

**Versuchsanleitung für das F-Praktikum**  
**Bestimmung von Anregungstemperaturen in**  
**einem Wasserstoff-Plasma**

T. Ludwig, V. Schulz-von der Gathen

7. Februar 2012

# 1 Versuchsanleitung

## 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Zwischen zwei wassergekühlten, kegelförmigen Kupfer-Elektroden variablen Abstands brennt ein Wasserstoffplasma. Die Existenzformen des Plasmas reichen vom nicht-thermischen Bereich bis in das Übergangsgebiet zum partiell-lokal-thermischen Gleichgewicht, d.h. von der stromschwachen bis zur stromstarken, kontrahierten Glimmentladung. Die Kontrolle des Plasmas geschieht über die Einflussgrößen Druck und Stromstärke. Der Plasmazustand in diesen Bereichen soll durch Intensitätsmessung der Balmerlinien spektroskopisch charakterisiert werden. Aus den relativen Intensitätsmessungen lassen sich bei Annahme einer Boltzmann-Verteilung die Anregungstemperaturen der einzelnen Übergänge bestimmen.

Da das Prisma eine nicht lineare Dispersion aufweist, muss die Dispersionsrelation des Prismas zunächst bestimmt werden, um diesen Effekt in der Auswertung zu berücksichtigen. Ferner weist die Empfindlichkeit des Photomultipliers einen nicht linearen Zusammenhang mit der Wellenlänge des einfallenden Lichtes auf. Daher wird als Referenz das Spektrum einer Wolframbandlampe (annähernd Schwarzkörperstrahler) aufgenommen, um aus dem Vergleich mit dem Planckschen Strahlungsgesetz eine relative Empfindlichkeit  $E(\lambda)$  des Multipliers zu bestimmen.

Außerdem soll neben den nötigen Kalibrierungsmessungen die Strom-/ Spannungscharakteristik bei konstantem Druck oder die Spannungs-/ Druckcharakteristik bei konstantem Entladungsstrom bestimmt werden.

## 1.2 Vorbereitung

Zur Vorbereitung auf diesen Versuch empfiehlt es sich, folgende Themen zu Erarbeiten (Literaturhinweise in Klammern):

- Strom/Spannungs-Charakteristik einer Gasentladung (a-e)
- Aufbau einer Glimmentladung (a-e)
- Elementarprozesse in Plasmen (a-c)
- Thermisches, lokal-thermisches und partiell-lokal-thermisches Gleichgewicht von Plasmen (e-h)
- Linienintensitäten (d-h)
- Boltzmannsche Dichteverteilung der angeregten Zustände (d-h)
- Anregungstemperatur (d-h)
- Plancksches Strahlungsgesetz, Schwarzkörperstrahlung (d-i)
- Balmer-Serie (fast jedes Lehrbuch über Atomphysik)
- Prismen-Spektrograph, Photomultiplier (i)
- Empfindlichkeit/ Kalibrierung des optischen Aufbaus (g, i)
- Dispersion eines Prismas, die förderliche Spaltbreite (i)

## 1.3 Literaturhinweise

- a) G. Francis, The Glow Discharge at Low Pressure, im Handbuch der Physik, Band XXII, Ed. S. Flügge, Springer-Verlag, Berlin, 1956 [2.1 FLÜ]
- b) Y. P. Raizer, Gas Discharge Physics, Springer-Verlag, Berlin usw., 1991 [5.11 RAI o. UMB5562]
- c) W. Rieder, Plasma und Lichtbogen, Vieweg, Braunschweig, 1967 [WQB 2261]
- d) A. M. Howatson, An Introduction to Gas Discharges, Pergamon Press, Oxford u.a., 1965 [5.11 HOW o. URB1378]
- e) W. Lochte-Holtgreven, Evaluation of Plasma Parameters, in Plasma Diagnostics, gleichnamiger Herausgeber, North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1968 [5.11 LOC]
- f) R. W. P. McWhirter, Spectral Intensities, in Plasma Diagnostic Techniques, Ed. R.H. Huddleston, S.L. Leonard, Academic Press, New York, 1965 [5.11 HUD o. UNB292]
- g) H. Edels and W. A. Gambling, Proc. Roy. Soc., A249 , 225 (1959), Excitation Temperature Measurements in a Glow and Arc Discharge in Hydrogen (s. Versuchsmappe)
- h) F. Kohlrausch, Praktische Physik, Bd. 1, Ed. G. Lutz, R. Taubert, Teubner Verlag, Stuttgart, 1968 [5.02 KOH]
- i) R. Rompe und M. Steenbeck, Ergebnisse der Plasmaphysik und Gaselektronik Bd.1, Akademie-Verlag Berlin 1967 [UNB276 - Im Zweifelsfall bei SvdG]
- j) Hutchinson, I. W., Plasma Diagnostics Techniques [5.11 HUT]
- k) Wiese, W. L. & Fuhr, J. R. Accurate Atomic Transition Probabilities for Hydrogen, Helium, and Lithium J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 38 (2009) 565
- l) NIST Datenbank für atomare Zustände und Linien ([http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html))

## 1.4 Theoretische Grundlagen

### Empfindlichkeit des Photomultipliers

Die zur Bestimmung der Empfindlichkeit des Photomultipliers herangezogene Wolfram-Referenzlampe (Halogenlampe) ist auf eine Temperatur von 2300 K bei einer Gleichspannung von 12 V kalibriert.

Die Empfindlichkeit des Photomultipliers  $E(\lambda)$  ist gegeben durch:

$$E(\lambda) = \frac{A_\lambda}{I(\lambda)} \quad (1.1)$$

wobei  $A_\lambda$  die Amplitude des gemessenen Photomultipliersignals meint und  $I(\lambda)$  für die mittels dem Planckschen Strahlungsgesetz theoretisch berechnete Intensität im Intervall  $d\lambda$  steht. Wie kann das  $d\lambda$  ersetzt werden?

### Messung der Intensitäten, Bestimmung der Temperatur

Der Quotient der Intensitäten zweier Übergänge von den angeregten Zuständen  $x$  bzw.  $y$  in das niedrigere Niveau  $z$  ist lediglich von der Anregungstemperatur  $T_{xy}$  abhängig:

$$\frac{I_{xz}}{I_{yz}} = \frac{A_{xz}g_x\lambda_{yz}}{A_{yz}g_y\lambda_{xz}} \cdot \exp\left(\frac{E_y - E_x}{kT_{xy}}\right) \quad (1.2)$$

Dabei steht  $A$  für die Einsteinschen Übergangskoeffizienten des jeweiligen Übergangs und  $g$  für die Besetzungszahlen der Dublettzustände im Wasserstoffatom, gegeben durch:

$$g_n = \sum_{l=0}^{n-1} (2l + 1) = 2n^2 \quad (1.3)$$

Aktuelle Übergangswahrscheinlichkeiten findet man z.B. bei *Wiese* (integral) und *NIST* (feinstruktur aufgelöst). Aus den Gleichungen 1.2 und 1.3 lässt sich also durch Umstellen und Einsetzen der Konstanten ein Zusammenhang zwischen der Anregungstemperatur des Übergangs und relativem Intensitätsverhältnis der beiden beteiligten Linien herleiten. Beispielhaft sei dies hier für den Übergang  $n = 3 \rightarrow n = 2$  getan:

$$T_{\alpha\beta} = \frac{7,69 \cdot 10^3}{\ln\left(0,458 \frac{I_\alpha}{I_\beta}\right)} K \quad (1.4)$$

Die Anregungstemperaturen lassen sich also über das relative Verhältnis der Linienintensitäten zweier Linien bestimmen.

## 1.5 Versuchsaufbau

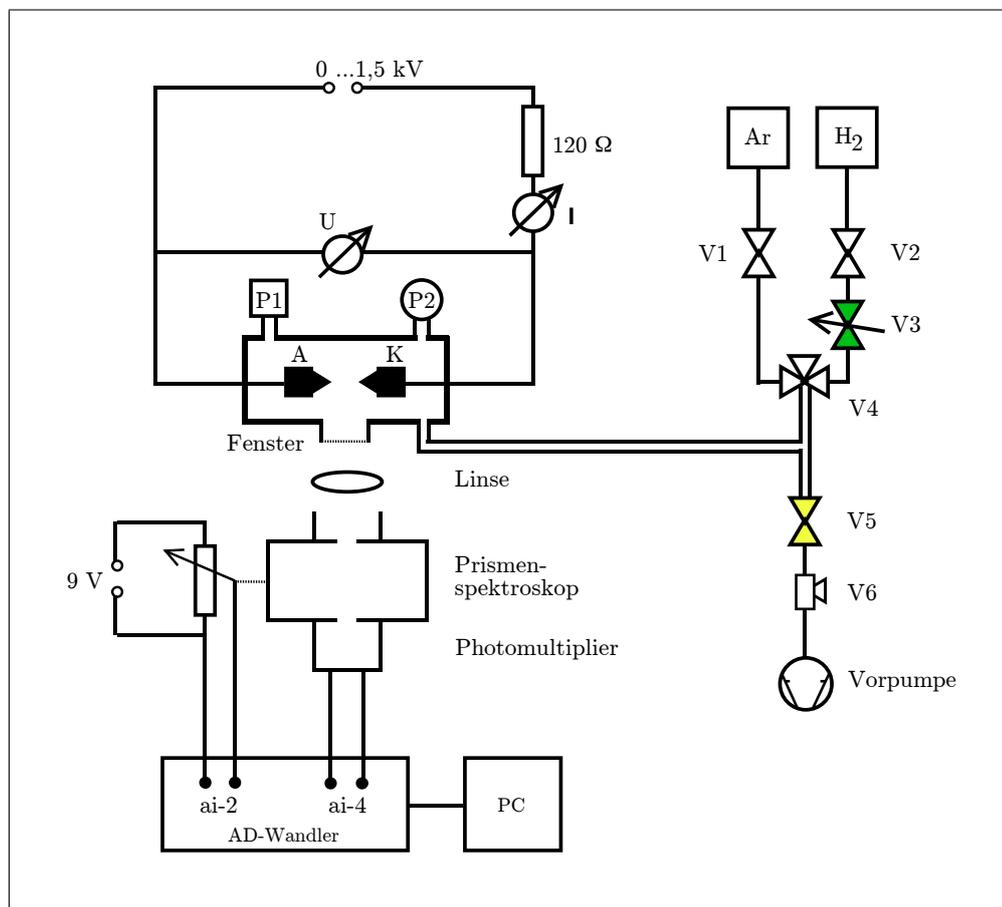


Abbildung 1.1: Skizze des Versuchsaufbaus

- V1            Absperrventil für die Argonzufuhr
- V2            Absperrventil für die Wasserstoffzufuhr
- V3            Dosierventil für die Feinregulierung des Wasserstoffflusses. Achtung! Dieses Ventil darf nur "handfest" geschlossen werden (Nadelventil)
- V4            Dreiwegeventil zur Gasauswahl bzw. Absperrung der Gassteuerungseinheit
- V5            Schnellschussventil zur Trennung der Vorpumpe von der Entladungskammer

V6	Belüftungsventil zum Belüften der Pumpe bei abgesperrtem V5
Amperemeter $I$	Am Netzgerät eingebauter Strommesser zur Bestimmung des Entladungsstromes
Voltmeter $U$	Zur Bestimmung der an den Elektroden anliegenden Spannung
ai-2	Eingang des AD-Wandlers zur Messung der Spannung am Stellpotentiometer des Prismenstisches als Äquivalent für die Prismenposition
ai-4	Eingang zur Messung der Photospannung am Multiplier
Linse	mit Brennweite $f = 120\text{mm}$

## 1.6 Allgemeine Sicherheitshinweise

Vor dem Inbetriebnahme ist unbedingt diese Versuchsanleitung zu lesen. Folgende Sicherheitshinweise sind strikt zu befolgen:



**Vorsicht: Hochspannung!**

**Explosionsgefahr bei Knallgas-Bildung!**

**Netzteil nur bei fließendem Kühlwasser einschalten!**

**Das Kühlwasser darf nicht zu heiß werden!**

**Vorpumpe nur bei geschlossenem Absperrventil V5 und geöffnetem Belüftungsventil V6 abschalten!**

## 1.7 Bedienungshinweise

### 1.7.1 Befüllen und Evakuieren der Entladungskammer, Inbetriebnahme des Entladung

Bei längerem Stillstand ist die Entladungskammer vom Vornutzer mit Argon gefüllt worden. Um den Versuch in Betrieb zu nehmen, ist folgendes Vorgehen nötig:

#### **Vor Beginn:**

- V1, V2, V3 und V4 schliessen. Gaswahlventil V4 dazu in mittlere Stellung drehen.
- Hauptventile der Gasflaschen öffnen. Hinterdruck nicht verändern.

#### **1. Abpumpen der Entladungskammer**

- V1, V2, V3 und V4 schliessen. Gaswahlventil V4 dazu in mittlere Stellung drehen.
- Schliessen des Belüftungsventils V6
- Öffnen von V5
- Pumpe einschalten

#### **2. Abschalten der Vorpumpe**

- Bei gewünschtem Druck (i.d.R.  $< 1\text{ mbar}$ ) Schnellschlussventil V5 (gelb) schließen.
- Belüftungsventil V6 öffnen, Pumpe kurz belüften lassen.
- Pumpe abschalten

**Die Entladungskammer wurde nun evakuiert, muss aber nun noch drei mal mit Wasserstoff gespült werden. Dazu sind Schritt 1 bis 3 zu wiederholen!**

### 3. Befüllen der Anlage mit Wasserstoff

- V4 in die Position "Wasserstoff" drehen.
- Absperrventil V2 öffnen.
- Wasserstofffluss mittels Dosierventil V3 *vorsichtig* regulieren. Gasfluss bei Drücken < 100 mbar zunächst auf dem eckigen Druckmesser p1 beobachten. Bei Drücken größer > 100 mbar wird der Messbereich des runden Druckmessers p2 erreicht. Achtung! Die Druckmesser sind träge! Zum Zünden der Entladung ist ein Druck von 3-8 mbar einzustellen! Nicht bei höheren Drücken zünden!

### 4. Zünden der Entladung

**Kühlwasser einschalten! Entladungsströme über 5A vermeiden!**

- Gaswahlventil V4 schliessen (Mittelposition)
- Netzgerät durch drücken des Schalters I (für ca. 3 s) einschalten. Achtung! Das Netzgerät lässt sich nur einschalten, wenn die Kurbel in Nullstellung steht. Dazu die Kurbel gegen den Uhrzeigersinn bis zum Anschlag drehen.
- Spannung langsam erhöhen, dazu Kurbel langsam im Uhrzeigersinn drehen. Ab ca. 700 - 800 V zündet die Entladung.
- Je nach Aufgabenstellung kann nun der gewünschte Druck bzw. Strom eingestellt werden.

**Nach der Durchführung des Messprogramms muss die Anlage mit Argon befüllt werden. Dazu wird wie folgt vorgegangen:**

### 5. Maßnahmen für das "Parken" des Versuches

- Gashauptventil an der Wasserstoffflasche schliessen.
- Gemäß Schritt 1 die Anlage abpumpen, jedoch bei geöffnetem V2 und V3 und Gaswahlventil V4 in Wasserstoff-Stellung. Dadurch wird das Leitungssystem bis zum Hauptventil der Gasflasche geleert.
- Gemäß Schritt 2 die Vorpumpe abstellen
- Die Kammer durch *vorsichtiges* Öffnen von V1 mit Argon bis zu einem Druck von  $p = 700$  Torr befüllen. **Keinen Überdruck erzeugen!**
- Argon-Hauptventil an der Gasflasche schliessen.
- V1 erneut öffnen. Restgas aus den Rohrleitungen und der Armatur strömt in die Kammer und es stellt sich ein Druck von ca.  $p = 760$  Torr ein.

### 1.7.2 Bedienungshinweise zum Messprogramm LABView SignalExpress

Vor dem Starten des Programms muss sichergestellt werden, dass der AD-Wandler an einen USB-Port des PCs angeschlossen ist. Das Projekt ist unter "Eigene Dateien" gespeichert und trägt den Namen Messung1.seproj. Zur Aufnahme eines Spektrums wird der Button "Aufnahme" gedrückt. Zur Beendigung kann die Aufnahme von Messwerten über die gleiche Schaltfläche gestoppt werden. Um die Messwerte zu erhalten können mittels Rechtsklick in das Diagrammfenster die Daten in die Zwischenablage exportiert werden.<sup>1</sup> Dies muss nach jeder Messung geschehen.

---

<sup>1</sup> Hinweis: Aus einem unerfindlichen Grund hängt das Programm an die eigentlichen Messwerte noch eine zusätzliche Tabelle. Diese muss vor der Auswertung natürlich entfernt werden.

## 1.8 Messprogramm

### Aufgabe 1: Charakteristika der Glimmentladung

Bestimmung der

- Strom-/ Spannungscharakteristik bei konstantem Druck (empfehlenswert  $p \approx 400$  Torr) **oder** der
- Spannungs-/ Druckcharakteristik bei konstantem Entladungsstrom

mit besonderem Augenmerk auf die einzelnen Entladungszustände. An dieser Stelle können gut Fotos für das Protokoll gemacht werden, da der Messaufbau noch nicht kalibriert ist und die verschiedenen Entladungszustände durchlaufen werden.

### Aufgabe 2: Justierung des optischen Aufbaus

Mittels der Linse wird die Entladung auf den Eintrittsspalt des Prismenmonochromator abgebildet. Dazu wird das Eintrittsrohr vorsichtig abgeschraubt, sodass die Eintrittsblende sichtbar wird. Der eigentliche Eintrittsspalt liegt jedoch etwa 1,5 cm hinter der Eingangsblende, so dass die Schärfeebene nur grob abgeschätzt werden kann. Die richtige Positionierung des optischen Aufbaus sollte bei abgenommenem Photomultiplier visuell überprüft werden.

### Aufgabe 3: Bestimmung der förderlichen Spaltbreite

Um ein optimales Intensitätssignal zu erhalten, muss die förderliche Spaltbreite des Eintritts- und Austrittspaltes bestimmt werden. Dazu wird die Beschleunigerspannung des Photomultipliers auf  $U = 750\text{V}$  gestellt. Bei weit geöffnetem Austrittsspalt wird der Eingangsspalt zunächst so weit geöffnet, dass der Sättigungsbereich des Photomultipliers erreicht wird, wenn die  $H_\alpha$  - Linie in den Ausgangsspalt abgebildet wird. Der Eintrittsspalt wird daraufhin so weit geschlossen, bis die Amplitude der Linie bei etwa einem Drittel der maximalen Intensität liegt. Dann wird der Ausgangsspalt so weit geschlossen, dass die Spektrallinien vollständig aufgelöst werden. Hinweis: Das am AD-Wandler anliegende Signal sollte nicht über 10 V liegen!

### Aufgabe 4: Bestimmung der Dispersionsrelation $\lambda(U_{\text{Prisma}})$ mittels der bekannten Balmerlinien

Um einen Zusammenhang zwischen der Prismenposition, die über die Spannung  $U_{\text{Prisma}}$  gemessen werden kann, und der momentan in den Austrittsspalt abgebildeten Wellenlänge zu bestimmen, wird ein Spektrum der Entladung aufgenommen. Anhand der bekannten Wellenlängen der Balmerlinien kann den Signalen eine Position im Spektrum zugeordnet werden, siehe Tab. 1.1. Daraus kann die Dispersionsrelation  $\lambda(U_{\text{Prisma}})$  durch anfitten eines Polynoms bestimmt werden.

**Tabelle 1.1:** Die Balmerserie

Linie	$\lambda/nm$
$H_\alpha$	656,28
$H_\beta$	486,13
$H_\gamma$	434,05
$H_\delta$	410,17

Diese Aufgabe kann prinzipiell auch mit der nachfolgenden Messung erledigt werden.

### Aufgabe 5: Bestimmung der relativen Intensitäten der Balmerlinien bei $p = const.$

Bei konstanten Drücken und variablen Strömen sollen die relativen Intensitäten der Balmerlinien bestimmt werden. Es hat sich als geschickt erwiesen, diese Messungen bei Drücken von  $p \approx 250$  Torr,  $p \approx 500$  Torr und  $p \approx 600$  Torr bei einer Variation des Entladungsstroms von  $I = 1...5$  A durchzuführen. Führen Sie bei jedem Messpunkt zwei Messungen durch! Behandeln Sie diese Vorgehen in ihrer Fehlerdiskussion. Nehmen Sie bei jedem Druck mindestens sechs Spektren auf!

**Aufgabe 6: Bestimmung der relativen Intensitäten der Balmerlinien bei  $I = const.$**

Bei einem konstanten Strom von  $I = 2A$  bzw.  $I = 4A$  sollen die relativen Intensitäten der Balmerlinien bestimmt werden. Der Druck wird dabei kleinschrittig im Bereich  $p = 200...600$  Torr variiert. Nehmen Sie auch hier an jedem Messpunkt zwei Messungen auf.

**Aufgabe 7: Aufnahme des Spektrums der Wolframlampe**

Zur Kalibrierung des gesamten optischen Aufbaus wird das Spektrum einer Wolfram-Referenzlampe aufgenommen. Dazu wird die Entladungskammer so weit verschoben, dass der Glühwendel an die Position der Entladung platziert werden kann (Ausgangsposition markieren!). Der Glühwendel der Wolframlampe muss in den Eingangsspalt abgebildet werden! Der optische Aufbau sollte möglichst nicht verändert werden. An dem stabilisiertem Netzgerät wird die Spannung **langsam** auf 12 V eingestellt. Beim Abschalten ist ebenfalls **langsam** runterzuregeln! Wichtig: Die Wolfram-Referenzlampe sollte sich mindestens 5 min einbrennen. Nun kann das Spektrum aufgenommen werden.