

# Anleitung zum Stern–Gerlach–Versuch

K. Hamacher 13.2.2018

## 1 Zielsetzung des Versuchs

In diesem Versuch wird das klassische Experiment von Stern und Gerlach zur Richtungsquantelung im Magnetfeld mit einem Kalium-Strahl wiederholt. Der Versuch verbindet Elemente der Quantenmechanik (Richtungsquantelung, Landé-Faktor des Elektrons), der Thermodynamik und Statistik (Boltzmann-Faktor, Clausius-Clapeyron Gln., Maxwell-Verteilung), der Elektrodynamik (inhomogene B-Felder und ihre Realisierung mit Ferromagneten) mit mehr experimentellen Aspekten der Atomstrahltechnik (Eigenschaften und Messung eines Atomstrahls) und der Vakuumtechnik. In der Datenanalyse wird die experimentelle Auflösung der Apparatur im Fit des Landé-Faktors explizit berücksichtigt.

## 2 Vorausgesetzte Kenntnisse und Vorbereitung

**Theoretische Grundlagen:** Spin  $S$ , Bahndrehimpuls  $L$  und magnetisches Moment, Atome im Magnetfeld, magnetisches Moment eines Atoms, Landé  $g$ -Faktor.

**Atomstrahltechnik:** 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, Orts-Intensitätsverteilung des Atomstrahles ohne und mit eingeschaltetem Feld, analytischer Zusammenhang der Aufspaltung mit  $g$ -Faktor, Berücksichtigung der (gemessenen) exp. Auflösung für die Messung der Ortsverteilung des Atomstrahls mit Magnetfeld.

**Vakuumtechnik:** Funktion einer mechanischen (Membran-) Pumpe (Vorvakuum,  $p \geq 1 \text{ Pa}$  ( $10^{-5} \text{ bar}$ )) und einer Turbopumpe (Hochvakuum,  $p \leq 1 \text{ Pa}$ ), Grundlagen der kinetischen Gastheorie, mittlere freien Weglänge (Vergleich zu den Gefäßdimensionen). Funktion und Wirkungsweise eines Wärmeleitvakuummeters (Vorvakuum) und eines Ionisationsmanometers (Hochvakuum)

**Literatur** Zur Vorbereitung wird empfohlen, das Musterprotokoll zu lesen. Weitere Informationen finden sich in den Lehrbüchern der Atomphysik, M. Wutz, Handbuch Vakuumtechnik: Theorie und Praxis, Springer, N. Ramsey, Molecular Beams, Oxford 1986, P. Kusch, V.W. Hughes: Atomic and Molecular Beam Spectroscopy, Handbuch der Physik / Encyclopedia of Physics, Springer, Stern–Gerlach Paket auf Moodle

## 3 Durchführung des Versuchs

### 3.1 Vorbereitungen

Machen Sie sich mit den Elementen der experimentellen Anordnung vertraut. Ein gutes Vakuum ist entscheidend für den Erfolg der Messungen. Überprüfen Sie zunächst das Vakuum mit Hilfe des Ionisationsvakuummessgerätes. Wenn Sie einen Druck  $p \leq 10^{-5}$  hPa messen, können Sie mit dem Experiment beginnen (warum muss der Druck so niedrig sein?)

Füllen Sie die Kühlfalle mit flüssigem Stickstoff (Nur mit Schutzbrille! Welche Funktion hat die Kühlfalle?). Achten Sie während des gesamten Versuches darauf, dass sie mit flüssigem Stickstoff gefüllt ist.

Überprüfen Sie die elektrische Schaltung des Langmuir–Taylor–Detektors. Schalten Sie das Elektrometer und die Kollektorsvorspannung (ca. -20 V) 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 des Langmuir–Taylor–Detektors durchbrennen. Dann ist eine Durchführung des Experimentes nicht mehr möglich, da ein Eingriff in die Apparatur den Zusammenbruch des Vakuums zur Folge hat. Für eine guten Vakuums muss ca. 24 Stunden gepumpt werden. Schalten Sie den Heizstrom nur im Beisein des Assistenten ein. Ein Heizstrom von 0.9 A ist ein guter Startwert. Auf der Oberfläche des Wolframdrahtes setzen sich Atome und Moleküle aus dem Restgas der Vakuumapparatur ab. Diese müssen vor Beginn der Messungen abgedampft werden. Erhöhen Sie daher die Temperatur für ca. 10 Minuten langsam auf einen maximalen Heizstrom ( $I_{max} \lesssim 1.3$  A!).

Entmagnetisieren Sie den Elektromagneten des Experiments sehr sorgfältig!

### 3.2 Der Atomstrahl

Schalten Sie den Atomstrahlöfen ein. Der Ofen verfügt über vier  $5\Omega$  Heizwiderstände mit maximal je 5 W Verlustleistung (in Luft). Im Vakuum sollte eine Verlustleistung von je 2 W nicht überschritten werden. Die Temperatur des Ofens wird mit einem PT100-Widerstand gemessen. Der Ofen soll zunächst auf  $180^\circ\text{C}$  geheizt werden. Dann wird die Temperatur auf  $170^\circ\text{C}$  gesenkt. Die ungefähre Kennlinie des Ofens findet sich in Bild 1. Die genaue Temperatur hängt vom Druck und der Umgebungstemperatur ab. Wenn Kalium austritt verfärbt sich der Blech der Kühlfalle blau-violett. Der Strahlshutter bleibt zunächst geschlossen (Öffnen und Schließen mit Permanentmagnet).

Welche Maximaltemperatur sollten Sie auf keinen Fall überschreiten, um einen brauchbaren Atomstrahl zu erzeugen, wenn die Breite der Strahlaustrittsöffnung des Ofens 0.15 mm beträgt?

Während der Abkühlphase können Sie mit der Strahlsuche beginnen. Stellen Sie den Detektor ins Strahlmaximum und schließen Sie den Shutter.

### 3.3 Einstellung des Langmuir–Taylor–Detektors

Sobald der Ofen auf eine konstante Temperatur gebracht ist, beginnen Sie mit der Messung der Detektorcharakteristik: Bestimmen Sie zuerst für eine Kollektorspannung von 20V den Detektorstrom als Funktion der Temperatur des Heizdrahts. Variieren Sie dazu den Heizstrom im Bereich 0,9-1V ohne Strahl anschließend mit Strahl. Tragen Sie Ihre Messungen und das Signal zu Rauschverhältnis auf und bestimmen Sie einen geeigneten Arbeitspunkt.

Messen Sie den Detektorstrom (mit Strahl) als Funktion der Kollektorspannung. Bestimmen Sie einen geeigneten Arbeitspunkt. Diskutieren Sie Ihre Wahl mit dem Assistenten.

Überprüfen Sie soweit möglich die mechanischen Abstände der Apparatur.

### 3.4 Messung des Strahlprofils und der Aufspaltung

Bereiten Sie für diesen Punkt Tabellen vor, mit denen Sie Ihre Messung sofort graphisch darstellen können (z.B. LIBREoffice ...). Abszisse von 0.9 bis 3.4 mit Schrittweite 0.05.

Bestimmen Sie die räumliche Intensitätsverteilung des Atomstrahls ohne Magnetfeld. Messen Sie grundsätzlich über das maximale Ortsintervall (maximale Detektorverschiebung). Wählen Sie für den Detektorstrom einen geeigneten Messbereich!

Vergleichen Sie die gemessene Halbwertsbreite mit Ihrer Erwartung aufgrund der Breite von Ofen- und Kollimatorblende (0,1 mm) und ihrem Abstand vom Detektor. Beachten Sie einen möglichen Untergrundstrom. Ein Skalenabschnitt auf der Mikrometerschraube beträgt  $1/10''$ .

Bestimmen Sie die räumliche Intensitätsverteilung des Atomstrahles für vier verschiedene Magnetfelder. Die Stärke des Feldes soll so gewählt werden, dass eine Aufspaltung deutlich messbar ist (beachten Sie die mögliche Detektorverschiebung). Welcher Maximalstrom ist sinnvoll? Kurzzeitig verträgt der Magnet der Apparatur bis zu 2A. Schließen Sie den Shutter und überprüfen Sie Ihre Messergebnisse! Dürfen Sie den Magnetstrom beliebig variieren?

### 3.5 Messung des K–Dampfdrucks

Heizen Sie den Ofen auf bis zu 190°C und entmagnetisieren Sie den Magneten. Stellen Sie den Detektor ins Strahlmaximum. Öffnen Sie den Shutter und schalten Sie die Ofenheizung ab. Messen Sie die Intensität des Atomstrahles als Funktion der Ofentemperatur bis das Rauschen dominiert. Versuchen Sie, aus dieser Messung die Verdampfungs-Enthalpie von Kaliums zu bestimmen. Bei hoher Temperatur gibt es Abweichungen von der Erwartung (Clausius Clapeyron Gln.) durch Reibung, bei kleiner Temperatur durch Rauschen des Detektors.

## 4 Auswertung

Verifizieren Sie aus der letzten Messung die maximal sinnvolle Arbeitstemperatur des Atomstrahlofens. Fitten Sie dazu einen Clausius-Clapeyron Ansatz an die Daten. Stellen

Sie den Strahlstrom exponentiell dar. Unabhängige Variable ist  $\beta = \frac{1}{kT}$ . Wählen Sie ein Koordinatensystem, das im Zentrum Ihrer Daten liegt! Berücksichtigen Sie das Detektorrauschen. Was erwarten Sie als Ergebnis? In welchem Bereich ist der oben beschriebene Ansatz nicht mehr gültig?

Entnehmen Sie für die Bestimmung des Landé-Faktors des Elektrons die Maße des Experiments den Zeichnung (siehe Abb. 2, 3 und 4) und das Magnetfeld am Strahlort der Tabelle 2. Überprüfen Sie die Maße soweit möglich.

Bestimmen Sie den Landé-g-Faktor des Elektrons indem Sie die erwartete Ortsverteilung des Strahls an die Messdaten anpassen. Hierbei müssen Sie die theoretische Erwartung mit der experimentellen Auflösung falten. Diese Faltung kann analytisch nicht durchgeführt werden und muss numerisch in der Fitroutine berechnet werden. Eine Summation (die das Faltungsintegral ersetzt) über den zentralen Bereich der Auflösungsfunktion der Apparatur ist hier ausreichend. Beachten Sie, dass die Normierung der verwendeten Auflösungsfunktion genau 1 sein muss, sonst verzerrt die Faltung die Normierung der angepassten Funktion! Berücksichtigen Sie auch ein evtl. positionsabhängiges Rauschen. Eine einfache Parameterisierung (Gerade mit Zentrum in den Daten) ist hier meist ausreichend. Vergleichen und diskutieren Sie die Fit-Resultate, die Sie für die 5 Erregerströme erhalten.

$\theta^\circ C$	110	120	130	140	150
$R/\Omega$	142,293	146,068	149,832	153,584	157,325
$\theta^\circ C$	160	170	180	190	200
$R/\Omega$	161,054	164,772	168,478	172,173	175,856

Table 1: Temperaturabhängigkeit eines PT100-Widerstands. Es gibt einfache Algorithmen die die Temperatur als Funktion des PT-100 Widerstands parameterisieren.

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

Table 2: Magnetische Induktion am Strahlort. Das Magnetfeld in der Apparatur scheint 5–10% kleiner zu sein als in der Tabelle angegeben.

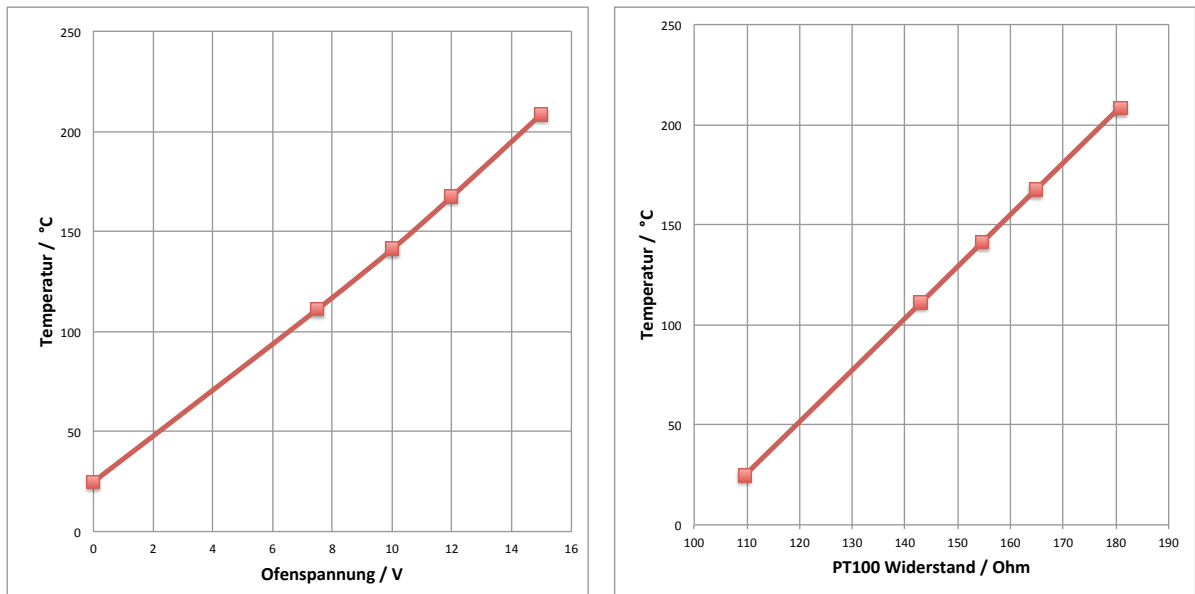
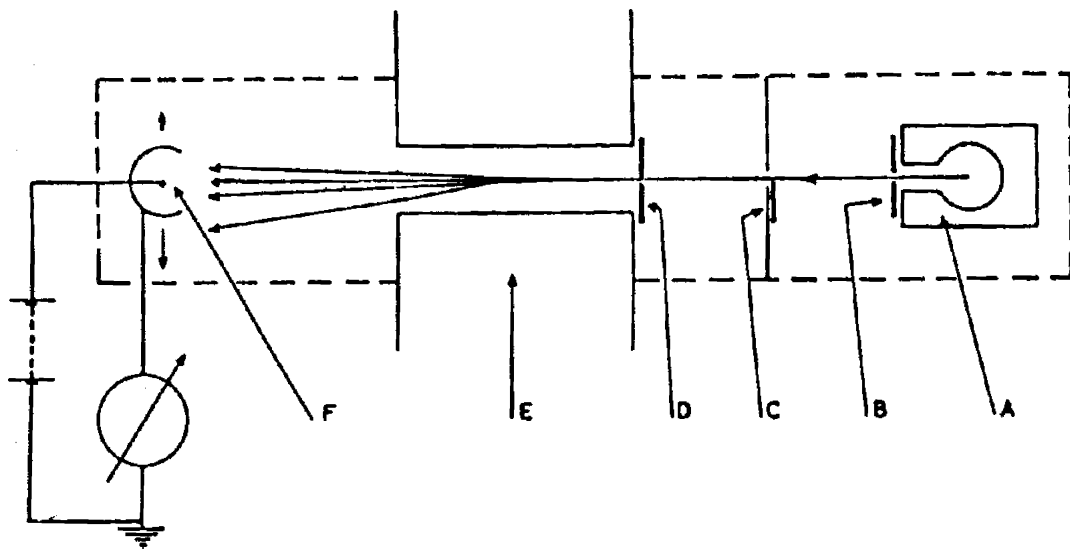


Figure 1: Kennlinie des Kalium Ofens und des PT 100 Widerstands.



A: Atomstrahlofen  
 B: Ofenblende (0.15 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 = 50.16 cm

Figure 2: Schematischer Aufbau der Stern-Gerlach-Apparatur.

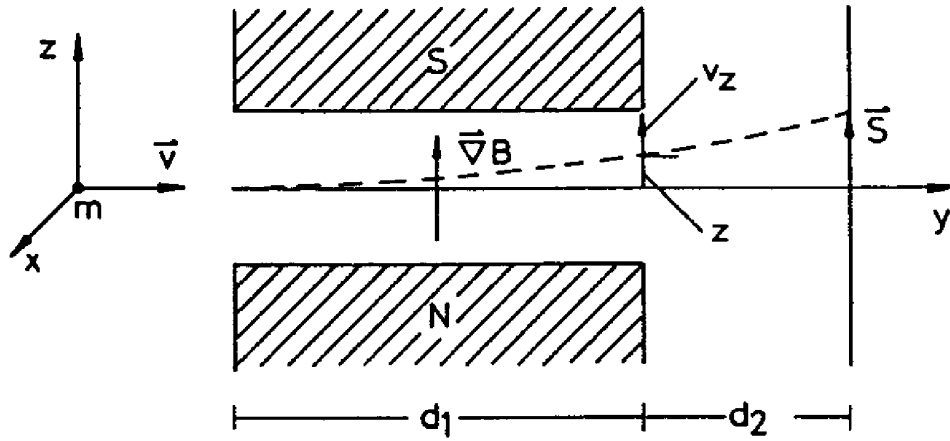


Figure 3: Schematische Darstellung der Flugbahn eines Atoms zur Berechnung der Ablenkung  $S$ .  $d_1 = 10.16$  cm, Länge der Polschuhe des Magneten  $d_2 = 40.0$  cm, Entfernung vom Austritt bis zum Detektor.

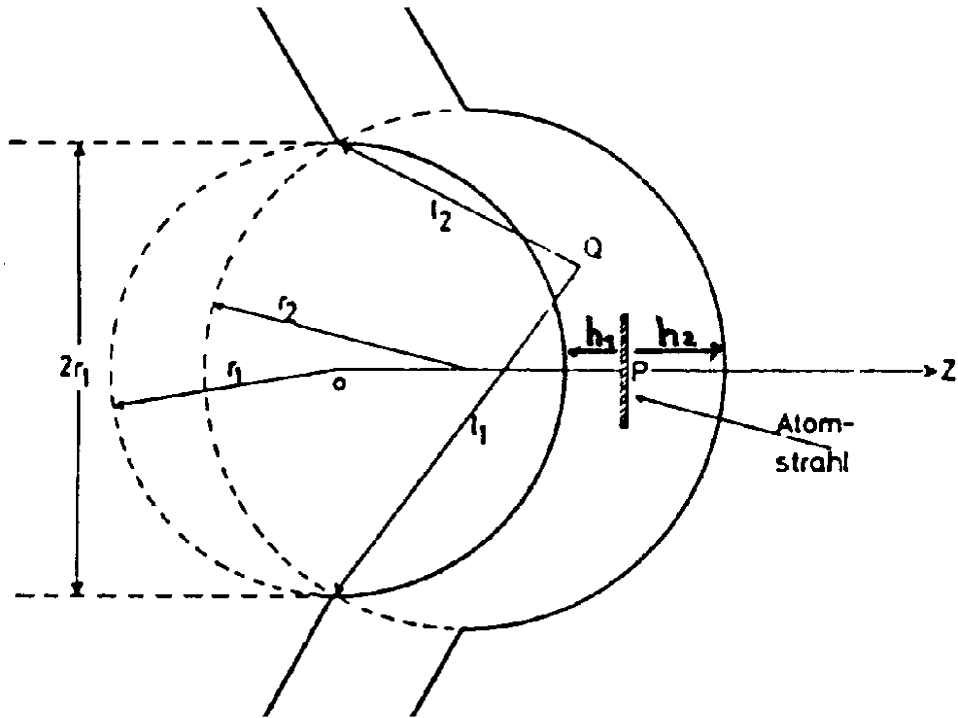


Figure 4: Schematischer Schnitt durch die Polschuhanordnung.  $r_1 = 0.554$  cm,  $r_2 = 0.635$  cm,  $h_1 = 0.177$  cm,  $h_2 = 0.217$  cm  $P$  = Strahlort,  $Q$  = bel. Feldpunkt mit den Entfernungen  $l_1, l_2$  vom Schnittpunkt der beiden, den Zylindern angehörenden Kreisen.

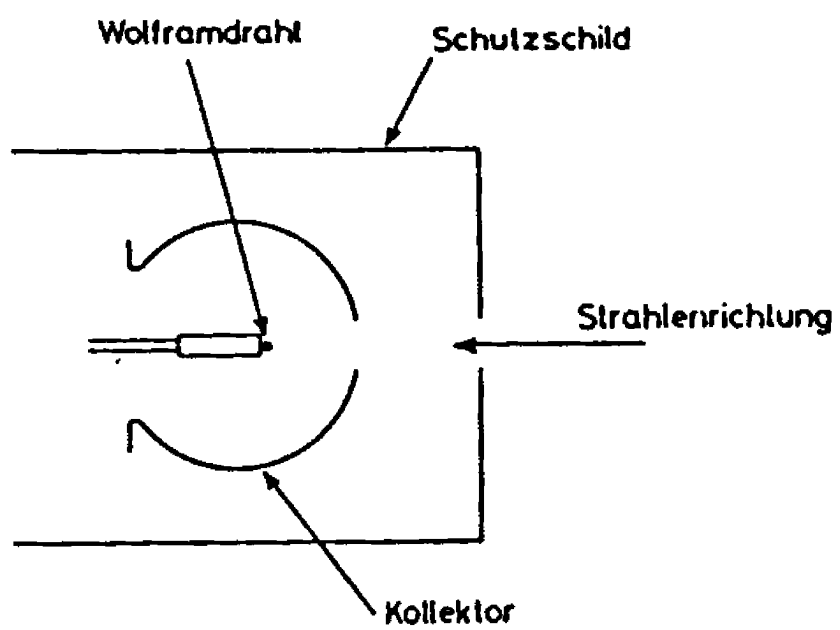


Figure 5: Schematische Seitenansicht des Langmuir–Taylor–Detektors.