



Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg
FB Physik

Fortgeschrittenen- Praktikum

Stand: 05/2020



B12: Stern-Gerlach-Experiment

Aufgabenstellung

Im Versuch wird das historische Stern-Gerlach-Experiment zum Nachweis der Richtungsquantelung des atomaren Drehimpulses mit Kaliumatomen nachvollzogen.

1. Durchführung des Stern-Gerlach-Experiments

- Bestimmen Sie den optimalen Heizstrom des Langmuir-Taylor-Detektors (LTD) aus der Messung des LTD-Stroms in Abhängigkeit vom Heizstrom ohne und mit Kalium-Strom.
- Messen Sie unter diesen Bedingungen die Intensitätsverteilung des Kalium-Stroms sowohl ohne als auch mit äußerem Magnetfeld für mindestens 5 Stromstärken des Elektromagneten bis einschließlich max. 1,0 A.
- Berechnen Sie aus Ihren Messdaten die Feldinhomogenität $\frac{\partial B}{\partial z}$ im Polschuhspalt.

2. Untersuchung der Elektronenemissionseigenschaften des Langmuir-Taylor-Detektors – ➔ Verwendung als Elektronenröhre (Vakuum-Gleichrichterdiode)

- Messen der Abhängigkeit des Sättigungsdurchlaßstroms der Röhrendiode vom (LTD-) Heizstrom. Schätzen Sie die jeweilige Temperatur des Wolfram-Heizdrahtes mittels der Richardson-Gleichung ab.
- Bestimmen der kompletten Dioden-Kennlinie der Elektronenröhre (Durchlass- und Sperrrichtung) für zwei deutlich verschiedene Katoden-Heizströme von max. 5,7 A (niedriger Heizstrom $\leq 5,0$ A).
- Überprüfen der Gültigkeit von Anlaufstrom- und Raumladungsgesetz der Dioden-kennlinie für beide Heizströme

Literatur:

- H. Haken, H.C. Wolf: „Atom- und Quantenphysik“, Springer-Verlag
- Bergmann, Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd IV, Teil 1, De Gruyter Verlag

Links:

- <http://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch>
- https://youtu.be/FC_A4XUIZyg

Kontrollfragen:

- Beschreiben Sie das Bohr-Sommerfeldsche Atommodell.
 - Wodurch kommen a) die Betragsquantelung und b) die Richtungsquantelung des elektronischen Drehimpulses ins Spiel?
 - Wodurch unterscheiden sich die Betragsquantelung des Drehimpulses im Bohr-Sommerfeldschen und im quantenmechanisch „richtigen“ Atommodell?
 - Erläutern Sie die allgemeine quantenmechanische Richtungsquantelung von Drehimpulsen.
 - Welcher Zusammenhang besteht zwischen Drehimpuls und magnetischem Moment eines Elektrons, das sich auf einer Kreisbahn bewegt?
 - Aus der Analyse welcher Experimente stellten G. Uhlenbeck und S. Goudsmit 1925 die Hypothese auf, daß das Elektron einen Eigendrehimpuls hat?
 - Warum kann man den Stern-Gerlach-Versuch nicht direkt mit Elektronen durchführen? Begründen Sie Ihre Antwort quantitativ mit einer Abschätzung, die Sie im Rahmen der Vorbereitung zu Hause durchführen!
 - Kann man auch den Kernspin mit einem solchen Experiment nachweisen? Begründen Sie Ihre Antwort ebenfalls mit einer Abschätzung!
 - Warum ist ein inhomogenes Magnetfeld erforderlich? Leiten Sie die Kraftwirkung auf ein Teilchen mit einem magnetischen Moment ab. Wie wirkt ein homogenes Magnetfeld?
 - Wie erfolgte der Nachweis der Silberatome im Originalexperiment? (Originalarbeiten auf der Webseite des F-Praktikums)
 - Der Temperaturregler des Kaliumofens ist ein sogenannter PID-Regler. Erläutern Sie das Reglerprinzip!
 - Wie funktioniert der Langmuir-Taylor-Detektor (LTD)?
 - Weswegen benötigt der Detektordraht eine Mindesttemperatur?
 - Erläutern Sie die Vorgehensweise zur Ermittlung des optimalen Heizstroms des LTD.
-
- Erklären Sie die I(U)-Kennlinie einer Hochvakuumdiode (Elektronenröhre).
 - Skizzieren Sie die Schaltung zur Aufnahme dieser Kennlinie mittels der apparativen Anordnung vom LTD.
 - Begründen Sie, daß die unterschiedlichen Katodenanschlussvarianten am Heizdraht unterschiedliche I(U)-Kennlinien hervorrufen (siehe Aufgabenhinweise zu 2.).

Das Stern-Gerlach-Experiment zum Nachweis der Richtungsquantelung des Elektronenspins

Im Jahr 1916 veröffentlichte Arnold Sommerfeld eine Arbeit [1], in der er zusätzlich zur Bohrschen Betragsquantelung des Drehimpulses auch eine Richtungsquantelung der elektronischen Drehimpulse des Atoms im Rahmen seiner Verfeinerungen des Bohrschen Atommodells ableitete. Otto Stern nahm dieses spannende Ergebnis ernst und schlug in einer im August 1921 erschienenen Arbeit [2] das später nach ihm und Walther Gerlach benannte Experiment zur Überprüfung dieses Theorieergebnisses vor. Den ersten erfolgreichen Versuch führte Gerlach am 4. November 1921 durch, was aber erst nach der Datenauswertung am Folgetag offenbar wurde [3a S. 245ff., 3b]. Die Experimente wurden dann mit steigender Präzision über den Jahreswechsel 1921/22 und im Laufe des Jahres 1922 wiederholt erfolgreich durchgeführt, wobei auch das magnetische Moment der verwendeten Ag-Atome zu etwa einem Bohrschen Magneton μ_B bestimmt wurde [3d]. Die entscheidende Beobachtung bestand aber darin, daß ein Strahl kollimierter, thermischer Ag-Atome durch ein stark inhomogenes Magnetfeld aufgespalten wird (Abb. 1). Diese Aufspaltung ist klassisch nicht zu erklären. Damit ist der Stern-Gerlach-Versuch zu einem grundlegenden Versuch der Quantenmechanik geworden, der die Richtungsquantelung des Drehimpulses der Elektronen nachweist [3c, 3e]. Allerdings konnten Stern und Gerlach 1922 ihre Ergebnisse noch nicht vernünftig aus der elektronischen Struktur des Silbers erklären. Der korrekte quantenmechanische Formalismus wurde erst später entwickelt (Heisenberg 1925, Schrödinger 1926) und, was noch entscheidender war, eine intrinsische Eigenschaft des Elektrons - sein Eigendrehimpuls, Spin genannt - wurde erst 1925 von G. Uhlenbeck und S. Goudsmit entdeckt/postuliert [4], weswegen Stern und Gerlach 1922 ihre Ergebnisse mit einer Richtungsquantelung des Bahndrehimpulses der Ag-Elektronen interpretierten.

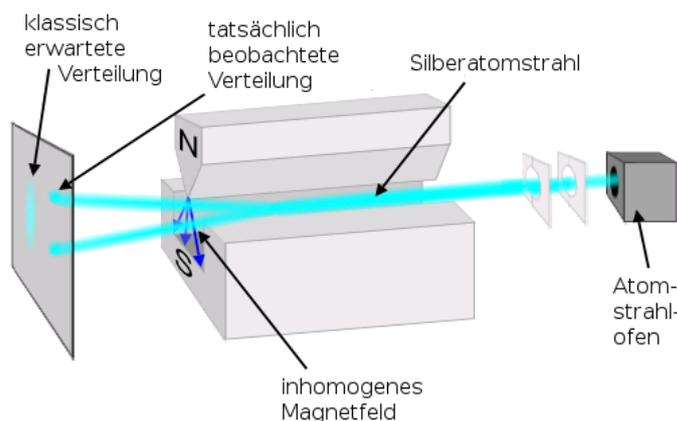


Abb. 1: Schema des Stern-Gerlach-Versuchs von 1922 (aus [5]).

Das inhomogene Magnetfeld wird durch die spezielle Ausführung der Magnetschuhe als Schneide in einer scharfen Rinne erreicht. Bei den von Stern und Gerlach verwendeten Ag-Atomen trägt nur das 5s-Elektron zum Gesamtdrehimpuls des Elektronensystems bei. Die Spins und Drehimpulse der restlichen Elektronen heben sich nach der Hundschen Regel auf (das gilt auch für das einwertige Kalium). Dieses 5s-Elektron hat die Bahndrehimpuls-Quantenzahl $l=0$ (es hat keinen Bahndrehimpuls). Damit wird der Gesamtdrehimpuls des Ag-Atoms (abgesehen vom Kernbeitrag) nur durch den Elektronenspin des 5s-Elektrons gebildet. Daher ist das magnetische Moment des Atoms $\vec{\mu}_{Ag}$ antiparallel zum Spin \vec{S}_{5s} (unter Vernachlässigung des magnetischen Kernmoments).

Im inhomogenen Magnetfeld der Form $\vec{B} = (B_{homogen} + B_{inhomogen}) \cdot \vec{e}_z$ stellt die z-Achse eine Vorzugsrichtung dar, weswegen die z-Komponente des Drehimpulses gequantelt ist. Die z-Komponente des Spindrehimpulses des 5s-Elektrons hat nur die beiden Einstellmöglichkeiten $\pm \frac{1}{2} \hbar$ (Abb. 2).

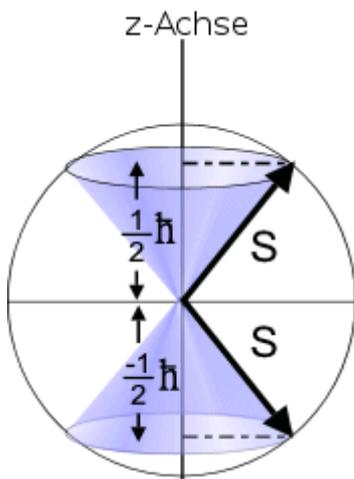


Abb. 2: Projektion des Spins eines Elektrons auf die z-Achse [5].

Durch das inhomogene Magnetfeld wirkt eine Kraft \vec{F} auf das magnetische Moment $\vec{\mu}$. Da $\vec{\mu}$ proportional zu \vec{S} ist, kann auch seine z-Komponente nur zwei Werte annehmen. Je nach zufälliger Ausrichtung des Spins in einer der beiden Richtungen erfolgt damit die Aufspaltung des Atomstrahls in zwei gleichstarke Teilstrahlen. Klassisch, d.h. ohne Quantisierung, müsste das magnetische Moment in alle Richtungen gleich verteilt sein. Das müsste zu einer Gleichverteilung der auftreffenden Silber- bzw. Kaliumatomen um z_0 führen, was nicht beobachtet wird.

Berechnung der Strahlaufspaltung

Die Größe der wirkenden Kraft hängt neben der Inhomogenität des Feldes vom magnetischen Moment des Valenzelektrons ab. Das magnetische Moment ergibt sich aus dem Spin \vec{S} zu $\vec{\mu} = \gamma_s \vec{S} = -\frac{e}{2m_0} g_s \vec{S}$. Dabei sind e die Elementarladung, m_0 die Ruhemasse des Elektrons, γ_s das gyromagnetische Verhältnis und g_s der g-Faktor des Elektronenspins (Spin-g-Faktor). In z-Richtung ergeben sich zwei Orientierungen mit den Quantenzahlen $m_s = \pm \frac{1}{2}$. Die z-Komponente des Spins hat die Eigenwerte $S_z = m_s \cdot \hbar$. Daraus ergibt sich die z-Komponente des magnetischen Moments zu $\mu_z = -\frac{e}{2m_0} g_s m_s \hbar = -\mu_B \cdot g_s \cdot m_s$ mit dem Bohrschen Magneton $\mu_B = \frac{e \cdot \hbar}{2m_0}$ und $g_s = 2,0023$.

Wegen des überraschenden Spin-g-Faktors $g_s \approx 2$ ist das magnetische Spinmoment des Elektrons genauso groß sein magnetisches Bahnmoment bei einer magnetischen Bahnquantenzahl von 1.

Die durch die Feldinhomogenität hervorgerufene Kraft $F_z = \mu_z \frac{\partial B}{\partial z}$ in z-Richtung steigt mit zunehmender Inhomogenität des Feldes.

Für die Berechnung der Atomstrahlablenkung werden folgende vereinfachende Annahmen gemacht. (1) Der Durchmesser des Atom-Strahls ist vernachlässigbar klein. (2) Als Geschwindigkeit der Kalium-Atome wird die mittlere Geschwindigkeit von Atomen genommen, die aus einem Reservoir mit thermischer, d.h. Maxwell'scher Geschwindigkeitsverteilung bei einer Temperatur T in eine wohlbestimmte Richtung austreten, d.h. einen gerichteten Atomstrahl bilden.

Der Mittelwert dieser Verteilung $\bar{v} = \sqrt{\frac{9\pi k_B T}{8 M}}$ ist um ca. 12% größer als der Mittelwert der Geschwindigkeitsbeträge $\bar{v} = \sqrt{\frac{8 k_B T}{\pi M}}$ gemittelt über alle Geschwindigkeitsrichtungen im Raum.
 M ist die Masse eines Kaliumatoms.

Mit diesen Annahmen können die Auslenkung des Atomstrahls u in der Detektorebene bei eingeschaltetem Magnetfeld als $u_1(m_s = +1/2)$, $u_2(m_s = -1/2)$ und die Aufspaltung $|\Delta u| = |u_2 - u_1|$ leicht berechnet werden. Für die Rechnung ist es vorteilhaft, von den Geometriedaten l (Laufstrecke von der Mitte des Magnetpolschuhs zum Detektor) und L (Wegstrecke im Magnetfeld) (Abb. 3) auszugehen.

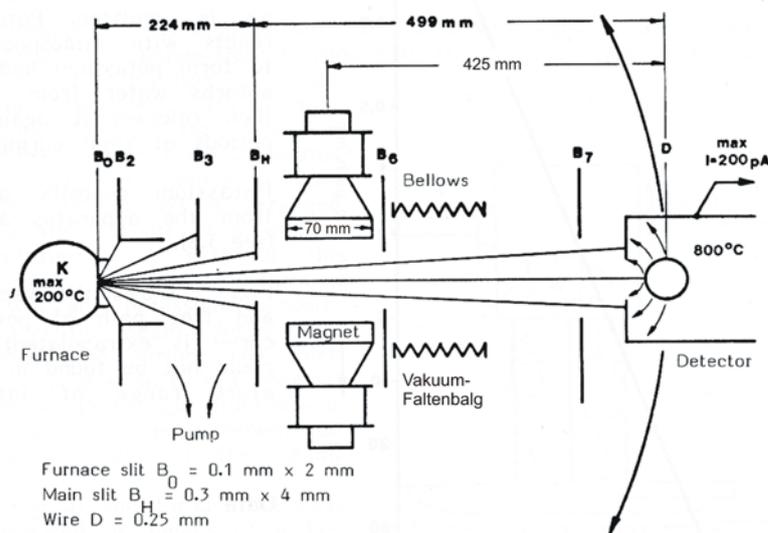


Abb. 3: Geometrische Anordnung des Stern-Gerlach-Versuchs. Dokumentation der Fa. PHYWE, „Stern-Gerlach Apparat“ [6], Fig. 6

Eine volle Umdrehung am Antrieb des beweglichen Arms bewegt den Detektor um 1,8 mm.

Langmuir-Taylor-Detektor

Der Ende der 1920er Jahre in der Arbeitsgruppe von Otto Stern entwickelte Detektor (Abb. 4) wird zum Nachweis von Atomstrahlen benutzt. Die Kaliumatome treffen den erhitzten Wolfram-Draht und werden dort ionisiert. Anschließend werden sie in einem elektrischen Feld zu einer den W-Draht umgebenden Elektrode abgesaugt. Einzelheiten zum Funktionsprinzip findet man in den Originalarbeiten [7, 8] und z.B. in [9].

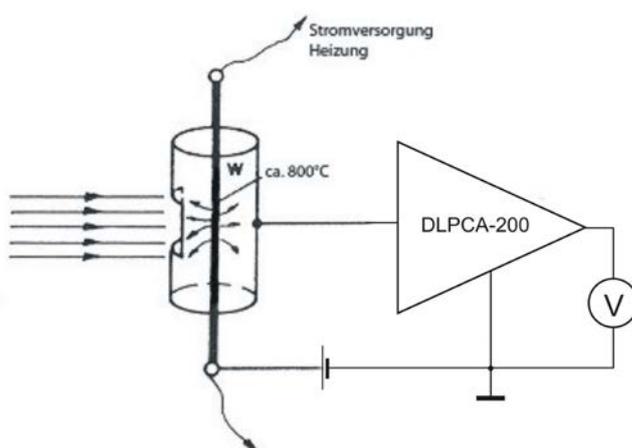


Abb. 4
 Der Langmuir-Taylor-Detektor zum Nachweis eines Atomstrahls.
 Der rauscharme Strom-Spannungswandler DLPCA-200 dient zur Verstärkung des im pA-Bereich liegenden K-Ionenstroms.
 Bedienung des DLPCA-200: Siehe beiliegendes Datenblatt.

Elektronenröhren-Gleichrichterdiode

Der Heizdraht des LTD emittiert bei hinreichender Temperatur Elektronen, genannt Glühemission. Deswegen stellt die Anordnung des LTD bei genügend hoher Elektronenemissionsrate auch eine Gleichrichterdiode dar, die nach dem Prinzip der Vakuum-Gleichrichter-Röhre funktioniert (siehe z.B. die Kennlinie der Röhre EZ 81 [10]). In diesem Zusammenhang bezeichnet man den elektronen-emittierenden Wolframdraht als Katode und die zylinderförmige Absaugelektrode als Anode der Elektronenröhre. Im Durchlaßbereich der Gleichrichterdiode werden die glühemittierten Elektronen zur Anode beschleunigt. Die Sättigungsstromdichte j der bei hohen Temperaturen aus dem W-Draht austretenden Elektronen wird durch die Richardson-Gleichung beschrieben:

$$j = A \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{W_A}{k_B T}} \quad (\text{RG})$$

Dabei ist W_A die Elektronenaustrittsarbeit der Wolframoberfläche ($\approx 4,5$ eV). A ist die Richardson-Konstante und beträgt für Wolfram ungefähr $7,2 \cdot 10^5 \text{ AK}^{-2} \text{ m}^{-2}$.

In der Kennlinie der Vakuumdiode, $I_a = f(U_a)$, (I_a , U_a – Anodenstrom bzw. -spannung) unterscheidet man drei unterschiedliche Abschnitte.

Im Sperrbereich gilt das *Anlaufstromgesetz* [11, 12]:

$$I = I_0 e^{\frac{e(U+U_k)}{k_B T}} \quad (\text{AS})$$

Hier müssen die Elektronen gegen das bremsende elektrische Feld „anlaufen“, um die Anode zu erreichen. Dazu ist ein Mindestwert ihrer kinetischen Energie erforderlich, woraus die Temperaturabhängigkeit dieses Gesetzes resultiert. U_k ist die Kontaktspannung zwischen Katode und Anode, die aus der Differenz der Austrittsarbeiten beider Elektrodenmaterialien resultiert und deswegen durch adsorbierte Schichten (hier: Kalium-Niederschlag auf der Anode) stark beeinflusst wird.

An diesen Kennlinienteil schließt sich im Durchlaßbereich das Raumladungsgebiet an, das durch das *Raumladungsgesetz* [11, 12]

$$I = K \cdot (U + U_k)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{RL})$$

beschrieben werden kann. Das Gesetz bringt die das elektrische Anodenfeld abschirmende Wirkung der Elektronenwolke in Katodennähe zum Ausdruck. Es gilt für beliebige Elektrodengeometrien (d.h. von Katode und Anode) und wird mittels der Maxwell'schen Gleichungen unter der Voraussetzung einer beliebig hohen Stromergiebigkeit der Katode abgeleitet. Damit berücksichtigt Gl. (RL) natürlich nicht den Strom I_0 von Gl. (AS), der wegen der thermischen Energie der glühemittierten Elektronen bei $U=0$ schon fließt. Dieser muß also bei der Beschreibung der experimentellen $I(U)$ -Kurve im Raumladungsbereich noch addiert werden. Die Raumladungskonstante K hängt bei einer bestimmten Katodentemperatur nur von der Katoden-/Anodengeometrie ab.

Nach einem längeren Übergangsgebiet mündet die Kennlinie schließlich in den durch die Richardson-Gleichung näherungsweise beschriebenen *Sättigungsbereich*.

Zum Nachweis der Kaliumatome wird die Diode in Durchlassrichtung für die K^+ -Ionen betrieben, d.h. in Sperrichtung für Elektronen, weswegen die durch Glühemission erzeugten Elektronen den vergleichsweise sehr kleinen Strom der Kaliumionen eigentlich nicht stören sollten. Allerdings verursacht eine größere Elektronendichte in der Nähe des Detektordrahtes eine unkontrollierte Rekombination der K^+ -Ionen. Deswegen muß die Temperatur des Detektor-Drahtes, verglichen mit den Messungen zur Glühmission, auf einen deutlich niedrigen Wert eingestellt werden, der zwar die Ionisation der K-Atome gewährleistet, aber noch keine merkliche Glühemission verursacht.

Hinweise zu den einzelnen Aufgaben

Genereller Hinweis zur Fehlerrechnung

- Die Messdaten sämtlicher Geometrieangaben in der Versuchsanleitung sind natürlich auch fehlerbehaftet. Nutzen Sie dafür die implizite Fehlerangabe.

zu 1.:

- Die Apparatur steht ständig unter Vakuum. Zum Messen ist ein Druck $< 5 \times 10^{-5}$ mbar erforderlich. Die Belüftung der Apparatur und auch die Befüllung mit Kalium wird nur durch den Assistenten vorgenommen. Bei demontierter Apparatur den Kaliumofen nicht berühren (Verätzungsgefahr)!
- Die Temperatur des Kaliumofens wird mittels eines PID-Reglers auf 190 °C geregelt. Seine Temperatur **darf 200°C keinesfalls überschreiten**.
- Die I_{LTD} -Messung geschieht mittels eines rauscharmen hochempfindlichen Stromverstärkers DLPCA-200, dessen Ausgangsspannung mit einem Digitalmultimeter DM 3061 gemessen wird. Parallel dazu ist ein PC-gestützter Datalogger (System Picoscope) zur Meßwertregistrierung angeschlossen. Für alle Meßaufgaben sind die unempfindlicheren "low noise"-Meßbereiche (Schalterstellung L) ausreichend.
- Als Absaugspannung des LTD wird die maximal mögliche der verwendeten Spannungsquelle eingestellt (generell $< 50V$).
- Der LTD-Heizstrom I_H wird hinsichtlich eines maximalen Signal/Untergrund-Verhältnisses von I_{LTD} bei heißem/kalten K-Ofen optimiert ($I_{H,max} < 5,0 A$). I_H wird durch die programmierbare Spannungsquelle PSM-2010 im Stromkonstantmode geregelt.
 - Wichtig! Bei heißem K-Ofen muß sich dabei der Detektor natürlich an der Position des nicht abgelenkten K-Strahls befinden. Die entsprechende Stellschraubenposition (siehe unten) beträgt etwa 7,00.
- Die Änderung der Detektorposition zur Messung der Intensitätsverteilung der K-Atome geschieht mit einer Stellschraube, die über einen Schneckentrieb die Schwenkmechanik des LTD steuert. Wegen des toten Gangs der Schwenkmechanik darf die Stellschraube für jede Meßreihe immer nur in eine Richtung gedreht werden.
- Eine volle Umdrehung der Stellschraube entspricht einer Detektorbewegung um 1,8 mm.
- Verändern Sie die Magnetfeldstärke der einzelnen Meßreihen beginnend mit dem kleinstem Magnetstrom I_M hin zu größeren Werten. Eine eventuell störende remanente Magnetisierung kann durch langsames Herunterfahren des Stromes unter häufigem Umpolen des Magnetfeldes beseitigt werden.

zu 2.:

- Der K-Ofen sollte sich bei diesem Versuchsteil auf Raumtemperatur befinden, da der K-Atomstrahl die Sperrkennlinie der Vakuumdiode beeinflusst.
- **Vorsicht bei der Einstellung des Heizstroms des LTD!** Der Sättigungsstrom der LTD-Vakuumdiode hängt **exponentiell** von der Draht-Temperatur und damit vom Heizstrom ab! Um eine längere Lebensdauer des Katodendrahtes zu gewährleisten, darf der Maximalwert von **5,7 A** nicht überschritten werden.
Für die Messung des Sättigungsstroms der LTD-Vakuumdiode muß die maximal mögliche Durchlassspannung eingestellt werden.
- Messen Sie für den größeren der gewählten Heizstromwerte die gesamte $I(U)$ -Kennlinie für **beide Katodenanschlussvarianten am Heizdraht** (Katode am Plus- oder Minuspol der Heizstromquelle) und begründen Sie die Unterschiede (siehe Kontrollfrage). Passen Sie die Messpunktdichte entsprechend den speziell interessierenden, relativ schmalen Anlauf- und Raumladungsbereichen an.

- Ermitteln Sie die Gültigkeitsbereiche von Anlaufstrom- und Raumladungsgesetz. Nutzen Sie hier die bei der Messung der beiden Katodenanschlussvarianten gewonnene Erfahrung. Hinweis: Zur Ermittlung des Gültigkeitsbereichs des Anlaufstromgesetzes ist eine linearisierte Darstellung des in Frage kommenden Kennlinienbereichs deutlich besser geeignet als ein formaler Fit mit der e-Funktion.
- Vergleichen Sie die Katodentemperaturen, die sowohl mittels Richardsgleichung, als auch mittels Anlaufstromgesetz erhalten werden, und diskutieren Sie etwaige Diskrepanzen.
- Geometrie des Wolfram-Detektordrahtes: \varnothing 0,25 mm, Länge 20 mm

Literatur:

- [1] A. Sommerfeld, Zur Quantentheorie der Spektrallinien, Ann. der Physik. IV. Folge, **51**, 1-94 (1916)
http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/39_annphys1916v51_1_sommerfeld.pdf
- [2] O. Stern, Ein Weg zur experimentellen Prüfung der Richtungsquantelung im Magnetfeld, Zeitschrift für Physik **7**, 249-253 (1921)
http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/39_zphys1921v7_249_stern.pdf
- [3] a) J.G. Huber, Walther Gerlach (1889-1979), Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München (2014), Kapitel 7, Das Stern-Gerlach-Experiment
http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/39_Diss_Huber_Kap7_2014.pdf
b) W. Gerlach, O. Stern, Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms, Zeitschrift für Physik, **8**, 110-111 (1921)
http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/39_Z.Phys_1921_Gerlach_Stern_a.pdf
c) W. Gerlach, O. Stern, Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld, Zeitschrift für Physik, **9**, 349-352 (1922)
http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/39_Z.Phys_1922_Gerlach_Stern_b.pdf
d) W. Gerlach, O. Stern, Das magnetische Moment des Silberatoms
Zeitschrift für Physik, **9**, 353-355 (1922)
http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/39_Z.Phys_1922_Gerlach_Stern_c.pdf
e) W. Gerlach, O. Stern, Über die Richtungsquantelung im Magnetfeld
Ann. der Physik. IV. Folge, **74**, 673-99 (1924)
http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/39_annphys1924v74_Gerlach_Stern.pdf
- [4] a) G. Uhlenbeck, S. Goudsmit, Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons, Naturwissenschaften **13**, 953-4 (1925)
http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/39_naturwiss1925v13_953_UG.pdf
b) G. Uhlenbeck, S. Goudsmit, Spinning Electrons and the Structure of Spectra
Nature **117**, 264-5 (1926)
http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/39_nature1926v117_264_UG.pdf
c) S. A. Goudsmit, The discovery of the electron spin
Vortrag in der Physikalischen Gesellschaft der Niederlande, April 1971
<http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/spin/goudsmit.html>
- [5] Wikipedia, Stichwort „Stern-Gerlach-Versuch“
<http://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch> (03. 05. 2010)
- [6] Beschreibung der Stern-Gerlach-Apparatur, Fa. PHYWE, Dokument 0905488e.pdf
(verfügbar unter <http://www.phywe.de/de/stern-gerlach-apparatur.html>)
- [7] I. Langmuir, K. H. Kingdon, Thermoionic Effects caused by Vapours of Alkali Metals, Proc. Royal Soc. London, **107**, 61-79 (1925)
http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/39_prslondon1925_langmuir.pdf
- [8] J. B. Taylor, Eine Methode zur direkten Messung der Intensitätsverteilung in Molekularstrahlen, Zeitschrift für Physik, **57**, 242-248 (1929)
http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/39_zphys_1929_taylor.pdf
- [9] I. V. Hertel, C.-P. Schulz, Atome, Moleküle und optische Physik, Teil 1, Springer-Verlag, Berlin 2008, S. 41
- [10] Datenblatt der Gleichrichterröhre (Doppeldiode) EZ 81
http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/39_EZ81.pdf
- [11] H. Barkhausen, Lehrbuch der Elektronenröhren und ihrer technischen Anwendungen, Bd. 1, 12. Auflage, Verlag S. Hirzel, Leipzig 1969 (Sign. C G 764 (1), Zweigbibl. Ha 4)
- [12] H. Pfeifer, Die Elektronenröhre (Elektronik für den Physiker), WTB-Reihe, Bd. 39, 2. Auflage, Akademie-Verlag; Berlin 1970 (Sign. 71 A 757 (2), ULB)