

**Zeitschrift:** Helvetica Physica Acta  
**Band:** 7 (1934)  
**Heft:** VII

**Artikel:** Zum Hydrodynamischen Mechanismus schallempfindlicher Flammen  
**Autor:** Haedung, Victor  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-110398>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Zum Hydrodynamischen Mechanismus schallempfindlicher Flammen

von Victor Hardung.

*Inhaltsangabe.* Zwei nebeneinander brennende leuchtende Gasflammen von rundem Querschnitt werden durch Anlegen von elektrischen Wechselfeldern in Schwingungen versetzt. Haben die entsprechenden Wechselfelder gleiche Phase, so ziehen sich die Flammen gegenseitig an. Besteht aber zwischen den Wechselfeldern je nach der Anordnung der Elektroden eine Phasendifferenz von 90 oder 180 Grad, so stoßen sich die Gasflammen gegenseitig ab. Dieser Effekt beruht auf hydrodynamischen „Fernkräften“, wie sie von C. A. BJERKNES zuerst beschrieben wurden. Fernkräfte dieser Art werden von H. ZICKENDRAHT (Helv. Phys. Acta 7, 470, 1934) zur Erklärung der Schallempfindlichkeit herangezogen. Vorliegende Versuche bestätigen diese Ansicht.

Bringt man das untere Ende einer schallempfindlichen Gasflamme mit Hilfe zweier Elektroden in ein elektrisches Wechselfeld von genügender Stärke, so beobachtet man ganz dasselbe Verhalten der Flamme wie in einem Schallfeld. Man kann dabei auch die Flammendüse selber als eine der Elektroden benutzen. Dieser Effekt ist zuerst von H. ZICKENDRAHT<sup>1)</sup> beobachtet worden. In der vorhergehenden Arbeit (siehe S. 773) von H. ZICKENDRAHT werden für den Mechanismus der schallempfindlichen Flammen hydrodynamische Fernkräfte, wie sie von BJERKNES<sup>2)</sup> studiert wurden, verantwortlich gemacht. Es handelt sich dabei kurz um Folgendes: Eine schallempfindliche Flamme kann, wenn sie einen asymmetrischen, etwa elliptischen Querschnitt besitzt, was übrigens für das Zustandekommen der Empfindlichkeit nötig ist, aufgefasst werden, als wenn sie im wesentlichen aus zwei parallelen Gasströmen bestünde. Geraten nun diese Gasströme in Schwingungen oder in Volum pulsationen, so ziehen sie sich nach BJERKNES gegenseitig an, wenn die Schwingungen oder Pulsationen mit gleicher Phase erfolgen. Eine Abstossung tritt bei Schwingungen mit entgegengesetzter Phase auf. Bei der schallempfindlichen Flamme ist immer das erstere der Fall. Die Anziehung bewirkt, dass die beiden Gasstrahlen in einiger Ent-

<sup>1)</sup> HANS ZICKENDRAHT. Über schallempfindliche Flammen. Helv. Phys. Acta 5, 317, 1932.

<sup>2)</sup> C. A. BJERKNES, Hydrodynamische Fernkräfte, Leipzig 1900. — V. BJERKNES. Die Kraftfelder. Braunschweig 1909. Die Wissenschaft. Sammlung naturwissenschaftlicher und mathematischer Monographien.

fernung von der Düse zusammenprallen und dabei die typische, bei starker Erregung gegabelte Flammenfläche erzeugen.

Um diese Theorie noch weiter zu erhärten, wurden folgende Versuche ausgeführt. Die beiden Gasstrahlen in der schallempfindlichen Flamme wurden durch zwei an sich unempfindliche Flammen mit rundem Querschnitt ersetzt. Verwendet wurden Düsen aus Glaskapillaren, deren obere Enden im Feuer abgerundet sind, um scharfe Kanten zu vermeiden. Bringt man diese Flammen in ein gemeinsames Wechselfeld, so beobachtet man eine deutliche Anziehung. Sorgt man aber dafür, dass die beiden Einzelflammen durch zwei Wechselfelder erregt werden, die in der Phase um  $90^\circ$ <sup>1)</sup> verschieden sind, so erfolgt eine deut-

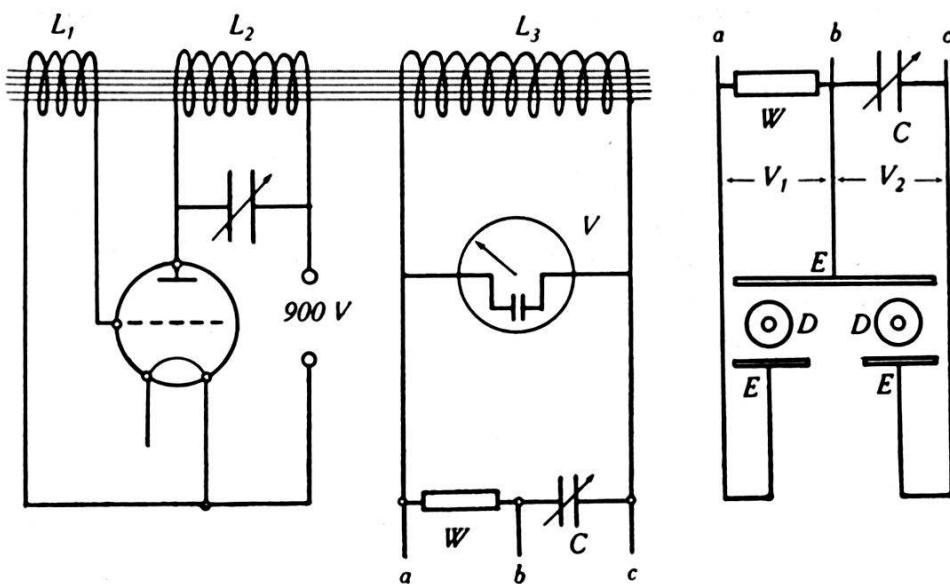


Fig. 1.

liche Abstossung der beiden Flammen. Die gegenphasigen Felder erzielt man leicht mit einer Anordnung wie sie in Fig. 1 rechts wiedergegeben ist.  $D-D$  stellen die Düsen von oben gesehen dar.  $E-E$  bezeichnen die Elektroden. Der veränderliche Kondensator  $C$  wird dabei so eingestellt, dass die Spannungen  $V_1$  und  $V_2$  gleich werden. Die Spannungen wurden mit einem statischen Voltmeter gemessen. Da es sich vorläufig nur um qualitative Versuche handelte, blieb die Kapazität des Instrumentes unberücksichtigt.

Mit einer Elektrodenanordnung wie sie in Fig. 1 und Fig. 2 dargestellt ist, wurden einige photographische Aufnahmen gemacht. Die Frequenz des verwendeten Wechselfeldes betrug ungefähr 4000 Hertz. Das Feld wurde mit Hilfe eines einfachen Röhren-

<sup>1)</sup> Die Begründung für die Wahl eines Phasenwinkels von  $90^\circ$  wird auf Seite 809 gegeben werden.

generators (kleine Senderöhre A.E.G.) erzeugt, dessen Schaltung aus Fig. 1 ersichtlich ist. Als Selbstinduktion  $L_3$  wurde die Sekundärseite eines Induktoriums benutzt.  $L_1$  und  $L_2$  sind Honigwabenspulen, auf den vorstehenden Eisenkern des Induktoriums aufgesetzt. Die Kapazität des Schwingkreises wird einfach durch die Kapazität des statischen Voltmeters gebildet. Die Kapazität und der Widerstand  $W$  bilden den Spannungsteiler zur Erzeugung der Felder entgegengesetzter Phase. Der Generator lieferte eine maximale Spannung von ca. 1500 Volt zwischen den Punkten  $a$  und  $c$  (siehe Fig. 1).

Die übrigen Versuchsbedingungen bei diesen Aufnahmen waren folgende: Düsenabstand 1,0 cm, Düsenquerschnitt ca. 0,1 cm, Gasdruck in der Zuleitung 1,5 cm Wassersäule. Da die

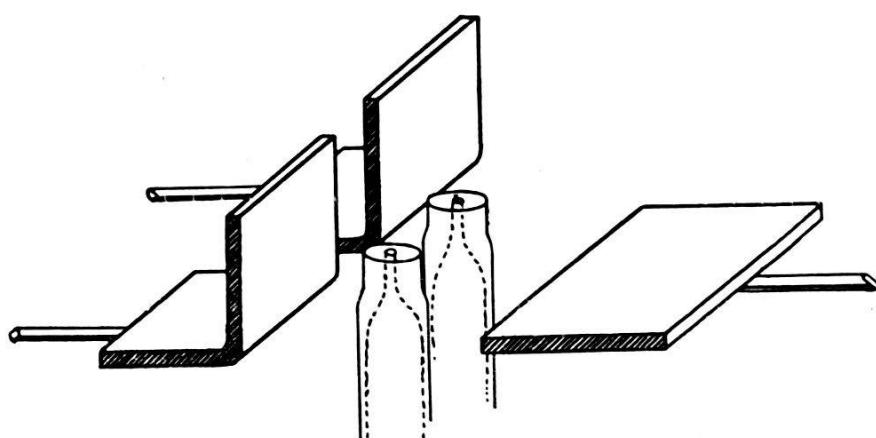


Fig. 2.

Anziehung und Abstossung der Flammen klein war, wurden die erhaltenen Flammenbilder an die Wand projiziert und der Flammen-Abstand an verschiedenen Stellen der Flamme gemessen. Das Resultat zeigen Fig. 3 und Fig. 4.

Die Kurven stellen den gemessenen Flammenabstand in Abhängigkeit von der Höhe über der Düse dar. Die Kurven 1 und 3 (ausgefüllte Kreise) sind von Normalaufnahmen mit unerregten Flammen gewonnen. Kurve 2 ist aus einer Aufnahme mit gleichphasiger Anregung, Kurve 4 aus einer Aufnahme mit gegenphasiger Anregung erhalten.

Einige weitere Versuche wurden mit einer Mittelfrequenzmaschine mit dazugehörigem Transformator durchgeführt. Damit konnte eine Spannung von 3750 Volt erreicht werden. Der Effekt war bedeutend grösser. Fig. 5a und Fig. 5b zeigen Aufnahmen der Flammen. Die Anordnung der Elektroden war ähnlich, wie im vorhergehenden Fall. Sie ist aus Fig. 2 ersichtlich. Fig. 5b zeigt links eine Aufnahme des ruhenden, rechts eine des gleich-

phasig erregten Flammenpaars. Die Spannung betrug dabei 2050 Volt. Die Anziehung der beiden Flammen ist daraus ohne weiteres erkennbar. Fig. 5a zeigt dasselbe mit gegenphasiger Erregung, wobei hier die Spannung an der einzelnen Flamme dieselbe ist wie in Fig. 5b. Die Abstossung der beiden Flammen ist hier deutlich sichtbar. Der benutzte Gasdruck betrug bei diesen Aufnahmen 1,7—1,8 cm Wassersäule.

Es erhebt sich nun die Frage, ist der beobachtete Effekt wirklich der gesuchte hydrodynamische Bjerkneseffekt, oder

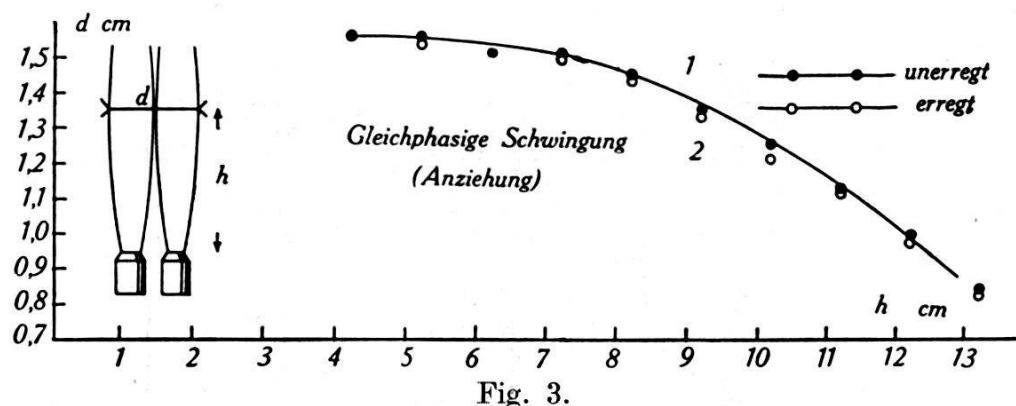


Fig. 3.

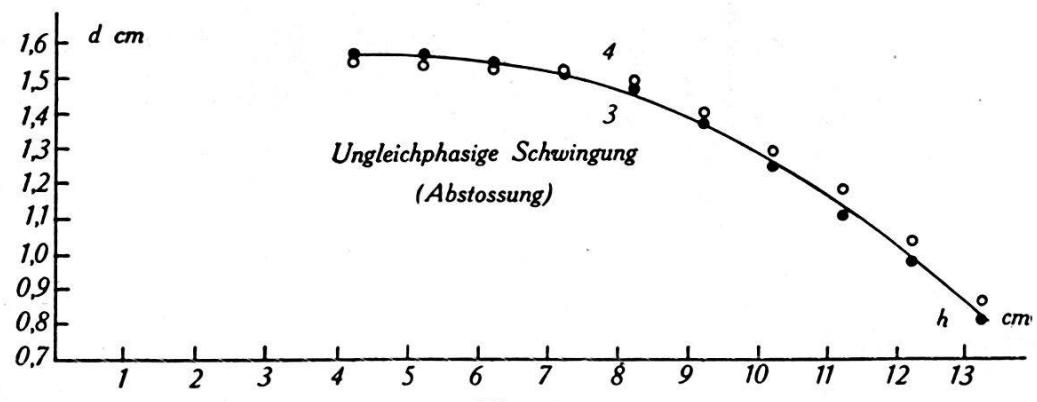


Fig. 4.

einfach eine elektrostatische Erscheinung, hervorgerufen durch eine bestimmte Ladungsverteilung in der Flamme. Man kann sich leicht überlegen, dass ein rein elektrostatischer Effekt nicht für die Erscheinung verantwortlich gemacht werden kann. Ohne eine bestimmte Annahme über die Natur der Ladungsträger in der Flamme zu machen, muss man annehmen, dass im gleichphasigen Feld gleichartige Ladungen sich in den beiden Flammen immer im gleichen Sinne entweder nach vorn oder nach hinten bewegen. Da auf diese Weise gleichnamige Ladungen immer gleichnamigen Ladungen gegenüberstehen, muss eine Abstossung erfolgen. Im Falle der gegenphasigen Erregung ergibt sich durch dieselbe Schlussweise eine Anziehung. Der elektrostatische Effekt bewirkt also gerade das Gegenteil des hydrodynamischen. Er

wird sich wahrscheinlich als Schwächung dem hydrodynamischen Effekt überlagern.

Um aber in der Deutung des gefundenen Effektes sicher zu sein, wurden die mechanischen Schwingungen der Flammen direkt mit Hilfe eines Stroboskopes untersucht. Versucht man dies bei der Frequenz 362 Hertz, so kann man deutlich das Unschärfwerden der Flammenränder erkennen. Die Schwingung selber ist schwer zu beobachten. Ohne weiteres gelingt dies hingegen bei stärkerer Erregung in einem Wechselfeld von 50 Perioden. Man sieht dabei die Wellenbewegung der Flammen sehr gut von



Fig. 5a.

Fig. 5b.

der Seite, d. h. in der Richtung der Verbindungsebene der beiden Flammen. Auch die gegenphasige Schwingung ist deutlich erkennbar. Die Anziehung und Abstossung ist ebenfalls sehr kräftig, doch brennen die Flammen bei diesen niederen Frequenzen sehr unstabil, sodass eine photographische Aufnahme nicht möglich war.

Die hier in Frage kommenden hydrodynamischen Fernkräfte (es handelt sich natürlich um scheinbare Fernkräfte) sind für den Fall zweier in einem Medium von der Dichte  $\rho$  senkrecht zu ihrer VerbindungsLinie parallel schwingender Kugeln von C. A. BJERKNES berechnet worden. Der Ausdruck für die Anziehungs- bzw. Abstossungskraft lautet:

$$K = -\frac{27}{16} \cdot \rho \cdot V_1 V_2 \cdot \frac{\dot{S}_1 \dot{S}_2}{\pi r^4} \quad \dot{S}_{12} = \frac{dS_{12}}{dt} \quad V_{12} = \begin{matrix} \text{Volumen der} \\ \text{Kugeln.} \end{matrix} \quad (1)$$

$S_1$  und  $S_2$  bedeuten hier die Entferungen der Kugeln von ihrer Ruhelage.  $\dot{S}_1$  und  $\dot{S}_2$  ihre Geschwindigkeiten.  $r$  ist der

gegenseitige Abstand der Kugeln in der Ruhelage. Macht man die vereinfachende Annahme

$$S_1 = S_0 \cdot \sin \omega t \quad S_2 = S_0 \sin (\omega t + \varphi) \quad V_1 = V_2 = V \quad (2)$$

so wird aus 1 im Falle dass  $\varphi = 0$

$$K = -\frac{27}{16} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{\pi r^4} \cdot S_0^2 \omega^2 \cos^2 \omega t \quad (3)$$

d. h., es entsteht eine im Zeitmittel anziehende Kraft.

Hat  $\varphi$  hingegen den Wert 90 Grad, so entsteht eine Kraft mit dem zeitlichen Mittelwert 0. Bei höheren Frequenzen nimmt also der Beobachter nichts wahr. Für  $\varphi = 180$  Grad erhält man aus (1)

$$K = +\frac{27}{16} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{\pi r^4} \cdot S_0^2 \omega^2 \cos^2 \omega t \quad (4)$$

d. h. eine Abstossungskraft.

Man sollte daraus schliessen, dass bei den Flammenversuchen die Wechselfelder eine Phasendifferenz von 180 Grad besitzen müssten, um eine Abstossung zu erzeugen, statt der verwendeten Phasendifferenz von 90 Grad. Die in Fig. 2 dargestellte Elektrodenanordnung besitzt hingegen einen einseitigen Richteffekt. Die Flammen werden in diesem Fall immer nach rechts abgelenkt unabhängig von der Polarität der Elektroden, was sich durch statische Versuche leicht zeigen liess. Macht man die Elektrodenanordnung symmetrisch, indem man auf beiden Seiten ein Plattenpaar verwendet, so ergibt sich die Abstossung der Flammen wie zu erwarten bei einer Phasendifferenz von 180 Grad der angelegten Spannungen. Bei 90 Grad Phasendifferenz sollte in diesem Falle keine Kraftwirkung eintreten. Führt man den Versuch aus, so kann man sogar eine Anziehung beobachten, die indessen durch elektrostatische Kräfte erklärbar ist.

Da eine der Formel (1) analoge Formel auch für Volumpulsationen gilt, war es naheliegend, Volumpulsationen in einer Doppelflamme zu erzeugen. Man erreicht dies mit einer Anordnung wie sie in Fig. 6 angedeutet ist. Zwei Düsen aus Messing sind auf einer möglichst flachen Schalldose mit starken Wänden aufgesetzt. Den Boden der Dose bildet eine Glimmermembran. Diese ist durch einen Stift mechanisch mit einem Lautsprechersystem gekoppelt, das durch einen einfachen Röhrengenerator erregt wird. Beobachtet man die Flammen im Stroboskop bei sehr tiefen Brummtönen, so sieht man ein Bild wie es in Fig. 6b an-

gedeutet ist. Die Flammen werden ebenfalls unstabil. Eine Anziehung der beiden Flammen konnte nicht beobachtet werden, auf alle Fälle war sie so gering, dass sie infolge der Unstabilität der Flammen bei diesen Frequenzen nicht wahrnehmbar war.

Die mit diesem Apparat erhaltenen Volum pulsationen  $\dot{V} = \frac{d W}{d t}$  sind offenbar zu schwach, um einen merklichen Bjerkneseffekt zu erzeugen, besonders bei höheren Frequenzen. Vibratoren im

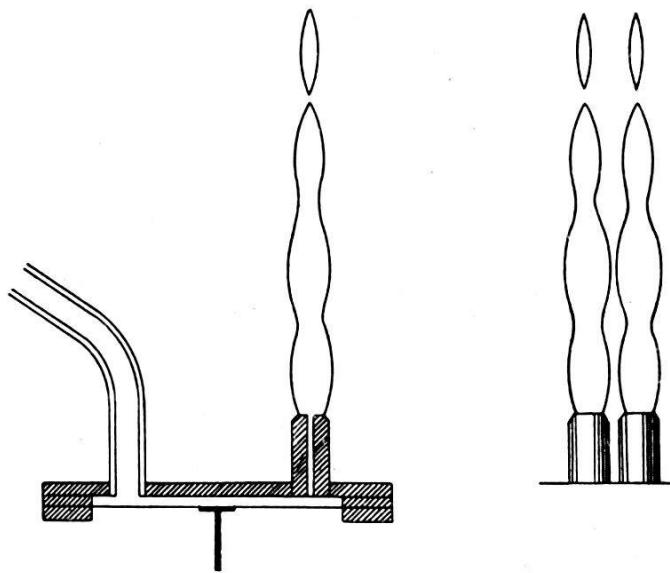


Fig. 6a.

Fig. 6b.

der Art wie sie für Unterwasserschallsignale verwendet werden, dürften hier allein genügen. Eine beliebige Verkleinerung des Abstandes Membran-Dosendeckel führt deshalb nicht zum Ziel, weil wenigstens ein Teil des Volumens der Zuleitungen zum Dosenvolumen hinzugerechnet werden muss.

#### **Einfluss der Flammenionisation.**

Bringt man eine einzelne Flamme zwischen die Platten eines Kondensators, der auf einige 1000 Volt aufgeladen ist, so beobachtet man eine Ablenkung der Flamme nach der negativen Platte, was schon lange bekannt ist und seine Erklärung darin findet, dass für die Elektrizitätsleitung in der Flamme im wesentlichen positive Ionen und negative Elektronen verantwortlich zu machen sind. Um den Einfluss einer Vermehrung der Ionisation zu untersuchen, wurde ein Brenner konstruiert, in dessen Innerem eine kleine Heizspirale angebracht war, die mit Natronwasserglas bestrichen wurde. Durch Glühen des Drahtes konnte so die Ionisation der Flamme verstärkt werden, ohne die Flamme durch Luftzufuhr oder das Einbringen eines Fremdkörpers zu verändern.

Ein Einfluss der Ionisation auf die Ablenkung im statischen Feld wurde nicht beobachtet. Dabei ist allerdings zu beachten, dass sich die Beobachtung auf den scharf begrenzten gelbroten Kern der Flamme bezieht. Durch das Einbringen des Natriumdampfes wird die äussere Partie der Flamme die sonst fast unsichtbar ist, gefärbt und im elektrischen Feld nach der negativen Elektrode zu verbreitert. Ein sicherer Schluss kann deshalb aus diesem Versuch noch nicht gezogen werden. Versuche an einem ähnlich konstruierten Brenner mit doppelter Düse mit gleich und gegenphasigen Wechselfeldern zeigten ebenfalls keine beobachtbare Verstärkung des „Bjerknes-Effektes“. Auch Kaliumionen, die durch Auftragen einer Paste aus KCl und NH<sub>4</sub>Cl auf den Heizdraht erzeugt wurden, gaben dasselbe negative Resultat. Ebenso hatte auch das Anbringen einer Salzperle an den unteren Flammenrand nahe der Düsen keinen Einfluss, trotz der in diesem Falle intensiveren Flammenfärbung.

Da dieses negative Resultat noch nicht sehr aufschlussreich war, wurden noch einige Versuche mit kalten Gasstrahlen ange stellt. Um die Gasstrahlen sichtbar zu machen, wurde die Töpler'sche Schlierenmethode<sup>1)</sup> angewendet. Da mit den zur Verfügung stehenden unkorrigierten Linsen die Empfindlichkeit der Anordnung nicht sehr weit getrieben werden konnte, musste das zur Verwendung kommende Gas etwas vorgewärmt werden. Die Temperatur blieb jedoch schätzungsweise unter etwa 100 Grad C, sodass eine merkliche Temperatur-Ionisation nicht in Frage kommt. Die Versuche fielen, wie zu erwarten war, negativ aus, d. h. es entstand keine Anziehung der beiden Gasstrahlen. Die Versuchsdaten waren folgende: Düsendurchmesser 0,17 cm; Düsenabstand 0,62 cm; Gasdruck 10—15 mm Wassersäule. Als Gase dienten Luft und Leuchtgas. Beobachtet man zwei *leuchtende* Gasflammen mit derselben Apparatur, so erkennt man nahe der Düsen deutlich schmale Strahlen unverbrannten relativ kalten Gases, die bei Anlegen des Wechselfeldes unbeweglich bleiben, während die äusseren Flammenpartien schon wenig über der Düse sich gegeneinander bewegen.

Eine hohe Temperatur und die damit verbundene Ionisation sind also für das Zustandekommen der elektrischen Flammen erregung nötig. Da die angelegten Wechselfelder ziemlich un homogen sind, könnte man daran denken, permanente und indu

<sup>1)</sup> Eine Darstellung der optischen Anordnung befindet sich bei J. ACKERET, Gasdynamik. SPRINGER, Handbuch der Physik, Bd. 7. Ebenso bei ERNST MAGIN, Optische Untersuchungen über den Ausfluss von Luft durch eine Lavaldüse. Diss. Göttingen 1908.

zierte Dipolmomente zur Erklärung der Flammen-Ablenkung heranzuziehen. Eine Abschätzung nach den Debye'schen Formeln ergibt aber viel zu geringe Kräfte.

Vorliegende Arbeit wurde im Laboratorium für angewandte Physik der Universität Basel ausgeführt. Für die bereitwillige Überlassung der Institutsmittel möchte ich an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. H. ZICKENDRAHT meinen verbindlichsten Dank aussprechen.

Basel, Physikalische Anstalt der Universität.

Abt. für angewandte Physik.

---