

Multipliemessungen an T-Rohren

Von I. HERTEL und H. KLINGENBERG

Ernst-Mach-Institut, Freiburg i. Br.

(Z. Naturforsch. **19 a**, 941—946 [1964]; eingegangen am 14. März 1964)

Mit zwei Photomultipliern und mit Lichtleitern wurden die Leuchterscheinungen an T-Rohren untersucht. Man beobachtet drei charakteristische Leuchterscheinungen. Die erste tritt nach 0,1 bis 0,5 μ s im ganzen Rohr auf und muß offenbar einer Anregung des Füllgases durch UV-Strahlung zugeschrieben werden. Eine zeitliche, am Rohrende beobachtete Verzögerung läßt auch eine Beteiligung von Resonanzstrahlung vermuten. Die Amplitude ist in komplizierter Weise vom Ort, vom Druck und vom Füllgas abhängig.

Die zweite Leuchterscheinung tritt im ganzen Rohr gleichzeitig auf und folgt den Stromschwingungen der Entladung. Ursache dieser Erscheinung ist die Anregung des Glases durch UV-Strahlung und Streulicht vom Entladungsraum.

Die dritte Leuchterscheinung kann dem laufenden Plasma zugeordnet werden. Die komplizierte, doch gut reproduzierbare Struktur dieser Erscheinung entspricht einer Verwirbelung des Plasmas, von dem sich mit einer gewissen Regelmäßigkeit Teile ablösen.

Im Zusammenhang mit Mikrowellenmessungen, auf die in einer späteren Arbeit eingegangen wird, wurden die Leuchterscheinungen an T-Rohren mit Hilfe von Photomultipliern untersucht. Diese Multipliemessungen waren ursprünglich nur als Kontrollmessungen gedacht. Doch war das dabei angefallene Untersuchungsmaterial so umfangreich und die beobachteten Effekte interessant genug, um eine getrennte Beschreibung zu rechtfertigen.

1. Meßapparatur

Die benutzte Entladungsapparatur ist schon in einer früheren Arbeit¹ beschrieben worden (s. Abb. 1 in ¹). Die Messungen wurden an zwei verschiedenen Rohren durchgeführt:

1. an einem kleinen Rohr^{1, 2}: Pyrexglas; 1,7 cm Innendurchmesser; 82 cm Länge; 10 kV Entladungsspannung; (160 Joule Entladungsenergie); 137 kHz Entladungsfrequenz (s. 2.3). Füllgas war Luft von 0,5 bis 100 Torr. In einigen Zentimetern Abstand von den Elektroden war das Rohr durchgeschnitten. Für die Messungen wurde es (mit aufgeklebten Flanschen und einem Dichtungsring) so zusammengeschraubt, daß die Glaskanten aufeinander lagen.

2. an einem großen Rohr: Rechteckrohr aus Kristallspiegelglas; Innenmaße: 4,9 cm Höhe; 10,5 cm Breite und 49 cm Länge. Die Entladungsspannung betrug (so weit nicht anders vermerkt) 20 kV (Entladungsenergie: 640 Joule), die Entladungsfrequenz 130 kHz (s. 2.3). Füllgas war Luft, Helium oder Argon von 0,5 bis 5 Torr.

Vor jeder Meßserie wurde das jeweilige Rohr mit einer Diffusionspumpe auf 10^{-4} Torr leergepumpt und dann über eine Kühlfalle gefüllt. Der Druck wurde mit einem Alphanatron-D gemessen.

Zur Beobachtung der Leuchterscheinungen dienten zwei Photomultiplier vom Typ 931-A (RCA) bei 700 V.

Multiplier, Netzgerät und Oszillograph (Tektronix Typ 555) befanden sich in einer Abschirmkabine. Der Oszillograph wurde stets (vor Beginn der eigentlichen Entladung) von einem induktiv abgezweigten Teil der Entladungsspannung getriggert, mit Streuzeiten kleiner als $\pm 0,05 \mu$ s.

Das Licht wurde den Multipliern über Lichtleiter zugeführt: zunächst über Pyrexglasstäbe von 8 mm Durchmesser und 1,4 m Länge — später über Fiber-Optik-Lichtleiter (American Optical Co.) von 1 m Länge. Beim kleinen Rohr waren die Lichtleiter senkrecht auf das Rohr gesetzt, beim großen Rohr dagegen (zur Verbesserung der Raumauflösung) in einer den Strahlengang begrenzenden Hülse senkrecht mit 3 cm Abstand.

2. Durchführung und Ergebnisse der Messungen

2.1. Allgemeines:

Das typische Aussehen der Multiplieroszillogramme zeigt Abb. 1 (vorausgesetzt, die Meßstelle hat einen gewissen Abstand von den Elektroden, sonst würden sich die Erscheinungen überlagern).

Man kann drei charakteristische Bereiche unterscheiden:

¹ H. KLINGENBERG, Mikrowellenmessungen an T-Rohren, Z. Naturforsch. **18 a**, 1331 [1963].

² H. KLINGENBERG u. E. MEDER, Z. Naturforsch. **18 a**, 459 [1963].



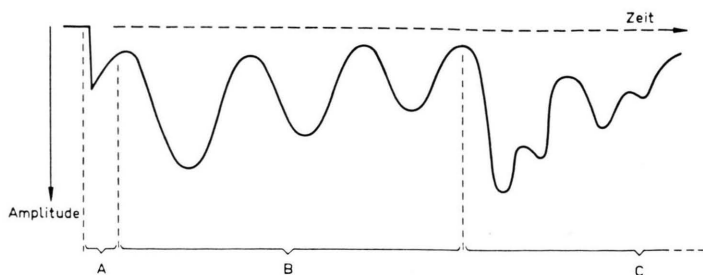
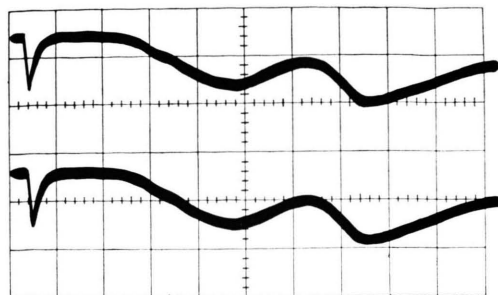


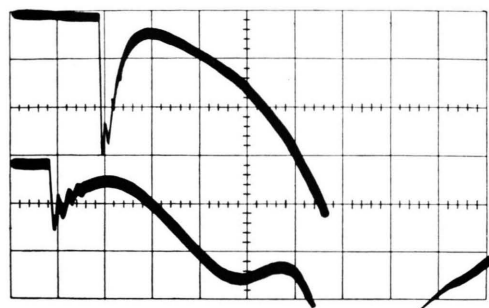
Abb. 1. Typisches Bild der Multiplieroszillogramme.

Abb. 2. Multiplier-Oszillogramm; kleines Rohr; Luft; 0,5 Torr; $x=12$ cm, Pyrexglasstab; $0,5 \mu\text{s}/\text{cm}$.

A) Ein Lichtsignal nach $0,1 \dots 0,5 \mu\text{s}$ im ganzen Rohr. Wir nennen diesen Effekt: 1. Vorläufer (siehe 2.2). (Die Mikrowellenmessungen ergaben übrigens eine meßbare Elektronendichte, wenn dieser Effekt sein Maximum erreicht hatte.) — Es handelt sich offenbar um einen Gaseffekt (s. 2.2.5).

B) Ein Lichtsignal — mit dem ersten Maximum nach ca. $2,5 \mu\text{s}$ — im ganzen Rohr, das den Stromschwingungen der Entladung folgt und als Glasleuchten bezeichnet wird (s. 2.3).

C) Ein orts- und zeitabhängiges Lichtsignal, das dem Eigenleuchten des in das Rohr hineinlaufenden Plasmas zugeordnet werden kann (s. 2.4).

Abb. 3. Multiplier-Oszillogramm; kleines Rohr; Luft; 1 Torr; Fiber-Optik; oberer Strahl $x=81$ cm; unterer Strahl $x=18$ cm; beide $0,2 \mu\text{s}/\text{cm}$.

2.2. 1. Vorläufer:

2.2.1. Übersicht

Der 1. Vorläufer wurde im kleinen und im großen Rohr bei allen untersuchten Gasen an allen Orten bei Drücken bis zu 5 Torr mit unterschiedlichen Amplituden beobachtet. Abb. 2 zeigt ein Beispiel. (Die im folgenden angegebenen Entfernungen x sind von der Elektrodenmitte aus gemessen.)

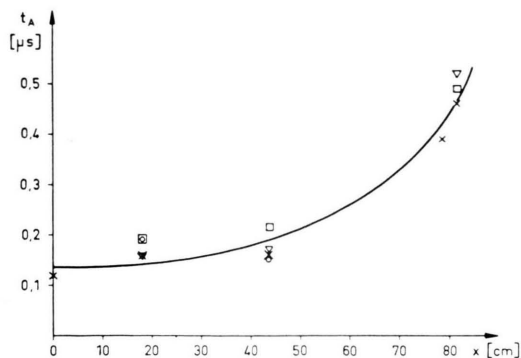
Der Effekt beginnt hier nach ca. $0,2 \mu\text{s}$; er verschwindet, wenn der Lichtleiter abgedeckt wird, ist also ein echtes Lichtsignal.

2.2.2 Einsatzzeit des 1. Vorläufers

An verschiedenen Orten des Rohres setzt der Effekt zu verschiedenen Zeiten t_A ein. Abb. 3 zeigt als Beispiel ein Oszillogramm für das kleine Rohr.

Die Einsatzzeit t_A des 1. Vorläufers als Funktion des Ortes x für das kleine Rohr zeigt Abb. 4.

Wegen des steilen Anstiegs läßt sich die Einsatzzeit sehr genau bestimmen. Bei der Auswertung des Maximums ergeben sich ähnliche Verhältnisse, so daß die gefundene Verzögerung als gesichert gelten kann. Bis etwa zur halben Rohrlänge setzt der Ef-

Abb. 4. $x-t$ -Diagramm des 1. Vorläufers. Kleines Rohr, Luft. □: 0,5 Torr; ×: 1 Torr; ▽: 2 Torr; ○: 5 Torr; Streubreite für alle Werte: $\pm 0,05 \mu\text{s}$.

fekt nur wenig später ein als am Ort der Entladung, dagegen wird am Rohrende eine deutliche Verzögerung beobachtet. Das Verhalten ist innerhalb der Streubreite für die angeführten Drücke gleich.

Die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit im Bereich zwischen 44 und 82 cm beträgt:

$$\bar{v}_p = 1,3 \cdot 10^8 \text{ cm/s} \pm 30\%.$$

Am großen Rohr konnte wegen der geringeren Länge keine Verzögerung beobachtet werden. Auch hier liegt t_A im Mittel bei etwa $0,2 \mu\text{s}$.

2.2.3 Amplitude des 1. Vorläufers

Durch Vergleich der Multipliersignale jeweils einer Serie können relative Aussagen über die Lichtintensität gemacht werden.

Die folgenden Abb. 5, 6 und 7 zeigen als Beispiel die Amplituden in willkürlichen Einheiten (die in diesen Abb. untereinander verschieden sind).

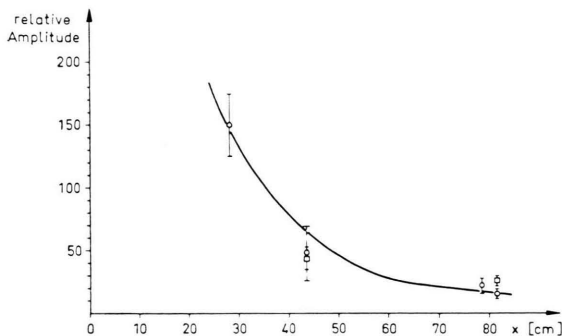


Abb. 5. Ortsabhängigkeit der Amplitude. Kleines Rohr; Luft; Fiber-Optik; □: 0,5 Torr; ○: 1 Torr.

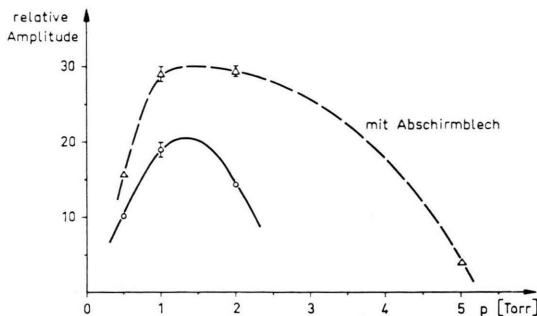


Abb. 6. Druckabhängigkeit der Amplitude, $x=22 \text{ cm}$. Kleines Rohr; Luft; Pyrex-Glasstab (gestrichelte Kurve s. 2.2.4.5).

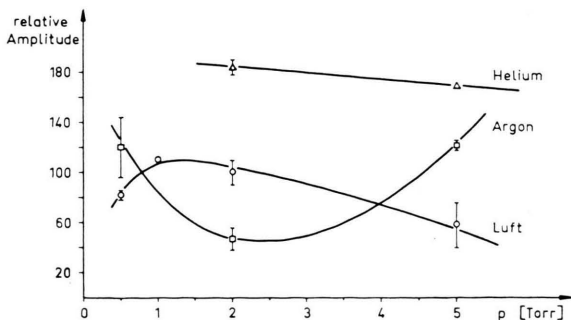


Abb. 7. Druckabhängigkeit der Amplitude, $x=17 \text{ cm}$. Großes Rohr; Luft; Argon; Helium; Fiber-Optik.

Die Amplitude des 1. Vorläufers nimmt für beide Rohre eindeutig mit der Entfernung ab; die Dämpfung ist druckabhängig. Der Effekt ist in Helium von größerer Amplitude als in Argon und in Luft.

2.2.4 Fallunterscheidungen

2.2.4.1 Fenstermessungen

In das kleine T-Rohr wurde für eine Meßserie im Abstand von $x = 5 \text{ cm}$ jeweils ein Fenster, einmal aus LiF, zum anderen Mal aus Quarzglas eingeklebt (was durch die Flanschbauweise, vgl. 1., erleichtert wird). Dadurch wurde das T-Rohr jeweils in zwei vakuumdichte Abschnitte aufgeteilt: einen Entladungsabschnitt und einen Meßabschnitt. Das LiF-Fenster ist durchlässig bis etwa 1250 Å , das Quarzglas-Fenster bis etwa 1700 Å .

Wenn das Füllgas (Luft oder Helium) im Entladungsabschnitt und im Meßabschnitt den gleichen Druck hatte, war der 1. Vorläufer im Meßabschnitt hinter den beiden Fenstern praktisch unverändert zu beobachten. Wurde der Meßzweig aber auf 10^{-2} Torr leergepumpt, so war kein Leuchten mehr festzustellen.

2.2.4.2 Spektrale Verteilung

Mit einem Spektrographen (Firma Steinheil) wurde die spektrale Verteilung des Lichtes vom 1. Vorläufer untersucht³.

Zur Lichtzuführung vom T-Rohr zum Spektrographenspalt und vom Spektrographen zum Multiplier diente wieder jeweils ein Fiber-Optik-Lichtleiter. Füllgas war Luft bei 1 Torr, und die Meßstelle lag bei $x = 18 \text{ cm}$. Das ganze sichtbare Spektrum wurde auf diese Weise abgetastet. Der Effekt hatte nur in einem bestimmten Bereich eine merkliche Amplitude, und zwar für

$$\lambda = (4250 \pm 50) \text{ Å}.$$

Für eine genauere Zuordnung waren die verwendeten Multiplier nicht empfindlich genug.

In dem genannten Bereich liegen u. a. sieben N^{I} -Linien und drei O^{I} -Linien.

2.2.4.3 Polarisation und Richtungsabhängigkeit

Am großen Rohr wurde zwischen dem Rohr und dem senkrecht angeordneten Fiber-Optik-Lichtleiter ein Polarisationsfilter gebracht und um Beträge von

³ Bei diesen spektroskopischen Messungen war uns Herr Dipl.-Phys. G. SCHWARZKOPF behilflich, dem wir unseren Dank aussprechen möchten.

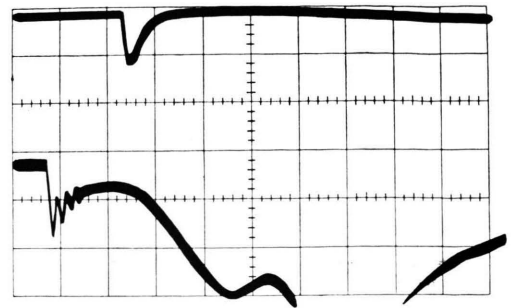
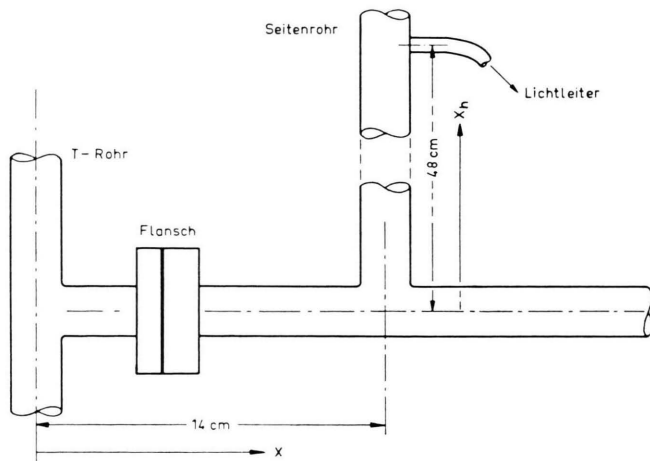


Abb. 9. Multiplier-Oszillogramm; kleines Rohr; Luft; Fiber-Optik; oberer Strahl: Seitenrohr, $x_h=48$ cm; unterer Strahl: Hauptrohr, $x=18$ cm; beide $0,2 \mu\text{s/cm}$.

← Abb. 8. T-Rohr mit Seitenrohr.

45° gedreht. Innerhalb der Streubreite konnte keine Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung beobachtet werden.

Ferner wurde der Lichtleiter unter verschiedenen Winkeln auf das Rohr gesetzt. Auch hier konnte innerhalb der Streubreite keine Änderung festgestellt werden.

2.2.4.4 Seitenrohr

Für eine andere Meßserie wurde das kleine Rohr im Abstand $x = 14$ cm aufgebohrt und ein Rohr aus Pyrexglas von gleichem Innendurchmesser und einer Länge von 62 cm senkrecht angeglast. Das Prinzip zeigt Abb. 8.

Dieses Seitenrohr wurde mit schwarzem Papier umkleidet, um jedes Streulicht abzublenken.

Der 1. Vorläufer konnte auch im Seitenrohr beobachtet werden (s. Abb. 9, oberer Strahl). Die

Meßstelle am Seitenrohr (im folgenden mit x_h bezeichnet) war 48 cm von der Mitte des Hauptrohrs entfernt (s. Abb. 8).

Der Effekt tritt auch im Seitenrohr verzögert auf, s. Abb. 10. Die Amplitude ist ebenfalls druckabhängig, s. Abb. 11. Bei 5 Torr ist der Effekt im Seitenrohr nicht mehr zu beobachten.

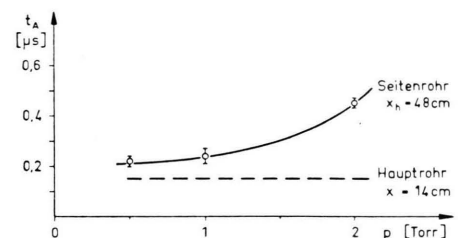


Abb. 10. Einsatzzeit des 1. Vorläufers im Seitenrohr.

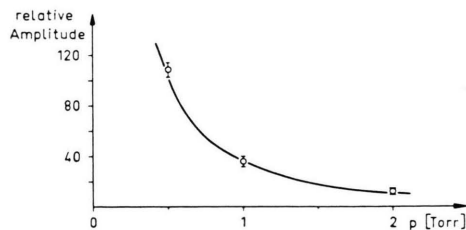


Abb. 11. Druckabhängigkeit der Amplitude im Seitenrohr, $x_h=48$ cm.

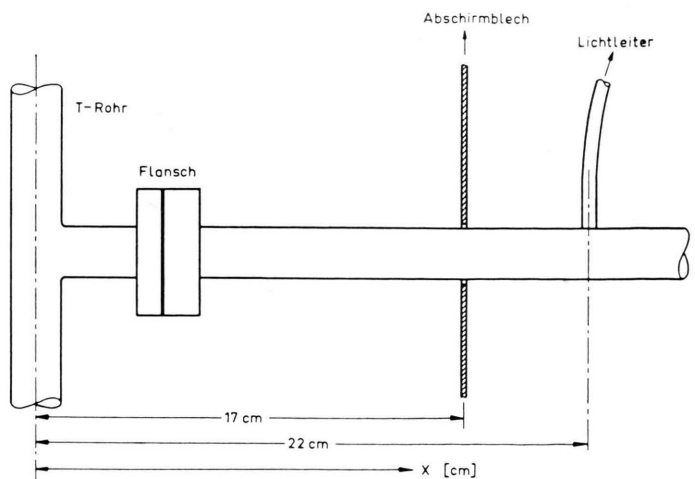


Abb. 12. T-Rohr mit Abschirmblech. →

2.2.4.5 Einfluß von Abschirmung und quer-angegletem Magnetfeld

Über das kleine Rohr wurde ein geerdetes, durchbohrtes Abschirmblech (etwa $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$, 2 mm starkes Eisenblech) geschoben und zwischen Entladungs-Strecke und Meßstelle gebracht, s. Abb. 12.

Die Amplitude wurde durch die Abschirmung wesentlich vergrößert, wie Abb. 6 (gestrichelte Kurve) verdeutlicht. Senkrecht zum kleinen Rohr wurde mit einem Dauermagneten (Poldurchmesser 4 cm, Polabstand 4 cm) ein Magnetfeld von 1400 Gauß angelegt. Hinter dem Magnet war die Amplitude größer als ohne Magnetfeld.

2.2.5 Diskussion der Ergebnisse

Auf Grund der Fenstermessungen (2.2.4.1: Verschwinden des Effektes für $2 \cdot 10^{-2}$ Torr im Meßabschnitt) darf man sagen, daß es sich beim 1. Vorläufer um eine Anregung des Gases handelt. Hinzu kommt die Tatsache, daß das Licht in einem relativ kleinen Spektralgebiet ein Maximum hat.

Die Anregung geschieht offenbar durch UV-Licht, nicht etwa durch Elektronen (2.2.4.1: Fenstermessung, 2.2.4.4: Seitenrohr und 2.2.4.5: Magnetfeld) und auch nicht durch eine Glimmentladung (2.2.4.1 und 2.2.4.5: Abschirmung).

Die beobachtete Verzögerung läßt vermuten, daß an dem Anregungsprozeß Resonanzstrahlung zumindest beteiligt ist. Damit wäre auch die Tatsache zu erklären, daß der Effekt im Seitenrohr beobachtet wird.

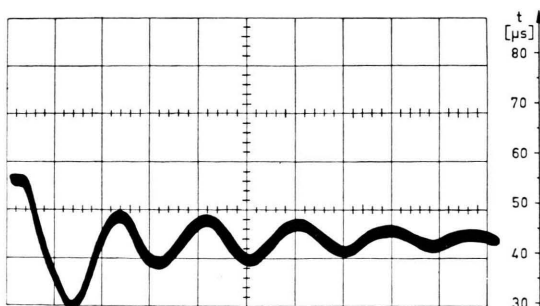


Abb. 13. Multiplier-Oszillogramm, kleines Rohr, Luft, 5 Torr, $x = 13\text{ cm}$, Pyrexglasstab, 2 µs/cm .

Abb. 15. $x-t$ -Diagramm des Plasmaleuchtens; kleines Rohr; Luft; 1 Torr.

Die Amplituden sind in komplizierter Weise vom Ort, vom Füllgas und vom Druck abhängig. Das ist auch verständlich, da einmal die Intensität des anregenden UV-Lichtes ($x=0$) vom Gas und vom Druck, zum anderen die Anregung selbst vom Ort, Gas und Druck abhängen.

2.3 Das Glasleuchten

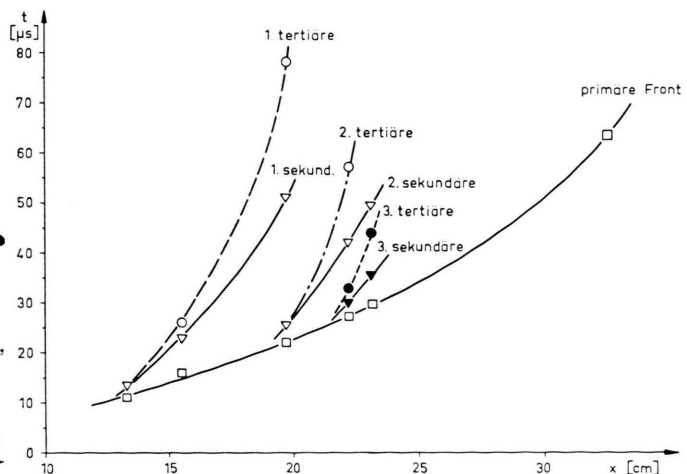
2.3.1. Meßergebnisse

Das Glasleuchten (Bereich B in 2.1, s. Abb. 1) wurde am kleinen und großen Rohr an allen Orten mit etwas unterschiedlicher Amplitude beobachtet, und zwar für Luft, Helium und Argon bei Drücken von 0,5...100 Torr. Abb. 13 zeigt den charakteristischen Verlauf.

Innerhalb der Meßgenauigkeit tritt das Glasleuchten im ganzen Rohr zur gleichen Zeit auf, die Amplitude nimmt in x -Richtung etwas ab. Die Oszillogramme zeigen alle das Bild einer gedämpften Schwingung mit dem ersten Maximum bei etwa $2,5\text{ µs}$. Die Maxima dieser Schwingungen entsprechen den Stromböchen der Entladung, die z.B. auch auf Trommelkameraaufnahmen beobachtet, vgl. 4, und mit Spannungsmessungen verglichen wurden. Dadurch konnte aus der Frequenz des Glasleuchtens die Entladungsfrequenz bestimmt werden.

2.3.2 Fallunterscheidungen

Die in 2.2.4 für den 1. Vorläufer beschriebenen Fallunterscheidungen ergeben für das Glasleuchten folgendes Bild:



⁴ P. JEANMAIRE, H. KLINGENBERG u. H. REICHENBACH, Z. Naturforsch. **18 a**, 318 [1963].

1. Hinter dem LiF- oder Quarzglasfenster bleibt das Glasleuchten praktisch unabhängig vom Druck im Meßabschnitt. Es bleibt beispielsweise unverändert in Luft für $2 \cdot 10^{-2}$ Torr (LiF-Fenster) bzw. 760 Torr (Quarzglas-Fenster) im Meßabschnitt.

2. Lichtleitung in der Glaswand konnte auf Grund der Beobachtungen praktisch ausgeschlossen werden.

3. Das Glasleuchten ist fast im gesamten sichtbaren Spektralbereich mit wechselnden Intensitäten zu beobachten.

4. Das Glasleuchten ist nicht polarisiert und nicht richtungsabhängig.

5. Im Seitenrohr ist das Glasleuchten *nicht* zu beobachten (vgl. Abb. 9, oberer Strahl).

6. Die Amplitude des Glasleuchtens nimmt mit der Entladungsspannung etwas zu.

7. Von der Abschirmung und vom Magnetfeld wird das Glasleuchten nicht meßbar verändert.

2.3.3 Diskussion

Nach den vorliegenden Messungen kommt als Ursache des Glasleuchtens wohl nur zweierlei in Frage:

Gestreutes Licht aus dem Entladungsraum und/oder Anregung des *Glasses* durch UV-Strahlung oberhalb von 1700 Å. (Aus der Literatur ist bekannt, daß technische Gläser durch UV-Strahlung zur Fluoreszenz angeregt werden, s. z. B. ⁵.)

Eine Anregung des *Gases* ist in diesem Bereich B vernachlässigbar.

2.4. Das Plasmaleuchten

Die restlichen Leuchterscheinungen (Bereich C in 2.1) können eindeutig dem laufenden Plasma zugeordnet werden.

Der jeweilige Beginn des Plasmaleuchtens ergibt die schon früher gemessenen $t = t(x)$ -Kurven der Leuchtfront ^{1, 2}, die hier nicht noch einmal gezeigt werden.

Die Oszillogramme zeigen deutlich mehrere aufeinanderfolgende Signale des Plasmaleuchtens. Das erste bezeichnen wir als Leuchtfront, die folgenden als Nachläufer. Das Auftreten der Nachläufer kann man sich aus der Verwirbelung des Plasmas, die mit KERR-Zellenaufnahmen nachgewiesen wurde ⁴, erklären. Die vorliegenden Messungen zeigen darüber hinaus, daß die Nachläufer im allgemeinen gut reproduzierbar sind, s. z. B. Abb. 14 a, b.

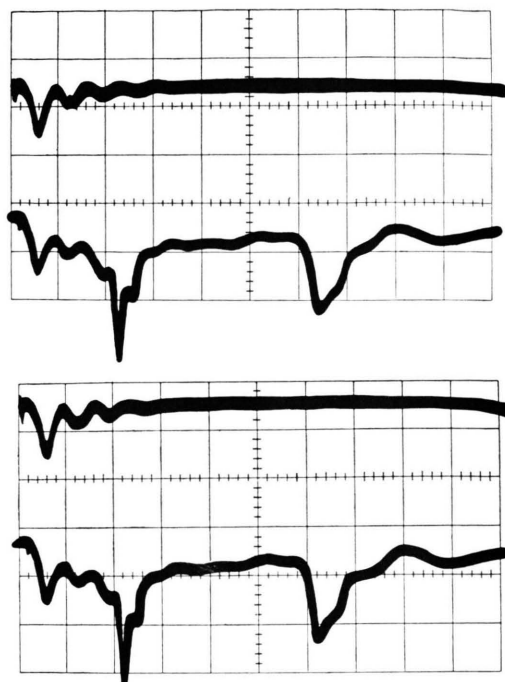


Abb. 14 a, b. Multiplieroszillogramme; kleines Rohr; Luft; Pyrexglasstab jeweils: oberer Strahl $x=33$ cm, unterer Strahl $x=13$ cm, $5 \mu\text{s/cm}$.

Die Reproduzierbarkeit der Nachläufer läßt vermuten, daß sie sich mit einer gewissen Gesetzmäßigkeit ausbilden. Man kann folgendes Bild entwerfen:

Von der Gesamtmasse des leuchtenden Plasmas löst sich nach einer gewissen Laufstrecke x ein Teil ab, der mit geringerer Geschwindigkeit weiterläuft. Von dieser sekundären Front löst sich dann wieder ein Teil ab und bildet eine tertiäre Front usw.

Von der primären Front löst sich in weiterer Entfernung wiederum ein Teil ab usw.; s. o.

Das Leuchten der einzelnen Fronten klingt mit der Zeit ab, und da sich die abgelösten Teile wesentlich langsamer bewegen, ist in einer gewissen Entfernung nur noch die primäre Leuchtfront zu beobachten, s. Abb. 15.

Für andere Drücke und Gase ergeben sich ähnliche Verhältnisse.

Die Stromschwingungen komplizieren das Bild.

Auch am großen Rohr treten Nachläufer mit guter Reproduzierbarkeit auf. Die Verhältnisse sind jedoch wesentlich komplizierter.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. SCHARDIN und Herrn Dr. H. REICHENBACH danken wir für die gewährte Unterstützung.

⁵ P. PRINGSHEIM, Fluorescence and Phosphorescence, Interscience Publish. Inc., New York u. London 1949, p. 505 ff.