

Praktikum Ulm - Plasmaspektroskopie

Betreuer: Jürgen Gafert, Thomas Pütterich und Kurt Behringer

Einleitung

Dieses Praktikum soll einen ersten Einblick in die spektroskopische Plasmadiagnostik vermitteln. Dazu werden grundlegende Kenntnisse über die spektrale Zerlegung des Lichts in Spektroapparaten, über Detektoren sowie über die Kalibrierung der Wellenlängen und der Strahldichten benötigt. Eine entsprechende Einführung wird am Praktikumstag als erstes gegeben, wobei eine sog. Spektrallampe als Strahlungsquelle dient. Dann muss aber auch ein Plasma betrieben werden, wozu Kessel und Kühlung, Pumpstände und Druckmesser, Gasversorgung und schließlich auch die Hochfrequenzheizung gehören. Im vorliegenden Fall handelt es sich um ein induktiv gekoppeltes Hochfrequenzplasma (ICP), das mit einer Frequenz von 27 MHz und mit einer Leistung bis zu 300 W betrieben werden kann. Das Plasma brennt bei Unterdruck in Helium, Argon und Stickstoff. Sein Ionisationsgrad ist sehr klein und die Temperaturen von Elektronen und schweren Teilchen unterscheiden sich erheblich. Die Plasmen emittieren charakteristische Spektren, die aus Linien, Molekülbanden und evtl. Kontinua bestehen. Emissionsspektren werden von angeregten Zuständen der Plasmateilchen ausgesandt; um Kenntnisse über die Teilchensorten im allgemeinen zu gewinnen, muss man theoretische Beziehungen ableiten, welche die Besetzung angeregter Niveaus in den entsprechenden Plasmen beschreiben. Dabei sind auf jeden Fall Elektronenstoßprozesse und spontane Emissionsprozesse zu berücksichtigen. Häufig spielen auch andere Mechanismen eine bedeutende Rolle. Eine einfache Theorie wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

Theorie

Grundlagen der Plasmaphysik

- Beobachtbare Strahlung: Linien, Banden
- Gleichgewichte: Koronagleichgewicht (basic)

Bei sehr kleinen Elektronendichten ($<10^{19} \text{ m}^{-3}$) können die abregenden Stöße gegen die spontane Übergangswahrscheinlichkeit vernachlässigt werden. Die angeregten Zustände sind dann sehr wenig besetzt (stark unterbesetzt) und die Teilchen sind fast alle im Grundzustand $n=1$. Die stationäre Besetzung eines angeregten Zustands ist dann gegeben durch die Gleichheit der Raten

$$\begin{aligned} \text{Elektronenstoßanregung} &= \text{spontane Emission} \\ \dot{N}_{1,m} = n_1 n_e X_{1,m}(T_e) &= \dot{N}_{m,k} = n_m \sum_{k < m} A_{m,k} \end{aligned}$$

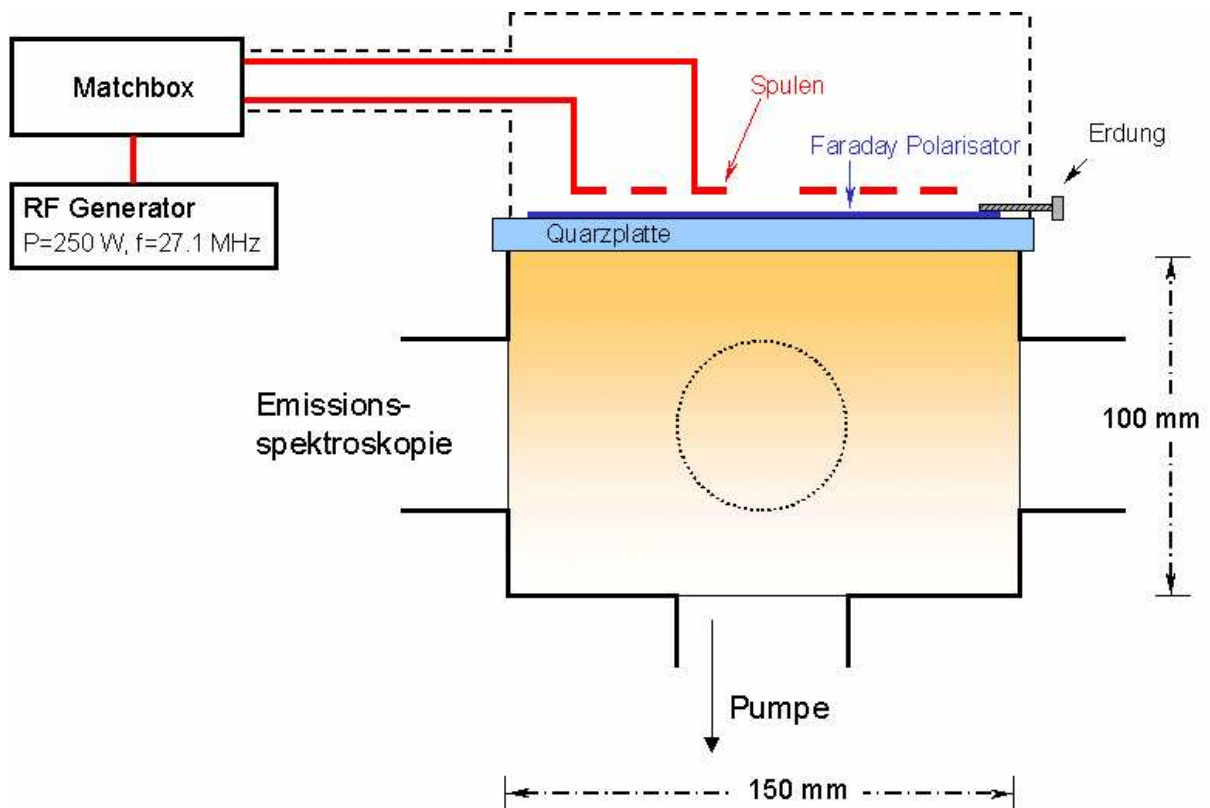
Mit dem Koeffizienten $X_{1,m}(T_e)$ für die Elektronenstoßanregung vom Grundzustand in den Zustand m , der von der Elektronentemperatur abhängt. Nach der Anwendung auf die dünne heiße Sonnenkorona wird diese Bilanz Koronamodell genannt. Beobachtet man eine Spektrallinie aus dem Übergang $m \rightarrow j$ mit der Übergangswahrscheinlichkeit $A_{m,j}$, so ergibt sich der Emissionskoeffizient $\varepsilon_{L,m,j}$

$$\varepsilon_{\text{Ph},m,j} \text{ (oder } \dot{N}_{\text{Ph},m,j}) = n_1 n_e X_{1,m} \frac{A_{m,j}}{\sum A_{m,k}} = n_1 n_e X_{1,m} b_{m,j}$$

$$\varepsilon_{\text{L},m,j} = \frac{h\nu}{4\pi} n_m A_{m,j} = \frac{h\nu}{4\pi} n_1 n_e X_{1,m} \frac{A_{m,j}}{\sum A_{m,k}}$$

Häufig wird nicht die emittierte Leistung angegeben, sondern die Anzahl der emittierten Photonen pro Volumen und Zeit in den gesamten Raumwinkel $\varepsilon_{\text{Ph},m,j}$ mit dem Verzweigungsverhältnis („branching ratio“) $b_{m,j}$. Die Kombination $X_{1,m} b_{m,j}$ wird auch häufig als „Emissionsratenkoeffizient“ bezeichnet. Diese Ratenkoeffizienten sind primär eine Funktion der Elektronentemperatur T_e , können aber auch von anderen Parametern abhängen. Kennt man die Teilchendichten und die Elektronendichte, so kann man aus der absoluten Strahldichte die Elektronentemperatur bestimmen. Eine Berechnung von T_e ist auch aus dem Verhältnis zweier Ratenkoeffizienten mit verschiedener Temperaturabhängigkeit möglich, wobei sich die Elektronendichte heraushebt. Das Aussehen von Molekülbanden wird durch die Verteilung über die Rotationszustände bestimmt. Diese ist von den statistischen Gewichten $(2J+1)$ und die sog. Rotationstemperatur T_r bestimmt. Unter bestimmten Voraussetzungen ist T_r gleich der Schwerteilchentemperatur. Somit erlaubt eine Simulation der Molekülbanden die Bestimmung dieses Plasmaparameters.

Experiment



Skizze des Experiments (induktiv gekoppeltes Plasma, ICP)

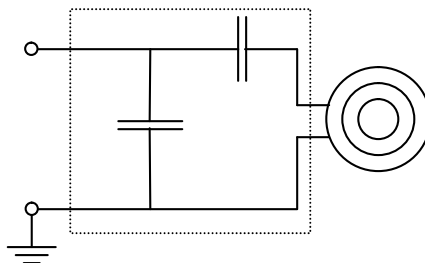
Zum Auspumpen dient ein Pumpstand bestehend aus Vorpumpe und Turbopumpe. Ablesen des Drucks an den entsprechenden Messgeräten. Die Einstellung des Arbeitsdrucks und der Gasmischung erfolgt über die Gasfluss-Regler und die Durchflussmesser. Der Pumpstand muss dazu gedrosselt werden (Markierung). Längere Einstellzeiten! Machen Sie sich mit der Anlage zunächst ohne Plasma vertraut.

Plasmaerzeugung:

Die im HF-Generator erzeugte Hochfrequenz von 27.1 MHz koppelt über die Spule induktiv in die wassergekühlte Plasmakammer ein. Das Anpassnetzwerk dient dazu, den Schwingkreis aus Spule, Zuleitung und Matchbox auf seine Resonanzfrequenz abzustimmen. Neben der Resonanzfrequenz muss mit dem Anpassnetzwerk auch der Abschlusswiderstand von 50Ω eingestellt werden.

Um die axialen (senkrecht zur Spulenebene) kapazitiven Anteile der HF zu minimieren, liegt ein radial geschlitzter, geerdeter Faradaypolarisator unterhalb der Spule auf dem Kammerdeckel auf.

Zur Abstimmung der Hochfrequenz wird ein rein kapazitives Anpassnetzwerk verwendet. Die Spule ist in Serie geschaltet. Während ein Ende mit der HF-Quelle verbunden ist, wird die andere Seite geerdet. Der Kessel selbst ist ebenfalls geerdet.



Spektrometer

Für den Versuch steht ein 35 cm Gitter-Monochromator mit CCD-Kamera zur Verfügung. Mit Hilfe des Rechners kann das Gitter im Spektrometer gewechselt werden. Zur Auswahl stehen Gitter mit 300, 600, 1200 und 1800 Strichen/mm. Befassen Sie sich mit dem Prinzip der spektralen Zerlegung. Überlegen sie welche Vor- und Nachteile hohe, bzw. niedrige Strichzahlen haben.

Als Detektor wird eine CCD-Kamera mit 1392×1040 Pixeln und einer Pixelgröße von $6.45 \mu\text{m}$ benutzt. Diskutieren Sie die Funktionsweise der verwendeten Kamera; mögliche Detektor-Typen (Photomultiplier, 1d-/2d-CCD-Kameras).

Durchführung, Aufgabenstellung:

1. Explorieren des Kamera-Spektrometer-Systems:

- Machen Sie sich mit der Bedienung und den Möglichkeiten des Spektrometersystems vertraut! Benutzen sie hierzu die Cd-Lampe, die Sie mit dem Spiegel über das optische System auf den Eintrittsspalt abbilden.
- Identifizieren Sie die Linien der Cd-Lampe anhand der im Anhang aufgeführten Spektraltabelle!
- Untersuchen Sie die Änderungen im Auflösungsvermögen des Systems an geeigneten Linienpaaren bei verschiedenen Gittern, Einstellungen des Eintrittsspalts und Variation der Irisblende.
- Bestimmen Sie die Dispersion über den Chip anhand des Linienpaares bei 467.82 nm und 479.99 nm. Vergleichen Sie die von Ihnen bestimmte Dispersion mit der aus Spektrometerangaben erhaltenen Dispersion!

2. Spektroskopie eines Helium/Argon-Mischplasmas

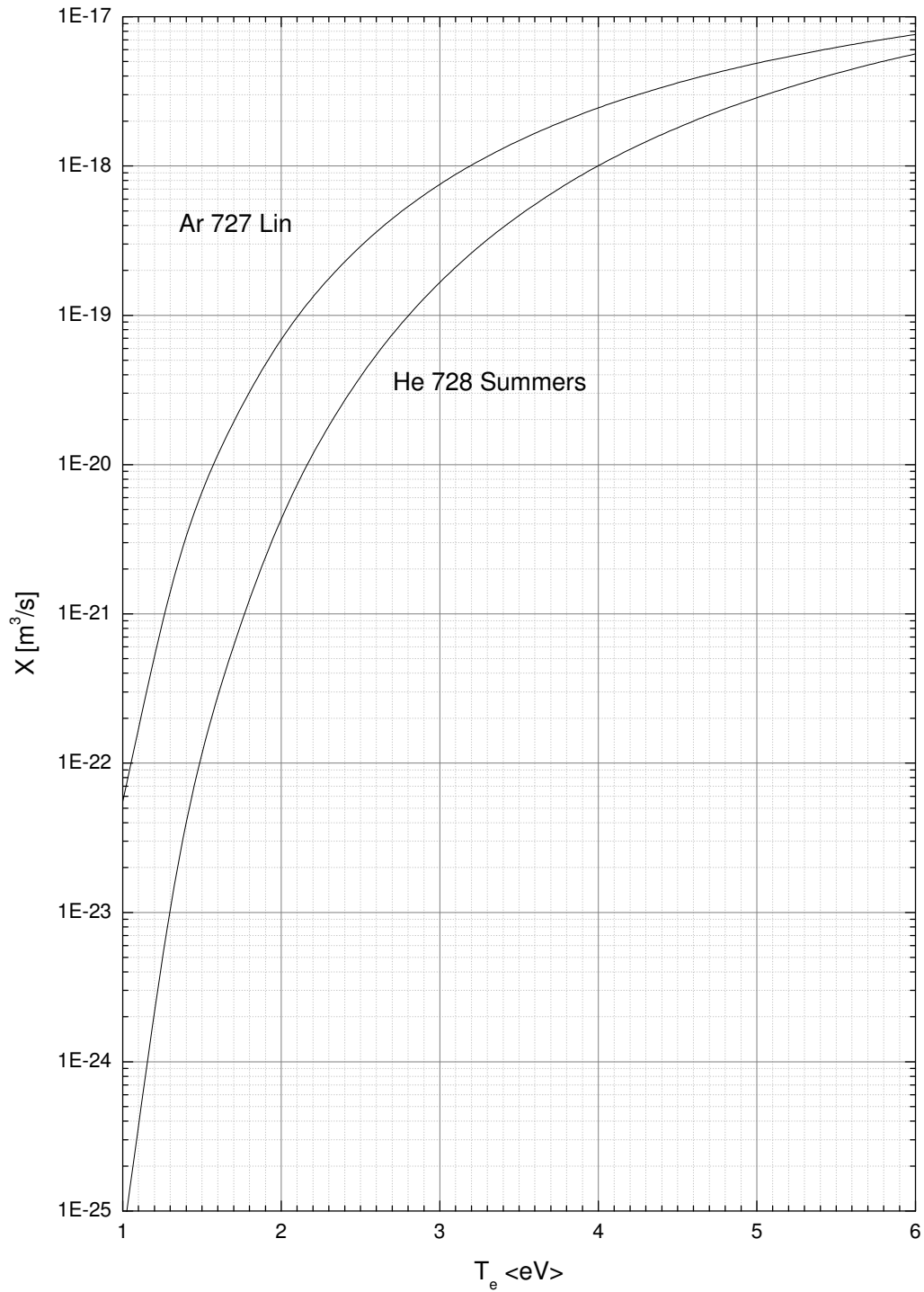
- Zündung des Plasmas mit He-Ar-Mischung (95%He/5%Ar): **(Betreuer)**
- Identifizieren Sie die Linien des Argons und des Heliums! Von welchen Elementen könnten die anderen Linien und Banden stammen? (Verunreinigungen im Gefäß)
- Untersuchen Sie die Höhenabhängigkeit im Plasma!
- Schätzen Sie die Elektronentemperatur im Plasma mit Hilfe der Argonlinie bei 727 nm und der Heliumlinie bei 728 nm ab. Benutzen Sie dazu das Koronamodell, indem Sie eine Gleichung für das Verhältnis der Linienintensitäten aufstellen! Benutzen sie die in den Graphen angegeben Emissionsratenkoeffizienten, bzw. deren Verhältnis! Schätzen Sie die Temperatur bei drei verschiedenen Drücken nach dieser Methode ab!
- Verändern Sie die Leistung und beobachten Sie dabei das Linienpaar!

3. N₂/Ar/He-Plasma

Mischen Sie dem Plasma Stickstoff zu! **(Betreuer!)**

- Beobachten Sie die Auswirkungen auf das oben untersuchte Ar/He-Linienpaar! Interpretieren Sie Ihre Beobachtung!
- Nehmen Sie die Bande des zweiten positiven System des Stickstoffs (380 nm) auf und vergleichen Sie die Messung mit den Ergebnissen aus dem Simulationsprogramms. Variieren Sie die Rotationstemperatur in der Simulation und versuchen Sie die Rotationsstemperatur und damit die Schwerteilchentemperatur im Plasma abzuschätzen!
- Beobachten Sie nun die N₂-Bande bei 380 nm und die N₂⁺-Bande bei 391 nm. Variieren Sie den Druck und die Leistung und diskutieren Sie Ihre Beobachtungen!

727/728-Raten (Stand Februar 2001)



EEDF: Maxwell

