

# Plasmadiagnostik-Laborprotokoll\*

Katharina Breitenecker  
e9726120@student.tuwien.ac.at

Herbert V. Riedel  
e9725348@student.tuwien.ac.at

14. April 1999<sup>†</sup>

---

\*Diese Protokoll wurde mittels  $\LaTeX$  unter GNU/Linux verfaßt  
<sup>†</sup>Zeitpunkt der experimentellen Durchführung

### Zusammenfassung

Dies stellt das Laborprotokoll von den, in der Laborübung am Mittwoch, den 14. April 1999, im Rahmen der LVA durchgeführten *Experimente* dar.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
1.1	Einleitung . . . . .	3
1.2	Kenngößen . . . . .	4
1.3	Erzeugung von Plasmen . . . . .	5
1.4	Die Doppelsondenmethode nach Johnson und Malter . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Auswertung der Meßergebnisse</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Meßwerte</b>	<b>9</b>
3.1	Plasma bei einer Stromstärke von 25 mA . . . . .	9
3.2	Plasma bei einer Stromstärke von 10 mA . . . . .	9
3.3	Plasma bei einer Stromstärke von 40 mA . . . . .	9

# 1 Theorie

## 1.1 Einleitung

*Plasma* ist der 4. Aggregatzustand<sup>1</sup>, unter *Plasma* versteht man ein gasförmiges Gemisch von freien Elektronen, Ionen und elektrisch neutralen Teilchen — Atomen, Molekülen und freien Radikalen. Alle Bestandteile des Gemisches besitzen eine große kinetische Energie, sind miteinander jedoch nicht unbedingt in thermischem Gleichgewicht. Die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen den einzelnen trägt wesentlich zum Verhalten des Systems bei.

Der Begriff *Plasma* kommt aus dem griechischen und bedeutet soviel wie, ein Stoff, der alles durchdringt. In etwa 95 % der Materie im Universum liegt in Plasmaform vor, in der Natur kann man aber Plasmaerscheinungen nur in der Form von Feuer, Blitzen oder Elmsfeuer beobachten. Schon oberhalb 100 km über der Erdoberfläche beginnt die interstellare Materie, die hauptsächlich aus Plasma besteht, kalte Materie, wie wir sie an der Erdoberfläche gewohnt sind, gibt es nur selten.

Plasmen werden in vielen Bereichen der Forschung und Technik verwendet:

**Kernfusionsforschung:** möglichst heiße Plasmen müssen erzeugt werden, damit die Kernfusionsreaktion so häufig ablaufen kann, daß eine ausreichende Energiebilanz auftritt.

**Magnethydrodynamische Generatoren:** Plasmen werden durch Verbrennungsvorgänge angeheizt und durchströmen ein Magnetfeld, so findet direkte Energieumwandlung von der kinetischen Energie der Plasmateilchen in elektrische Energie statt. Der Wirkungsgrad ist dabei höher als bei klassischen thermodynamischen Anlagen.

**Thermionische Konversion:** in einer Plasmadiode wird eine Kathode durch Verbrennung angeheizt, die dadurch emittierten Elektronen ermöglichen Stromtransport über Diodenstrecke, womit ebenfalls direkte Energieumwandlung ermöglicht wird.

All diese Verfahren sind noch in der Grundlagenforschung, insbesondere, was die Lösung der damit verbundenen technischen Probleme betrifft.

Durch Anlegen einer geeigneten, gepolten Spannung zwischen einem Plasma und einer Extraktionsblende können entweder Elektronen oder Ionen aus dem Plasma gezogen werden, wobei die dabei erzielbaren Stromdichten den Sättigungsstromdichten entsprechen.

---

<sup>1</sup>Zusammengefaßt sind folgende Aggregatzustände definiert:

1. Gas
2. flüssig
3. fest
4. Plasma
5. Elektronen-Fermi-Gas
6. Relativistisches Fermi-Gas
7. Neutronengas
8. Photonengas
9. Relativistisches Neutronengas — Schwarzes Loch.

**Elektronenstrahlen:** Anwendung zum Erhitzen, Schweißen und bearbeiten hochschmelzender Metalle im Vakuum

**Ionenstrahlen:** Anwendungen für Ionenquellen bei Teilchenbeschleunigern und elektromagnetischen Isotopen-Separatoren, sowie Ionenstrahltriebwerke in der Raumfahrt

**Plasmastrahlen:** Plasmaschweißen, Plasmaschneiden, Plasmaspritzen, Oberflächenbehandlung

Durch Verwendung von Plasmen ermöglichen neue technische Verfahren die Verwendung besonders harter und hochschmelzender Materialien. Auf diese Weise können neuartige Konstruktionen für neue technische Lösungen verwendet werden.

Die *Plasmadiagnostik* dient zur Untersuchung der Eigenschaften von Plasmen, insbesondere der Teilchendichte und der Temperatur.

Eine Grundeigenschaft des Plasmas ist die *Quasineutralität*: Plasmen sind in makroskopischen Bereichen im räumlichen und zeitlichen Mittel elektrisch neutral:

$$n_e = \sum_{i=1}^Z i n_i \quad (1.1)$$

## 1.2 Kenngrößen

**Ionisationsgrad** Der Ionisationsgrad  $x_r$  gibt den Anteil der Ionen mit der Kernladung  $Z$  in einem Plasma aus Atomen und positiv geladenen Ionen, die mindestens  $r$ -fach ionisiert sind an (wobei  $n_i$  die Konzentration bzw. Dichte  $i$ -fach geladener Ionen angibt)

$$x_r = \frac{\sum_{i=r}^Z n_i}{\sum_{i=0}^Z n_i} \leq 1 \quad (1.2)$$

Wenn  $x_1 \ll 1$  dann liegt ein *Schwach ionisiertes Plasma* vor, bei  $x_1 \approx 1$  spricht man von einem *Stark* oder *voll ionisiertem Plasma*.

**Geschwindigkeitsverteilung** Für Plasmen im *Vollständigen thermodynamischen Gleichgewicht*<sup>2</sup> kann eine Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung angegeben werden:

$$f(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} v^2 \left( \frac{m}{2k_B T} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}} \quad (1.3)$$

**Debye-Länge** Die Debye-Länge  $\lambda_D$  ist eine charakteristische Länge, die die Abschirmung eines Potentials beschreibt.

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{2e_0^2 n_e}} \quad (1.4)$$

---

<sup>2</sup>Der Energieinhalt eines Plasmas kann auf verschiedene Weisen verteilt sein. Neben den üblichen Anregungen eines Gases (Rotations- und Schwingungsanregung) treten auch in größerem Maße elektronische Anregungen auf. Im Vollständigen thermodynamischen Gleichgewicht werden alle Verteilungsfunktionen durch eine einzige Zustandsgröße, die Temperatur  $T$ , bestimmt.

Längs einer Debye-Länge fällt das Potential  $U$  auf das  $1/e$ -fache ab:

$$U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e_0}{r} e^{-\frac{r}{\lambda_D}} \quad (1.5)$$

### 1.3 Erzeugung von Plasmen

Zur Erzeugung von Plasmen muß von außen genügend Energie bereitgestellt werden, um den Atomen und Molekülen die minimale Energie zuzuführen, die zur Ionisation notwendig ist. Dazu stehen zwei Mechanismen zur Verfügung:

- Erhöhung des Energieinhaltes durch Wärmezufuhr. Die zugeführte Energie verteilt sich auf die verfügbaren Freiheitsgrade; die Ionisation geschieht durch Stoß- und Photoionisation. Die entstehenden Plasmen befinden sich meist in der Nähe des thermischen Gleichgewichtes.
- Energieerhöhung durch gezielte Energiezufuhr (Strahlung oder elektrischer Strom) ohne wesentliche Temperaturerhöhung. Die Ionisation erfolgt direkt durch Wechselwirkung zwischen Atomen und Molekülen und der von außen zugeführten Energie. Die entstehenden Plasmen sind weit entfernt vom thermischen Gleichgewicht (es gilt  $T_e \gg T_i$ ).

Als Beispiel für letztere Variante (und als Grundlage für die Labor-Messungen) gibt es die Möglichkeit Plasmen durch *Gasentladungen* zu erzeugen.

### 1.4 Die Doppelsondenmethode nach Johnson und Malter

In Gasentladungplasmen haben die Elektronen im allgemeinen eine Maxwell-Verteilung, womit eine Elektronentemperatur  $T$  definiert werden kann. Eine übliche Methode zur Bestimmung der Elektronentemperatur ist die Sondenmeßmethode, wobei entweder eine (*Einzelsondenmessung*) oder zwei Sonden (*Doppelsondenmessung*) in Kontakt mit dem Plasma stehen. Die Sonden bestehen aus sehr kleinen Elektroden, die im Plasma sind und durch eine regelbare Spannungsquelle relativ zum Plasma auf positives oder negatives Potential gelegt werden können. Solange die Sonde klein gegenüber dem Plasma ist, wird ihre Anwesenheit im Plasma vernachlässigbar gering beeinträchtigt.

Die Sonde wird in Plasma getaucht und mit der Kathode oder der Anode verbunden. Durch diese Sonde fließt nun Strom, der je nach Potentialdifferenz positiv oder negativ sein kann. Die Kurve der Kennlinie zerfällt in 3 Bereich:

- Ionensättigungsgebiet
- Übergangsgebiet Elektronensättigungsgebiet
- Elektronensättigungsgebiet

Es kommen sowohl Ionen als auch Elektronen zur Sonde. Da aber die Elektronen viel leichter sind, können sie sich auch viel schneller bewegen als die Ionen, weshalb pro Zeiteinheit mehr Elektronen als Ionen auf die Sonde aufreffen, was einen positiven Strom ergibt. Wird nun relativ zum Plasma an der Sonde positive Spannung angelegt, werden die Ionen abgestoßen und die Elektronen angezogen, wenn dann die Sonde nur mehr Elektronen um sich scharrt, fließt Elektronensättigungsstrom.

Wie vorher schon des öfteren erwähnt, herrscht im Plasma Quasineutralität, deswegen kann es keinen abrupten Übergang zwischen der positiven Sonde und den neutralen Plasma geben. Deswegen bildet sich eine Art Schicht aus negativen Ladungsträgern nahe der Oberfläche der Sonde, um die Quasineutralität zu sichern, diese Schicht entspricht der Dicke der Debyelänge. Die Sonde sammelt nur jene Elektronen, welche durch thermische Bewegung durch die Schicht diffundieren. Bei einer ideal ebenen Sonde müßte mit steigender Spannung die Schicht immer dicker werden, ohne daß sich der Strom verändern würde, allerdings steigt in der Praxis der Strom auch bei ebener Sonde.

**Das Übergangsgebiet** Wird an der Sonde relativ zum Plasma negative Spannung angelegt, so werden die Elektronen zurückgedrängt, die Ionen aber beschleunigt, weswegen der Elektronenstrom mit zunehmender Spannung fällt. Wenn schließlich genauso viele Elektronen wie Ionen angezogen werden, hat man das *Schwimmpotential* erreicht, was bedeutet, daß eine Elektrode, die auf dem Plasma schwimmt, dieses Potential annehmen würde.

**Das Ionensättigungsgebiet** Wird das Sondenpotential stärker negativ gestellt, werden schließlich die Elektronen vollständig abgestoßen und nur noch Ionen gesammelt. Analog zum Elektronensättigungsgebiet bildet sich aus Gründen der Quasineutralität eine positive Schicht um die Sonde herum.

**Verhalten einer Doppelsonde** Manchmal muß man direkt auf dem Plasma schwimmend gewisse Kenndaten messen (Hochfrequenzladung oder Ionensphärische Messung), weil keine Bezugselektroden zur Verfügung stehen. Die Einzelsondenmessung ist dabei nicht möglich, weil keine Verbindung zur Elektrode hergestellt werden kann. Hierbei hilft die Doppelsondenmessung. Sie wurde ursprünglich entwickelt, um auch absterbendes Plasma (*afterglow plasma*) messen zu können, bei dem sich das Plasmapotential mit der Zeit verändert, und es daher recht schwierig ist, eine konstante Potentialdifferenz zwischen Plasma und Sonde zu erhalten. Deswegen verwendet man zwei miteinander verbundene, aber von der Umgebung isolierte Elektroden, die auf dem Plasma schwimmen und alle Fluktuationen mit dem Plasma mitmachen.

Zwei Sonden werden ins Plasma gebracht und über ein Strommeßgerät miteinander verbunden. Weil sie gemeinsam auf dem Plasma schwimmen, ist ihr Gesamtstrom gleich Null. Wenn auch die Spannung zwischen beiden Sonden Null ist, befinden sich beide auf dem Schwimmpotential. Im Normalfällen ist es daher einfacher, die Kennlinie einer Doppelsonde, als die einer Einzelsonde zu ermitteln. Jede der beiden Sonden  $S_1$  und  $S_2$  hat eigene Spannung  $U_1$  und  $U_2$  gegen das Plasma. Wenn die Spannungsdifferenz  $U$  zwischen  $U_1$  und  $U_2$  größer als Null ist, dann fließt positiver Strom. Am Nullpunkt ist  $U = 0$  und  $I = 0$ , beide Sonden befinden sich auf dem Schwimmpotential  $U_S$ , welches gegenüber dem Plasma negativ ist. Wird nun positives  $U$  angelegt, so nähert sich  $U_1$  dem Plasmapotential und  $U_2$  wird negativ gegenüber  $U_S$ , daher gehen mehr Elektronen zu  $S_1$  als zu  $S_2$ . Wenn das positive  $U$  sehr groß wird, gerät  $S_2$  weit in den Ionensättigungsbereich und deswegen wiederum wird durch die Sonde nur mehr Ionensättigungsstrom fließen, während sich  $S_1$  soweit zum Plasmapotential begibt, daß entsprechend viele Elektronen gesammelt werden. Analog verhält

sich die Sache, wenn  $U$  negativ gemacht wird, die Kennlinie ist im Normalfall symmetrisch.

## 2 Auswertung der Meßergebnisse

Die Plasmatemperatur  $T$  und die Teilchendichte  $n_p$  sollen bei 3 verschiedenen Stromstärken unter verschiedenen Abständen der Sonden zum Plasmamittelpunkt bestimmt werden. Es waren Sondenkennlinien für Entladungen dreier verschiedener Stromstärke aufzunehmen ( $I_E = \{10, 25, 40\}$  mA). Bei 25 mA waren Messungen für 7 verschiedene Sondenpositionen, dem Abstand  $d$  der Sonde zum Plasmamittelpunkt bei 1 mm, 2,5 mm, 5 mm, 7,5 mm, 10 mm, 12,5 mm und 15 mm durchzuführen. Außerdem war verlangt, auch bei den anderen beiden Stromstärken zu bestimmten Positionen die Messungen durchzuführen. Da wir aber ausreichend Zeit zur Verfügung hatten, machten wir beide *auch* hier ein volles Programm durch. . .

Zur Berechnung der Elektronentemperatur und der Plasmadichte bei Verwendung einer Doppelsonde (wie es in unserem Fall war) wurden die Formeln aus [1] entnommen, deren Herleitung bitte von dort zu entnehmen ist. Um  $I(U)$  zu bestimmen, müssen  $i_{1+}$ ,  $i_{1-}$ ,  $i_{2+}$  und  $i_{2-}$  als Ionen- bzw. Elektronenströme auf den Sonden  $S_1$  und  $S_2$  definiert werden.

Da das System auf Plasma schwimmt, muß der Gesamteinstrom an beiden Sonden gleich Null sein. Die Form der Kurve selber ist durch den Elektronensättigungsstrom  $I_e$ . Nach relativ aufwendigem Umformen und herumrechnen erhält man für die Elektronentemperatur

$$T'[\text{eV}] = T[\text{K}] \frac{k_B}{e_0} = \frac{i_{1+} + i_{2+}}{i_{1+} + i_{2+}} \frac{dI_s}{dU_s} \Big|_{U_s=0} \quad (2.1)$$

und im weiteren erhält man die Teilchendichte durch

$$n_p = \frac{(i_{1+} + i_{2+}) \sqrt{m_i}}{A e_0^{3/2} \sqrt{T'[\text{eV}]}} \quad (2.2)$$

wobei  $\frac{\sqrt{m_i}}{e_0^{3/2}} \approx 4 \cdot 10^{15} \frac{\text{kg}^{1/2}}{\text{C}^{3/2}}$  gilt, und für die Sondenfläche  $A$  der Wert  $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  einzusetzen ist.

$d$ [mm]	$I_1$ [ $\mu$ A]	$I_2$ [ $\mu$ A]	$\frac{dI}{dU} _{U=0}$	$T$ [eV]	$n_p$
1	5,25	7,25	$0,7692 \cdot 10^{-6}$	3,9	$6,125 \cdot 10^{21}$
2,5	5	8,75	$0,7692 \cdot 10^{-6}$	4,1	$1,04471 \cdot 10^{21}$
5	5	8,25	$0,7692 \cdot 10^{-6}$	4,0	$1,01923 \cdot 10^{21}$
7,5	4,5	6,5	$0,9090 \cdot 10^{-6}$	2,9	$7,65054 \cdot 10^{15}$
10	3,5	6	$0,8333 \cdot 10^{-6}$	2,6	$1,57671 \cdot 10^{21}$
12,5	2,75	4,25	$1,1111 \cdot 10^{-6}$	1,5	$8,7766 \cdot 10^{21}$
15	2	2,25	$2 \cdot 10^{-6}$	5,5	$2,788 \cdot 10^{21}$

Tabelle 1: Meßreihe bei 25 mA

$d$ [mm]	$I_1$ [ $\mu$ A]	$I_2$ [ $\mu$ A]	$\frac{dI}{dU} _{U=0}$	$T$ [eV]	$n_p$
1	4,41	4,9	$0,9090 \cdot 10^{-6}$	3,9	$4,5619 \cdot 10^{21}$
2,5	3,92	7,35	$0,9090 \cdot 10^{-6}$	4,1	$8,56286 \cdot 10^{21}$
5	4,41	7,1	$1,1111 \cdot 10^{-6}$	4,0	$8,85385 \cdot 10^{21}$
7,5	3,675	5,88	$1,1111 \cdot 10^{-6}$	2,9	$8,63213 \cdot 10^{21}$
15	2,45	1,225	$2,5 \cdot 10^{-6}$	5,5	$2,40752 \cdot 10^{20}$

Tabelle 2: Meßreihe bei 10 mA

### 3 Meßwerte

Die aufgenommenen und ausgewerteten Kurvendiagramme sind am Ende dieses Protokolls angefügt.

#### 3.1 Plasma bei einer Stromstärke von 25 mA

Die Messung erfolgte bei einer Stromstärke von 25 mA, die Kurve bewegt sich bei fast ausschließlich jeder Messung im Bereich zwischen +29,9 V (rechts oben) bis -29,9 V (links unten). Die Meßwerte sind in der Tabelle 1 zusammengefaßt.

#### 3.2 Plasma bei einer Stromstärke von 10 mA

Die Messung erfolgte bei einer Stromstärke von 10 mA, die Kurve bewegt sich bei fast ausschließlich jeder Messung im Bereich zwischen +29,9 V (rechts oben) bis -29,9 V (links unten). Wie aus der Kurve ersichtlich, waren bei den Sondenabständen von 10 mm und 12,5 mm die Plasmenstrukturen nur sehr ungenau, und nicht mehr stabil, weswegen diese beiden Ergebnisse in der Tabelle 2 nicht angeführt wurden.

#### 3.3 Plasma bei einer Stromstärke von 40 mA

Die Messung erfolgte bei einer Stromstärke von 40 mA, die Kurve bewegt sich bei fast ausschließlich jeder Messung im Bereich zwischen +29,9 V (rechts oben) bis -29,9 V (links unten). Die Meßwerte sind in der Tabelle 3 zusammengefaßt.

$d$ [mm]	$I_1$ [ $\mu\text{A}$ ]	$I_2$ [ $\mu\text{A}$ ]	$\left. \frac{dI}{dU} \right _{U=0}$	$T$ [eV]	$n_p$
1	5,635	9,8	$0,6666 \cdot 10^{-6}$	5,37	$1,27517 \cdot 10^{23}$
2,5	5,635	11,02	$0,5882 \cdot 10^{-6}$	6,3	$1,02085 \cdot 10^{22}$
5	5,88	11,025	$0,6666 \cdot 10^{-6}$	5,7	$1,08934 \cdot 10^{10}$
7,5	4,65	9,55	$0,8333 \cdot 10^{-6}$	3,7	$1,13579 \cdot 10^{22}$
10	3,675	7,596	$2 \cdot 10^{-6}$	1,2	$1,58292 \cdot 10^{22}$
12,5	3,6	6,1	$1,4285 \cdot 10^{-6}$	1,584	$9,12813 \cdot 10^{21}$
15	1,96	3,675	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,7	$1,03617 \cdot 10^{21}$

Tabelle 3: Meßreihe bei 40 mA

## Literatur

- [1] Francis F. Chens. *Plasma Diagnostic Techniques*. Academic Press, New York – London, 1965.
- [2] Horst Stöcker (Hrsg.). *Taschenbuch der Physik (2. Auflage)*. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1994.