University of Basel
Department of Physics

Fortgeschrittenenpraktikum I/II

Plasma Kamer

27. Oktober 2026

Versuchsübersicht

Dieses Experiment vermittelt einen Einblick in die Funktionsweise einer Vakuumkammer und die Grundlagen der Niedertemperatur-Plasmaphysik. Sie werden mithilfe verschiedener Gase und eines Hochfrequenzgenerators ein kapazitiv gekoppeltes Plasma erzeugen. Nach der visuellen Beobachtung des Plasmas werden Sie es sowohl optisch als auch elektrisch mit einem optischen Spektrometer und einer Langmuir-Sonde charakterisieren. Sie werden die vorhandenen Teilchenarten identifizieren und wichtige Plasmaeigenschaften wie die Elektronentemperatur und die Elektronendichte bestimmen. Abschließend werden Sie beobachten, wie Magnetfelder die Entladung beeinflussen. Am Ende dieser Praktikumseinheit sind Sie mit den Grundprinzipien des Niedertemperaturplasmas vertraut und in der Lage, eine Plasmaanzündvorrichtung selbstständig aufzubauen.

Dr. Paul Hiret / Ren Kimura
paul.hiret@unibas.ch /
ren.kimura@unibas.ch

Inhaltsverzeichnis

1 Theoretischer Hintergrund **2**

1.1 Plasma und kapazitiv gekoppelte Entladungen 2

1.2 Optische Emissionsspektroskopie 2

1.3 Langmuir-Sonde 2

2 Experimenteller Aufbau **4**

3 Fragen **4**

3.1 Forschungsfrage 5

1 Theoretischer Hintergrund

1.1 Plasma und kapazitiv gekoppelte Entladungen

Ein Plasma ist ein teilweise ionisiertes Gas, das aus Elektronen, Ionen und neutralen Teilchen besteht. Im Volumen ist es quasineutral und zeigt kollektives Verhalten. In diesem Experiment betrachten wir ein Niedertemperaturplasma, bei dem die Elektronentemperatur deutlich höher ist als die Ionentemperatur. Ein kapazitiv gekoppeltes Plasma (CCP) wird durch Anlegen einer HF-Spannung (hier 13,56 MHz) zwischen Elektroden erzeugt. Das Plasmavolumen bleibt quasineutral, d. h. die Dichten positiver und negativer Ladungen sind annähernd gleich. Da Elektronen wesentlich heißer als Ionen sind, stellt sich im Plasma natürlicherweise ein Potential ein, das höher ist als das Potential von Oberflächen in Kontakt mit dem Plasma. Dadurch bildet sich zwischen Plasmavolumen und Elektroden eine sogenannte Plasmascheide [1].

1.2 Optische Emissionsspektroskopie

In einem Niedertemperaturplasma befinden sich viele Atome, Moleküle, Radikale und Ionen aufgrund von Prozessen wie Elektronenkollisionen, Ionen-Molekül-Reaktionen und Ladungsaustausch in angeregten Zuständen. Photonen entstehen hauptsächlich durch die Relaxation dieser Spezies und können von außerhalb des Plasmas detektiert werden. Die spektrale Verteilung der Photonen kann Informationen über verschiedene Plasmaspezies, deren Dichte und Temperatur sowie über die Stärke innerer und äußerer Felder liefern.

1.3 Langmuir-Sonde

Eine Langmuir-Sonde ist eine elektrostatische Sonde, die aus einem einzelnen Draht besteht und in das Plasma eingeführt wird. Durch Sweepen der Spannung und Messen des resultierenden Stroms erhält man die I–V-Charakteristik der Sonde; eine typische Messung ist unten dargestellt. Eine typische I–V-Kurve besteht aus drei Bereichen, nämlich dem Ionen-Sättigungsbereich, dem Übergangsbereich und dem Elektronen-Sättigungsbereich (siehe Abbildung unten). Diese Bereiche werden getrennt ausgewertet, um die Plasmaparameter zu bestimmen.

Abbildung 1 zeigt die Strom-Spannungs-Charakteristik einer planaren Langmuir-Sonde. Diese Kurve steht in direktem Zusammenhang mit zentralen Plasmaparametern, insbesondere dem Floating-Potential V_f, dem Plasma-Potential V_p, der Plasmadichte n_0 und der Elektronentemperatur T_e. Von diesen Größen ist das Floating-Potential in der Regel am einfachsten mit einer elektrostatischen Sonde zu bestimmen. Es ist als das Sondenpotential definiert, bei dem der netto gesammelte Strom null ist, und entspricht dem natürlichen Potential einer ungebiassten Sonde im Plasma.

Eine planare Fläche, die in ein quasineutrales Plasma ohne externes Magnetfeld eingebracht und unterhalb des Plasma-Potentials ($V < V_p$) gebiast wird, sammelt einen Nettostrom I:

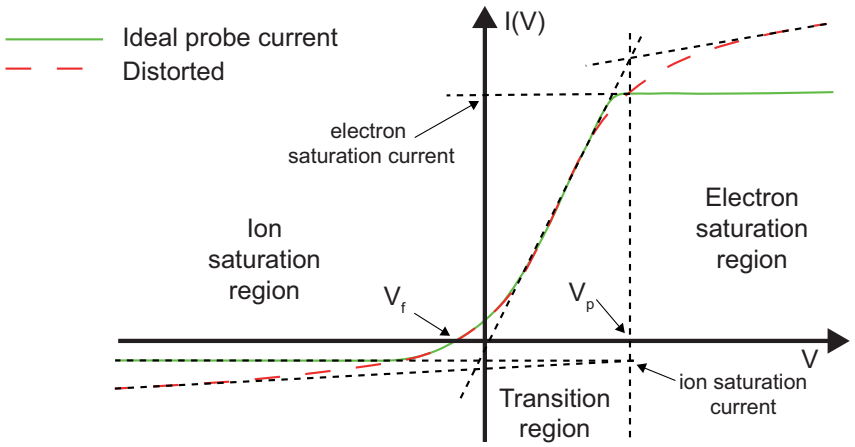


Abbildung 1: Ideale und reale Messung von Sonden-I–V-Kurven sowie direkt aus der Sondencharakteristik zugängliche Parameter. Abbildung aus Hiret 2024 [2].

$$I = eA\left[-\frac{n_0 v_e}{4}\exp\left(\frac{e(V-V_p)}{k_B T_e}\right) + n_s u_B\right] \tag{1}$$

Dabei ist A die Sondenoberfläche, n_s die Plasmadichte an der Scheidenkante, v_e die thermische Elektronengeschwindigkeit und $u_B = \sqrt{k_B T_e / m_i}$ die Bohm-Geschwindigkeit. In nicht magnetisierten kapazitiv gekoppelten Entladungen wird die Dichte an der Scheidenkante gut durch $n_s = \alpha n_0$ mit $\alpha = 0{,}61$ beschrieben [1].

Man erkennt, dass bei starker negativer Vorspannung der Sonde relativ zum Plasma-Potential ($V \ll V_p$) (*d.",h.* im Ionen-Sättigungsbereich) ein sättigender Strom $I_i^s = eAn_s u_B$ gesammelt wird. Aus dem Ionen-Sättigungsstrom und der Elektronentemperatur kann dann die Plasmadichte bestimmt werden. Zieht man den Ionenstrom vom Gesamtstrom ab, erhält man:

$$I_e = eA\frac{n_s v_e}{4}\exp\left(\frac{e(V-V_p)}{k_B T_e}\right) \tag{2}$$

Durch Logarithmieren des Elektronenstroms ergibt sich:

$$\ln(I_e) = \ln\left(\frac{eAn_0 v_e}{4}\right) + \frac{e(V-V_p)}{k_B T_e} \tag{3}$$

Daraus folgt, dass die Elektronentemperatur mit der Steigung des Logarithmus des von der planaren Sonde gesammelten Elektronenstroms unterhalb des Plasma-Potentials zusammenhängt (im Übergangsbereich).

Die Bestimmung des Plasma-Potentials V_p aus der I–V-Kurve ist schwieriger als die Bestimmung der übrigen Parameter. Bei positiverer Vorspannung als dem Floating-Potential steigt der Elektronenstrom an, bis keine Retardierung der Elektronen mehr vorliegt. Bei noch höheren Potentialen wird der exponentielle Retardierungsstrom durch die Sammlung von Elektronen unter orbitaler Bewegung ersetzt, die sich mit dem Potential weniger stark ändert. Dieser Bereich wird Sättigungsbereich genannt. Der Übergang zwischen diesen beiden Regimen der Elektronensammlung kann als

„Knick“ in der Sondencharakteristik identifiziert werden. Dieser Übergang lässt sich durch Ableiten der Charakteristik (dI/dV) hervorheben. Der „Knick“ führt zu einem Maximum der Ableitung in der Nähe des DC-Plasma-Potentials. Weitere Parameter, z.",B. die Elektronenenergieverteilungsfunktion, können ebenfalls aus der zweiten Ableitung der Strom-Spannungs-Charakteristik bestimmt werden.

2 Experimenteller Aufbau

Der Aufbau besteht aus einer Vakuumkammer aus Glas und Metall, die mit einer Turbomolekularpumpe und einer Vorpumpe evakuiert wird. Ein Massendurchflussregler ermöglicht die Einstellung des Gasflusses der verschiedenen Gase in die Kammer. Zusätzlich können unterschiedliche Gase verwendet werden, hauptsächlich Ar und N_2; weitere Gase sind nach vorheriger Absprache möglich. Ein HF-Generator mit Matchbox, der über den Computer gesteuert wird, dient zum Zünden des Plasmas. Außerdem stehen ein Spektrophotometer und eine Langmuir-Sonde zur Verfügung.

3 Fragen

1. Was sind die Aggregatzustände? Was definiert den Aggregatzustand einer Substanz? Welcher Aggregatzustand kommt im Universum am häufigsten vor?
2. Nenne verschiedene Arten von Plasma – sowohl natürliches als auch künstlich erzeugtes Plasma. Wann hast du zuletzt eines gesehen?
3. Warum erforscht die Menschheit Plasma? Was stellen wir damit her?
4. Nenne einige wichtige Parameter von Plasma.
5. Sind Plasmen neutral? Befinden sich Plasmen im stationären Zustand? Befinden sich Elektronen (im Allgemeinen) im thermischen Gleichgewicht? Befinden sich Ionen (im Allgemeinen) im thermischen Gleichgewicht?
6. Warum strahlen Plasmen Licht aus und warum haben verschiedene Gase unterschiedliche Lichtfarben?
7. Warum strahlen Plasmen Licht aus, auch wenn die Elektronentemperatur niedriger ist als die Ionisationstemperatur?
8. Zünde ein Plasma mit unterschiedlichen Eingangsparametern an und beobachte die Veränderungen visuell.
9. Charakterisieren Sie die Plasmen optisch mittels OES (optisches Emissionsspektrum). Geben Sie die größten Peaks (oder Zonen) an.
10. Nehmen Sie eine grobe Schätzung der Ionentemperatur, der Gastemperatur und der Elektronentemperatur der Plasmen vor, die Sie in dieser Arbeit erzeugt haben.
11. Stellen Sie die mit der Langmuir-Sonde ermittelte I–V-Kurve grafisch dar. Geben Sie die einzelnen Bereiche an. Berechnen Sie die Plasmaparameter mithilfe des Programms und erläutern Sie die physikalischen Zusammenhänge hinter den im Programm verwendeten mathematischen Formeln (wie im obigen Beispiel zum Übergangsbereich).
12. Im experimentellen Teil haben Sie verschiedene Parameter wie die Plasmaleis-

tung, das Gas und den magnetischen Einschluss verändert. Außerdem haben Sie mit der Höhe der elektrischen Sonde experimentiert, um Daten von verschiedenen Positionen zu erhalten. Stellen Sie diese Ergebnisse in Tabellen oder Diagrammen dar und kommentieren Sie sie kurz.

3.1 Forschungsfrage

Formulieren Sie eine Forschungsfrage, die Sie mit diesem Experiment untersuchen möchten. Formulieren Sie Ihre Hypothese in der Einleitung. Beschreiben Sie qualitativ, was Sie erwarten. Diskutieren Sie im Diskussionsteil Ihres Berichts:

- ob Ihre Ergebnisse Ihre Hypothese bestätigen,
- den Einfluss Ihrer untersuchten Variablen auf die Plasmaeigenschaften,
- Fehlerquellen,
- die Übereinstimmung mit der Theorie.

Literatur

[1] Chabert P and Braithwaite N 2011 *Physics of Radio-Frequency Plasmas* (Cambridge: Cambridge University Press)

[2] Hiret, Paul. "Radiofrequency Magnetised and Unmagnetised Plasma Sheath/Bulk Properties and Their Influence on the Erosion Distribution," 2025. https://hdl.handle.net/20.500.14716/202539.

[3] Lieberman M A and Lichtenberg A J 2005 *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (New York, NY, USA: Wiley)

Educating
Talents
since 1460.

Universität Basel
Petersplatz 1
Postfach 2148
4001 Basel
Switzerland

unibas.ch