

Plasmadiagnostik mittels Langmuirsonden

Oktober 2010

Im Versuch sollen u.a. Plasmaparameter mittels einer Langmuirsonde bestimmt werden. Die vorliegende Anleitung dient lediglich als Rahmenliteratur und als Anleitung zur Vorbereitung, erhebt aber selbst bezüglich des physikalischen Inhalts keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr soll dem Studenten die Möglichkeit zur selbständigen und eigenverantwortlichen Vorbereitung eingeräumt werden. In sofern ist das Studium weiterer Quellen zur Vorbereitung auf den Versuch notwendig und erwünscht.



Institut für Angewandte Physik

Fortgeschrittenenpraktikum

Raum 02.307

1 Allgemeines

Information

- Das Praktikum findet während der Vorlesungszeit immer **montags** von **09:30 bis 11:30 Uhr** und von **13:00 bis 16:00 Uhr** statt.
- Zu Beginn werden in der Regel jeweils 2-3 Vorträge gehalten - deshalb ist **pünktliche Anwesenheit** selbstverständlich. Die Vortragenden melden sich bitte zu Beginn des Praktikumstages bei den Betreuern!
- Während der Mittagspause bitte den Versuch abschalten!
- Das Protokoll ist **spätestens zwei Wochen** nach der Versuchsdurchführung abzugeben.
- Der für diesen Versuch zuständige Betreuer ist

Benjamin Koubek
koubek@phyisk.uni-frankfurt.de

Vorkenntnisse

- Plasma
- Plasmaparameter
(Ionisierungsgrad, Elektronentemperatur, Plasmadichte, Debye-Länge)
- Langmuirsonde
- Kennlinie einer Langmuirsonde

Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeines	2
2 Grundlagen der Plasmaphysik	1
3 Theorie der Plasmadiagnostik mittels Langmuirsonden	2
3.1 Bestimmung der Plasmaparameter aus der Kennlinie	4
4 Versuchsaufbau	4
5 Aufgaben	5
6 Versuchsdurchführung	5
6.1 Manuelle Messung	5
6.2 Versuchsablauf	6
7 Auswertung	6
7.1 Logarithmische Auswertung	6
7.2 Variation der Leistung bei verschiedenen Drücken	7
7.3 Zusatzfragen	7
7.4 Bestimmung des Enddrucks p_{end} der Drehschiebervorpumpe	8
7.5 Bestimmung des Saugvermögens S einer Drehschieberpumpe	8
7.5.1 Messung der Auspumpkurve	8
7.5.2 Leiten Sie im Protokoll die Formel 2 aus 1 her	8

Literaturvorschläge Diese Anleitung enthält in Kurzfassung die nötigsten Grundlagen der Plasmaphysik und der Langmuirsondenmessungen. Weiterführende Kenntnisse sollen aus der angegebenen Literatur oder ähnlichen Quellen herausgearbeitet werden.

- Bergmann-Schaefer, **Lehrbuch der Experimentalphysik, Band IV, Teil 2, Aufbau der Materie und Band V, Vielteilchensysteme**, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 198 und 1995
- H. Müller, **Aufbau eines Experiments zur Plasmadiagnose mittels Langmuirsonden**, Examensarbeit, Institut für Angewandte Physik der J.W.Goethe- Universität Frankfurt am Main, Januar 1998
- U. Streb, **Aufbau eines Experiments zur Hochfrequenz-Einkopplung in ein Plasma**, Examensarbeit, Institut für Angewandte Physik der J.W.Goethe Universität Frankfurt am Main, Januar 1998
- H. Vogel, **Gerthsen Physik**, 18. völlig neubearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1995
- Dr. A. Frank-Kamenezski, **Vorlesung über Plasmaphysik**, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1967
- Dr. A. Frank-Kamenezski, **Plasma- der vierte Aggregatzustand**, Verlag Progress Moskau, Alleinvertrieb Harri Deutsch Verlag FrankfurtIMain, 1963
- G. Hertz und R. Rompe, **Einführung in die Plasmaphysik und ihre technische Anwendung**, Akademie Verlag, Berlin 1965

2 Grundlagen der Plasmaphysik

In der Physik wird mit dem Wort „Plasma“ ein ionisiertes Gas bezeichnet, also ein Gemisch aus Elektronen, Ionen und neutralen Teilchen, welches sich nach außen hin quasineutral verhält. Quasineutral bedeutet, daß sich die positiv und negativ geladenen Anteile im Plasma entsprechen. Plasmen werden durch die Plasmadichte n , und die Elektronentemperatur T , charakterisiert. Weitere Kenngrößen sind die Debye-Länge λ_D und die Plasmafrequenz ω . Zur Berechnung der Elektronentemperatur werden Angaben zum angelegten Sonden und Plasmapotential (U_S und U_P) benötigt. Das Plasmapotential stellt sich ein, wenn alle Elektronen auf die Sonde fließen. Dieser Strom wird Elektronensättigungsstrom I_e , genannt. Die Elektronentemperatur berechnet sich wie folgt aus der Boltzmann-Verteilung:

$$I = I_e \exp\left(\frac{e(U_S - U_P)}{k_B T_e}\right) \Rightarrow T_e = \frac{e(U_S - U_P)}{k_B (\ln I/I_e)} \quad (1)$$

Mit Hilfe der Elektronentemperatur läßt sich nun auch die Plasmadichte n_e bestimmen.

$$n_e = \frac{I_e}{eF} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{k_B T_e}} \quad (2)$$

Nach Einsetzen der Naturkonstanten ergibt sich mit der Elektronentemperatur in eV, dem Sondenstrom I , in mA und der Sondenfläche F in cm^2 eine Elektronendichte in cm^{-3} von:

$$n_e = 3,7 \cdot 10^8 \frac{I_e}{k_B T_e} \quad (3)$$

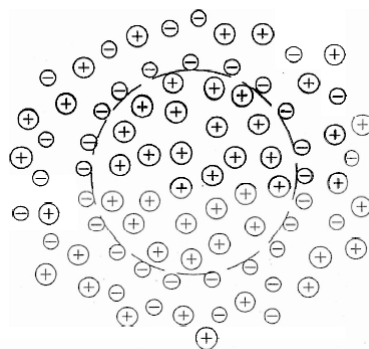
Aus der Plasmadichte und der Elektronentemperatur lassen sich die Debye-Länge λ_D und die Plasmafrequenz ω_P berechnen.

Die Debye-Länge kennzeichnet die Reichweite der abschirmenden Teilchenwolke, die sich um eine Ladung im Plasma ausbildet. Es ist

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{e^2 n_e}} \quad (4)$$

Nach Einsetzen der Naturkonstanten ergibt sich die Debye-Länge in mm:

$$\lambda_D = 7,4 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{k_B T_e}{n_e}} \quad (5)$$



Plasmen, zeichnen sich durch eine charakteristische Dynamik der Raumladungsschwankungen aus. Diese Frequenz, die sogenannte Plasmafrequenz ω_P ist bestimmend für die Wechselwirkung des Plasmas mit elektromagnetischen Wellen und wird nach folgender Formel berechnet:

$$\omega_P = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad (6)$$

Nach dem Einsetzen der Naturkonstanten folgt:

$$\omega_P = 5,6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e} \quad (7)$$

Aufgrund des Skin-Effektes (Verdrängung der Elektronen zur Leiteroberfläche) kann sich die Welle nur bis zu einer frequenzabhängigen Eindringtiefe d ausbreiten. Die folgende Formel gilt nur näherungsweise bei Vernachlässigung von Stoßprozessen und Dissipation.

$$d = \frac{c}{\omega_p} \quad (8)$$

Hierbei bezeichnet ω_P die Plasmafrequenz und c die Lichtgeschwindigkeit.

3 Theorie der Plasmadiagnostik mittels Langmuirsonden

Aus einer Langmuirsondenkennlinie lassen sich wichtige Plasmamparameter, wie das Plasmapotential U_P , die Elektronendichte n_e die Elektronentemperatur T_e die Debye-Länge λ_D und die Plasmafrequenz ω_P bestimmen. Diese Meßmethode wurde 1924 von I.Langmuir. entwickelt und ist ein wesentlicher Bestandteil der Plasmadiagnostik. Ein Computerprogramm steuert über ein Netzgerät das Sondenpotential und registriert den auftreffenden Strom. Durch Auftragen des Sondenstromes in Abhängigkeit von der kontinuierlich veränderten Sondenspannung entsteht die Sondenkennlinie. Sie enthält die zur Bestimmung der wichtigen Plasmakenngrößen notwendigen Informationen. Die folgende Abbildung zeigt die idealisierte Sondenkennlinie, wie man sie unter Bedingungen eines stationären, (unendlich) ausgedehnten Plasmas erhalten würde.

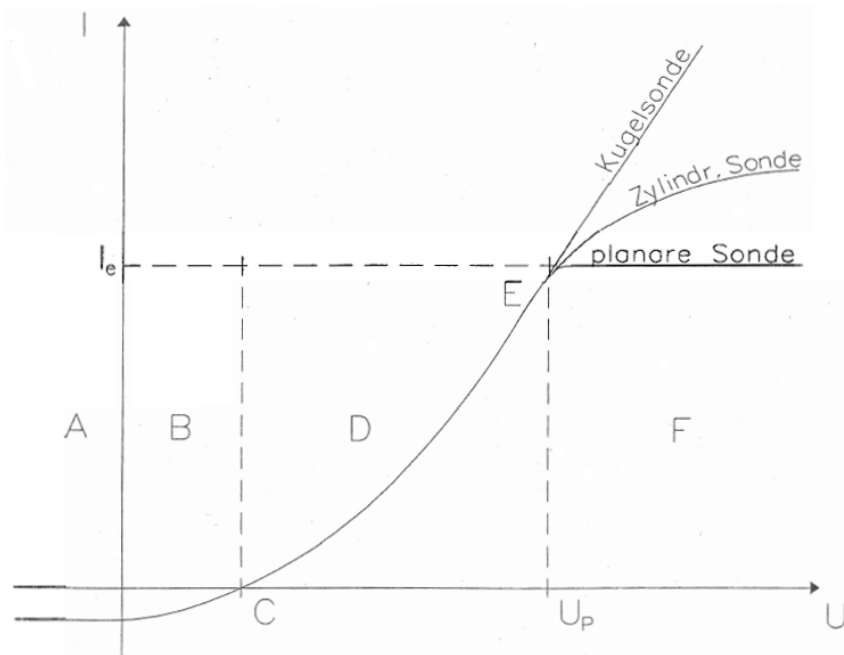


Abbildung 1: Die Sondenkennlinie wird in verschiedene Bereiche aufgeteilt

- A** Liegt die Sonde auf einem genügend negativen Potential gegenüber dem Plasma, so werden die Elektronen abgestoßen, und es treffen ausschließlich Ionen auf die Sonde. Somit umgibt sich die Sonde mit einer positiven Raumladungsschicht. Der Ionenstrom nimmt im Idealfall einen konstanten Wert an und steigt bei wachsendem negativen Potential nicht weiter an. Dieser Bereich heißt Ionensättigungsgebiet.
- B** Mit abnehmender negativer Sondenspannung gelangen auch schnelle Elektronen auf die Sonde, die die elektrische Abstoßung überwinden können. So kompensieren sich der auftretende Elektronenstrom und der bestehende Ionenstrom allmählich. Dies ist am Anstieg der Kennlinie deutlich zu erkennen. Dieser Bereich wird Anlaufgebiet bzw. Elektronenanlaufgebiet genannt.
- C** An der Nullstelle der Kennlinie heben sich Ionen- und Elektronenstrom gerade auf, so daß der resultierende Strom auf die Sonde Null ist. Dieser Punkt heißt Floating-Potential. Dieses Potential nimmt eine isoliert eingetauchte Sonde gegenüber dem Plasma an.
- D** Da das abstoßende Potential der Sonde immer kleiner wird, gelangen vermehrt Elektronen auf die Sonde. Die Ionen werden immer weniger angezogen. Sofern die Elektronen Maxwell-Boltzmann verteilt sind, steigt der Strom in diesem Bereich exponentiell an. Die Raumladungszone um die Sonde nimmt nun während der Anlaufphase mit steigendem Potential immer weiter ab.
- E** Am Knickpunkt der Sondenkennlinie hat die Sonde Plasmapotential erreicht. Es gelangen dann alle Elektronen auf die Sonde und der Sondenstrom läuft in eine Sättigung.
- F** Bei weiter steigender Sondenspannung gelangen ausschließlich Elektronen auf die Sonde. Sämtliche Ionen werden von dem sich entgegengesetzt aufbauenden elektrischen Feld abgestoßen. Der Strom geht in die Elektronensättigung über und die Kennlinie verläuft bei einer planaren Sonde parallel zur Abzisse. Um die I Sonde entsteht eine mit zunehmender Spannung wachsende Elektronenraumladungsschicht.

Diese Raumladungsschicht, also der Bereich zwischen der Sonde und dem ungestörten Plasma, wird Plasmarandschicht genannt.

3.1 Bestimmung der Plasmaparameter aus der Kennlinie

Ein wesentlicher Bestandteil der Auswertung zur Ermittlung der Plasmaparameter aus der Kennlinie ist das Plasmapotential, das zunächst ermittelt werden muß. Das Plasmapotential befindet sich im Übergang des exponentiell steigenden Kennlinienabschnittes (Anlaufgebiet) zum parallel zur Abszisse verlaufenden Elektronensättigungsgebiets. Leider tritt aber in der praktischen Auswertung kein solcher Knick auf. Aus diesem Grund wird das Plasmapotential durch den Schnittpunkt des extrapolierten Anlauf- und Sättigungsanteils festgelegt.

In diesem Punkt hat die Kennlinie ihre maximale Steigung. Deshalb läßt sich das Plasmapotential genauer aus dem Maximum der differenzierten Kennlinie bestimmen. Ist das zum Maximum gehörende Potential bestimmt, so kann aus der ursprünglichen Kennlinie der zugehörige Elektronensättigungsstrom I_s abgelesen werden, der zur Berechnung der Elektronentemperatur (1) und der Plasmadichte (2) benötigt wird.

Die logarithmierte Kennlinie liefert Aussagen über die Energieverteilung der Elektronen und die Elektronentemperatur, wobei der Verlauf der Kurve bis zum Punkt des Plasmapotentials entscheidend ist.

Die Elektronentemperatur wird aus dem Anstieg der logarithmierten Kurve im Anlaufgebiet (unter Voraussetzung Maxwell'scher Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen) durch lineare Regression bestimmt. Die genaue Vorgehensweise zur Bestimmung der Elektronentemperatur kann der Examensarbeit von H. Müller entnommen werden.

Die zur Berechnung der Plasmaparameter nötigen Plasmakenngrößen, nämlich der Elektronensättigungsstrom I_s , und die Elektronentemperatur T_e werden aus der Sondenkennlinie bestimmt und mit Hilfe der Formeln (3), (5), (7) und (8) lassen sich die Elektronenanzahldichte n_e die Debye-Länge λ_D , die Plasmafrequenz ω_p und die Eindringtiefe d berechnen.

4 Versuchsaufbau

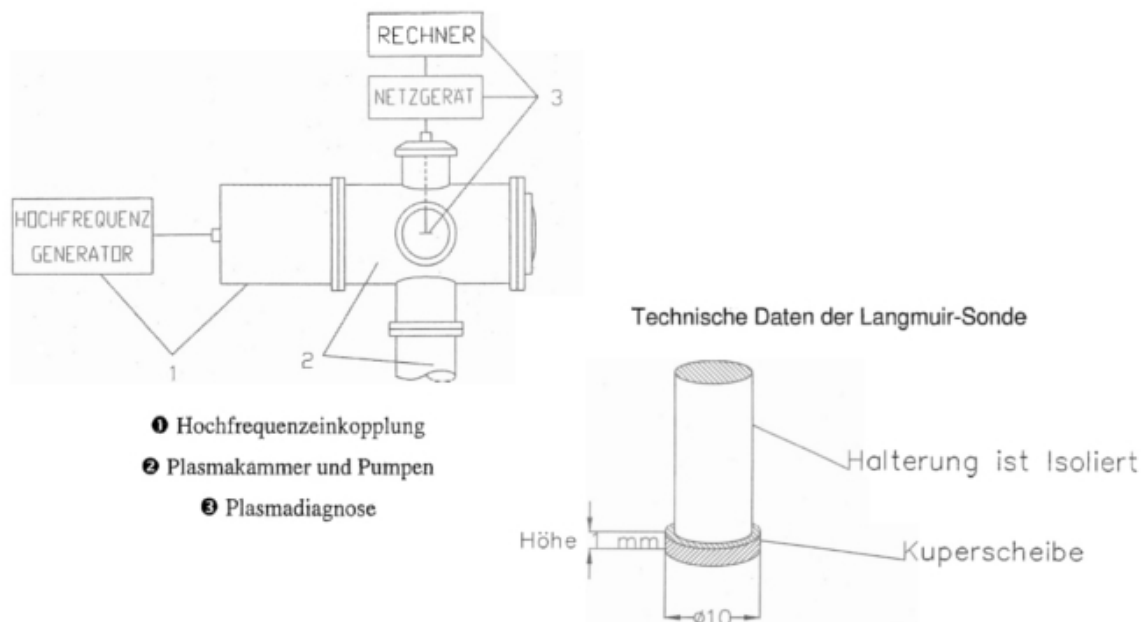


Abbildung 2: Versuchsaufbau

Die Hochfrequenzeinkopplung besteht aus einem Leitungsresonator und einem Hochfrequenz-Signal-Generator. Nach dem Einschalten des Generators schaltet er zunächst auf Störung (eine rote Lampe leuchtet). Diese „Anfangsstörung“ muß durch Betätigen des „Ein Reset“-Knopfes

behooben werden. Die eingebaute Sicherheitsabschaltung reagiert auf Überstrom und zu hohe Temperatur. Bei einem einminütigen Rücklauf, der größer als 5 W ist, schaltet sich der Generator aus. Der Neubeginn ist nach Fehlerbeseitigung mit einer Resetbetätigung möglich. Die Rücklaufanzeige am Generator kann von 50 W auf 5 W umgeschaltet werden, um den Rücklauf besser minimieren zu können.

Zu Beginn müssen die Vakuumpumpen eingeschaltet werden. Das Anzeigergerät des Vakuums wird auf dessen Rückseite eingeschaltet. Die Anzeige ist auf mbar eingestellt. Nach Beendigung des Experiments muß die Plasmakammer durch Betätigen des Flutschalters an der Vakuumsteuerung geflutet werden.

5 Aufgaben

- Manuelle Aufnahme einer Langmuirsonden-Kennlinie
- 3 Messungen bei konstanter Leistung
- 3 Messungen bei konstantem Druck
- 3 Messungen bei unterschiedlichen Magnetfeldern und konstanter Leistung und Druck
- Bestimmung des Enddrucks, des Saugvermögens und der Leckrate

6 Versuchsdurchführung

6.1 Manuelle Messung

1. Bei einem fest eingestellten Druck zwischen $1 \cdot 10^{-1}$ mbar und $1 \cdot 10^{-3}$ mbar und einer stabilen Leistung (15 - 40 W) soll per Hand eine Sondenkennlinie aufgenommen werden. Aus dieser Kennlinie sollen die Plasmaparameter (Plasmapotential, Elektronensättigungsstrom I_e , Elektronentemperatur T_e Plasmadichte n_e Debye- Länge λ_D , Plasmafrequenz ω_P und die Eindringtiefe d) bestimmt werden.
2. Bei den gleichen Einstellungen wird eine computergesteuerte Messung durchgeführt und ausgewertet.
3. Die Ergebnisse beider Messungen sollen miteinander verglichen werden.

Hinweise zur Durchführung der manuellen Messung Zum Einstellen der Sondenspannung per Hand muß der Probus im Netzgerät ausgeschaltet sein, während eine computergesteuerte Messung ohne eingeschalteten Probus nicht möglich ist.

Zur Plasmaerzeugung muß der Druck in der Plasmakammer größer als $3 \cdot 10^{-3}$ mbar sein, da bei niedrigeren Drücken das Plasma nicht mehr gezündet werden kann.

Bei jeder Messung muß nach Einstellung der gewünschten Leistung die Frequenz optimiert werden, so daß der Rücklauf minimal wird, um die beste Einkopplung zu erreichen.

Beim minimalsten Rücklauf reicht schon eine eingekoppelte Leistung von nur 0,5 W zur Plasmazündung aus.

geeignete Einstellungen

Sondenspannung	0 - 100 V	
Schrittweite	manuell	1 - 5 V
	computergesteuert	0,5 V

(Bei der Computermessung sind diese Werte bereits im Setup gespeichert.)

Für jede neue Messung muß ein neuer Meßdateiname benutzt werden, da ansonsten die alte Datei mit dem gleichen Namen überschrieben wird.

6.2 Versuchsablauf

1. Einschalten der Drehschieberpumpe
2. Mit Feindosierventil (kleines Rädchen, Messing) den Rezipienten auf einen Druck von ca. 0,3 mbar einstellen.
3. HF-Signalgenerator einschalten. Die Frequenz des Signals liegt ungefähr bei 13,45 MHz. Dabei die Leistung im Vorlauf auf 2 Watt einstellen und den Rücklauf mit dem Frequenzrädchen minimieren.
4. Den PC und das Mittelspannungsnetzteil (FUG) einschalten. Manuelle Messung aufnehmen mit 2 Watt Leistung, 0,3 mbar Druck und ohne Magnetfeld. Die Schrittweite der Spannungsänderung ist sinnvoll zu wählen und in Bereichen starker Änderung zu verfeinern! Messung auf mm-Papier auftragen und auswerten, Temperatur und Potential bestimmen.
5. Mittelspannungsnetzteil auf „digital“ stellen. Auf dem Desktop des PCs befindet sich der Ordner „Plasma“. Darin das LabView-Programm „Start“ ausführen. Zum Laden der ersten Durchführung etwas Geduld bitte. Im Fenster auf „deutsch“ klicken und dann die Messung mit „OK“ starten (geht sofort los). Eine Testmessung durchführen.
6. Nun bei festgehaltener bzw. konstanter Leistung und ohne Magnetfeld drei Messungen mit unterschiedlichen Drücken durchführen.
7. Bei konstantem Druck drei Messungen mit den Leistungen 1 Watt, 2 Watt und 3 Watt ausführen.
8. Schließlich drei Messungen bei eingeschaltetem Magnetfeld verschiedener Stärken und fester Leistung respektive festem Druck durchfall.

Zu allen Messungen sind mindestens Temperatur, Potential, Dichte Debye-Länge, Plasmafrequenz und Eindringtiefe festzustellen. Erst dann dürft ihr nach Hause zur Mamma.

7 Auswertung

7.1 Logarithmische Auswertung

Hinweise zur Auswertung

Bei der manuellen logarithmischen Auswertung muß berücksichtigt werden, daß der Logarithmus negativer Werte und Null nicht gebildet werden kann. Im Auswerteprogramm ist deshalb ein Offset-Faktor eingebaut, der die negativen Daten auf positive Werte durch Addition anhebt und so auch Meßschwankungen relativieren kann. Manuell sollte zum einen der Offset-Faktor berücksichtigt, sowie auch eine logarithmische Auswertung ohne diese Werte vollzogen werden. Die resultierenden Elektronentemperaturen sollen in beiden Fällen miteinander verglichen werden. Bei der Auswertung der Kennlinie mit dem Auswerteprogramm kann sich ein systematischer Fehler ergeben, sofern beim Differenzieren und vor allem beim Logarithmieren das Plasmapotential bzw. die Regressionsgeraden nicht immer einheitlich bestimmt werden. Bei der Auswertung der logarithmierten Kurve entspricht das Plasmapotential dem Knickpunkt des Graphen, der stets gleich gewählt werden muß, um die resultierenden Elektronentemperaturen vergleichen zu können.

Logarithmische Auswertung

Elektronentemperatur T_e = Kehrwert der Geradensteigung

Um diese Gerade zu erhalten, muß auch in der logarithmierten Ausführung das Plasmapotential ermittelt werden, das mit dem einzugebenden Startpunkt die Begrenzung für diese Gerade darstellt. Mathematisch muß das Plasmapotential im Knickpunkt des logarithmierten Graphen liegen. Dieser Knickpunkt wird durch lineare Regression mit zwei Geraden ermittelt, wobei die eine Gerade nur zur Ermittlung des Plasmapotentials benutzt wird, während die andere Gerade zur Bestimmung der Elektronentemperatur nötig ist. Der Schnittpunkt dieser beiden Regressionsgeraden markiert das Plasmapotential, das mit dem differenziell ermittelten Wert übereinstimmen soll.

Bemerkungen

- Die Wahl der Regressionsfaktoren, die die Abweichung der Meßpunkte von der Geraden angeben, und des Startpunktes erfordern eine gewisse Erfahrung, so daß die logarithmische Auswertung unter Benutzung der Optionen des Glättens oder Zoomens mehrmals durchgeführt werden muß.
- Die Elektronenenergie entspricht umso genauer einer Maxwellverteilung, je höher der Regressionsfaktor gewählt werden kann, da sich dann die Gerade umso besser der Kurve anpaßt.

Bestimme aus den so ermittelten Werten die Plasmadichte und die anderen Plasmaparameter!

7.2 Variation der Leistung bei verschiedenen Drücken

1. Bestimme anhand von computergesteuerten Messungen die Abhängigkeit der Plasmadichte n_e von der eingekoppelten Leistung bei verschiedenen Drücken.
2. Stelle diese Abhängigkeiten graphisch dar und diskutiere sie.
3. Berechne die Plasmaparameter.

Hinweise zur Durchführung der 2. Aufgabe

Die untere Grenze des Druckbereiches, in dem gemessen werden soll, ist der Wert, bei dem das Plasma noch leuchtet und die obere Grenze beträgt $1 \cdot 10^{-1}$ mbar. Ein höherer Druck als $1 \cdot 10^{-1}$ mbar schadet bei Dauerbelastung der Turbomolekularpumpe und soll deshalb nicht eingestellt werden. Es ist darauf zu achten, daß der Druck für jede Meßreihe der Leistungsvariation konstant gehalten wird.

Die rücklaufende Leistung muß stets minimiert werden, damit möglichst die gesamte Energie zum Ionisieren von Teilchen im Plasma genutzt werden kann.

Die Messungen zu beiden Aufgaben sollten am gleichen Tag ohne Belüftung des Rezipienten gemacht werden, damit das Arbeitsgas immer aus ähnlichen Teilchen besteht und die Messungen vergleichbar sind.

7.3 Zusatzfragen

1. Wo tritt Plasma noch auf?
2. Warum kann eine feste Temperatur definiert werden?
3. Warum entsprechen die gemessenen Kennlinien nicht der idealisierten Kennlinie der planaren Sonde?

7.4 Bestimmung des Enddrucks p_{end} der Drehschiebervorpumpe

Starten Sie Drehschieberpumpe und lassen Sie diese warm laufen. Dies kann 20-30 min dauern. Es ist der mit der Pumpe erreichbare Enddruck p_{end} zu bestimmen. Hierzu läßt man die Pumpe (bei geschlossenem Gaseinlaß) so lange laufen, bis der Druck nicht mehr weiter sinkt. Realistische Pumpzeiten sind 10-15 min. Der Hersteller gibt einen Enddruck von $2 \cdot 10^{-4}$ mbar an. Warum wird dieser nicht erreicht?

Bestimmen sie aus dem Enddruck p_{end} sowie dem Saugvermögen die Leckrate q_L .

7.5 Bestimmung des Saugvermögens S einer Drehschieberpumpe

7.5.1 Messung der Auspumpkurve

Hierzu wird das Volumen V des Rezipienten benötigt. Dieses ist mit 1,5 l bestimmt worden. Anschließend wird der Rezipient beginnend mit Atmosphärendruck p_0 ausgepumpt und der Druck $p(t)$ im Rezipienten als Funktion der Zeit alle 5 sec gemessen. Die Messung kann abgebrochen werden, wenn sich die Anzeige des Messgerätes nicht mehr ändert. Die Messdaten sind auf halblogarithmischen Papier aufzutragen.

Für die Auspumpkurve wird ein exponentieller Verlauf erwartet.

$$p(t) = p_0 \cdot e^{-\frac{S \cdot t}{V}} \quad (9)$$

mit p_0 = Atmosphärendruck [mbar]

S = Saugvermögen der Pumpe $\left[\frac{V}{S}, \frac{m^3}{h} \right]$

V = Volumen des Rezipienten.

Für den Anfangsbereich der Druckkurve ergibt sich eine Gerade. Mit Hilfe dieser Gerade läßt sich leicht die Zeit $t_{1/10}$ bestimmen, nach der der Druck gerade auf ein zehntel seines Anfangswerts abgefallen ist.

Hieraus läßt sich das Saugvermögen bestimmen.

$$S = \frac{\ln(10) \cdot V}{t_{1/10}} \quad (10)$$

Vergleichen Sie den errechneten Wert mit den Herstellerangaben.

7.5.2 Leiten Sie im Protokoll die Formel 2 aus 1 her