

## Spektroskopische Diagnostik eines nichtthermischen He-Plasmas in der Hochstromfackel

H. Mauderer \* und G. Schmid \*\*

Institut für Physikalische Chemie der T. U. München

(Z. Naturforsch. **29 a**, 1690–1691 [1974];  
eingegangen am 16. August 1974)

### *Spectroscopic Diagnostics of a non-thermal He-Plasma Jet*

The properties of a low-pressure non-thermal He-plasma jet have been investigated. The gas temperature was obtained from the population densities of high excited He-levels. The electron density was determined both from the Stark-effect broadening of some He-lines and from the intensities of some forbidden transitions. The radial distribution of electron temperature was found by comparing the computed population densities of the He  $3^1P$  level with the experimental values.

### 1. Experimentelles

Da Helium wegen seiner großen thermischen Aggressivität besondere Anforderungen an Material und Kühlsystem eines Plasmajets stellt, wurde ein Brenner mit besonders hoher thermischer Belastbarkeit entwickelt und gebaut<sup>2</sup> (Abbildung 1). Die

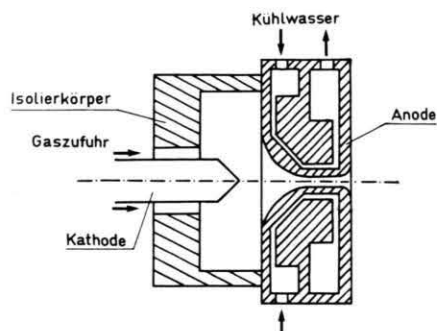


Abb. 1. Prinzipskizze des Plasmabrenners.

Kathode besteht aus thoriiertem Wolfram. Die aus Kupfer gefertigte Anode wird direkt gekühlt, wobei an den thermisch am meisten beanspruchten Stellen der Kühleffekt durch Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers vergrößert wird. Die feldfreie Fackel des He-Hochstrombogens (35 V, 110 A, 860 l He/h strömt in einen Vakuumkessel ( $p = 25$  Torr). Sie wird „side on“ durch ein Quarzfenster auf den Spalt eines 3,5-m-Gitterspektrographen abgebildet. Alle Intensitätsmessungen an He-Linien wurden photoelektrisch durchgeführt, wobei zur Eichung des Photomultipliers die Emission des positiven Kraters eines Kohlebogens verwendet wurde<sup>3</sup>.

\* Auszug aus der Diplomarbeit an der T. U. München.

\*\* jetzt: Fa. Osram GmbH, München.

### 2. Gastemperatur und Elektronendichte

Abbildung 2 zeigt die absoluten Besetzungsdichten verschiedener He-Terme im Zentrum der Plasmafackel als Funktion ihrer Anregungsenergie ( $N_m =$

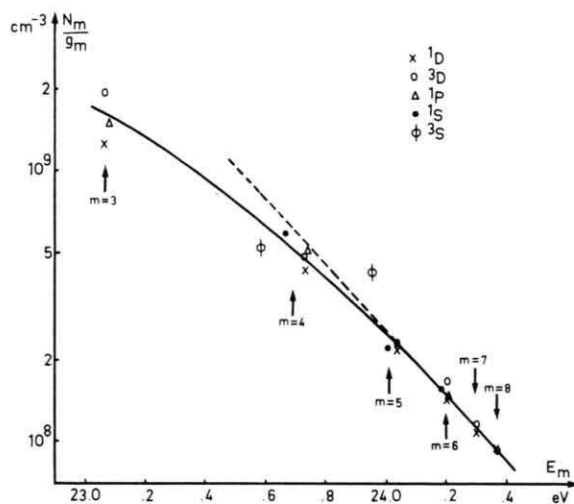


Abb. 2. Termbesetzungskurve der He-Plasmafackel.

absolute Teilchendichte des Niveaus  $m$  mit dem statistischen Gewicht  $g_m$  und der Energie  $E_m$ ). In halblogarithmischer Darstellung ergibt die Besetzungskurve aller Terme keine Gerade, das heißt, daß sich das Plasma nicht im thermischen Gleichgewicht befindet.

Drawin<sup>4</sup> untersuchte den Einfluß von Atom-Atom-Stößen auf die Besetzungszahlen von angeregten Atomniveaus. Sind Elektronen- und Gastemperatur verschieden, so geben in einem Plasma von geringem Ionisierungsgrad die Besetzungsverhältnisse der hohen Terme eher die Gastemperatur als die Elektronentemperatur wieder. Der Grenzwinkel  $\alpha$ , den die logarithmische Besetzungskurve für hohe Quantenzahlen mit der Abszisse bildet, ist dann ein Maß für die Gastemperatur.

Aus der Steigung (Winkel  $\alpha$ ) der Besetzungsggeraden der hohen Terme (ab  $m \geq 5$ ) in Abb. 2 ergibt sich hiernach eine Gastemperatur  $T_g = 4200$  K für den Kern der Plasmafackel.

Wegen der geringen Temperaturabhängigkeit der Starkverbreiterung von Linien bleibt die Bestimmung der Halbwertsbreite oder des ganzen Intensitätsprofils einer Stark-verbreiterten Linie auch im NLTE-Plasma ein wichtiges Hilfsmittel zur Elektronendichtebestimmung. Ferner ermöglicht das Auftreten von verbotenen Komponenten einiger He-Linien Rückschlüsse auf die Elektronendichte  $n_e$ . Es handelt sich um die Übergänge  $4^1F - 2^1P$  (HeI 4921) und  $4^3F - 2^3P$  (HeI 4470). Für diese bei-



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitalized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition “no derivative works”). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

den Linien berechneten Barnard und Mitarbeiter<sup>5</sup> die Intensitätsverteilungen in Abhängigkeit von  $n_e$ . Aus den gemessenen Halbwertsbreiten (der Linien HeI 3355, 3448, 4388 –<sup>6</sup>) und Intensitätsprofilen (HeI 4470, 4921) ergab sich eine gute Übereinstimmung der nach den beiden Methoden ermittelten Werte der Elektronendichte. Im Bereich  $r \leq 0,5$  cm des rotationssymmetrischen Plasmastrahles beträgt die Elektronendichte  $n_e = 5 \cdot 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>.

### 3. Elektronentemperatur $T_e$

Im Falle des untersuchten Plasmas handelt es sich um ein stationäres NLTG-Plasma, das sich durch ein lineares inhomogenes Gleichungssystem für die Besetzungsdichten  $N_m$  der Niveaus  $m$  beschreiben läßt:

$$dN_m/dt = 0, \quad m = 1, 2, 3, \dots, p$$

( $p$  höchstes gebundenes Niveau).

Dabei ist beachtet, daß der Grundzustand des Heliums vom System der angeregten Zustände entkoppelt ist und allein von Druck und Temperatur be-

stimmt wird ( $n_0 \gg N_m$ )<sup>1</sup>. Zur Berechnung der Besetzungsdichten wurde ein für das Plasma einer He-Hohlkathodenentladung aufgestelltes Bilanzgleichungssystem verwendet<sup>1</sup>, das den Einfluß der Atom-Atom-Stöße auf Anregung und Ionisation und deren inverse Prozesse nicht berücksichtigt. Da die ersten angeregten Niveaus des He aus energetischen Gründen nur durch Elektronenstoß besetzt werden, ist seine Verwendung für die Berechnung der Besetzungsdichten der unteren He-Niveaus zulässig. Die in das Bilanzgleichungssystem  $dN_m/dt = 0$  eingehenden Reaktionskoeffizienten

$$\overline{v_e \sigma(v_e)} = \int \sigma(v_e) v_e f(v_e) dv_e$$

sind nur noch Funktionen der Elektronentemperatur  $T_e$  und der Elektronenverteilungsfunktion  $f(v_e)$ . Nach Rother<sup>7</sup> ist  $f(v_e)$  im vorliegenden Plasma (Ionisationsgrad  $10^{-2}$ ) eine Maxwell-Verteilung.

Abbildung 3 zeigt den berechneten Verlauf der Besetzungsdichte des 3<sup>1</sup>P-Niveaus als Funktion der Elektronentemperatur.

Experimentell wurden durch Abelung die radialen Volumenstrahldichten  $\varepsilon(r)$  der Linie HeI 5016 und aus ihnen die radialen Besetzungszahlen  $N(r)$  des 3<sup>1</sup>P-Niveaus ermittelt.

Der Vergleich der in Abhängigkeit von  $T_e$  berechneten Besetzungszahlen dieses Niveaus mit den gemessenen ergibt den radialen Verlauf von  $T_e$  (Abbildung 4).

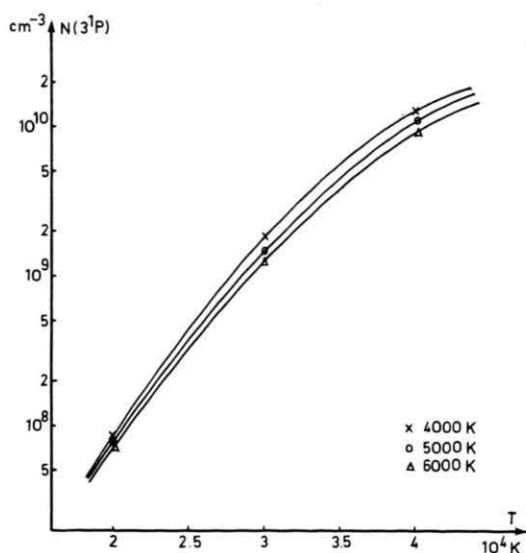


Abb. 3. Berechnete Besetzungsdichte des 3<sup>1</sup>P-Niveaus ( $n_e = 5 \cdot 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>,  $p = 25$  Torr).

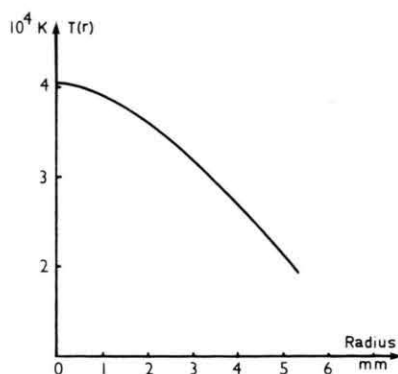


Abb. 4. Radialer Verlauf der Elektronentemperatur in der He-Plasmafackel ( $T_g = 5000$  K,  $n_e = 5 \cdot 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>,  $p = 25$  Torr).

**Anerkennungen.** Wir danken unserem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. H. Krempel, für die Anregung zu dieser Arbeit sowie für zahlreiche Diskussionen. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danken wir für die Bereitstellung der Mittel.

<sup>1</sup> G. Schmid, Z. Naturforsch. **26 a**, 1901 [1971].

<sup>2</sup> J. Schneider, Diplomarbeit am Inst. f. Phys. Chemie, TU München 1971.

<sup>3</sup> M. R. Null u. W. W. Lozier, J. Opt. Soc. Amer. **52**, 1156 [1962].

<sup>4</sup> H. W. Drawin, Z. Naturforsch. **25 a**, 145 [1970].

<sup>5</sup> Barnard et al., Astron. Ap. **1**, 28 [1969].

<sup>6</sup> H. R. Griem et al. (6BKO), Phys. Rev. **125**, 177 [1962].

<sup>7</sup> H. Rother, Z. Phys. **173**, 441 [1963].