Anleitung zum Versuch FPI-1: Stern–Gerlach–Experiment

1 Zielsetzung des Experiments

Dieser Versuch soll Sie mit den Methoden der Erzeugung und des Nachweises von Atomstrahlen vertraut machen und gleichzeitig in die Grundlagen der Hochvakuumtechnik einführen. Konkrete Zielsetzung sind die Demonstration der Richtungsquantelung atomarer magnetischer Momente in einem äußeren Magnetfeld und die Bestimmung des Bohrschen Magnetons aus der Messung der Aufspaltung eines Kalium-Strahles in einem inhomogenen Magnetfeld.

2 Vorbereitung

Theoretische Grundlagen: quantenmechanische Addition von Drehimpulsen (Vektoradditionsmodell), Kopplung von Elektronenspin S und Bahndrehimpuls L, Atome im Magnetfeld, Berechnung des magnetischen Momentes eines Atoms, der Landé'sche g–Faktor.

Atomstrahltechnik: Aufbau einesAtomstrahlofens, Schmelzpunkt und Dampfdruckkurve von Kalium, Maxwell'sche Geschwindingkeitsverteilung, Knudson–Bedingung für die Querdimension des Atomstrahls, Geschwindigkeitsverteilung im Atomstrahl, Aufspaltung eines Kaliumstrahles in einem inhomogenen Magnetfeld, analytische Darstellung des Magnetfeldes zweier paralleler Drähte, Aufbau und Wirkungsweise des Langmuir–Taylor–Detektors, räumliche Intensitätsverteilung des Atomstrahles bei eingeschaltetem Feld, analytischer Zusammenhang der Aufspaltung mit dem Bohrschen Magneton, Korrektur auf die Breite des Strahls ohne Magnetfeld nach dem Verfahren von KUSCH und HUGHES.

Vakuumtechnik: Funktion und prinzipielle Wirkungsweise einer mechanischen Pumpe (Vorvakuum, $p \ge 1$ Pa (10^{-5} bar)) und einer Öldiffusionspumpe (Hochvakuum, $p \le 1$ Pa), Grundlagen der kinetischen Gastheorie, speziell: Diffusion, Wärmeleitung in verdünnten Gasen, der Begriff der mittleren freien Weglänge (im Vergleich zu den Gefäßdimensionen).

Vakuummesstechnik: Funktion und Wirkungsweise eines Wärmeleitvakuummeters (Vorvakuum) und eines Ionisationsmanometers (Hochvakuum) nach dem Bayard–Alpert–Prinzip.

3 Literatur

- H. Vogel: Gerthsen Physik
- J. Yarwood: High Vakuum Technique
- Ramsey: Molecular Beams
- P. Kusch, V.W. Hughes: Atomic and Molecular Beam Spectroscopy (in Flügge: Handbuch der Physik, Band XXXVII/1, S.35ff)
- M.Böhm, A. Scharmann: Höhere Experimentalphysik

4 Durchführung des Versuchs

4.1

Machen Sie sich als Erstes mit den Elementen der experimentellen Anordnung vertraut. Da ein gutes Vakuum entscheidend für den Erfolg der Messungen ist, laufen die Vakuumpumpen an der Apparatur durchgehend. Überprüfen Sie zunächst das Vakuum mit Hilfe des Ionisationsvakuummessgerätes. Wenn Sie einen Druck $p \leq 1.3 \times 10^{-3}$ Pa (10^{-5} Torr) messen, können Sie mit dem Experiment beginnen (warum muss der Druck so niedrig sein?)

Füllen Sie die Kühlfalle mit flüssigem Stickstoff (welche Funktion hat die Kühlfalle?). Achten Sie während des gesamten Versuches darauf, dass diese mit flüssigem Stickstoff gefüllt bleibt. Sie sollten hierzu den Flüssigkeitsstand stündlich prüfen.

4.2

Stellen Sie, soweit erforderlich, die elektrische Schaltung zum Betrieb des Langmuir–Taylor–Detektors her. Schalten Sie das Elektrometer, die Kollektorvorspannung (ca. -20 V) und den Heizstrom für den Heizdraht ein.

Das Einschalten des Heizstromes ist die risikoreichste Manipulation bei Beginn des Versuches. Durch einen zu starken Heizstrom kann der 0.1 mm dünne Wolframdraht durchbrennen. Hierdurch wäre eine Durchführung des Experimentes am selben Tag nicht mehr möglich, da ein Eingriff in die Apparatur den Zusammenbruch des Vakuums zur Folge hat. Zur Erreichung eines erneuten, guten Vakuums muss mind. 24 Stunden gepumpt werden. Schalten Sie daher den Heizstrom nur im Beisein des Assistenten ein. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt (Januar 2000) ist ein Heizstrom von 1.0 A ein guter Startwert. In der langen Zeit zwischen den Versuchen im Praktikum setzen sich auf der Oberfläche des Wolframdrahtes Atome und Moleküle aus dem Restgas in der Vakuumapparatur ab. Diese sollten vor Begin der Messungen abgedampft werden. Erhöhen Sie daher die Temperatur für ca. 10 Minuten langsam mit dem Heizstrom ($I_{max} = 1.3$ A!).

4.3

Schalten Sie den Atomstrahlofen ein. In der Aufheizphase sollte ein Strom von 5 A nicht überschritten werden. Zur Messung der Ofentemperatur wird ein Eisen–Konstantan–Thermoelement verwendet, wobei der Referenzpunkt durch ein Eis–Wassergemisch gegeben wird (siehe Tabelle 5). Ist eine Temperatur von 180 °C erreicht, wird der Heizstrom reduziert (auf ca. 3 A), damit sich der Ofen auf seine Betriebstemperatur von ca. 170 °C abkühlen kann. Welche Maximaltemperatur sollten Sie auf keinen Fall überschreiten, um einen brauchbaren Atomstrahl zu erzeugen, wenn die Breite der Strahlaustrittsöffnung des Ofens 0.25 mm beträgt?

Während der Abkühlphase können Sie mit der Strahlsuche beginnen.

4.4

Sobald der Ofen auf eine konstante Temperatur gebracht ist, beginnen Sie mit der Messung der Detektorcharakteristik:

– Bestimmen Sie zuerst den Detektorstrom als Funktion der Kollektorspannung. Stellen Sie dann für die Kollektorspannung einen geeigneten Wert ein, den Sie bei den nachfolgenden Messungen beibehalten.

– Variieren Sie nun die Temperatur des Heizdrahtes und tragen Sie den Detektorstrom als Funktion des Heizstromes auf. Tragen Sie ebenfalls das Signal–Untergrund–Verhältnis als Funktion des Heizstromes auf. Dabei ist das Signal–Untergrund–Verhältnis definiert als das Verhältnis aus Detektorstrom mit Atomstrahl zu Detektorstrom ohne Atomstrahl. Der Atomstrahl kann mit Hilfe einer Schwingblende an der Kühlfalle von außen mit einem Permanentmagneten ein- und ausgeschaltet werden.

4.5

Wenn Sie den Arbeitspunkt des Langmuir-Taylor-Detektors eingestellt haben, beginnen Sie mit der eigentlichen Messung. Bestimmen Sie zunächst die räumliche Intensitätsverteilung des Atomstrahls ohne Magnetfeld. Vergleichen Sie die gemessene Halbwertsbreite mit Ihrer Erwartung aufgrund der Breite von Ofen- und Kollimatorblende und ihrem Abstand vom Detekor. Beachten Sie dabei den Einfluss der Restmagnetisierung im Magneten, sowie möglichen Untergrundstrom.

Bestimmen Sie nun die räumliche Intensitätsverteilung des Atomstrahles für vier verschiedene Magnetfelder. Die Stärke des Feldes sollte so gewählt werden, dass eine Aufspaltung deutlich messbar ist (auch die Detektorreichweite beachten).

4.6

Wenn Ihnen noch Zeit geblieben ist, sollten Sie die Intensität des unabgelenkten Atomstrahles als Funktion der Ofentemperatur bestimmen. Versuchen Sie, aus dieser Messung den Dampfdruck des Kaliums als Funktion der Temperatur zu bestimmen (nur grobe Ergebnisse möglich).

5 Auswertung

Bestimmen Sie aus Ihren Messungen das magnetische Moment des Kaliumatoms. Die Abmessungen der Apparatur können Sie den beiliegenden Zeichnungen (siehe Abb. 5, 5 und 5), das Magnetfeld am Strahlort der Tabelle 5 entnehmen. Wenden Sie das im Handbuch der Physik von KUSCH und HUGHES beschriebene Korrekturverfahren für die Strahlablenkung an. Benutzen Sie zur Bestimmung des Korrekturfaktors das unten angegebene Diagramm. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit und ohne Korrektur miteinander.



°C	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
mV	5.81	6.36	6.90	7.45	8.00	8.56	9.11	9.67	10.22	10.78

Der Referenzpunkt ist 0 ° C (schmelzendes Eis).

Tabelle 1: Thermospannung eines Eisen-Konstantan-Thermoelementes



Abbildung 1: Schematischer Aufbau der in einer Vakuumkammer eingebauten STERN-GERLACH-Apparatur



 $d_1 = 10.16$ cm, Länge der Polschuhe des Magneten $d_2 = 50.50$ cm, Entfernung vom Austritt bis zum Detektor

Abbildung 2: Schematische Darstellung der Flugbahn eines Atoms zur Berechnung der Ablenkung S

Strom [A]	0	0.21	0.41	0.61	0.81	1.01	1.21	1.41
B [Tesla]	0.0439	0.1414	0.2722	0.4117	0.5463	0.6702	0.7824	0.8702

Tabelle 2: Magnetische Induktion am Strahlort



 $r_1 = 0.554$ cm, $r_2 = 0.635$ cm, $h_1 = 0.177$ cm, $h_2 = 0.217$ cm P = Strahlort, Q = bel. Feldpunkt mit den Entfernungen l_1, l_2 vom Schnittpunkt der beiden den Zylindern angehörenden Kreisen

Abbildung 3: Schematischer Schnitt durch die Polschuhanordnung



Abbildung 4: Schematische Seitenansicht des LANGMUIR-TAYLOR-Detektors