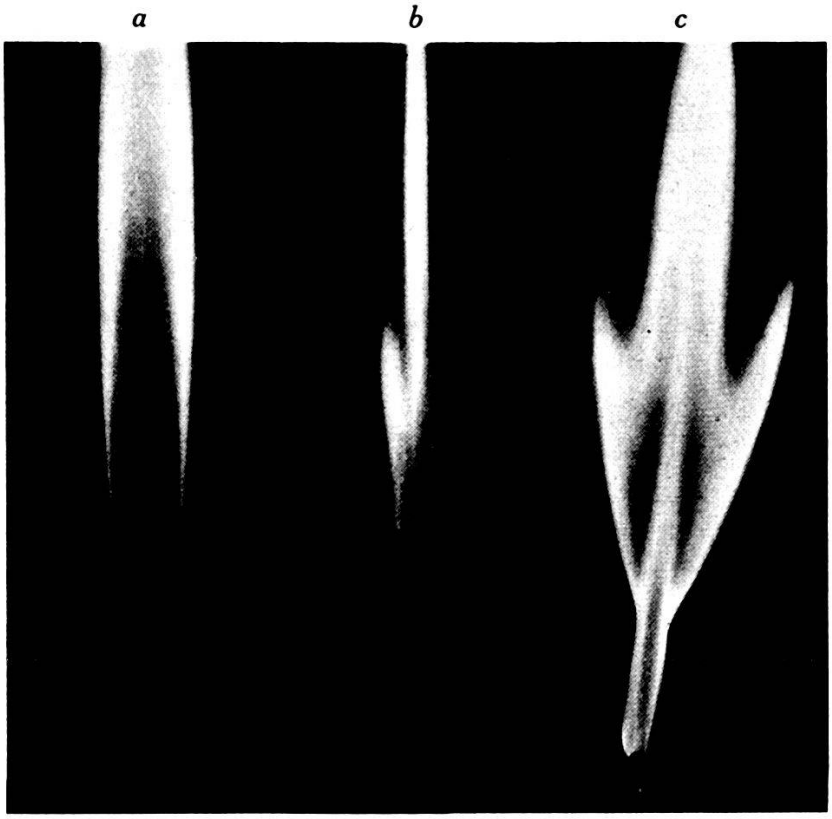

Fig. 5.

oben erläuterten Weise deformiert. Die unretuschierte Originalaufnahme Fig. 5a gibt eine Ansicht der verbreiterten Flamme, Blickrichtung der Achse des Lautsprechers entgegen. Noch ist die Flamme nicht erregt, sie bildet ein maximal beinahe 2 cm breites Band, dessen Begrenzungslinien charakteristische Kurven darstellen. In Fig. 5a ist der deformierende Platindraht leicht erkennbar. Man achte darauf, dass die Begrenzungslinien als zwei zur Flammenachse symmetrisch liegende gestreckte Kurven sich nach oben hin wieder zu vereinigen streben. Zwei Gasstrahlen stossen also unter sehr spitzem Winkel aufeinander und bilden

eine Fläche, deren Spur man in der Photographie als helle Mittellinie unschwer erkennt.

Lässt man nun in den Figuren 5a und b (von hinten in Richtung auf den Beschauer zu) Schall hoher Frequenz auf die Flamme einwirken, so krümmen sich die beiden Begrenzungsstrahlen von einem bestimmten Punkte ab symmetrisch zur Flammenachse nach dieser hin. Bei einigermassen grossen Schallintensitäten kann dies geradezu zu einer Knickstelle in den beiden Kurven mit nachfolgendem Krümmungswechsel führen. Fig. 5b zeigt einen derartigen Fall für die Frequenz 2940 Hertz. Scharf prallen zwei Gasstrahlen unter etwa 30 Grad Neigungswinkel aufeinander und rufen eine zur Ebene des ursprünglichen Flammenbandes senkrecht stehende Fläche brennenden Gases hervor. Fig. 5b lässt den Vorgang in perspektivischer Verkürzung, Fig. 5c in Seitenansicht (quer zur Schallrichtung) sehen. Die Neigung der Figur nach rechts rührt vom deformierenden Platindrahte her. Die Flamme weist drei Spitzen auf. Die mittlere führt die Hauptmenge des verbrennenden Leuchtgases nach oben fort, die beiden seitlichen Spitzen rühren daher, dass die beiden oben erwähnten begrenzenden Gasstrahlen im Innern aus Fäden sehr verschiedener Geschwindigkeit zusammengesetzt sind. Der Zusammenprall solcher komplizierter Strömungen führt dann zu Flammenflächen verschiedenster Gestalten, deren Begrenzungsformen ein Bild von der Geschwindigkeitsverteilung im Innern der Gasmasse geben. Wir kommen weiter unten auf die Bildung vollständig gespaltener Gasflammen zurück.

Aus dem eben Entwickelten geht hervor, dass die Gasgeschwindigkeiten in einer Flamme sowohl über deren Länge als auch über die einzelnen Querschnitte ziemlich kompliziert verteilt sind. Durch folgenden einfachen Kunstgriff wurde eine Schätzung der mittleren Geschwindigkeiten der leuchtenden Kohleteilchen in der ruhenden und der schallerregten Flamme versucht: Nimmt man auf bewegter photographischer Platte gleichzeitig die vertikale Flamme und horizontal eine bekannte Zeitmarke auf und kennt man den Masstab des verkleinerten Bildes, so ist eine Ermittlung der Teilchengeschwindigkeiten wohl möglich.

1. Versuch. Ruhende Flamme aus Düse Fig. 2. Flammenhöhe 44 cm, Gasdruck 8,0 cm Wasser. Neonglimmröhre als Zeitmarke. Glimm-Frequenz $n = 384$ Hertz, somit entsprechen der Länge der einzelnen Lichtmarken auf der Platte je 0,002604 Sekunden. Einem Zentimeter Flammenhöhe entsprach 1 Millimeter auf der Platte. Die Neigung $dy/dt = v$ liefert dann die Geschwindigkeiten. So wurde gefunden, dass wenig oberhalb der Düse Geschwindig-

keiten von rund 17 m/s, an der photographierbaren Flammenspitze noch 8,5 m/s herrschten. Die unsichtbaren Verbrennungsgase steigen natürlich darüber mit abnehmenden Geschwindigkeiten noch weiter empor.

2. Versuch. Erregte Flamme aus Düse Fig. 2. Flammenhöhe 36 cm, Gasdruck 8,0 cm Wasser. Zeitmarke wie beim ersten Versuche. Fig. 6 gibt die Aufnahme der leuchtenden Flammenspitze auf bewegter Platte und die Art der Extrapolation zur Geschwindigkeitsschätzung wieder. Die ausserordentlich zarten Zeitmarken sind nur auf dem Originalnegativ erkennbar. Unmittelbar über

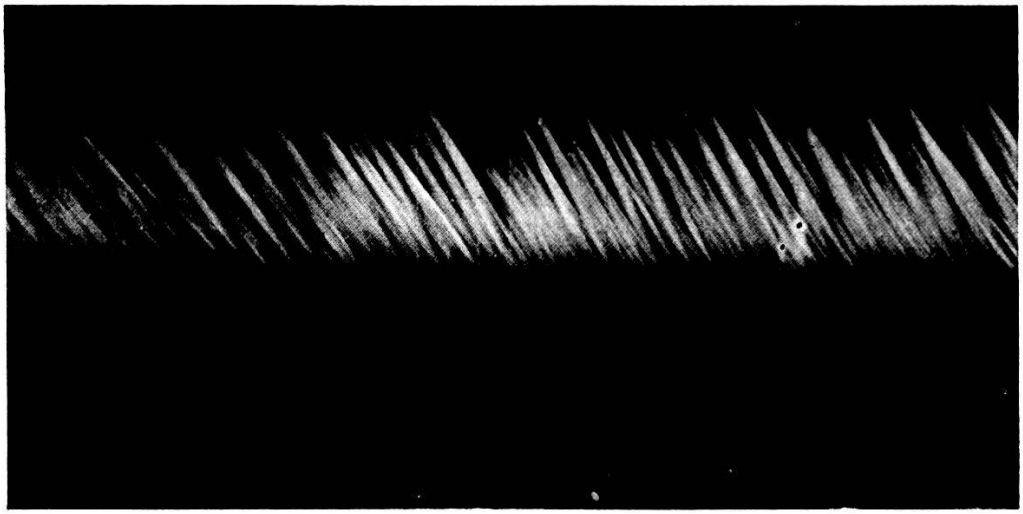

Fig. 6. ←

der Düse wurden mittlere Geschwindigkeiten von der Grössenordnung von 13,6 m/s, an der Flammenspitze rund 9 m/s erhalten.

Dass diese Schätzungen die Grössenordnung der mittleren Gasgeschwindigkeiten richtig wiedergeben, zeigt eine kleine Kontrollrechnung nach der bekannten Gleichung für ein unter dem Drucke p aus einer Öffnung von der Fläche f (einer Verjüngung des Rohrquerschnittes F) ausströmendes Gas von der Dichte ϱ:

In technischem Masse, wie in der Aërodynamik üblich, gilt:

$$\text{Ausströmungsgeschwindigkeit } v = \sqrt{\frac{2\,p}{\varrho\left(1-\left(\frac{f}{F}\right)^2\right)}} \text{ Meter/Sekunde.}$$

Hier war $p = 8$ kg/m². Gasdichte bei Annahme einer Gastemperatur von rund 200 Grad an der Brenneröffnung $\varrho = 0{,}0454$. Das Verhältnis $\left(\frac{f}{F}\right)^2 = 0{,}005$ kann neben 1 vernachlässigt werden, woraus

Ausströmungsgeschwindigkeit $v = 18{,}8$ Meter/Sekunde.

Der zweite Versuch zeigt, *dass durch die Schalleinwirkung eine Drosselung des Gasstrahles eintritt.* In Fig. 7 sind die beobachteten mittleren Gasgeschwindigkeiten bei ruhender und erregter Flamme als Funktion der Flammenhöhe über der Düse aufgetragen.

Man hat früher geglaubt, empfindliche Flammen nur unter verhältnismässig hohen Gasdrucken erhalten zu können. Es wurden deshalb einige Versuche angestellt, die ermitteln sollten,

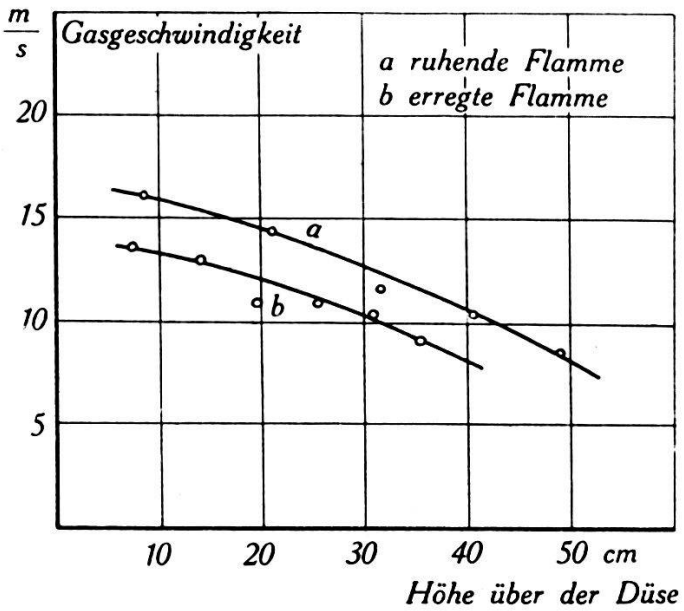

Fig. 7.

wie weit der Gasdruck bzw. die Austrittsgeschwindigkeit aus der Düse noch herabgesetzt werden könne, ohne dass die Flamme ihre Empfindlichkeit ganz verliere.

Die folgende Tabelle I gibt eine derartige mit der Düse Fig. 2 gewonnene Messreihe wieder. Der Gasdruck und die nach der

Tabelle I.

Gasdruck cm Wasser	Geschwindigkeit in m pro Sek.	Flammenhöhe in cm	Bemerkungen
8,3	19,2	42,5	Empfindliche Flamme.
7,0	17,6	39,0	Empfindlichkeit nimmt ab
6,5	16,9	36,0	,, ,, ,,
5,0	14,8	31,0	,, ,, ,,
3,8	12,9	26,5	Sehr wenig empfindlich
2,8	11,1	23,3	Schwache Reaktion
2,0	9,4	19,0	Unempfindlich
0,9	6,3	10,2	,,
0,5	4,7	6,5	,,

oben gegebenen Gleichung berechnete Gasgeschwindigkeit beim Verlassen der Düse sowie die Flammenhöhe sind mit einigen Bemerkungen versehen in ihr zusammengestellt.

Bei 2,8 cm Gasdruck ist auch bei der sonst sehr empfindliche Flammen liefernden Düse keine nennenswerte Reaktion mehr zu erhalten. Mittels des Platindrahtes, der seitlich an die Düsenöffnung gelegt wurde, gelang zwar noch eine schwache Sensibilisierung, *bei Gasgeschwindigkeiten unter 10 m/sek scheint im vorliegenden Falle keine empfindliche Flamme mehr entstehen zu können.*

Eine oft erörterte Frage ist diejenige nach dem *Ort der Einwirkung des Schallfeldes auf die Flamme.* Mit folgender einfachen Anordnung liess sich die Frage beantworten: Ein 8 cm langes Stück Rohr von 2,5 cm lichter Weite wurde, während starker Schall die Flamme spaltete, koaxial über deren Standrohr geschoben und nun von unten her langsam so gehoben, dass das Rohr die Brennermündung mehr und mehr vor den einfallenden Schallstrahlen abschirmte. Lag die Brennermündung dann etwa 2 bis 3 cm im Innern des Rohres, der obere Teil der Flamme aber frei im Schallfelde, so hörte die Wirkung auf die Flamme vollständig auf. Bedeckte man umgekehrt den obern Teil der Flamme bis auf etwa einen Zentimeter oberhalb der Brenneröffnung mit dem Rohre, liess also den Schall nur auf ein zentimeterlanges Stück des Gasstrahles oberhalb der Düse wirken, so spaltete sich die Flamme in durchaus normaler Weise.

Damit war zugleich erwiesen, dass keine nennenswerte Wirkung des Schallfeldes auf den (im vorliegenden Falle 270 cm langen) der Strahlung des Lautsprechers absichtlich ausgesetzten Gasschlauch vorlag, der Haupteffekt also in der Nachbarschaft der Düse zustande kommt. Um ganz sicher zu sein, ersetzte man den langen Gasschlauch durch eine starre Glasrohrverbindung, die direkt vom Gashahn an der Wand zur empfindlichen Flamme führte. Zwischen Schlauch- und Glasrohrverbindung wurde keinerlei Unterschied gefunden.

Zur Demonstration des Abschirme-Effektes genügt schon ein von unten her zwischen Schallquelle und Flamme heraufzuschiebendes Brettchen, doch muss dabei der Beugungseffekte gedacht werden, die je nach der Wellenlänge des betreffenden Tones verschieden stark auftreten.

Bei den schallerregenden Flammen sind *stehende Wellen in Brennerrohr und Gasschlauch* nachgewiesen worden 9). Wir versuchten, bei unsern Flammen unter Zuhilfenahme eines Stumpfschen Interferenzrohres 10) dasselbe zu tun, doch ohne sichtbaren Erfolg. An ein gläsernes Standrohr, in dessen oberes mes-

singnes Ende die Düsen eingeschraubt werden konnten, war seitlich ein 26 cm langes Rohr mit gut dichtendem verschiebbarem Stempel angesetzt. Wenn stehende Wellen im Rohre die Empfindlichkeit der Flamme bedingen oder beeinflussen, so muss ein Abstimmen des Seitenrohres auf ein ungerades Vielfaches der wirksamen Wellenlänge irgend eine Wirkung auf die Flamme hervorrufen. Davon konnte aber trotz vielen sorgfältigen Versuchen nichts wahrgenommen werden.

Da man zuweilen neben dem feinen Rauschen der Flamme auch leise hohe Töne ziemlich konstanter Frequenz wahrnehmen kann und da insbesondere beim kontinuierlichen Durchlaufen weiter Tonbereiche, wie das die gewählte Anordnung ja bequem ermöglicht, *Schwebungstöne steigender und fallender Frequenz* zu hören waren, so musste auf die eventuell von der Düse selbst hervorgerufenen *Schneidentöne* und auf den weiten kontinuierlichen Frequenzenbereich geachtet werden, der das *Schallspektrum des Flammenrauschens* ausmacht. In der Zusammenfassung seiner sechsten Vorlesung an der Royal Institution 11) sagt Tyndall wörtlich:

„Das Gas, das unter übertriebenem Drucke steht, wird beim Durchgang durch den Brenner in Schwingungen von bestimmter Dauer versetzt. Um die grösste Wirkung auf die Flamme auszuüben, muss der äussere Ton Schwingungen enthalten, die mit denen des ausströmenden Gases zusammenpassen.“ (Übersetzung von Helmholtz und G. Wiedemann.)

Obwohl ausser Zweifel steht, dass in den aus Düsen der beschriebenen Art brennenden Flammen Schwingungen eines weiten Frequenzbereiches entstehen und obwohl vom Verfasser unverkennbare Schwebungstöne zwischen dem aufgeprägten Schalle und bestimmten, in der Flamme selbst entstehenden Schwingungen benachbarter Frequenzen beobachtet werden konnten, sind die Untersuchungen hierüber vorläufig noch zu wenig vorgeschritten, als dass ein abschliessendes Urteil möglich wäre. Grosse Vorsicht ist mit den Angaben über *ausgeprägte Frequenzen* geboten, auf die die Flamme besonders stark reagieren soll. Die beiden Frequenzen um 3100 und 7000 Hertz, die bei den ersten Versuchen besonders heftig auf die Flamme wirkten, erwiesen sich als unverkennbare Schall-Intensitätsmaxima, die von dem zuerst verwendeten Amplion-Lautsprecher herrührten, d. h. diesem u. a. als Eigentöne der Membran angehörten. Wir kommen weiter unten (S. 332) nochmals auf diesen Punkt zurück. Bei Verwendung des elektrodynamischen Lautsprechers, der im Gebiete von 3000 Hertz an aufwärts keine besonderen Eigenfrequenzen besitzt, reagierte

die Flamme auch bis zu sehr hohen Tönen hinauf mit langsam abnehmender Stärke, doch gleichmässig in ihrem Verhalten. Das Vorhandensein von Stellen besonderer Empfindlichkeit bei Flammen der hier betrachteten Art ist daher noch nicht mit Sicherheit nachgewiesen. Die Frage wird im Zusammenhang mit der Theorie zylindrischer Diskontinuitätsflächen unter Berücksichtigung der Karman'schen Wirbelstrassen und der Emden'schen Untersuchungen an Gasstrahlen weiter zu behandeln sein. Hierher gehören möglicherweise auch feine Querrippen, die auf den Originalen der Flammenaufnahmen (Fig. 5) zu sehen sind.

Leicht ist es, an einer Flamme nachzuweisen, *dass sie in stehenden Wellen am stärksten in den Bewegungsbäuchen reagiert.* In $\lambda/4$ Entfernung vor einer genügend ausgedehnten ebenen schallharten Wand wird sie sich unter Einfluss eines Tones der Frequenz $n = c/\lambda$ spalten, in $\lambda/2$ Entfernung vor derselben Wand hingegen je nach der Schärfe der Schallinterferenz mehr oder weniger ruhig verhalten. Es zeigte sich bald, dass die Druckbäuche in einer stehenden Welle, die mit den Bewegungsknoten zusammenfallen, mit grosser Schärfe festzustellen sind. Gerät die Flamme nämlich nur um sehr geringe Beträge neben die Stellen, an denen die Luftteilchen sich nicht verschieben, so zeigt sie sofort durch Verkürzung oder sonstige Formänderung das Vorhandensein von schwingend bewegter Luft nahe der Düse an. Diese Beobachtung veranlasste uns, die empfindliche Flamme in der weiter unten näher zu beschreibenden Weise zur Schallwellen-Messung bei hohen Frequenzen zu benutzen.

Die empfindlichen Flammen gehören also zu den akustischen Bewegungsempfängern, da sie auf die Maximalgeschwindigkeit schwingender Luftteilchen:

$$J = A \cdot \omega$$

oder, wie man neuerdings zur Vermeidung von Verwechslungen mit der Schallgeschwindigkeit c zu sagen pflegt, auf die „Schallschnelle" reagieren 12). A bedeutet dabei die Amplitude, $\omega = 2\pi n$ die Kreisfrequenz des betreffenden Tones.

Tabelle II gibt die Abstände einer Reihe von abwechselnd auf einanderfolgenden Bewegungsbäuchen und Bewegungsknoten von der Flamme wieder. Die Zimmertemperatur betrug 28 Grad, die Schallgeschwindigkeit somit $c = 349{,}3$ m/s. Die verwendete Frequenz war $n = 3120$ Hertz. Die Werte wurden durch sukzessives Parallelverschieben einer schallreflektierenden Wand erhalten. (r bedeutet die ruhende, b die bewegte Flamme.)

Tabelle II.

$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{2\lambda}{4}$	$\frac{3\lambda}{4}$	$\frac{4\lambda}{4}$	$\frac{5\lambda}{4}$	$\frac{6\lambda}{4}$	$\frac{7\lambda}{4}$	$\frac{8\lambda}{4}$	$\frac{9\lambda}{4}$
b	*r*	*b*	*r*	*b*	*r*	*b*	*r*	*b*
35	57	88	114	145	171	204	227	250
35	57	90	114	141	171	197	226	262
35	57	88	114	150	171	202	226	267
38	57	87	113	143	171	204	228	263

In Figur 8 ist ein Schema für die räumliche Anordnung der Gasstrahlen in einer erregten Flamme wiedergegeben, auf das sich alle, auch die äusserlich weit komplizierter erscheinenden

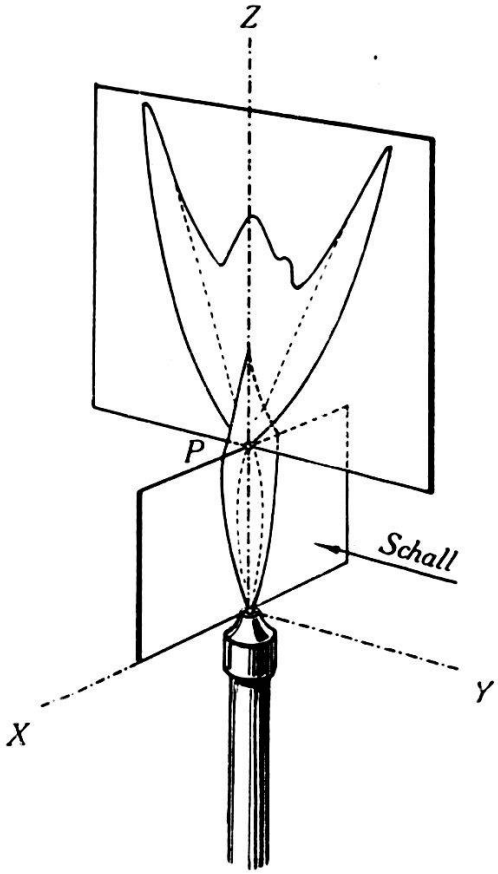

Fig. 8.

Flammenformen, mit denen man sich wohl früher abzugeben pflegte, zurückführen lassen.

Der Ursprung des rechtwinkligen Koordinatensystemes liege in der Düsenmündung, die Z-Achse sei die Figurenachse der ruhenden Flamme (als spindelförmiger Rotationskörper gedacht). Der Schall falle in Gestalt ebener Wellen in Richtung der Y-Achse auf. Die oben beschriebenen charakteristischen seitlichen Begren-

zungskurven des empfindlichen Flammenbandes liegen in der XZ-Ebene, die durch den Zusammenprall der konvergenten Gasstrahlen hervorgerufene Flammenfläche liegt in der YZ-Ebene. Schall, der in Richtung der Y-Achse einfällt, wirkt maximal, solcher, der die Flamme in Richtung der X-Achse trifft, wirkt überhaupt nicht auf die Flamme. Dies besagt, *dass auch die ruhende Flamme schon eine Asymmetrie enthalten muss, die sie allein als schallempfindlichen Indikator befähigt.* Diese Asymmetrie ist ein Bandcharakter (wenn auch nur der leichtesten, oft kaum sichtbaren Form) als Vorbereitung zu der in Fig. 8 wiedergegebenen Gestalt.

Für die Wirkung wesentlich ist der untere Flammenteil, die XZ-Ebene. Was dagegen in die Augen fällt, sind die Flammenflächen der YZ-Ebene, die jedoch bloss eine Folge der Geschwindigkeitsverteilung der Gasstrahlen im wesentlichen unteren Teil sind und akustisch keine Bedeutung mehr haben. Man kann die Bildung der Flammenfläche durch einen dünnen Platindraht verhindern, den man an der Stelle stärksten Zusammenströmens (maximaler Gasgeschwindigkeit) etwa bei Punkt P in die erregte Flamme hineinhält.

Die Flammenaufnahme Fig. 6 zeigt erneut (was übrigens längst bekannt), dass die Flammenfläche unter Einwirkung bestimmter Tonfrequenzen auf das Flammenband unregelmässig zuckt, akustisch ein *Geräusch* (Rauschen) mit kontinuierlichem Frequenzspektrum und keinen Ton aussendet.

Da das Flammenband in der XZ-Ebene aber offenbar auf die Schallschnelle $J = A \cdot \omega$ mithin auf Amplitude und Frequenz gleichzeitig reagiert, so ist es nicht verwunderlich, dass die Schallintensität (proportional dem Amplitudenquadrate) eine Hauptrolle bei der Wirkung auf die Flamme spielt. In der Tat werden Schwebungstöne von der Flamme durch deutliche Schwankungen von Helligkeit und Höhe der Flammenfläche in der YZ-Ebene wiedergegeben. Mit Hilfe der beiden Tongeneratoren der Fig. 4 konnte das leicht am Flammenbild im rotierenden Spiegel nachgewiesen werden. Schon der Entdecker der empfindlichen Flamme, John Leconte, nahm solches wahr.

Nun wird aber auch klar, warum die Flamme für hohe und höchste Töne so empfindlich ist, kommt doch neben der Amplitude A auch die Frequenz $\omega = 2\pi n$ in der Gleichung für die Schallschnelle vor.

Versuche zur näheren Prüfung dieser Zusammenhänge sind im Gange. Über die Ergebnisse soll später berichtet werden.

Es lag nach dem oben Entwickelten nahe, anstelle des aërodynamischen Wechselfeldes, wie es der Schall nun einmal darstellt, ein elektrisches zu setzen und zu untersuchen, ob eine sensibilisierte Flamme, wie wir eine solche mit der zur Schallempfindlichkeit erforderlichen Asymmetrie nennen wollen, auch auf elektrostatische Wechselfelder reagiere. Dies ist nun in der Tat der Fall.

Versuch: Gasflamme aus Düse Fig. 2 unter 7,9 cm Druck normal gebrannt. Das messingne Standrohr wird durch Glas vom Tische isoliert, der Lautsprecher vom Tongenerator zweipolig bei *a* und *b* in Fig. 3 abgeschaltet und der metallene Flammenbrenner mit dem Pole *a* des Generators verbunden. Ein Platindraht, verbunden mit dem Pole *b*, wird in Richtung der *Y*-Achse, also senkrecht zur Ebene des nur ganz schwach ausgeprägten Flammenbandes ½ Millimeter oberhalb der Düse in den Gasstrahl eingeführt. Es entsteht ein inhomogenes *elektrostatisches Wechselfeld*, dessen Hauptrichtung mit demjenigen des früher verwendeten Schallwechselfeldes übereinstimmt. Sofort ist eine starke Wirkung auf die Flamme, Spaltung der Flammenfläche, Rauschen zu beobachten. Hingegen kann mit dem Platindraht ein Punkt gefunden werden, bei dem das elektrische Feld symmetrisch in Richtung der *X*-Achse wirkend die Flamme vollständig ruhen lässt.

Elektrische Wechselfelder beeinflussen somit die empfindliche Flamme im gleichen Sinne wie aërodynamische Wechselfelder (Schall).

Noch sei hervorgehoben, dass die elektrische Erregung in der Flamme offenbar Volumenschwankungen im Takte der aufgeprägten Frequenz hervorruft und sie dadurch zur leisen Aussendung des betreffenden Tones zwingt. Interessant ist ferner, dass sich ein bei 7000 Hertz auftretendes Maximum in der Flammenwirkung bei näherer Untersuchung als die Folge einer Resonanzstelle des Tongenerators erwies. Das Maximum war somit nicht der Flamme, sondern einer zufälligen Spannungserhöhung zwischen den Punkten *a* und *b* bei dieser Frequenz zuzuschreiben.

6. Empfindliche Flammen als akustische Messgeräte.

Überall da, wo ein empfindlicher Bewegungsempfänger bei akustischer Messung am Platze ist, wird die sensibilisierte Flamme gute Dienste leisten. Oben erwähnten wir schon die Bestimmung von Schallwellenlängen bei hohen und höchsten Tönen. Es mögen hierüber noch einige weitere Angaben Platz finden.

Messung von Wellenlängen hoher Töne im freien Raume: In einer schönen Arbeit hat F. A. SCHULZE 13) Wellenlängen sehr hoher Töne, die er mit der Galtonpfeife erregte, durch Bildung stehender Wellen zwischen Pfeife und Tischplatte gemessen. Als Indikatoren dienten ihm Chladni-Figuren auf kleinen Plättchen, die in die Knotenstellen gebracht wurden. Die Methode ist schon alt und stammt vermutlich von SEEBECK aus dem Jahre 1843. Wir verwenden hier moderne frequenzstabile Tongeneratoren mit Elektronenröhren, die Flamme als Indikator für die Bewegungsknoten (vgl. Fig. 4 und Tabelle II) und erhalten ein Verfahren, das sich zur Eichung von Tongeneratoren und zu mannigfachen andern akustischen Untersuchungen und Demonstrationen vorzüglich eignet. Einige *Zahlenbeispiele* mögen dies näher erläutern:

a) *Nachprüfung einer König'schen Stimmgabel,* angeschrieben 6144 v. s.

Einstellung des Tongenerators auf denselben Ton, wobei die Flamme die hörbaren Schwebungen deutlich sichtbar anzeigt. (Es bietet sich dabei die Gelegenheit, die Frequenzvariationen einer angeschlagenen Stimmgabel vorzüglich zu demonstrieren.) Wiederholte Messung einer Reihe von halben Wellenlängen mittels der in Fig. 4 abgebildeten Apparatur für stehende Wellen. Man findet drei Mittelwerte für $\lambda/2$ zu 5,666, 5,666, 5,650, woraus die Wellenlänge des Tones $\lambda = 11{,}32$ cm. Bei 22 Grad Zimmertemperatur ist die Schallgeschwindigkeit $c = 345{,}2$ m/s, somit die Frequenz der Stimmgabel $n =$ *3049,7 Hertz* (gegen 3072 Nennwert).

b) *Nachprüfung zweier König'scher Klangstäbe,* angeschrieben 8192 v. s. und 10240 v. s.

Einstellung des Tongenerators unter Zuhilfenahme der an der Flamme sichtbaren Schwebungen, hierauf Messung von je 10 halben Wellenlängen. Temperatur beide Male 21 Grad. Schallgeschwindigkeit $c = 344{,}6$ m/s.

Erster Klangstab: Wellenlänge = 8,30 cm
Frequenz $n =$ *4151 Hertz* (gegen 4096 Nennwert).

Zweiter Klangstab: Wellenlänge = 6,74 cm
Frequenz $n =$ *5112 Hertz* (gegen 5120 Nennwert).

c) *Versuch mit einer grossen Zahl stehender Wellen.*

Einstellung des Tongenerators auf ungefähr 7200 Hertz. Schallwand von 1110 cm^2 Oberfläche wird langsam nach rückwärts von der Flamme entfernt, wobei sämtliche Bewegungsknoten (an der Ruhe der Flamme erkennbar) einzeln durchgemessen werden. Man liest 48 Werte ab, die alle zwischen dem Minimum von 2,2 und dem Maximum von 2,5 cm liegen. Mittel aus 48 Werten $\lambda/2 = 2{,}383$ cm. Temperatur 23 Grad. Schallgeschwindigkeit $c = 345{,}9$ m/s. Frequenz $n = 7256$ Hertz. Leicht hätten 50 halbe Wellen und mehr gemessen werden können. Wegen der Schallinterferenzen mit den von der Tischplatte zurückgeworfenen Wellen *(Lloyd'scher Versuch!)* wie auch wegen möglicher Oberschwingungen des Generators ist Vorsicht geboten.

d) *Versuch über die Hörgrenzen der Beobachter und über Ultraschall.*

An Stelle des grossen Drehkondensators C im Tongenerator (vgl. Fig. 3) trat ein kleiner mit maximaler Kapazität von 0,000288 Mikrofarad. Man mass dessen Bereich ganz durch und erhielt folgende Ergebnisse:

Tabelle III.

Kondensatorstellung	0	20	30	40	60	80
Zahl der Halbwellen	30	20	20	30	20	20
Wellenlänge in cm .	2,24	2,40	2,49	2,62	2,85	3,10
Temperatur in Grad	24,5	25,0	25,0	25,2	25,2	25,2
Schallgeschwindigk.	346,8	347,2	347,2	347,3	347,3	347,3
Frequenz in Hertz .	**15·482**	**14·466**	**13·943**	**13·256**	**12·186**	**11·203**

Die Intensitäten dieser hohen Töne, die der elektrodynamische Lautsprecher nur mit sehr geringer Stärke, doch für die Zwecke der Messungen durchaus hinreichend wiedergab, reichten offenbar zur Ermittlung der von der Amplitude ja abhängigen Hörgrenze nicht ganz aus, da beide Beobachter, cand. phil. W. Lehmann und der Verfasser, oberhalb 14000 Hertz hier nichts mehr, den Ton eines stark angeschlagenen Koenig'schen Klangstabes von 16384 Hertz jedoch noch deutlich hören konnten. Man sieht, wie gut sich die einfache Flammenanordnung auch bei sehr geringen Schallintensitäten noch für derartige Messungen oberhalb der Hörgrenze eignet.

Den Herren cand. phil. Werner Lehmann und dem Institutsmechaniker Arthur Meyer bin ich, ersterem für die Hilfe bei den Messungen und die Ausführung der photographischen Aufnahmen, dem letzteren für die geschickte Anfertigung der Düsen, zu besonderem Danke verpflichtet.

Literaturverzeichnis.

1) Sillimans American Journal for January 1858. Phil. Mag. (4) XV, S. 235 (1858).
2) John Tyndall. Der Schall. Deutsche Ausgabe von H. Helmholtz und G. Wiedemann. Braunschweig 1869, S. 258 ff. Phil. Mag. (4) XXXIII, S. 92 und 375 (1867).
3) W. F. Barrett. Phil. Mag. (4) XXXIII, S. 216 (1867).
4) W. F. Barrett. Phil. Mag. (4) XXXIII, S. 287 (1867).
5) Lord Rayleigh. Proc. Cambr. Phil. Soc. IV, S. 17 (1883).
6) Heinrich Mache. Phys. Zeitschr. XX, S. 467 (1919).
7) Diese Untersuchungen waren mir leider nicht zugänglich.
8) Müller-Pouillet. Lehrbuch der Physik. 11. Aufl. Akustik. red. von E. Waetzmann, S. 310.
9) E. G. Richardson. Proc. Phys. Soc. **35**, S. 47 (1923).
10) Müller-Pouillet. Akustik, S. 426.
11) John Tyndall. Der Schall (vgl. 2), S. 302.
12) Akustische Nomenklatur. E. T. Z. Jahrgang 1923, S. 114 und 138.
13) F. A. Schulze. Ann. d. Physik (4), XXIV, S. 785 (1907).

Basel, Physikalische Anstalt der Universität.
Abteilung für angewandte Physik.