

Anleitung zum Versuch FP-1:

Stern–Gerlach–Experiment

1 Zielsetzung des Experiments

Das Stern–Gerlach Experiment demonstriert die Richtungsquantelung von Drehimpulsen bzw. magnetischen Momenten im äußeren Magnetfeld. Das Bohrsche Magnetons bzw. der Landé-Faktors des Elektrons werden aus der Messung der Aufspaltung eines Kalium-Strahles in einem inhomogenen Magnetfeld gemessen. Der Versuch macht Sie mit der Erzeugung und dem Nachweises von Atomstrahlen vertraut und führt in die Grundlagen der Hochvakuumtechnik ein. Für die Auswertung werden nichtlineare Fits benötigt.

2 Vorbereitung

- **Theoretische Grundlagen [1]:** quantenmechanische Addition von Drehimpulsen (Vektoradditionsmodell), Kopplung von Elektronenspin S und Bahndrehimpuls L , Atome im Magnetfeld, Berechnung des magnetischen Momentes eines Atoms, Landé'sche g -Faktor. Vgl.
- **Atomstrahltechnik [2, 3]:** Aufbau eines Atomstrahlrofens, Schmelzpunkt und Dampfdruckkurve von Kalium, Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung, 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.
- **Vakuumtechnik [4]:** Funktion und prinzipielle Wirkungsweise einer mechanischen Pumpe (Vorvakuum, $p \geq 1 \text{ Pa}$ (10^{-5} bar)) und einer Turbopumpe (Hochvakuum, $p \leq 1 \text{ Pa}$), Grundlagen der kinetischen Gastheorie: Diffusion, Wärmeleitung in verdünnten Gasen, der Begriff der mittleren freien Weglänge (im Vergleich zu den Gefäßdimensionen).
- **Vakuummessstechnik [4]:** Funktion und Wirkungsweise eines Wärmeleitvakuummeters (Vorvakuum) und eines Ionisationsmanometers (Hochvakuum) nach dem Bayard–Alpert–Prinzip.

3 Durchführung des Versuchs

3.1 Orientierung

Machen Sie sich mit der experimentellen Anordnung vertraut. Das Experiment basiert auf der Ealing-Daybell Stern-Gerlach Apparatur [5].

3.2 Vakuum

Ein gutes Vakuum ist entscheidend für den Erfolg der Messungen, deshalb werden die Vakuumpumpen der Apparatur vor den Versuchen angeschaltet. Überprüfen Sie zunächst das Vakuum mit Hilfe des Messgerätes. 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.

3.3 Langmuir–Taylor–Detektor

Stellen Sie, soweit erforderlich, die elektrische Schaltung zum Betrieb des Langmuir–Taylor–Detektors her.

Schalten Sie das Elektrometer, die Kollektorsvorspannung (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. Dann ist eine Durchführung des Experimentes am selben Tag nicht mehr möglich, da die Apparatur geöffnet werden muss. Um ein gutes Vakuum zu erreichen muss ca. 24 Stunden gepumpt werden. Schalten Sie daher den Heizstrom nur im Beisein des Assistenten ein. Ein Heizstrom von 1.0 A ist 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 Beginn der Messungen abgedampft werden. Erhöhen Sie daher die Temperatur für ca. 10 Minuten langsam mit dem Heizstrom (I_{max} 1.3 A!).

3.4 Atomstrahlofen

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 1). Eis gibt es im Wachraum auf Ebene G11. Ist eine Temperatur von 170° C erreicht, wird der Heizstrom auf ca. 3 A reduziert. Der Ofen soll auf einer konstanten Betriebstemperatur von ca. 170°C betrieben werden. Welche Maximaltemperatur sollten Sie auf keinen Fall überschreiten, um einen brauchbaren Atomstrahl zu erzeugen, wenn die

Breite der Strahlaustrittsöffnung des Ofens 0.2 mm beträgt?
Während der Abkühlphase können Sie mit der Strahlsuche beginnen.

3.5 Detektorcharakteristik

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. Das ist 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. Wählen Sie dann den optimalen Arbeitspunkt! Jetzt beginnen Sie mit der eigentlichen Messung.

3.6 Auflösung und Aufspaltung

Entmagnetisieren Sie den Magneten der Apparatur (mehrfaches Umpolen der Spulen und reduzieren des Stroms). 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 Detektor. 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. Beachten Sie die maximale Verschiebbarkeit des Detektors!

3.7 Dampfdruck von Kalium

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. Es nur grobe Ergebnisse möglich. Achten Sie auf eine geeignete Darstellung der Daten!

4 Auswertung

Bestimmen Sie aus Ihren Messungen das magnetische Moment des Kaliumatoms und den Landéfaktor des Elektrons, indem Sie annehmen, dass der Spin des Kaliums durch den Elektronspin gegeben ist. Die Abmessungen der Apparatur können Sie den beiliegenden Zeichnungen (siehe Abb. 2, 3 und 4), das Magnetfeld am Strahlort der Tabelle 2 entnehmen.

Zur einfachen Aswertung können Sie das im Handbuch der Physik von *Kusch* und *Hughes* beschriebene Korrekturverfahren für die Strahlablenkung anwenden. Benutzen Sie dann zur Bestimmung des Korrekturfaktors das unten angegebene Diagramm. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit und ohne Korrektur miteinander.

Besser ist ein analytischer Fit der Messwerte, in den neben B-Feld und magnetischem Moment die zugrundeliegende Maxwellverteilung der Kaliumatome, die Austrittswahrscheinlichkeit aus dem Ofen ($\propto v$) und die gemessene Auflösung der Apparatur eingehen. Dieses Vefahren fhrt zu statistisch wesentlich genaueren Ergebnissen. Gehen Sie für die Auswertung wie folgt vor:

1. Fitten Sie zunächst die Auflösung der Apparatur, d.h. die Intensitätsverteilung ohne Magnetfeld, mit einer Kombination aus Normalverteilungen mit gleichem Zentrum.
2. Transformieren Sie die erwartete Geschwindigkeitsverteilung im Atomstrahl in die erwartete Intensittsverteilung am Strahlort. Benutzen Sie hier die Erhaltung der Intensitt (Wahrscheinlichkeit) und die entsprechenden Jacobi ableitungen. Bercksichtigen Sie die erwartete Ablenkung im inhomogenen “Zweidraht” Magnetfeld.
3. Die gemessenen Verteilungen mit Magnetfeld können Sie jetzt als Faltung der im vorigen Punkt 2 berechneten Intensitätsverteilung mit der erwarteten Auflösung aus 1 beschreiben bzw. fitten. Hierfür ist das Levenberg Marquard Verfahren im Fit Vorbedingung. Vermeiden Sie beim Programmieren Singularitäten (z.B. $\lim_{z \rightarrow 0} 1/z$) der Fitfunktionen. Die Faltung lässt sich nicht (?) analytisch vornehmen, eine einfache numerische Approximation der Normalverteilung an Stützstellen ist jedoch ausreichend. Wählen Sie im Fit geeignete Startwerte der Parameter.

Diskutieren Sie bei Problemen mit dem Assistenten!

Literatur

- [1] Lehrbücher der Experimental- und Atomphysik.
- [2] N.F. Ramsey, Molecular Beams.
- [3] P. Kusch und V.W. Hughes, Atomic and Molecular Beam Spectroscopy (in Flügge: Handbuch der Physik, Band XXXVII/1, S.35ff im Downloadbereich).
- [4] Lehrbücher der Vakuumtechnik z.B. J. Yarwood, High Vacuum Technique.
- [5] Die Beschreibung finden Sie im Downloadbereich des FP. Die Apparatur ist vergleichsweise alt (1969). Heute wird meist eine Apparatur von Phywe benutzt. Dazu gibt es eine umfangreiche, jedoch nicht gut geschriebene Anleitung.

A Bilder und Tabellen

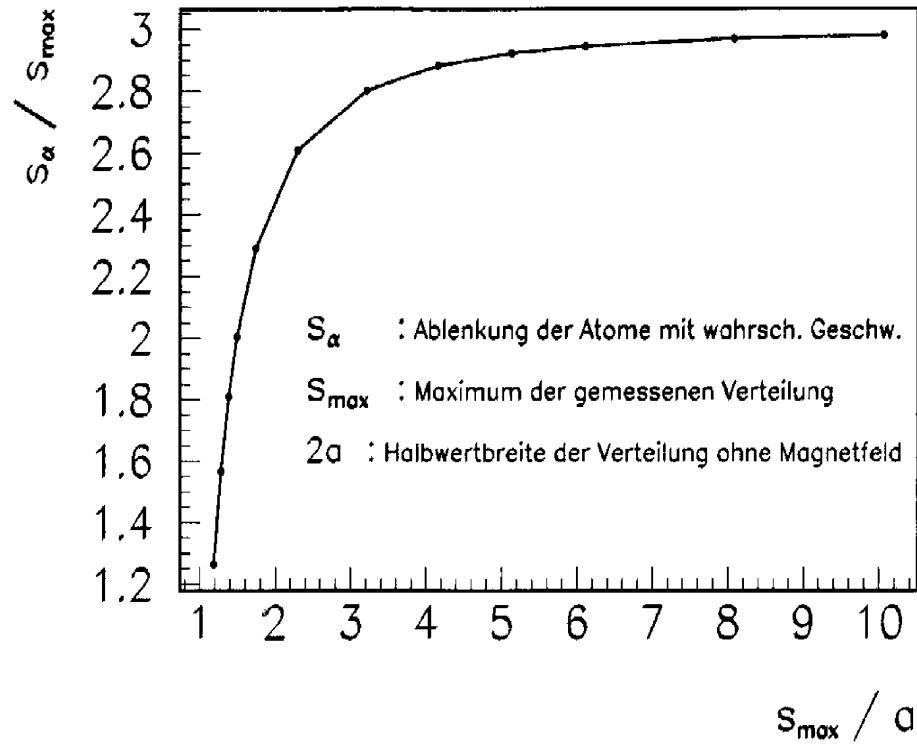


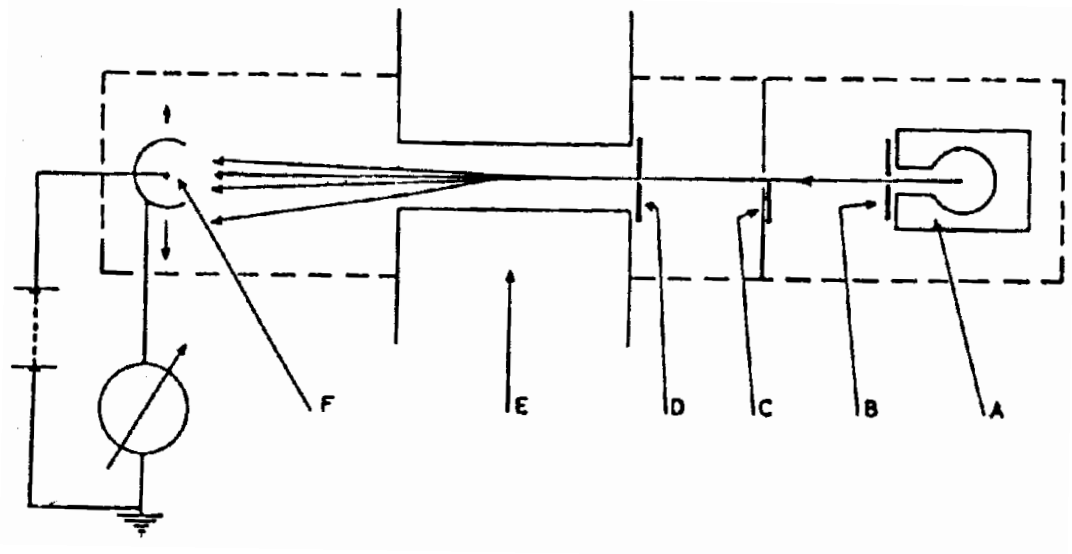
Abbildung 1: Kusch-Hughes Korrekturfunktion

Tabelle 1: Thermospannung eines Eisen–Konstantan–Thermoelementes

°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 Referenztemperatur ist 0 °C (schmelzendes Eis).

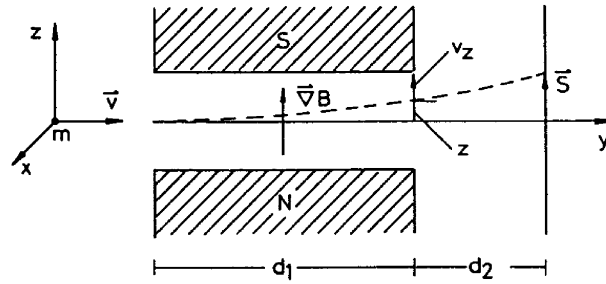
Abbildung 2: Schematischer Aufbau der STERN–GERLACH–Apparatur.



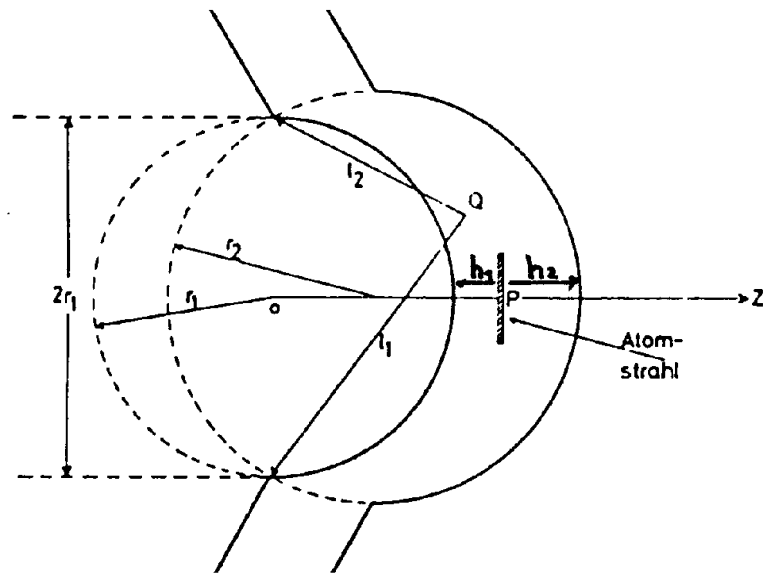
A: Atomstrahlofen
 B: Ofenblende (0.25 mm)
 C: Kühlfalle mit Schwingblende
 B → D = 26.34 cm

D: Strahlblende (0.11 mm)
 E: Polschuhe des Magneten
 F: Langmuir–Taylor–Detektor
 D → F = 60.66 cm

Abbildung 3: Schematische Darstellung der Flugbahn eines Atoms zur Berechnung der Ablenkung S



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



$r_1 = 0.554$ 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 5: Schematische Seitenansicht des LANGMUIR-TAYLOR-Detektors

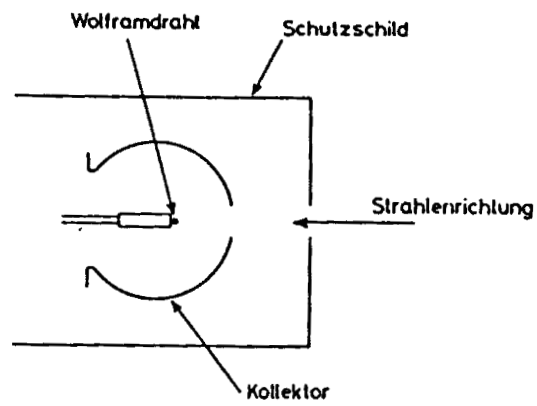


Tabelle 2: Magnetische Induktion am Strahlort

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