



Doctoral Thesis

## Untersuchung des hochionisierten Argon-Lichtbogenplasmas mit rotierenden Langmuirsonden bei Atmosphärendruck

**Author(s):**

Terens, Lucien

**Publication Date:**

1966

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000346633> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. Nr. 3670

**Untersuchung des hochionisierten  
Argon-Lichtbogenplasmas mit rotierenden  
Langmuirsonden bei Atmosphärendruck**

ABHANDLUNG

zur Erlangung  
der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften  
der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN  
HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

LUCIEN TERENS

dipl. El.-Ing. ETH

geboren am 8. April 1932

luxemburgischer Staatsangehöriger

Angenommen auf Antrag von  
Prof. Ed. Gerecke, Referent  
P.-D. Dr. W. Rieder, Korreferent

Juris Druck + Verlag Zürich  
1966

The probe method applied to temperature determination in stationary, strongly ionised, high current, high pressure plasmas. Investigation of the argon arc plasma under atmospherical pressure.

---

Temperature as well as the temperature distribution in high current, high pressure plasma are mostly obtained from spectral intensity measurements. These methods have the great advantage of not interfering with the plasma. But they are indirect methods, and when applied to temperature determination of high pressure arc plasmas, the results obtained often exhibit considerable discrepancy.

The Langmuir probe method has proved itself a very useful tool in plasma-diagnostics of low pressure plasmas. It not only supplies the temperature, but also the electron density and the potential distribution. We found it worthwhile to try the method for its applicability to high pressure plasma analyses.

We applied the method to analyse a 100 A, 10 mm long arc plasma, burning between a plane copper anode and a tapered tungsten rod cathode in argon at atmospheric pressure. The developed technique makes use of instrumentation from which one obtains a direct record of the probe characteristics at 7 preselected radial positions in the arc plasma. A cylindrical platinum probe, isolated with quartz tubes up to a collector volume of  $0,016 \text{ mm}^3$  is swung through the arc in a plane perpendicular to the arcs axis, and the probe characteristics are measured dynamically within  $10 \mu\text{s}$ . With this method the isothermal field could be resolved, and the maximum temperature in the arcs axis 2 mm in front of the cathode tip is found to be  $23'000 \text{ }^\circ\text{K}$ . The potential distribution in the arc is also measured, and the electric field strength and current density are derived from temperature and potential measurements. The carrier density of the plasma as a function of temperature is evaluated using the ion-saturation part of the probe characteristics.

## ZIELSETZUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit verfolgt zwei Ziele: Es soll erstens abgeklärt werden, ob die Langmuirsche Sondenmethodik für den Fall eines stationären Hochstrom-Hochdruckplasmas anwendbar ist, und zweitens soll eine zweckentsprechende Messmethode entwickelt werden, mit welcher ein Argonlichtbogenplasma unter Atmosphärendruck untersucht werden kann.

Hochstrom-Hochdruckplasmen sind in vielen Gebieten der Plasmaforschung anzutreffen, und sie finden überraschend schnell Anwendung in der Praxis (Lichtbogenschweissung, Plasmabrenner und Plasmaöfen, Plasmaantriebstechnik, magneto-hydrodynamische Generatoren . . . ). In all diesen Forschungssektoren sollten die sehr hohen Plasmatemperaturen sowie die Temperaturverteilungen im Plasma ermittelt werden. Ferner sind die Potentialverteilungen sowie die Dichteverteilungen im Plasma von grossem Interesse. Zur Temperaturbestimmung werden heute vorwiegend spektralanalytische Messmethoden eingesetzt. Dieses sind indirekte Methoden. Das, von z.B. einem Bogenplasma ausgestrahlte Licht wird dem Spektrographen über einen Spalt zugeführt, und die radiale Intensitätsverteilung vorgewählter Spektrallinien wird von der Bogenachse zum Bogenrand gemessen. In einem beliebigen Abstand von der Bogenachse tragen also von einem inhomogenen Bogenplasma Zonen unterschiedlicher Temperatur zur Intensität der Spektrallinie bei. Bei rotationssymmetrischer Anordnung muss die gemessene Intensitätsverteilung dann über die Abelsche Integralgleichung auf die wirkliche radiale Verteilung umgerechnet werden, und aus dieser folgt dann - unter der Voraussetzung, dass wichtige Plasmaeigenschaften wie das Plasmakomponentendiagramm, die Uebergangswahrscheinlichkeiten . . . bereits in ihrer Temperaturabhängigkeit bekannt sind - der Temperaturverlauf. Damit die spektralanalytischen Methoden zu richtigen Resultaten führen, muss weiter das Plasma optisch dünn sein.

Bei der Untersuchung von Niederdruckplasmen ( $p < 1$  Torr) hat sich die Langmuirsche Sondenmethode als äusserst wertvolles Hilfsmittel erwiesen. Die Strom-Spannungscharakteristik (Sondencharakteristik) einer ins Plasma getauchten

Sonde liefert, unter den Voraussetzungen, dass die thermischen Elektronengeschwindigkeiten im Plasma nach Maxwell-Boltzmann verteilt sind, und der Sondenkollektor klein gegenüber den Plasmadimensionen ist, direkt die Lokalwerte der Elektronentemperatur, der Elektronendichte und des Plasmapotentials.

Die Direktheit der Sondenmethode, sowie die Aussicht, dass sie eventuell mehr Größen als nur die Temperatur liefern könnte, fordern zum Versuch auf, sie auch bei der Untersuchung von Hochdruckplasmen einzusetzen. Diesem Versuch standen entmutigende Behauptungen entgegen. So z.B. in [1] unter:

Temperaturbestimmung im Hochdruck- (Bogen-) Plasma.

"Wegen des Versagens der Sondenmessmethoden zur Bestimmung der Elektronentemperatur und Konzentration, und wegen der Unmöglichkeit thermoelektrischer Messungen werden spektroskopische Methoden und Gasdichtemessungen herangezogen".

Anhand der in der vorliegenden Arbeit angeführten Ueberlegungen, und hauptsächlich aus den Resultaten des direkten Versuchs konnte eindeutig festgestellt werden, dass Sondenmessungen auch im Hochdruckplasma ausführbar sind und zu richtigen Resultaten führen, falls der Messapparatur die nötige Sorgfalt zuteil kommt.

Unter der Annahme, dass in einem stark ionisierten Hochdruckplasma im "Sondengebiet"-Gebiet, in welchem die Sonde noch einen Einfluss auf die Ladungsträger ausübt - Quasineutralität bis auf die letzte, der Sonde vorgelagerte freie Ladungsträgerweglänge herrscht, können die Sondenströme einer Zylindersonde bei Aufteilung der Sondencharakteristik in die Gebiete: stark negative, stark positive und schwach negative Sonde gegenüber dem Plasmapotential, abgeleitet werden.

In Anbetracht der Auswertung von Sondencharakteristiken im Falle des Hochdruckplasmas können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden.

- Unter Berücksichtigung der "Trägerverarmung" im Sondengebiet, kann die Ionenkonzentration im ungestörten Plasma über den ionenbestimmten Teil der Sondencharakteristik abgeschätzt werden.
- Auch im stark ionisierten Hochdruckplasma kann die Elektronentemperatur, immer unter der Voraussetzung, dass die thermischen Geschwindigkeiten der Elektronen im Plasma nach Maxwell-Boltzmann verteilt sind, bei noch genügend negativer Sonde gegenüber dem Plasmapotential aus dem Anstieg des Elektronenanlaufstromes in halblogarithmischer Darstellung bestimmt werden. Liegt weiter thermisches Gleichgewicht unter den Plasmakomponenten vor, so ist die gemessene Elektronentemperatur gleich der einheitlichen Plasmatemperatur.
- In stark ionisierten Hochdruckplasmen sind, wegen der hohen Trägerkonzentrationen, im allgemeinen Messungen der Sondencharakteristiken bis ins Elektronensättigungsgebiet nicht durchführbar. Bereits bei positiven Sondenströmen, welche noch um Größenordnungen kleiner sind als die theoretisch zu erwartenden Elektronensättigungsströme, stellt sich zwischen Sonde und Referenzelektrode (bei unseren Versuchen die Kathode) eine selbständige Bogenentladung ein. Aus diesem Grunde ist es nicht möglich das Plasmapotential aus dem Elektronensättigungsknick der Sondencharakteristik zu bestimmen. Zur Erfassung der Potentialverteilung arbeitet man deshalb mit stromloser Sonde, indem man annimmt [4.1.], dass das wirkliche Plasmapotential um etwa 2 V höher liege als das mit stromloser Sonde gemessene Potential.

Als Messobjekt zur Durchführung der Versuche wurde ein Argon-Gleichstromlichtbogen unter Atmosphärendruck gewählt, welcher im Hochstromgebiet, wo die statische Bogencharakteristik bereits steigend ist, mit 100 A bei einer Bogenlänge von 10 mm betrieben wird. Die Wahl dieses Bogentypus ist insofern günstig, da im Hochstromgebiet betriebene Argonbögen bereits von verschiedenen Forschern unter Verwendung spektroskopischer Messmethoden untersucht wurden. In verschiedenen

Arbeiten [2], [3], [4] wurden Achsentemperaturen im Bereich von 16000 . . . 25000 °K gefunden. In [5] weisen die Autoren darauf hin, dass sie je nach gewählter Spektrallinie im gleichen Achsenpunkt eines Argonbrennerplasmas 20'000 oder 30'000 °K messen! Die Unstimmigkeiten dieser Resultate zeigen deutlich, dass es nötig ist, eine, von den spektroskopischen Methoden unabhängige Messmethode zu entwickeln, mit welcher es möglich wird, diese hohen Plasmatemperaturen zu messen.

Mit zylindrischen Platinsonden (Durchmesser  $d = 0,2$  mm), welche bis auf eine Kollektorlänge von 0,5 mm mit Quarzrohren isoliert sind, und die mit solcher Geschwindigkeit durch das Bogenplasma geführt werden, dass sie trotz der hohen Plasmatemperaturen nicht mehr zum schmelzen kommen, lassen sich lokale Temperaturwerte im Plasma messen, und es gelingt auch die Temperaturverteilung im Plasma zu bestimmen. Die Messung erfolgt dabei dynamisch, indem pro Durchlauf der Sonde in 7 vorgewählten Positionen die Sondencharakteristiken innerhalb je 10  $\mu$ s aufgenommen werden.

Die Messungen zeigen, dass das Exponentialgesetz für den Elektronenlaufstrom zur Sonde im Auswertungsbereich noch bis zu 2,5 Dekaden erfüllt ist. Hierdurch ist direkt der Beweis einer Maxwell-Boltzmannschen Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen im untersuchten Plasma erbracht. Das Isothermenfeld folgt über die Ausmessung der Sondencharakteristiken in  $9 \times 7 = 63$  diskreten Bogenpunkten. In der Bogenachse wurde ein der Kathode um etwa 2 mm vorgelagertes Temperaturmaximum von 23'000 °K gefunden. Bei den Messungen [2], [3], [4] wurde ein solches nicht gefunden, da die Achsentemperatur dort meistens interpoliert wurde. Hingegen findet Olsen [6] bei neueren Messungen an einem 400 A Argonbogen unter 1,1 Atm. ein ähnliches Maximum von  $\approx 23'000$  °K.

Im Abschnitt 4 der vorliegenden Arbeit sind alle Resultate der Temperatur-, Aequipotential-, und Ionensättigungsstrommessungen zusammengestellt. Anhand der bestehenden Lichtbogentheorien wird das untersuchte Argonplasma unter Berücksichtigung dieser Resultate eingehend diskutiert.