

# Physikalisches Praktikum Teil IV: **Atome, Moleküle, Festkörper**

*Versuchsbeschreibungen*

Postadresse:  
Nussallee 12  
D-53115 Bonn

BONNN-MG-2024-09P4  
Universität Bonn  
September 2024



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
1    Praktikumsordnung	v
2    Verfassen eines Versuchsberichts	ix
3    Strahlenschutzbelehrung	xvii
P401    Elektronische Übergänge in Atomen	1
P402    Quantelung von Energie	17
P404    Optisches Pumpen	29
P422    Raster tunnelmikroskopie	37
P425    Elektronisches Rauschen	53
P428    Röntgenstrahlung und Materialanalyse	65
P442    Laser	77
P443    Kernmagnetische Relaxation	81
P464    Spektroskopie von Sternen	97
P465    Die Vermessung der Milchstraße	101



# 1 Praktikumsordnung

Die Praktikumsordnung sowie alle organisatorischen Regelungen sind auf der Webseite des Physikalischen Praktikums einzusehen: <http://www.physik-astro.uni-bonn.de/praktika/de>. Über organisatorische Änderungen, die während des Semesters notwendig sind, wird ebenfalls hier und auf eCampus informiert. Sie gelten als mitgeteilt und bekannt, wenn sie eine Woche lang hier veröffentlicht sind. Vor Beginn des Praktikums wird eine Laserschutz-Unterweisung sowie eine Sicherheitsbelehrung durchgeführt. Zudem gibt es noch eine Strahlenschutzbelehrung, welche zusätzlich auch im Kapitel 3 wiedergegeben wird. Die persönliche Teilnahme an diesen Belehrungen ist vorgeschrieben und Voraussetzung für die Durchführung der Praktika.

## 1.1 Zulassungsvoraussetzungen:

Voraussetzung zur Teilnahme am Physikalischen Praktikum Teil IV ist die Teilnahme an der Klausur zur Vorlesung Physik IV.

## 1.2 Praktikumstermine:

Das Praktikum findet Mo./Di. von 13:00 – 17:00 Uhr oder Mi./Do. von 13:00 – 17:00 Uhr statt. Nach persönlicher Absprache mit den Assistentinnen oder Assistenten können die Versuche auch wochentags ganztägig, in der Zeit von 8:00 – 18:00 Uhr durchgeführt werden. Außerhalb dieser Zeiten darf im Interesse der Sicherheit der Studierenden nur ausnahmsweise gearbeitet werden, dabei muss der Assistent bzw. die Assistentin im Praktikumsraum anwesend sein. Eine Versuchsdurchführung am Wochenende und an gesetzlichen Feiertagen ist grundsätzlich ausgeschlossen.

## 1.3 Gruppeneinteilung:

Es wird grundsätzlich in Zweiergruppen gearbeitet. Aus Sicherheitsgründen ist es nicht gestattet, alleine an einem Praktikumsversuch zu arbeiten.

## 1.4 Vorbereitung:

Zur Vorbereitung sind in der Versuchsanleitung Informationen zum Versuch und der ihm zugrundeliegenden Physik aufgeführt. Die zitierte Literatur ist in der Universitätsbibliothek<sup>1</sup>, Abteilung

Naturwissenschaften in der ZBL, Nussallee 15a, zugänglich oder bei den zuständigen Assistentinnen und Assistenten zu erhalten. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Benutzung der Bibliotheken der Physikalischen Institute den Studierenden aufgrund der begrenzten Räumlichkeiten nicht gestattet werden kann.

## 1.5 Betreuung und Anleitung:

Vor Durchführung des Versuches müssen die Studierenden nachweisen, dass sie ausreichend vorbereitet sind. Anschließend werden sie in die Benutzung der Geräte eingewiesen. Der Assistent bzw. die Assistentin steht ggf. auch außerhalb der Praktikumszeiten zur Verfügung, wenn im Zusammenhang mit dem Versuch Fragen aufgetaucht sind.

## 1.6 Versuchsbericht:

Zu einem Versuch ist grundsätzlich von jeder Teilnehmerin bzw. jedem Teilnehmer ein Versuchsbericht anzufertigen. Darin soll die Versuchsdurchführung beschrieben, die Messergebnisse dargestellt und unter Berücksichtigung statistischer und systematischer Fehler diskutiert werden. Eine Gruppe kann auch einen gemeinsamen Versuchsbericht abgeben, für dessen Inhalt beide Teilnehmende voll verantwortlich sind. Der Assistent / die Assistentin darf die Abgabe von getrennten Versuchsberichten verlangen.

Der Versuchsbericht ist spätestens 7 Tage nach Abschluss des Versuchs abzugeben, andernfalls wird er als nicht abgegeben gewertet. Bei rechtzeitiger Rücksprache kann diese Frist jedoch um eine Woche verlängert werden. Die Versuchsberichte müssen grundsätzlich elektronisch über die eCampus Plattform eingereicht werden. Abgaben per Email oder in Papierform werden nicht akzeptiert.

## 1.7 Erfolgreiche Teilnahme:

Zur erfolgreichen Teilnahme am Physikalischen Praktikum IV müssen 5 Versuche ordnungsgemäß durchgeführt worden sein.

Wird bei den Versuchen eine Prüfungsleistung (mündl. Prüfung und/oder Versuchsbericht) mit nicht ausreichend bewertet, so kann diese Prüfungsleistung durch Wiederholung nachgebessert werden. Ist nur ein Praktikant/eine Praktikantin nicht ausreichend auf die Versuchsdurchführung vorbereitet, darf die Gruppe den Versuch trotzdem durchführen. Der/die nicht ausreichend Vorbereitete hat die Möglichkeit, dieses Defizit durch eine mündliche Nachprüfung innerhalb einer Woche nach Versuchsdurchführung auszugleichen. Diese Nachprüfung muss vor der Abgabe des Versuchsberichts für den entsprechenden Versuch abgelegt werden, ansonsten darf der Versuchsbericht vom Assistenten/von der Assistentin nicht angenommen werden.

<sup>1</sup><http://www.ulb.uni-bonn.de/de>

Bei zwei oder mehr nicht erfolgreichen Prüfungsleistungen muss das Praktikum wiederholt werden. Über eine eventuelle Anerkennung erfolgreicher Prüfungsleistungen entscheidet die Praktikumsleitung.

Bonn, den 02. März 2023  
Die Praktikumsleitung

- **Einleitung:** Beschreiben Sie in drei bis fünf Sätzen den Inhalt des folgenden Textes und das Ziel der Versuchsdurchführung.
- **Grundlagen/Theorie:** Beschreiben Sie an den Stellen, wo weiterführende Grundlagen benötigt werden, diese so kurz wie möglich oder verweisen Sie hier auf ausführlichere weiterführende Literatur.

- **Versuchsdurchführung:** Beschreiben Sie alle Methoden, die Sie verwendet haben, um die Messung durchzuführen. Stellen Sie den Versuchsaufbau dar, und beschreiben Sie den Messablauf. Alle relevanten Parameter der Messung sollen angegeben werden. Auch eine Angabe über die Genauigkeit der Messung gehört hierher.
- **Daten:** Alle Messdaten werden im Versuchsbericht dokumentiert. Je nach Menge der Daten können Sie sich überlegen, die Messdaten in einem separaten Anhang aufzuführen. Große Datensmengen können z. B. auch auf Sciebo hinterlegt werden und im Bericht wird der Link hierzu eingebunden. Bitte sprechen Sie die Vorgehensweise auch mit dem/der Tutor/in ab! Geben Sie alle Messdaten mit Messfehlern an. Beschreiben Sie alle Fehlerquellen der Messung und erklären Sie, wie Sie die Messfehler bestimmt bzw. abgeschätzt haben. Unterscheiden Sie immer zwischen statistischen und systematischen Fehlern [1], und zeigen Sie, welche Fehlerkomponente dominant ist. *Geben Sie alle numerischen Werte mit einer sinnvollen Anzahl von Ziffern an!*

## • Auswertung/Ergebnisse:

- Werten Sie Ihre Daten auf das Ziel des Versuchs hin aus. Die Fehlerechnung ist ein sehr wichtiger Teil der Auswertung.
- Stellen Sie Ihre experimentellen Daten grafisch dar. Alle Messpunkte sind mit Fehlerbalken darzustellen! Wenn die Fehlerbalken zu klein sind, erwähnen Sie das in der Bildunterschrift! Unterscheiden Sie auch hier zwischen statistischen und systematischen Fehlern, und überlegen Sie sich, wie letztere am besten grafisch dargestellt werden können.
- Passen Sie eine Funktion an Ihre Messdaten an<sup>1</sup>, berücksichtigen Sie dabei mögliche Untergrundbeiträge. Als Ergebnis der Anpassung werden Sie bestimmte numerische Werte für die Parameter sowie eine Güte der Anpassung (z.B.  $\chi^2/NDF$ ) erhalten. Vergleichen Sie diese Werte mit den Vohlersagen des Modells. Wenn experimentelle Ergebnisse und theoretische Vohlersagen nicht kompatibel sind, begründen Sie den Unterschied.
- **Diskussion:** Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse in Bezug auf die Literaturwerte. Diskutieren Sie die Genauigkeit des Versuchs, welche Fehlerquellen die Messung beeinflusst haben und, wenn möglich, wie man den Versuch verbessern könnte.

<sup>1</sup>Dafür brauchen Sie ein theoretisches Modell (Gleichung), die Sie an dieser Stelle einführen müssen. Erklären Sie kurz, warum dieses Modell sich eignet, Ihre experimentellen Daten zu beschreiben. Nennen Sie unter welchen Umständen und Näherungen das Modell gilt und mit welcher Genauigkeit. Listen Sie alle Konstanten und Parameter auf, die in dem Modell vorkommen. Wenn nicht selbstverständlich, erklären Sie, welche Rolle die Variablen Ihrer Messung in dem Modell spielen.

## 2 Hilfestellungen zum Verfassen eines Versuchsberichts

### 2.1 Einführung

Das Anfertigen des Versuchsberichts soll Sie auf das Verfassen einer Abschlussarbeit vorbereiten. Dieses Dokument soll Ihnen helfen, sich mit dem Gestalten wissenschaftlicher Texte vertraut zu machen. Abschnitt 2.2 enthält generelle Anforderungen, die Ihr Versuchsbericht erfüllen soll. Die Hinweise von Abschnitt 2.3 dienen der Verbesserung des Berichts, und werden nicht dessen Bewertung beeinflussen. Abweichungen von diesem Schema sind je nach Versuch und Praktikumsassistent möglich. Deshalb ist es sinnvoll, Ihren Assistenten zu fragen, welche abweichenden Anforderungen an den Versuchsbericht von ihm gestellt werden.

### 2.2 Anforderungen an den Versuchsbericht

#### 2.2.1 Inhalte:

Der Bericht zu einem Versuch im Praktikum für fortgeschrittenne Studierende soll die Durchführung des Versuchs, die Messdaten, deren Auswertung und die Ergebnisse der Messungen dokumentieren. Die erforderlichen Grundlagen sollen an den Stellen, an denen sie benötigt werden, kurz erläutert werden bzw. soll hier auf ausführliche Literatur verwiesen werden. Die Ausarbeitung soll es dem Assistenten ermöglichen, Ihre Versuchsdurchführung nachzuvollziehen. Außerdem sollten Sie den Versuchsbericht so verfassen, dass Studierende Ihres Ausbildungstands in der Lage sind, den Text zu verstehen, ohne den Versuch selber durchgeführt zu haben. Diese beiden Zielgruppen im Auge zu behalten, sollte Ihnen helfen, die richtige Balance zwischen „Wissen voraussetzen“ und „ausführlich genug beschreiben“ zu erreichen.

#### 2.2.2 Länge und Stil:

Der Bericht soll so kurz wie möglich sein, ohne dass wichtige Informationen vernachlässigt oder gar vergessen werden. Benennen Sie sich um eine sachliche Sprache und kurze, prägnante Formulierungen.

#### 2.2.3 Aufbau des Versuchsberichts:

Das Versuchsbericht sollte folgendermaßen aufgebaut sein:

- **Zusammenfassung:** Schreiben Sie einige wenige Sätze, in denen Sie die Durchführung und die Ergebnisse der Messung zusammenfassen.

## 2.2.4 Wissenschaftliche Schreibweise:

- Quellen:
  - Alle fremden Leistungen müssen gekennzeichnet werden (das gilt auch für Bilder und nicht selbst angefertigte Zeichnungen). Der Versuchsbericht beschreibt Ihre Versuchsdurchführung. Plagiate werden mit einer 5 bewertet.
  - Quellenangaben müssen eindeutig sein ([www.uni-bonn.de](http://www.uni-bonn.de) ist keine eindeutige Quellangabe), beim Zitieren von Webseiten muss ein Datum angegeben werden.
  - Führen Sie alle Abkürzungen und Variablen in Gleichungen beim ersten Gebrauch ein.
  - Verweisen Sie immer im Text auf alle Abbildungen und Tabellen.
  - Zu jeder Abbildung/Tabelle gehört eine Bildunterschrift, die beschreibt, was in der Abbildung/Tabelle dargestellt wird. Die Bildunterschrift sollte zusammen mit der Abbildung/Tabelle selbst eigenständig verständlich sein: Welche Messung wird gezeigt? Welche Funktion wurde an die Messdaten angepasst? Welche Ergebnisse bekommt man?

- Beachten Sie, dass die Einheit zu einer physikalischen Größe sowie beschreibende Indizes (wie in  $E_{\max}$  (maximal)) und Zahlen, Zeichen für Funktionen und Operatoren ( $e \equiv \exp(1)$ ,  $i^2 \equiv -1$ ,  $d$  (Differential)) aufrecht gesetzt werden.

Falls Sie Ihren Bericht mit L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X schreiben, können Ihnen die zwei Pakete

<http://www.ams.org/publications/authors/tex/amslatex>

- Quellen:
  - für den mathematischen Formelsatz) und <http://www.tug.org/applications/hyperref/> (um PDF-Befehle zu Aktivieren) möglicherweise helfen. Um das Layout des Versuchsberichts zu verbessern, können Sie das Packet SIunits verwenden und den Hinweisen von [2] und [3] folgen.
  - Ferner ist auf die korrekte Schreibweise von Beschriftungen von Achsen und Kopfzeilen von Tabellen zu achten. Die Schreibart  $U$  [V] ist falsch und muss durch  $U$  /  $V$  ersetzt werden. Auch die Angabe von Zahlenwerten in Tabellen wie  $2,998\text{ E+008}$  ist nicht wissenschaftlich und muss durch  $2,998 \cdot 10^8$  ersetzt werden.
  - Vor der Abgabe überprüfen Sie bitte den Bericht auf Vollständigkeit!

## Literatur

- [1] R. J. Barlow. *Statistics. A guide to the Use of Statistical Methods in the Physical Sciences*. 1989 (siehe S. x).
- [2] A. Thomson und B. Taylor. *The NIST guide for the use of the International System of Units*. URL: <https://www.nist.gov/pml/special-publication-811> (besucht am 20.06.2022) (siehe S. xii).
- [3] I. Mills und W. Metanomski. *Interdivisional Committee on Nomenclature and Symbols, IUPAC, On the use of italic and roman fonts for symbols in scientific text. 1999* (siehe S. xii).

## 2.3 Weitere Hinweise

Diese Hinweise dienen der Verbesserung des Versuchsberichts:

- Verwenden Sie keine englischen Wörter (wie z.B. Fit, Plot), Anglicismen (z.B. in 2010) oder Formulierungen, die im täglichen Gebrauch im Labor zwar benutzt werden, aber nicht den Ausprächen eines geschriebenen Textes genügen (z.B. fitten, Fifthfunktion). Außerdem achten Sie bitte darauf, ein Komma statt eines Punktes in numerischen Werten zu verwenden.
- Verwenden Sie Querverweise an Stelle von „siehe oben“ oder „siehe unten“, um das Lesen des Textes zu erleichtern.
- Numerieren Sie nur die Gleichungen, auf die im Text verwiesen wird.
- Vermeiden Sie den Zeilenwechsel zwischen einem numerischen Wert und seiner Einheit, und den Wörtern Abb., Tab., Kap., Seite, Gl. und der entsprechenden Zahl.
- Unterscheiden Sie zwischen Bindestrich (-), Bis- und Gedankenstrich (-). Der Bindestrich wird benutzt, um zwei zusammengehörende Wörter miteinander zu verbinden, der Bis-Strich wird in der Notation von Intervallen verwendet, während der Gedankenstrich zwischen zwei Sätzen angesetzt wird, um eine Denkpause oder die Betonung eines Wechsels einzufügen. Verwenden Sie das Minuszeichen nur in mathematischen Formeln.





Gray (Gy). 1 Gy entspricht einer Energieabgabe von  $1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ . Die biologische Wirkung (Strahlungswichtungsfaktor) hängt nicht nur von der Menge der absorbierten Strahlenergie, sondern auch von der Ionisierungsdichte längs der Bahn der ionisierenden Teilchen ab. Die wichtigsten Arten dicht ionisierender Strahlung sind: Schnelle Neutronen bzw. die durch sie ausgelösten Rückstoßprotonen,  $\alpha$ -Teilchen und Protonen nebst  $\alpha$ -Teilchen, die infolge von Kerneaktionen mit langsamem Neutronen im Gewebe erzeugt werden. Ihre biologische Wirksamkeit ist, verglichen mit der von  $\gamma$ -Strahlung sehr groß. Will man die Wirkung beliebiger Strahlungen auf Gewebe miteinander vergleichen, so verwendet man den Begriff der Äquivalentdosis. Ihre Einheit ist das Sievert (Sv). Die Äquivalentdosis ist das Produkt aus Energiedosis und Strahlungs-Wichtungsfaktor. Dieser ist für Röntgen-, Gamma- und Betastrahlung 1, für  $\alpha$ -Strahlung aus radioaktivem Zerfall 20.

### 3 Strahlenschutzbelehrung für die Teilnehmer des P4 der Physikalischen Institute der Universität Bonn

#### 3.1 Einleitung

Im Fortgeschrittenen-Praktikum haben Sie bei einigen Versuchen mit ionisierender Strahlung zu tun. Dabei sind Vorsichtsmaßnahmen zum Schutz Ihrer Gesundheit und zur Vermeidung von Umweltbelastungen zu beachten. Das wichtigste Ziel ist es, Ihre Strahlenbelastung so gering wie möglich zu halten. Durch Verordnungen der Bundesregierung wird der Umgang mit Röntgenstrahlung sowie mit radioaktiven Stoffen genau geregelt. Alle Personen, die hiermit im weitesten Sinne zu tun haben, sind über mögliche Gefahren und die erforderlichen Schutzmaßnahmen zu belehren. Über den Inhalt und den Zeitpunkt der Belehrung sind Aufzeichnungen zu führen, die von diesen Personen zu unterschreiben sind.

#### 3.2 Strahlenwirkung auf Organismen

Alle biologischen Reaktionen auf ionisierende Strahlung sind auf die gleichen Grundvorgänge der Ionisation und Anregung von Atomen und Molekülen zurückzuführen. Durch diese Prozesse kann das physikochemische Gleichgewicht und morphologischen Veränderungen kommen wodurch es zu verschiedenen funktionellen und morphologischen Strahlenwirkung steht. Diese ist abhängig von den Eigenschaften des bestrahlten Gewebes, von der Ionisationsdichte der jeweiligen Strahlung ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  bei verschiedenen Energien), von der Dosisleistung, d.h. der absorbierten Strahlungsenergie pro Zeiteinheit und Masse, und von der Größe des bestrahlten Körpervolumens. Letzteres ergibt sich aus der Anordnung der Strahlenquelle zum Körper und der Durchdringungsfähigkeit der Strahlung.

#### 3.3 Definitionen und Maßeinheiten

Die Aktivität einer radioaktiven Substanz wird in Becquerel (Bq) angegeben.  
 $1\text{Bq} = 1\text{ Zerfall pro Sekunde}$ . Für die früher verwendete Einheit Curie (Ci) gilt:  $1\text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}\text{ Bq}$ . Als Maß für die primäre Schädigung des Gewebes wird die Energiedosis definiert. Sie ist der Quotient aus der Energie, die durch die ionisierende Strahlung auf das Material in einem Volumenelement übertragen wird, und der Masse in diesem Volumenelement. Sie hat die Einheit

Da man im Praktikum mit schwachen radioaktiven Präparaten arbeitet, soll hier nicht die Wirkung hoher Dosen behandelt werden. Es darf aber nicht die Dauerbelastung kleiner Dosen übersehen werden. Für das Auftreten von Schädigungen gibt es keine prinzipielle, nur eine praktische untere Grenze. Die Klärung der Wirkung schwacher Dauerbestrahlung ist wichtig für die Festlegung der Toleranzdosen. Diese Problemstellung führt auf die Frage nach der natürlichen Strahlenbelastung, der der Organismus infolge der Umweltbedingungen ausgesetzt ist. Sie setzt sich aus der äußeren und inneren Strahlenbelastung zusammen. Zu der ersten ist kosmische Strahlung und die der umgebenden Luft und der Gebäudewände sowie die Erdstrahlung zu rechnen. Die durchschnittliche jährliche kosmische Strahlenbelastung beträgt in unseren Breiten  $0,35 \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$ , der durch Betonbauten hervorgerufene Beitrag kann  $1 \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$  erreichen, während die Erdstrahlung stark von der Gesteinsunterlage (Ra, K) abhängt und zwischen  $0,55$  und  $2,5 \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$  liegt. Die innere Strahlenbelastung röhrt von der Gesamtheit aller im Organismus befindlichen radioaktiven Stoffe her. Insbesondere sind das  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{14}\text{C}$  sowie in der Luft vorhandene Thorium- und Radiumemanation, die in die Lunge gelangt. Man schätzt die innere Strahlenbelastung auf  $0,25 - 2,5 \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$ . Es lässt sich also ferner, dass in unseren Breiten der Organismus einer natürlichen Dauerbelastung von mindestens  $2 \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$  ausgesetzt ist. Eine biologische Wirkung dieser Strahlenbelastung wird zwar angenommen, konnte aber bis jetzt wegen der geringen Größe des Effektes nicht eindeutig erfasst werden. Bei vorschriftsmäßigem Umgang mit den Strahlungsquellen im Praktikum liegt die zusätzliche Strahlenbelastung weit unter der natürlichen Belastung.

Die strahlenempfindlichsten Gewebe des Körpers sind die lymphatischen Organe, ferner Knochenmark und Magenschleimhaut. In den Lymphknoten finden sich schon nach  $250\text{ mSv}$  deutliche, wenn auch in der Regel rasch ausheilende Schäden. Auch die genetischen Strahlenwirkungen spielen bei der Festlegung der Toleranzgrenze eine Rolle. Es besteht ein Zusammenhang zwischen der verabfolgten Gesamtstrahlendosis und der Häufigkeit von Germutationen. Daher empfiehlt es sich, die Strahlenbelastung bis zum Ende der Fortpflanzungsperiode so klein wie möglich zu halten. Bei beruflich strahlenexponierten Personen darf eine Summdosis von  $400\text{ mSv}$  während der gesamten beruflichen Tätigkeit nicht überschritten werden.

### 3.5 Schutzmaßnahmen und Arbeitsregeln

Alle Personen, die Umgang mit ionisierender Strahlung haben, unterliegen der Strahlenschutzauberwachung. Da die zu erwartenden Dosiswerte der Praktikanten selbst bei Aufsummierung über ein halbes Jahr unter der Nachweisschwelle von Filmplaketten liegen, den üblicherweise im Strahlenschutz verwendeten Dosismessgeräten, findet die Überwachung durch Messung der aktuellen Ortsdosisleistung in den Praktikumsräumen durch den Strahlenschutz der Universität statt. Aus diesen Messungen wird auf die maximal mögliche Dosis, die Praktikanten erhalten könnten, geschlossen. Die erwarteten Dosiswerte sind für unser Praktikum weit unter den Nachweisschwellen von Filmdosimetern und daher als ungefährlich anzusehen. Damit die Strahlenbelastung zusätzlich möglichst klein gehalten wird, sind folgende Regeln zu beachten:

Alle Arbeiten mit radioaktiven Substanzen sollten möglichst schnell durchgeführt werden. Dabei ist zu bedenken, dass die Strahlenbelastung quadratisch mit der Präparatenfernung abnimmt. Am einfachsten lässt sich eine Quelle in ihrer nächsten Umgebung abschirmen. Bei relativ geringem Gesamtgewicht des Absorbermaterials ist hier der Raumwinkel, auf den sich der Schutz auswirkt, maximal.

Bei sachgemäßer Handhabung der radioaktiven Quellen im Praktikum, wobei Sie bitte den Anweisungen des betreuenden Tutors folgen, ist die Strahlenbelastung durch  $\alpha$ - $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung kleiner als die natürliche Strahlenbelastung.

Die im Praktikum verwendeten radioaktiven Präparate sind in inaktive Präparathalter fest eingeschlossen, so dass keine Gefahr einer Kontamination bzw. Inkorporation besteht. Sollte bei der Durchführung eines Versuches ein Präparat beschädigt werden, benachrichtigen Sie sofort den für Ihren Versuch zuständigen Tutor, einen Praktikumsleiter oder einen der Strahlenschutzbeauftragten Dr. K. Peithmann, HISKP, Tel. 73 3470 bzw. Dr. C. Wendel, HISKP, Tel. 73 5451. Die radioaktiven Präparate sind in Tresoren mit Blei weitgehend abgeschirmt. Bei manchen Versuchen müssen Sie hintereinander mit verschiedenen Präparaten arbeiten. In diesen Fällen benutzen Sie die vorhandenen Abschirmvorrichtungen und halten Sie Abstand von den gerade nicht benutzten Präparaten. Die Praktikanten tragen für alle ihnen ausgehändigten sowie die in den Messapparaturen vorhandenen Präparate für die gesamte Versuchsdauer die Verantwortung. Nach dem Versuch sind nicht fest eingebaute Präparate von den Türen in die entsprechenden Tresore wegzuschließen.

gez. Dr. C. Wendel

Bonn, 26. Januar 2015

## P401 Elektronische Übergänge in Atomen

### P401.1 Versuchsziel

Mit einfachen spektroskopischen Methoden wurde schon im Jahr 1885 von Johann Jakob Bahmer gezeigt, dass Atome Energieniveaus besitzen. Dies zog letztlich die Einführung von Termschemata nach sich. Mit diesen, bei Mehrelektronenatomen recht komplexen Schemata lassen sich die beobachtbaren Spektrallinien eines Atoms erklären.

Werden Atome in ein Magnetfeld gebracht, so spalten die Energieniveaus weiter auf. Die Entartung der Energieniveaus wird aufgehoben und kann beobachtet werden. Pieter Zeeman wies den nach ihm benannten Effekt im Jahr 1896 nach, der drei Jahre später durch Hendrik Antoon Lorentz erklärt werden konnte. Im Jahr 1902 erhielten beide für ihre Entdeckung den Nobelpreis für Physik.

Auch beim Zeeman-Effekt lassen sich mit dem Termschema wiederum Aussagen über die elektronischen Übergänge machen. Dabei müssen – wie auch ohne externes Magnetfeld – die Auswahlregeln beachtet werden.

Im Versuch soll mit einem hochauflösenden Fabry-Pérot-Etalon der Zeeman-Effekt an Cadmium ausgemessen werden. Die Bestimmung des Polarisationszustandes der einzelnen Spektrallinien wird durchgeführt. Aus der Messung soll das Bohrsche Magneton bestimmt werden.

Ferner wird der Franck-Hertz-Versuch mit Quecksilber durchgeführt. Dieser Versuch wurde erstmals von James Franck und Gustav Hertz in den Jahren 1911 bis 1914 durchgeführt und belegt die Existenz von diskreten Energieniveaus in Atomen. Für diesen Versuch wurde den beiden im Jahr 1925 der Nobelpreis für Physik verliehen.

Im Versuch soll die Übergangsenergie der Quecksilber-Resonanzlinien bestimmt werden und der Einfluss der Temperatur und der zur Durchführung des Versuchs nötigen Gegenspannung auf die Messung untersucht werden.

### P401.2 Notwendige Vorkenntnisse

#### Teil I – Zeeman-Effekt

- Verhalten von Atomen in äußeren Magnetfeldern
  - Magnetisches Moment, Zeeman- und Paschen-Back-Regime, Energieverschiebungen, Landé-Faktor
  - Auswahlregeln elektrischer Dipolübergänge, Übergänge in Cadmium, insbesondere der Übergang  ${}^1\text{D}_2 \rightarrow {}^1\text{P}_1$  der fünften Schale
  - Winkelverteilung elektrischer Dipolstrahlung, Richtungsabhängigkeit der abgestrahlten Polarisation für die verschiedenen Übergänge
  - Fabry-Pérot-Etalon
    - Funktionsprinzip, Auflösungsvermögen, Finesse
    - Natürliche Linienbreite und Linienverbreiterungen
    - Viertel-Wellenlängen-Platte
    - Hall-Sonde

#### Teil II – Franck-Hertz-Versuch

- Röhrenelektronik
  - Glühemission, Elektronenbewegung in einem Triodensystem, Gegenfeldmethode, Anodenstromkurve
  - Thermodynamik und Stoßprozesse
    - Gaskinetik, elastische und inelastische Stöße, mittlere freie Weglänge, Stoßanregung
- Quecksilberatom
  - Termchema, Stoßanregungen der  ${}^6\text{S}_0 \rightarrow {}^6\text{P}$  Übergänge und Stoßquerschnitte

### P401.3 Literatur

- Haken, Wolf: „*Atom- und Quantenphysik*“
- Alonso, Finn: „*Quantenphysik und Statistische Physik*“
- Mayer-Kückuk: „*Atomphysik*“
- Hecht: „*Optik*“
- Schwabl: „*Statistische Mechanik*“
- Alonso, Finn: „*Grundkurs: Theoretische Physik 4/6*“
- Nolting: „*Laserspektroskopie*“
- Demiröder: „*Laserspektroskopie*“

P401.4 Aufgaben

Teil I – Zeeman-Effekt

- Aufbau der Apparatur
  - Justieren mit eingesetzter Cd-Lampe
  - Beobachtung der Aufspaltung mit und ohne Magnetfeld mit einem Okular in transversaler und longitudinaler Konfiguration
  - Bestimmung des Polarisationszustandes der einzelnen Linien
  - Kalibrierung des Magnetfeldes
  - Messung der Zeeman-Aufspaltung an der roten  $643,8 \text{ nm}$ -Cadmium-Linie mit einer CCD-Kamera

! Hierzu bitte einen USB-Stick mitbringen!

- Bestimmung des Bohrschen Magnetons  $\mu_B$
  - Abschätzen des Auflösungsvermögens und der Finesse des Etalons

**Teil II – Franck-Hertz-Versuch**

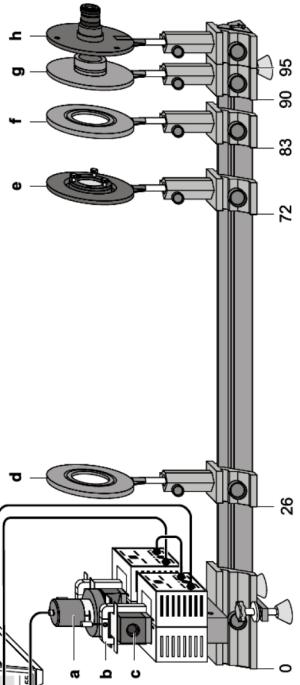
  - Bestimmung der Anregungsenergie für die Hg-Resonanzlinie anhand von für unterschiedliche Dampfdrücke und Gegenspannungen
  - Diskussion der Form der Anodenstromkurven

P401.5 Durchführung und Analyse

Teil I = Zeeman-Effekt

! Achtung!

- Die elektrischen Zuleitungen an der Cadmiumlampe sind frei zugänglich!
    - auf keinen Fall stromführende Teile berühren!
  - Den Quarzkolben der Cadmiumlampe *niemals* mit bloßen Händen berühren!
  - Vor dem Einschalten des Magneten kontrollieren, ob die Knebel-schrauben fest angezogen sind (warum?)!



**Abbildung P401.1:** Versuchsaufbau in transversaler Konfiguration (LD Handblätter Physik)

P401-5.1 Aufbau der Anordnung

- Abschätzen des Auflösungsvermögens und der Finesse des Etalons
  - Bestimmung des Domischen Magnetonus  $\mu_B$
  - Nach Abb. P401.1 ist der Versuch aufzubauen.
  - a Cadmiumlampe mit Halbleiter**

Teil II – Franck-Hertz-Versuch

- Bestimmung der Anregungsenergie für die Hg-Resonanzlinie anhand der Anodenstromkurven für unterschiedliche Dampfdrücke und Gegenspannungen

- \* Brechungsindex:  $n = 1,457$
- \* Reflexionsgrad:  $R = 0,85$

- g Interferenzfilter (rot) in Halterung
    - \* Mittelwellenlänge:  $\lambda = 643,8(20)$  nm
    - \* Halbwertsbreite: 13,0 nm
  - h Okular mit Strichskala
  - Die Knebelschrauben während des ganzen Versuches *nicht* lösen!
  - Die Cadmiumlampe vorsichtig zwischen die Polschuhe schieben.
  - Die Lampe soll sich genau in der Mitte der Polschuhe befinden
  - Die Abschmelzstelle des Lampenkollbens soll nach hinten zeigen.

- Die Zuleitungen möglichst weit aus dem Strahlengang drehen.
- Die Spulen des Elektromagneten in Reihe beschalten (unterschiedliche Polung beachten) und an das Hochstrom-Netzgerät anschließen.

### Justierung der Apparatur

- Nach dem Einschalten der Cadmiumlampe zwei Minuten bis zur hinreichend starken Lichtemission warten.
- Das Okular scharf auf die Strichskala einstellen.
- Die Abbildungslinse verschieben, bis ein scharfes Bild des Ringsystems zu beobachten ist.
- Die Kondensorlinse verschieben, bis das beobachtete Bild möglichst gleichmäßig ausgelenkt ist.
- Durch leichten Kippen des Fabry-Pérot-Etalons mit den Stellschrauben das Zentrum des Ringsystems auf die Mitte der Strichskala verschieben.

### P401.5.2 Beobachtung der Aufspaltung

#### Transversale Konfiguration

- Zunächst das Interferenzmuster ohne Magnetfeld beobachten.
- Aufspaltung skizzieren.
- Magnetstrom langsam erhöhen, bis die aufgespaltenen Ringe deutlich voneinander getrennt sind.
- Aufspaltung skizzieren.

- Zur Unterscheidung von  $\pi$ - und  $\sigma$ -Komponenten den Polarisationsfilter vor das Etalon stellen.
- Den Filter drehen, bis die  $\sigma$ -Komponente verschwindet.
- Die Winkel des Filters zusammen mit der dazugehörigen Skizze aufnehmen.

### P401.5.3 Messung der Aufspaltung

#### Aufbau

- Das Hochstrom-Netzgerät ist zunächst auszuschalten.
- Zwischen die Magnetspulen ist das „Cassy-Modul“ zur Strommessung zu schalten.
- Die ausgeschaltete Cadmiumlampe *vorsichtig* zwischen den Polschuhlen des Magneten herausziehen.
  - Die Knebelschrauben *nicht* lösen!
- Der Filter ist wieder aus dem Strahlengang zu entfernen.
- Nun wird der Strom so eingestellt, dass die aufgespaltenen Linien gerade unterschieden werden können. Um daraus später das Auflösungsvermögen bestimmen zu können, ist der Magnetstrom zu notieren.
  - Niemals die Hall-Sonde gleichzeitig mit der Lampe zwischen die Polschuhe schieben!

### **agnetfeldkalibrierung**

Eine Kalibrierungskurve für das Magnetfeld gegen den Magnetstrom ist aufzunehmen, damit die weitere Auswertung erfolgen kann.

- Das Programm „*Magnetfeldkalibrierung*“ auf dem Computer starten.
  - Die Sonde ist – auch unter Zuhilfenahme der Spulen – so zu justieren, dass sie mittig feldmesswerte bei geringer Bestromung der Spulen – so zu justieren, dass sie mittig zwischen den Polschuhnen sitzt.
  - Im entsprechenden Menü jeden Kanals mittels Klick auf die Schaltfläche  $\rightarrow 0 \leftarrow$  einen eventuell auftretenden Offset ausgleichen.

#### **Die Messung mit F9 starten.**

- Den Strom nun langsam erhöhen, sodass ein Strom von 0 A bis maximal 10 A durchfahren wird.
- Die Messung mit **F9** wieder stoppen.
- Den Strom wieder auf 0 A drehen.
- Mit einem Rechtsklick der Maus auf die Tabelle diese mit „*Tabelle kopieren*“ kopieren und in einer Textdatei speichern.

### **Justierung der Apparatur**

- Die Halb-Sonde wieder entfernen und die Cadmiumlampe, wie in P401.5.1 beschrieben, wieder *vorsichtig* einsetzen.
- Das Okular gegen die CCD-Kamera tauschen. Die Kamera „*VideoCom*“ mit Spannung versorgen und mit dem Computer verbinden.

#### **Das Programm „*VideoCom-Intensitäten*“ starten.**

- Im Menü „*Kalibrierung / Theorievergleich*“ (F5), Register „*Beugungswinkel*“, die Brennweite  $f$  der abbildenden Sammellinse eingeben. Das Programm berechnet dann aus der Pixelkoordinate  $p$ , die von 0 bis 2047 läuft, den Winkel  $\alpha$  über

$$\alpha = \arctan \left( \frac{(1024 - p) \cdot 0,014 \text{ mm}}{f} \right)$$

- Mit **F9** die Messung mit 2048 Punkten zur Justierung starten.

- Die Belichtungszeit mit der zugehörigen Schaltfläche so einstellen, dass die Peaks eine Intensität von 50 % haben.

- Um zu erreichen, dass sich die CCD-Zeile in der Brennebene der Abbildungslinse befindet, wird diese Linse verschoben, bis die Peaks der beobachteten Kurve scharf sind und die maximale Intensität haben.

- Das Zentrum des Ringsystems muss nun auf die CCD-Zeile abgebildet werden. Dazu wird das Etalon mit den Stellschrauben gekippt. Das Zentrum des Ringsystems ist gefunden, wenn beim Verkippen des Etalons auf dem Bild keine weiteren Peaks hervorquellen und die beiden zentralen Peaks den maximalen Abstand haben.

- Nun wird das Etalon so gekippt, dass der Mittelpunkt zwischen den beiden ersten Peaks auf 0° der Winkelskala liegt.
- Die Kondensorlinse wird so verschoben, dass eine möglichst gleichmäßige Ausleuchtung der gesamten CCD-Zeile erreicht wird.

### **Messung**

- Zunächst wird ohne Magnetfeld eine Messung mit F9 durchgeführt. Um statistische Schwankungen zu minimieren, mit der entsprechenden Schaltfläche ( $\Sigma_1$ ) eine Mittelwertbildung der Intensitäten vornehmen. Die Mittelwertbildung braucht nicht lange zu laufen. Es reicht, wenn der nebenstehende Zähler bis 40 läuft.

- Die Messung wieder stoppen (erst F9, dann  $\Sigma_1$ ) und die Daten der Tabelle über einen Rechtsklick der Maus auf die Tabelle mit „*Tabelle kopieren*“ in einer Textdatei speichern.
- Die Intensität der Peaks sollte etwa bei 50 % liegen. Gegebenenfalls die Belichtungszeit erneut anpassen, da sich die Helligkeit der Cadmiumlampe im Magnetfeld ändert.

- Mit F9 erneut eine Messung starten. Den Magnetstrom nun langsam hochfahren und die Aufspaltung beobachten. So kann ein sinnvoller Messbereich ermittelt werden.
- Mit Alt+Z den Ausschnitt eines inneren Peaks vergrößern.
- Nun in einem sinnvollen Messbereich die Aufspaltung für verschiedene Magnetströme messen.
  - Für jeden Magnetstrom die Messung mit F9 starten, die Mittelwertbildung benutzen, die Messung stoppen und die Werte mit dazugehörigen Magnetstrom in einer Textdatei speichern.
  - Es sind mindestens zehn Messungen mit verschiedenen Strömen durchzuführen.
  - Da sich die Spulen mit der Zeit erhitzten, sollte der Strom *nur* während der Mittelwertbildung fließen!

- Abschließend ist noch eine zweite Magnetfeldkalibrierung durchzuführen.

### **P401.5.4 Auswertung**

#### **Beobachtung des Zeeman-Effektes**

- Es sind die mit dem Okular beobachteten Interferenzmuster zu erklären.
- Die Polarisation der einzelnen Linien ist zu diskutieren.

## Messung des Zeeman-Effektes

- Zur Kalibrierung des Magnetfeldes ist eine geeignete Funktion an die aufgenommenen Daten anzupassen, die die Sättigung der Messkurve berücksichtigt.

• Für jede Messung sind für die  $\pi$ - und  $\sigma$ -Peaks einer Seite eines inneren Rings die Peakschwerpunkte zu bestimmen. Hierzu werden Gauß-Funktionen – eine Überlagerung dreier Gauß-Kurven ist sinnvoll – an die Peaks angepasst.

• Die Energieverschiebung  $\Delta E$  ist aus der relativen Wellenlängenverschiebung  $\Delta\lambda/\lambda_{\sigma^\pm}$ , die aus den Schwerpunkten und ohne Nutzung der Beugungsordnung gewonnen wird, zu berechnen. Hierzu ist die Interferenzbedingung für das Etalon zu benutzen, wobei Abb. P401.2 hilfreich sein kann.

$$\Delta E = -\frac{h c}{\lambda_\pi} \frac{\lambda_{\sigma^\pm} - \lambda_\pi}{\lambda_{\sigma^\pm}} \approx -\frac{h c}{\lambda_\pi^0} \frac{\lambda_{\sigma^\pm} - \lambda_\pi}{\lambda_{\sigma^\pm}} \equiv -\frac{h c}{\lambda_\pi^0} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\sigma^\pm}}$$

- Die Energieverschiebung  $\Delta E$  ist als Funktion der magnetischen Flussdichte  $B$  aufzutragen. Daraus ist das Bohrsche Magneton  $\mu_B$  zu bestimmen.
  - Die magnetische Flussdichte  $B$  ist gegebenenfalls durch geeignete Berücksichtigung vorhandener Abweichungen der beiden Kalibrierungsfunktionen zueinander zu gewinnen.

## Weitergehende Überlegungen

- Das Auflösungsvermögen und die Finesse des Etalons sind abzuschätzen.
  - Dazu sind zunächst die theoretischen Werte für Auflösungsvermögen und Finesse zu berechnen.
  - Dann ist eine Abschätzung für das Auflösungsvermögen und die Finesse mit den genessenen Magnetstrom-Werten der transversalen und longitudinalen Beobachtung durchzuführen.
  - Aus dem mit der CCD-Kamera aufgenommenen Interferenzbild ohne Magnetfeld ist ebenfalls die Finesse abzuschätzen. Dabei ist der Rechenweg zu dokumentieren.
  - Die Doppler-Verbreiterung der Linien ist abzuschätzen, wobei für die Cd-Lampe eine Temperatur von 1000 K angenommen werden kann. Die Doppler-Verbreiterung ist mit der Breite einer mit der CCD-Kamera aufgenommenen Linie zu vergleichen.
  - Es ist ein gegebenenfalls vorhandener Unterschied zwischen theoretischer und gemessener Finesse zu diskutieren.
- Zunächst für vier verschiedene Gegenspannungen  $U_2$  – bei fester Temperatur  $T$  – die Anodenstromkurven  $I_A(U_1)$  aufnehmen. Sinnvolle Gegenspannungen liegen im Bereich von 2 V bis 4 V.
- Weiterhin für vier verschiedene Temperaturen  $T$  – bei fester Gegenspannung  $U_2$  – die Anodenstromkurven  $I_A(U_1)$  aufnehmen. Sinnvolle Temperaturen liegen im Bereich von 165 °C bis 180 °C.

## Teil II – Franck-Hertz-Versuch

### P401.5.5 Aufbau

Die Franck-Hertz-Röhre befindet sich in einem Ofen, dessen Temperatur über das Steuergerät des Franck-Hertz-Versuches geregelt wird. Mittels dieses Steuergeräts werden weiterhin die Kathodenheizspannung  $U_H$ , die Beschleunigungsspannung  $U_1$  und die Gegenspannung  $U_2$  geregelt. Der Anodenstrom  $I_A$  und die Beschleunigungsspannung  $U_1$  werden direkt vom Steuergerät abgegriffen und über ein „Cassy-Modul“ vom Messrechner ausgelesen.

Die Beschaltung der Franck-Hertz-Röhre erfolgt über die Rückseite des Ofens und ist bereits vorgenommen. Durch eine Glasscheibe in der Frontseite ist die Franck-Hertz-Röhre beobachtbar.

### P401.5.6 Durchführung

Der Ofen ist auf eine Temperatur von  $T \approx 165^\circ\text{C}$  zu heizen. Es ist dabei darauf zu achten, dass die Aufheizzeit ausreichend ist, um die Franck-Hertz-Röhre gleichmäßig aufzuheizen, da schon geringe Temperaturänderungen erhebliche Dichteänderungen im Hg-Dampf hervorrufen können.

#### ! Vorsicht !

Das Ofengehäuse wird sehr heiß. Bei längerem Betrieb können sich der Haltegriff und die Anschlüsse samt der angeschlossenen Kabel ebenfalls stark erwärmen.

Der Messrechner ist einzuschalten und das Programm „Cassy Lab“ zu starten, indem das Programm „Franck-Hertz“ geladen wird. Am Steuergerät wird mittels des Schalters „Function“ der Modus „Ramp“ eingestellt. Die Beschleunigungsspannung wird in diesem Modus automatisch bis zur Maximalspannung  $U_1^{\max}$  erhöht. Die Messung wird mit dem „Start/Stopp“-Knopf gestartet; direkt davor muss die Messung in „Cassy“ gestartet werden. Die Daten jeweils mit einem Rechtsklick der Maus auf die Tabelle mit „Tabelle kopieren“ kopieren und in einer Textdatei speichern.

- Zunächst für vier verschiedene Gegenspannungen  $U_2$  – bei fester Temperatur  $T$  – die Anodenstromkurven  $I_A(U_1)$  aufnehmen. Sinnvolle Gegenspannungen liegen im Bereich von 2 V bis 4 V.

- Weiterhin für vier verschiedene Temperaturen  $T$  – bei fester Gegenspannung  $U_2$  – die Anodenstromkurven  $I_A(U_1)$  aufnehmen. Sinnvolle Temperaturen liegen im Bereich von 165 °C bis 180 °C.

### ! Achtung !

Bei zu hoher Beschleunigungsspannung  $U_1$  kann die Franck-Hertz-Röhre durchzünden. Dies bedeutet ein starkes Ansteigen des Anodenstroms  $I_A$  und kann die Kathode beschädigen. Erkenbar ist das Durchzünden an einem bläulichen Aufleuchten. Daher ist das Franck-Hertz-Rohr zu beobachten, wenn die Gitterspannung hochläuft. Die Zündspannungen können sich von Gerät zu Gerät unterscheiden. Es ist also kein Verlass auf beobachtete Werte der Partnergruppe. Experimentell beobachtete Zündspannungen liegen im Bereich von  $U_1 = 35\text{--}45\text{ V}$  (Stand 10/2023), wobei das Netzeil mit einer Einstellung von  $U_1^{\max} = 60\text{ V}$  startet. Diese Einstellung muss nach dem Einschalten also deutlich reduziert werden.

Die Zündspannung steigt mit höherer Teilchendichte aufgrund der kleineren freien Weglänge. Ein Durchzünden wird durch Drücken des „Start/Stopp“-Knopfes verhindert, wodurch die begonnene Messung abgebrochen wird. Falls die Franck-Hertz-Röhre durchgezündet ist, ist anschließend der am Steuergerät eingestellte Höchstwert der Beschleunigungsspannung  $U_1$  zu vermindern und die Messung mit diesem neuen Wert durchzuführen.

Für eine sinnvolle Auswertung der Anodenstromkurven sollten im Messbereich jeweils mindestens 4 Maxima zu sehen sein. Falls für eine Messung die Maxima zu groß sind und außerhalb des Messbereichs liegen kann es sinnvoll sein, diese bei einer höheren Gegenspannung zu wiederholen.

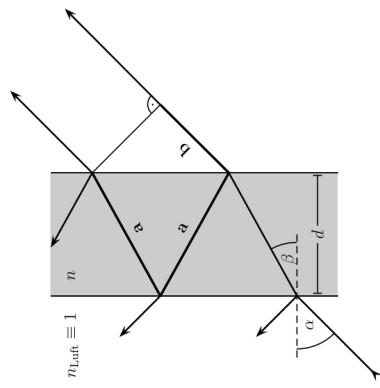
## P401.6 Anhang

- Die Dampfdruckkurve von Quecksilber lässt sich durch folgende Formel darstellen:

$$\log p = 10,55 - 3333/T - 0,85 \log T \quad (p \text{ in Torr und } T \text{ in Kelvin})$$

- Ausgewählte Energieniveaus von Quecksilber:

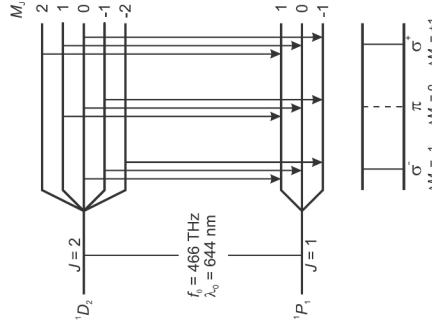
$1S_0$	$3P_0$	$3P_1$	$3P_2$	$1P_1$	$3S_1$
0,00 eV	4,67 eV	4,89 eV	5,46 eV	6,70 eV	7,73 eV



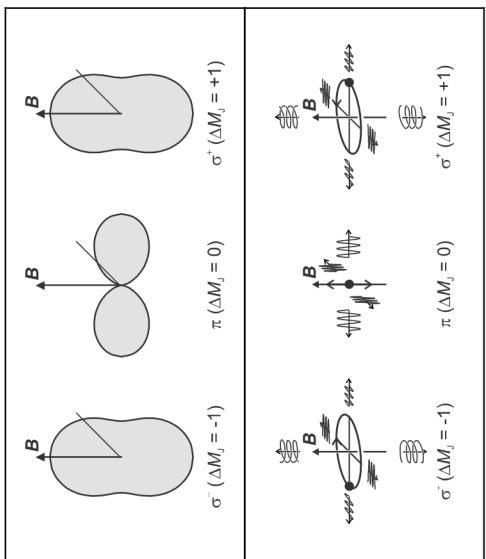
**Abbildung P401.2:** Strahlengang im Fabry-Pérot-Etalon.

## P401.5.7 Auswertung

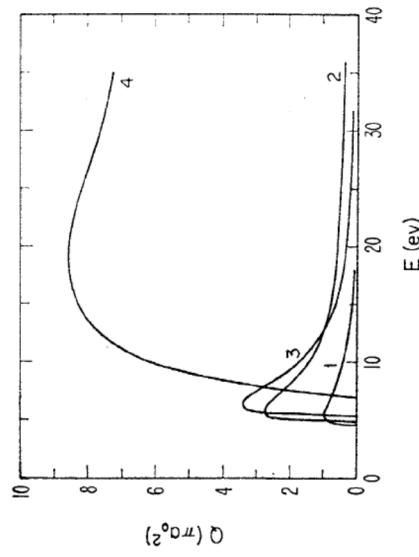
- Aus den Anodenstromkurven  $I_A$  ist die Energiedifferenz  $\Delta E$  zwischen dem  $6S$ - und dem  $6P$ -Niveau des Hg-Atoms zu bestimmen. Hierbei ist auch die Breite der Kurven zu bestimmen.
- Die bestimmte Energiedifferenz  $\Delta E$  ist mit Blick auf das Hg-Termschema (s. Abb. P401.5) und den Wirkungsquerschnitt für Elektronenstoßanregung von Hg-Atomen (s. Abb. P401.6) zu diskutieren.
- Der Einfluss der Temperatur  $T$  und der Gegenspannung  $U_2$  auf den Verlauf des Anodenstroms  $I_A$  ist zu diskutieren. Dabei ist auch zu erläutern, warum es bei ganzen Vielfachen der Anregungsenergie keine scharfen Einbrüche im Anodenstrom gibt.
- Ferner ist zu erklären, warum die praktische Durchführung des Versuchs mit Hg-Atomen auf ein relativ kleines Temperaturintervall beschränkt ist.



**Abbildung P401.3:** Niveaupaltung und Übergänge beim normalen Zeeman-Effekt an Cadmium (LD Handblätter Physik).



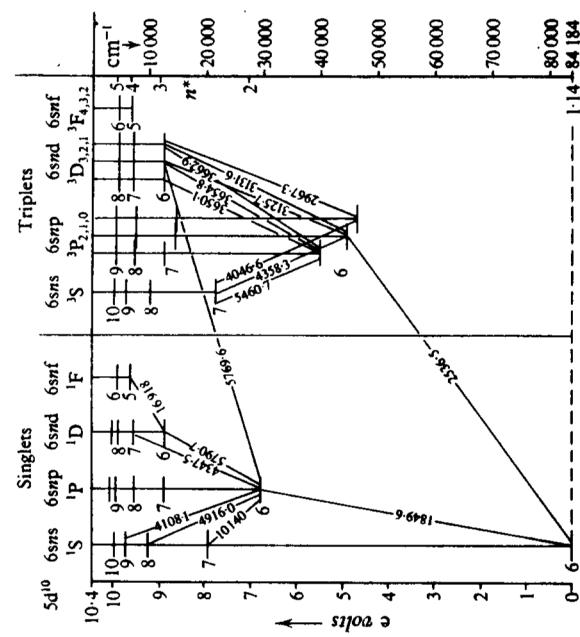
**Abbildung P401.4:** Abstrahlungsrichtungen (oben) und Polarisationsverteilung (unten) der elektrischen Dipolübergänge für  $\Delta M_J = 0, \pm 1$  (LD Handblätter Physik).



**Abbildung P401.6:** Totaler Wirkungsquerschnitt  $Q(\pi a_0^2)$  von Hg für Elektronenstoßanregung.  
1:  $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_0$ ; 2:  $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_1$ ; 3:  $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_2$ ; 4:  $6^1S_0 \rightarrow 6^1P_1$ .  
(Moiseiwitsch, „Electron Impact Excitation of Atoms“, Rev. Mod. Phys. 40, S. 267, 1968).

Viel Erfolg bei der Durchführung!

Stand: 10/2023



**Fig. III. 28. Term diagram of Hg.**

**Abbildung P401.5:** Vereinfachtes Hg-Termschema. (Kuhn, Atomic Spectra, S. 192, 1962.)



## P402 Quantelung von Energie

### P402.1 Versuchsziel

Durch Spektroskopie gelingt es, Informationen über den Atomaufbau zu erhalten. Es muss jedoch erklärt werden, weshalb Emissions- und Absorptionslinien auftreten. Diese Quantelung von Energie und der Zusammenhang zwischen Lichtfrequenz und Energie kam in einem fundamentalen Versuch – der Untersuchung des Photoeffektes – nachgewiesen werden.

Mit der Kenntnis dieses Zusammenhangs können die Spektralserien von Atomen durch diskrete Anregungsstufen der Atome erklärt werden. Beim Wasserstoffatom können die Energiestufen bei der Balmer-Serie beobachtet und ausgemessen werden.

Im Versuch wird die Energieabhängigkeit des Photoeffekts beobachtet und das Plancksche Wirkungsquantum bestimmt sowie die Austrittsarbeit abgeschätzt.

Ferner wird die Balmer-Serie des Wasserstoffs sowie des Deuteriums ausgemessen. Außerdem ist die Isotopieaufspaltung zu beobachten und abzuschätzen. Aus den Balmer-Linien wird dann ebenfalls das Plancksche Wirkungsquantum bestimmt und mit den Ergebnissen aus dem ersten Versuchsteil verglichen.

### P402.2 Notwendige Vorkenntnisse

#### Teil I – Photoelektrische Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

- Photoeffekt
- Photozelle

#### Teil II – Balmer-Serie

- Aufbau der Atomhülle
  - Bohrsches Atommodell, Balmer-Serie, Quantenmechanische Betrachtung der Balmer-Serie, Isotopieaufspaltung
- Spektroskopie
  - Natürliche Linienbreite und Linienverbreiterungen, Funktionsprinzip und Auflösungsvermögen eines Reflexionsgitters
  - mit einer CCD-Kamera

## P402.3 Literatur

- Demtröder: „*Experimentalphysik, Bd. 3: Atome, Moleküle, Festkörper*“
  - Meschede: „*Gerthsen Physik*“
  - Bergmann, Schäfer: „*Lehrbuch der Experimentalphysik III, IV*“
  - Alonso, Finn: „*Quantenphysik und Statistische Physik*“
  - Haken, Wolf: „*Atom- und Quantenphysik*“
  - Mayer-Kuckuk: „*Atomphysik*“
  - Hecht: „*Optik*“
  - Demtröder: „*Laserspektroskopie*“
  - Jedes Lehrbuch der Atomphysik und der Quantenmechanik
  - Bestimmung der Grenzspannung  $U_0$ , bei der keine Kathodenelektronen mehr die Anode erreichen, für fünf Wellenlängen
  - Berechnung des Planckschen Wirkungsquantums  $h$  und Abschätzung der Austrittsarbeit  $W_A$
  - Überprüfung des Einflusses der Intensität des einfallenden Lichts auf die Messung
  - Ausmessen der Gitterkonstanten mit Hilfe der Hg-Lampe
  - Ausmessen des Wasserstoffspektrums samt Isotopieaufspaltung
    - mit einem Okular
    - mit einer CCD-Kamera
- ! Hierzu bitte einen USB-Stick mitbringen !**
- Abschätzen des Auflösungsvermögens der Apparatur

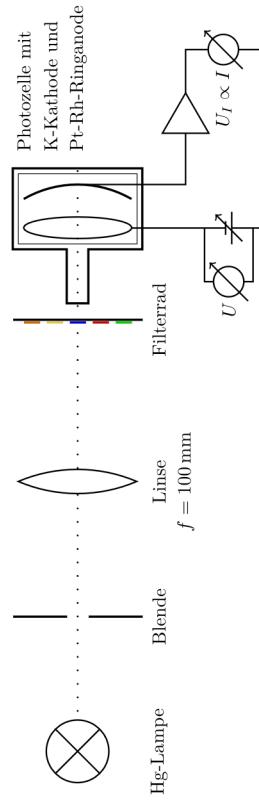
## P402.5 Durchführung und Analyse

### P402.5.1 Teil I – Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

#### Aufbau

Eine Quecksilberdampflampe dient für diesen Versuch als Lichtquelle. Mittels einer verstellbaren Blende kann die Intensität des Lichtes variiert werden. Eine Linse ( $f = 100 \text{ mm}$ ) erzeugt einen kleinen Lichtfleck auf der Kathode der Photozelle, die mit einer schwarzen Haube gegen Streulicht geschützt ist. Direkt vor der Photozelle befindet sich ein Filterrad, das fünf Interferenzfilter enthält, die diskrete Linien aus dem Spektrum der Hg-Dampflampe filtern. Zwischen Interferenzfilterrad und Photozelle ist ein Streulicht begrenzendes Rohr angebracht. Das auf die Kathode auftreffende Licht löst Photoelektronen aus, deren kinetische Energie gleich der Energie der Lichtquanten abzüglich der Austrittsarbeit aus dem Kathodenmaterial ist. Mittels einer variablen Spannungsquelle (0 – 12 V) kann zwischen Kathode und Ringanode ein elektrisches Feld angelegt werden. Verschiedene Widerstände ( $100\Omega$ ,  $222\Omega$  und  $333\Omega$ ) können verwendet werden, um eine Spannungsteilerschaltung aufzubauen und somit die Ausgangsspannung des Netzgerätes an den Bedarf anzupassen. Die elektrische Spannung zwischen Kathode und Anode kann an einem Multimeter abgelesen werden. Ein Messverstärker misst den Anodenstrom und gibt eine zum Strom proportionale Spannung aus, die mittels eines weiteren Multimeters gemessen werden kann.

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abb. P402.1 dargestellt.



**Abbildung P402.1:** Versuchsaufbau: Photoelektrische Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

#### Justierung

Zur Justierung die schwarze Schutzhülle von der Photozelle vorsichtig lösen, sodass gesehen werden kann, wo das Licht der Hg-Lampe auf die Photokathode trifft. Die optischen Bauteile so auf der optischen Bank positionieren, dass sich die Hg-Dampflampe und die Photozelle jeweils entgegengesetzt am äußeren Ende der optischen Bank befinden. Als nächstes Linse und Interferenzfilterrad einbauen. Im Filterrad das gelbe Interferenzfilter ( $\lambda = 578 \text{ nm}$ ) in die Durchlassposition stellen. Als letztes die Irisblende direkt vor die Hg-Lampe stellen. Es ist beim Aufbau darauf zu achten, dass alle Bauteile die gleiche Höhe aufweisen.

Die Irisblende am Filterrad vollständig öffnen und die Irisblende an der Hg-Lampe so weit schließen, dass auf der Photokathode ein Lichtfleck mit einem Durchmesser von ca. 5 – 10 mm entsteht. Die Linse so lange verschieben, bis sich eine scharfe Abbildung dieses Lichtflecks ergibt. Insbesondere darauf achten, dass die Ringanode nicht beleuchtet wird.

Nun die schwarze Schutzhülle vorsichtig über die Photozelle stülpen bis die Öffnung in Höhe des Strahlenganges liegt. **ACHTUNG: Die Schutzhülle nicht bis zum Anschlag nach unten schieben!** Die Irisblenden so einstellen, dass die Öffnung der Schutzhülle nicht überstrahlt wird. Zuletzt das Streulicht begrenzende Rohr zwischen Schutzhülle und Interferenzfilterrad anbringen, ohne dabei die Justierung zu verändern.

#### Durchführung

Beide schwarzen Kabel der Photozelle (Anodenanschluss) mit dem gleichen Ausgang des Netzgerätes verbinden. Dabei auf die korrekte Polung achten. Den Kathodenanschluss (weißes Kabel mit BNC-Stecker) mit dem entsprechenden Anschluss des Messverstärkers verbinden. Einen eventuell vorhandenen Offset des Ausgangssignals des Messverstärkers beseitigen. Weiterhin den zweiten Ausgang der regelbaren Spannung des Netzgerätes mit dem Masseanschluss des Messverstärkers verbinden. Die Digitalmultimeter so anschließen, dass Photostrom und Gegenstrom gemessen werden können.

- Zunächst das Interferenzfilter wählen, das das energiereichste Licht durchlässt, und die Gegenstrom so lange variieren, bis der Photostrom verschwindet. Es kann festgestellt werden, dass die benötigte Gegenstrom deutlich niedriger ist als die vom Netzgerät maximal bereitgestellte Spannung von 12 V.
- Aus den vorhandenen Widerständen eine sinnvolle Auswahl treffen und den Versuchsaufbau um eine Spannungsteilerschaltung erweitern, die einen sinnvollen Spannungsbereich für die Messungen liefert. Diesen Aufbau für die gesamte Messung beibehalten.

- Eine Wellenlänge mittels des Filterrads auswählen. Die größtmögliche Gegenstrom einstellen und die Größe des Anodenphotostroms  $I_0$  bestimmen, der aus Elektronen besteht, die aus der Anode gelöst wurden und zur Kathode gelangen. Die Gegenstrom variieren und grob die Grenzspannung  $U_0$  bestimmen, bei der der Photostrom Null wird. Im Folgenden die Kennlinie der Photozelle messen, indem die Gegenstrom von  $U = 0 \text{ V}$  bis zu einer Spannung variiert wird, bei der der Photostrom den Wert von  $I_0$  annimmt. Hierbei Messpunkte im geeigneten Abstand aufnehmen; dabei ist darauf zu achten, dass im quadratischen Bereich der Kennlinie genügend Messpunkte liegen.
- Diese Messung für alle Wellenlängen durchführen ( $I_0$ ,  $U_0$ , Kennlinie). Die Messungen für die Kennlinien müssen zweimal durchgeführt werden, da die Intensität der Hg-Lampe schwankt.

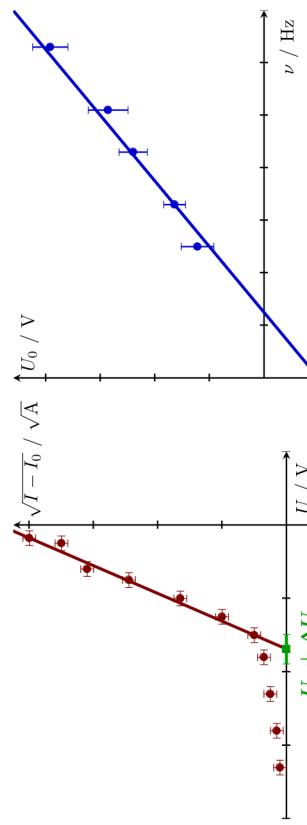
- Im Filterrad das Interferenzfilter mit der Durchlasswellenlänge  $\lambda = 365 \text{ nm}$  in den Strahlengang stellen und die erste Irisblende so verändern, dass der Photostrom bei  $U = 0 \text{ V}$  deutlich größer wird. Wenn eine Öffnung der Blende nicht zu einer Erhöhung des Photostroms führt, den Blendendurchmesser verringern, bis eine deutliche Abnahme des Photostroms um 30–50 % beobachtet werden kann. Die Kennlinie der Photozelle für diese Wellenlänge wie oben beschrieben bei dieser niedrigeren Intensität messen.

### Auswertung

Die Energiedbilanz in der Photozelle kann mit Hilfe der Abbildung P402.5 bis P402.7 aufgestellt werden. Für diese gilt

$$h\nu = eU_0 + W_A , \quad (\text{P402.1})$$

wobei  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum,  $\nu$  die Frequenz des Lichts,  $e$  die Elektronenladung,  $U_0$  die Grenzspannung und  $W_A$  die Austrittsarbeit der Anode ist.



**Abbildung P402.2:** Auswertung des Versuchs

- Die Energiebilanz für Photoelektronen ist herzuleiten (siehe Abschnitt P402.6.1). Dabei ist auch zu erläutern, weshalb nur die Austrittsarbeit der Anode  $W_A$  bestimmt werden kann.
- Im Anlaufgebiet wächst der Photostrom  $I$  quadratisch mit der Gegenspannung  $U$ . Für jede Wellenlänge separat die Wurzel aus dem Anlaufstrom  $\sqrt{I - I_0}$  als Funktion von  $U$  grafisch aufzutragen. Den linearen Teil extrapoliieren und so die Grenzspannung  $U_0$  samt Fehler bestimmen (Abbildung P402.2, linkes Teilbild).
- Die Grenzspannungen  $U_0$  mit ihren Fehlern in Abhängigkeit der Frequenzen aufzutragen und die Steigung der Geraden ermitteln. Aus der Steigung der Geraden und dem Achsenabschnitt kann dann das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  bestimmt und die Austrittsarbeit  $W_A$  abgeschätzt werden (Abbildung P402.2, rechtes Teilbild). Es ist eine sinnvolle Fehlerrechnung und -diskussion durchzuführen.
- Die Kennlinien für  $\lambda = 365 \text{ nm}$  bei unterschiedlichen Intensitäten vergleichen und die Ergebnisse diskutieren.

### P402.5.2 Teil II – Balmer-Serie

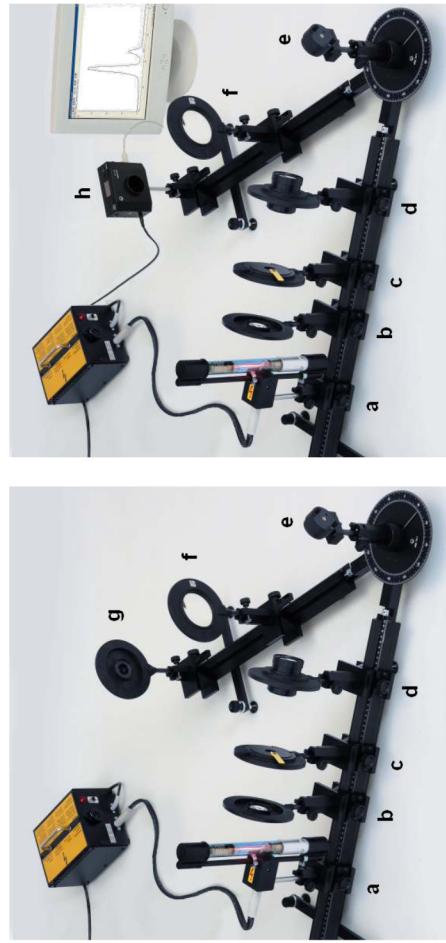
#### Aufbau

##### ! Achtung !

- Die Oberfläche des Gitters kann *nicht* gereinigt werden!
- auf keinen Fall berühren!
- Schutzkappe nur für den Versuch abnehmen!

Mit einem Reflexionsgitter soll die Balmer-Serie des Wasserstoffs samt Isotopeaufspaltung ausgemessen werden. Zur Übung der Justierung und zur Bestimmung der Gitterkonstanten dient eine Hg-Spektrallampe.

- Die Optikelemente nach Abb. P402.3 aufbauen und auf eine Höhe ausrichten. Die Ausrichtung ist mit der Balmer-Lampe durchzuführen, da deren Kapillare auf den Spalt abgebildet werden soll.



**Abbildung P402.3:** Versuchsaufbau mit Okular (links) und mit CCD-Kamera (rechts) (LD Handblätter Physik)

a Balmer-Lampe, deutierter

b Linse,  $f = 50 \text{ mm}$

c Verstellbarer Spalt, schräge Flanken zur Lichtquelle

d Projektionsobjektiv,  $f = 150 \text{ mm}$

e Holographisches Gitter

- f** Linse,  $f = 300 \text{ mm}$
- g** Okular mit Strichskala

#### h CCD-Kamera

#### Justierung

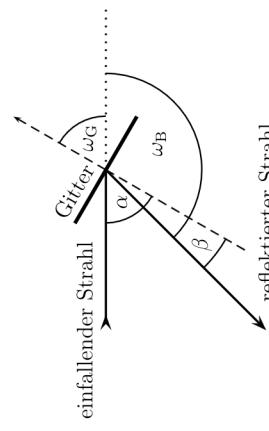
- Die Hg-Spektrallampe einsetzen.
- Mit Hilfe der Linse mit Brennweite  $f = 50 \text{ mm}$  die Lampe auf den Spalt abbilden.
- Das Projektionsobjektiv im Brennweitenabstand  $f = 150 \text{ mm}$  hinter dem Spalt positionieren.
- Die Säule des Drehgelenks so drehen, dass der Zeiger exakt auf  $0^\circ$  weist. Mit der Rändelschraube die Säule fixieren.
- Das Gitter senkrecht einsetzen, sodass das Licht auf den Spalt reflektiert wird. Nun das Projektionsobjektiv etwas verschieben, bis ein scharfes Bild des Spaltes neben dem Spalt zu beobachten ist (Autokollimation). So wird der Spalt ins Unendliche abgebildet.
- Mit Hilfe der Rändelschrauben des Gitters dieses so ausrichten, dass das Bild des Spaltes genau im Spalt selbst liegt.
- Den Winkel der optischen Bänke auf  $130^\circ \leq \omega_B < 170^\circ$  stellen.
- Das Okular am Ende der Schiene positionieren und so einstellen, dass die Skala gut ablesbar ist.
- Die Linse mit der Brennweite  $f = 300 \text{ mm}$  vor das Okular stellen (Fernrohraufbau).

#### Bestimmung der Gitterkonstanten

Mittels einer Hg-Spektrallampe wird die Gitterkonstante bestimmt, da der vom Hersteller angegebene Wert nicht genau ist. Die Bestimmung dient auch zur Übung der Messmethode für die Aufnahme der Balmer-Serie, da die Intensität der Hg-Spektrallampe höher als die der Balmer-Lampe ist.

- Zunächst die Rändelschraube der Säule mit dem Gitter lösen und die Säule drehen, bis die erste sichtbare Linie zu beobachten ist. Zum Auffinden der Linie ist es hilfreich, den Spalt erst weiter zu öffnen und anschließend auf ca.  $0,1 \text{ mm}$  einzustellen.
- Die Werte der Wellenlängen der Hg-Linien können dem Anhang entnommen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dort nicht alle Spektrallinien aufgeführt sind.
- Die Linse der Brennweite  $f = 300 \text{ mm}$  verschieben, bis das Bild des Spaltes scharf ist.
- Den Winkel der optischen Bänke  $\omega_B$  und den Winkel des Gitters  $\omega_G$  ablesen.

- Jeder gemessenen Hg-Linie ist eine Wellenlänge mit Hilfe der Tabelle im Anhang zuzuordnen.
- Von den 13 angegebenen Linien sind mindestens zehn zu messen.



**Abbildung P402.4:** Winkel am Aufbau

#### Untersuchung der Balmer-Linien

#### Messung mit einem Okular

- Die Hg-Spektrallampe gegen die Balmerlampe tauschen.
  - Die Balmer-Lampe ist eine mit Wechselstrom betriebene Gasentladungsrohre, die mit Dampf aus deuteriertem und normalem Wasser (Verhältnis ca. 1 : 2) gefüllt ist.
- Mit Hilfe der Linse der Brennweite  $f = 50 \text{ mm}$  die Kapillare der Balmerlampe auf den Spalt abbilden. Darauf achten, dass die optische Achse im Mittelpunkt der Kapillare liegt.
- Die Justierung wie zuvor vornehmen.
- Wiederum die Rändelschraube der Säule mit dem Gitter lösen und die Säule drehen, bis die rote  $H_\alpha$ -Linie zu sehen ist.
  - Die Linse vor dem Okular verschieben, bis ein scharfes Bild des Spaltes erkennbar ist.
  - Den Winkel der optischen Bänke  $\omega_B$  und den Winkel des Gitters  $\omega_G$  ablesen.
- Den Abstand der Aufspaltung  $d$  auf der Skala des Okulars abschätzen.
  - Die Skala des Okulars hat eine Länge von  $10 \text{ mm}$  mit einer Teilung von  $0,1 \text{ mm}$ .
  - Für die anderen Balmer-Linien wird nach dem selben Schema vorgegangen.

#### Messung mit einer CCD-Kamera

- Anstelle des Okulars wird nun die CCD-Kamera eingesetzt, sodass die CCD-Zeile in Höhe der optischen Achse liegt.

- Die Kamera „VideoCom“ mit Spannung versorgen und mit dem Computer verbinden. Dort das Programm „VideoCom-Intensitäten“ starten.

- Im Menü „Kalibrierung / Theorievergleich“ (F5), Register „Beugungswinkel“, die Brennweite  $f$  der abbildenden Sammellinse eingeben. Das Programm berechnet dann aus der Pixelkoordinate  $p$ , die von 0 bis 2047 läuft, den Winkel  $\beta$  über

$$\beta = \arctan \left( \frac{(1024 - p) \cdot 0,014 \text{ mm}}{f} \right).$$

- Die Belichtungszeit mit der zugehörigen Schaltfläche auf Stufe 8 stellen.

- Die Messung mit der Taste F9 starten.

- Die Rändelschraube der Säule mit dem Gitter lösen und die Säule drehen, bis die roten Balmer-Linien auf die Mitte der Phototransistorzeile der Kamera, also bei  $0^\circ$ , abgebildet werden.
- Es ist sinnvoll, den Spalt zum besseren Auffinden der Linien zunächst weiter zu öffnen und anschließend nur so weit zu öffnen, dass die Linien gerade zu sehen sind.

- Die Linse vor der Kamera verschieben, bis die Darstellung des Spaltes auf dem Monitor scharf ist. Es sollten zwei schmale Maxima unterschiedlicher Höhe zu beobachten sein.
- Mit Alt+Z den Ausschnitt vergrößern, sodass die Aufspaltung besser zu erkennen ist.
- Ist der gewünschte Ausschnitt ausgewählt, so kann zur Verbesserung der Auflösung mit der entsprechenden Schaltfläche ( $\Sigma_1$ ) eine Mittelwertbildung der Intensitäten gestartet werden. Unterscheiden sich zwei Maxima gut, kann die Messung mit F9 gestoppt werden.
- Mit einem Rechtsklick der Maus auf die Tabelle, diese mit „Tabelle kopieren“ kopieren und in einer Textdatei speichern. Den Winkel des Gitters notieren.
- Für die anderen Balmer-Linien wird wieder nach dem selben Schema vorgegangen.
  - Hierbei ist zu beachten, dass die Intensität der blauen Linie zu schwächer ausgeprägten Maxima führt.
  - Die Intensität der violetten Linie ist noch kleiner, sodass sie sich nur schwer beobachten lässt und somit die Aufspaltung nicht nachweisbar ist.

## Auswertung

### Bestimmung der Gitterkonstanten

- Mit Hilfe der Gittergleichung ist für jede Linie die Gitterkonstante auszurechnen. Abb. P402.4 erklärt die auftretenden Winkel. Der Winkel  $\alpha$  ist der Einfallswinkel,  $\beta$  der Ausfallswinkel.
- Die Gitterkonstante des vorliegenden Gitters wird durch ein geeignetes Regressionsverfahren aus den errechneten Werten gewonnen.

### Bestimmung der Balmerlinien

- Die Wellenlängen der Balmer-Linien sowie deren Isotopieaufspaltung  $\Delta\lambda$ , gewonnen aus der Winkelauflösung  $\Delta\beta$  der Linien, sind zu bestimmen.
  - Die Isotopieaufspaltung ist unter Verwendung von  $\frac{\partial\lambda}{\partial\beta}$  zu berechnen.
- An die Daten der mit „VideoCom“ gemessenen Intensitäten sind Gauß-Kurven anzupassen; es bietet sich eine Überlagerung zweier Gauß-Kurven an. Daraus wird der Peakschwerpunkt sowie die Halbwertsbreite bestimmt. Aus der somit gewonnenen Winkeldifferenz der aufgespaltenen Balmer-Linien, ist die Isotopieaufspaltung zu berechnen.
- Aus den gewonnenen Wellenlängen der Balmer-Linien ist die Rydberg-Konstante zu bestimmen und aus dieser das Plancksche Wirkungsquantum, welches mit dem gemessenen Wert aus Versuchsteil I zu vergleichen ist.
- Mögliche Fehlerquellen bei der Durchführung und der Auswertung sind zu diskutieren.

### Weitergehende Überlegungen

- Im Spektrum der Balmer-Lampe befinden sich, neben den vier im Sichtbaren liegenden Balmer-Linien, zusätzlich noch schwache Linien vom roten bis grünen Spektralbereich. Der Ursprung dieser, nicht zur Balmer-Serie gehörenden Linien ist zu diskutieren.
- Die Doppler-Verbreiterung der Linien ist abzuschätzen.
  - Die Temperatur der Balmer-Lampe beträgt ungefähr 1000 K.
- Die Doppler-Verbreiterung ist mit der natürlichen Linienbreite zu vergleichen.
- Die Breiten der mit der CCD-Kamera aufgenommenen Kurven sind mit der Doppler-Verbreiterung zu vergleichen und zu diskutieren.
- Das Auflösungsvermögen des Gitters ist abzuschätzen.
  - Die Abmessung des Gitters beträgt  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ .

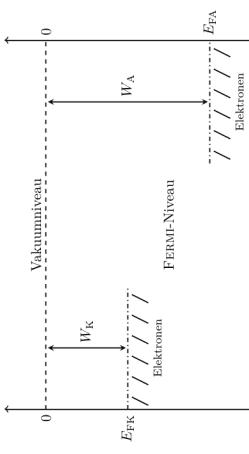
## P402.6 Anhang

### P402.6.1 Bänderschemata der Elektroden

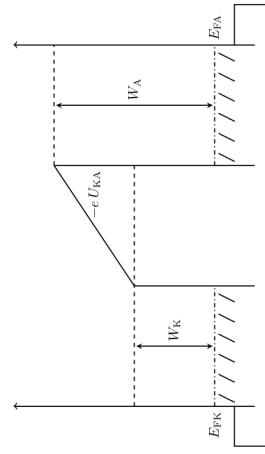
### P402.6.2 Spektrum der Hg-Spektrallampe

- Die in Luft gemessenen Wellenlängen sind der Quelle „Wavelength and Transition Probabilities for Atoms and Atomic Ions“ von Joseph Reader und Charles H. Corliss entnommen.
- Stand: 9/2016

Viel Erfolg bei der Durchführung!



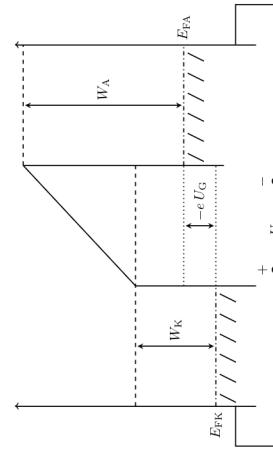
**Abbildung P402.5:** Vereinfachtes gemeinsames Bänderschema von Kathode und Anode. Eingezeichnet sind die beiden Fermi-Niveaus von Kathode und Anode mit entsprechenden Energien  $E_{FK}$  und  $E_{FA}$ . Die Elektroden besitzen unterschiedliche Austrittsarbeiten  $W_K$  und  $W_A$ .



**Abbildung P402.6:** Kontaktpotential bei kurzgeschlossenen Elektroden. Es entsteht eine negative Potentialdifferenz  $U_{KA}$  zwischen Kathode und Anode, das Kontaktpotential.

Farbe	$\lambda_{Hg}/\text{nm}$	rel. Int.
violett	404,656	1800
	407,783	150
	410,805	40
	433,922	250
	434,749	400
blau	435,833	4000
türkis	491,607	80
grün	546,074	1100
gelb	576,960	240
	579,066	280
rot	623,440	30
	671,643	160
	690,752	250

**Tabelle P402.1:** Wellenlängen der Hg-Spektrallampe



**Abbildung P402.7:** Anlegen einer äußeren Spannung  $U_G$ . Der Potentialberg, den ein durch Licht aus der Kathode ausgelöstes Elektron in Richtung Anode überwinden muss, erhöht sich zusätzlich.

- de Zafra: Optical Pumping

Weitere Literatur:

- Bernheim: "Optical Pumping"
- Demtröder: "Grundlagen und Technik der Laserspektroskopie"
- Kopfermann: "Kernmomente"
- Penselin: "HF-Spektroskopie", Vorlesung Bonn 1965
- Walker, Straw: "Spectroscopy"

## P404 Optisches Pumpen

### P404.1 Versuchsziel

Unter *optischem Pumpen* versteht man die gezielte Umbesetzung atomarer Niveaus durch Einstrahlen elektromagnetischer Felder geeigneter Frequenz. Es erlaubt die Beobachtung von Übergängen, die mit der optischen Spektroskopie nicht erreichbar sind und eignet sich zum Ausmessen der Zeemanaufspaltung der Hyperfeinstrukturkomponenten, der Bestimmung atomarer Größen wie der *g*-Faktoren und damit verbunden von Kernspins. Auch sehr kleine magnetische Felder können mit hoher Genauigkeit vermessen werden. Das Verfahren wurde insbesondere durch den französischen Physiker A. Kastler zu hoher Präzision entwickelt, wofür er 1966 den Nobelpreis erhielt.

Ziel des Versuches ist das Vertrautwerden mit den physikalischen Prinzipien des optischen Pumpens und der Bestimmung der *g*-Faktoren und der Kernspins der beiden stabilen Rubidium-Isotope anhand der Zeemanaufspaltung der Hyperfeinstrukturniveaus.

### P404.2 Notwendige Vorkenntnisse

- Erzeugung und Eigenschaften polarisierten Lichts, Interferenzfilter, Photonennachweis, insbesondere durch Photodioden.
- Energieniveaus der Alkalimetalle, einschließlich Fein- und Hyperfeinstruktur. Aufspaltung in äußeren Magnetfeldern, Auswahlregeln bei verschiedenen Multipolordnungen, Spektrumstruktur, Linienbreiten.
- Optisches Pumpen durch Umsetzen von Niveaus. Induzierte Emission durch Einwirkung magnetischer Hochfrequenzfelder. einsteinischer Ansatz für die Wechselwirkung von Strahlungsfeldern mit Atomen.
- Thermodynamik der Phasenübergänge in Einstoffsystmen.
- Gaskinetik: Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung, mittlere Geschwindigkeit, mittlere freie Weglänge von Gasen.

### P404.3 Literatur

Beim Assistenten zu entliehen:

- Benumof: Optical Pumping Theory and Experiments

1. Theoretische Aufgaben

Der einsteinische Ansatz für die Wechselwirkung eines Strahlungsfeldes mit Atomen (Einstein-Koeffizienten für Absorption und induzierte Emission) kann benutzt werden, um charakteristische Größen für die Physik des Optischen Pumpens zu erhalten. Danach hat man  $W_{\text{family abs}} = B\rho$  wobei  $W_{\text{abs}}$  die Absorptionsrate für ein Atom,  $B$  den Einstein-Koeffizienten für Absorption und  $\rho$  die spektrale Strahlungsenergiendichte des einfallenden Lichtbündels bedeuten.  $B$  ist gegeben durch  $B = \frac{\lambda^3}{8\pi h} \frac{1}{\tau}$ ,  $\tau$  ist die Lebensdauer des betrachteten Niveaus. Die spektrale Energiedichte  $\rho$  ist gegeben durch  $\rho = S/c\nu_D$ , wobei  $S$  den Poynting-Vektor,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und schließlich  $\nu_D$  die Dopplerbreite darstellen.

- Über die Absorptionswahrscheinlichkeit lässt sich der lineare Absorptionskoeffizient  $\kappa$  ausrechnen. Das Ergebnis ist  $\kappa = \frac{\lambda^2}{8\pi} \frac{dN}{dV} \frac{1}{\tau} \frac{1}{\nu_D}$ . Dabei ist  $\frac{dN}{dV}$  die Teilchendichte. Können Sie die Herleitung nachvollziehen? Wie groß ist dann die freie Weglänge der Photonen verglichen mit den Gefäßabmessungen? (Zur Herleitung der Einstein-Koeffizienten siehe G. Birnbaum: Optical Masers in Advances in Electronics & Electronic Physics, Suppl. 2 (1964).)
- Die Leistungsdichte (Mittelwert des Poynting-Vektors) des die Zelle durchsetzenden Lichtstrahls ist etwa  $1.5 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ . Welchen Wert erhalten Sie für die spektrale Energiedichte und wie viele Photonen kann ein Atom pro Sekunde etwa absorbieren?
- Damit eine Besetzungsinverson überhaupt auftreten kann, muss das Pumpen schneller erfolgen als das Relaxieren (vergl. 5.4.). Bei Abwesenheit von Fremdgasen wird das Relaxieren im wesentlichen durch Wandstöße hervorgerufen. Welche mittlere freie Weglänge ergibt sich mit Hilfe des angegebenen gaskinetischen Querschnittes alleine für Rb-Rb-Stöße? Wie viel Wand-Stöße pro Sekunde macht unter diesen Annahmen etwa ein Atom?

Die Relaxationszeiten werden in der Praxis durch Zugabe von Eddgas als Puffergas wirksam vergrößert. Die Stoße mit den Rb-Atomen lassen die Spinausrichtung im wesentlichen bestehen und die Zeit für ein Rb-Atom die Wand zu erreichen, wird stark erhöht. Für He z.B. betragen der Depolarisationsquerschnitt  $\sigma_{\text{depol}} = 6,2 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$  und die Diffusionskonstante  $D_0 = 0,54 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$  bei Atmosphärendruck. Die Diffusionstheorie gibt für das Durchdiffundieren durch eine Gassschicht der Dicke  $d$  unter Atmosphärendruck eine typische Diffusionszeit von

$$\tau_D = \frac{d^2}{6D_0}.$$

- d) Nehmen sie im folgenden eine He-Füllung von 1 mbar an. Welche Diffusionszeit schätzen Sie ab? Wie groß ist die freie Weglänge  $\lambda_{\text{depol}}$  zwischen zwei depolarisierenden He-Rb Stoßen und welche Zeit  $\tau_{\text{depol}}$  vergelt im Mittel zwischen solchen Stoßen? Verwenden Sie, dass die Diffusionskonstante dem Druck umgekehrt proportional ist und

$$\lambda_{\text{depol}} = \frac{1}{n_0 \sigma_{\text{depol}}} ; \quad \tau_{\text{depol}} = \frac{\lambda_{\text{depol}}}{\bar{v}_{\text{rel}}}.$$

Dabei sind  $n_0$  die Dichte der He-Atome und  $\bar{v}_{\text{rel}}$  die mittlere Relativgeschwindigkeit von He- und Rb-Atomen.

- e) Vergleichen Sie die natürlichen (gegeben durch die Lebensdauer) und die apparativen (gegeben durch den Dopplereffekt) Linienbreiten mit den Aufspaltungen der Niveaus durch Fein-, Hyperfein- und Zeeman-Wechselwirkung. Warum sind scharfe Übergänge zwischen den Zeeman-Niveaus sichtbar?

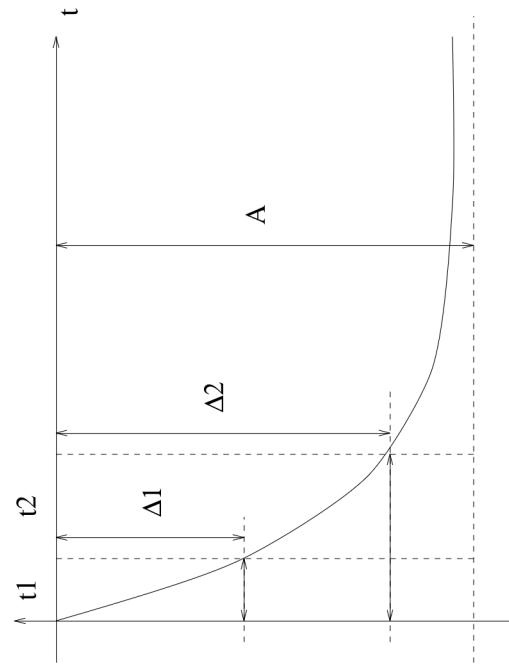
## 2. Praktische Aufgaben:

- a) Zunächst soll der Einfluss des Erdmagnetfeldes auf die Apparatur gemessen und kompensiert werden.
- b) Nach erfolgreicher Kompensation werden die Signalverläufe zeitlich vermessen.
- c) Die Zuordnung der einzelnen Rb-Isotope erhält man durch die Abhängigkeit von Hochfrequenz und Modulationsfeldamplitude. Bei guter Kompensation treffen sich jeweils die drei Geraden in einem Punkt.
- d) Es werden schließlich die g-Faktoren und die Kernspins vermessen.
- e) Im letzten Teil soll aus den Temperaturkurven die Isotopenhäufigkeiten berechnet werden.

## P404.5 Durchführung und Analyse

Im Hinblick auf die späteren Versuchsteile ist es wichtig, die korrekte Signalform zu erkennen und den Einfluss des Erdmagnetfeldes zu kompensieren. Führen Sie dazu folgende Versuchsschritte aus:

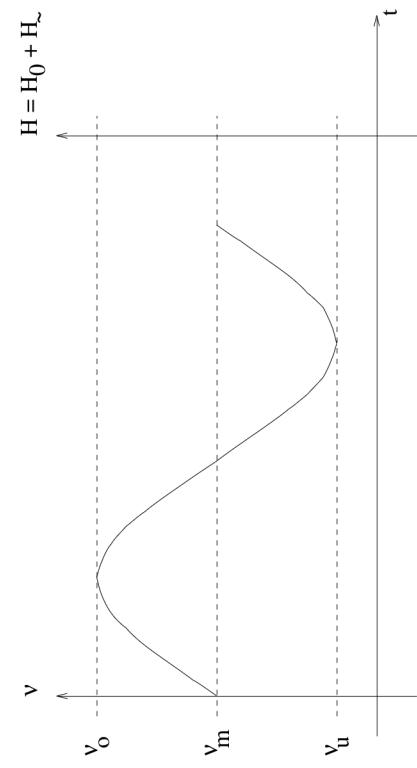
**Abbildung P404.1:** Typischer Signalverlauf (Aufbau)



Sie die Amplitude des Signals zu verschiedenen Zeiten (siehe Abbildung P404.1). Alternativ haben sie die Möglichkeit das eingestellte Messsignal auf einem USB-Stick zu speichern und aus:

für die weitere Auswertung zu verwenden. Nun gilt für die einzelnen gemessenen Wertepaare  $A - \Delta_i = A(e^{-\frac{t_i}{\tau}})$ . Dieses Ergebnis lässt sich durch eine Taylorentwicklung darstellen  $\Delta_i \approx A(\frac{t_i}{\tau} - \frac{1}{2}(\frac{t_i}{\tau})^2 + \dots)$  woraus schließlich  $\tau$  berechnet werden kann. Machen Sie den Ansatz  $\frac{1}{\tau_{\text{auf}}} = \frac{1}{\tau_p} - \frac{1}{\tau_r}$  und  $\frac{1}{\tau_{\text{ab}}} = \frac{1}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_r}$  wobei  $\tau_p$  die Pumpzeit und  $\tau_r$  die Relaxationszeit bedeuten. Welche Werte erhalten Sie hier für  $\tau_p$  und  $\tau_r$ ?

Durch Einstrahlen von Hochfrequenz werden magnetische Dipolübergänge zwischen den Hyperfein-Zeeman-Niveaus des Grundzustandes induziert, was eine Umbesetzung und damit wiederum eine Transmissionsänderung zur Folge hat. Wie man der Abbildung entnimmt, gibt es drei aus-



**Abbildung P404.2:** Ausgezeichnete Resonanzpunkte

zeichnete Frequenzen, bei denen die Absorptionssignale äquidistant sind: Obere und untere 50 Hz-Modulationspunkte und die 100 Hz-Modulationspunkte, d.h. die Signale auf dem Oszillographen erscheinen bei diesen Frequenzen mit der angegebenen Wiederholrate.

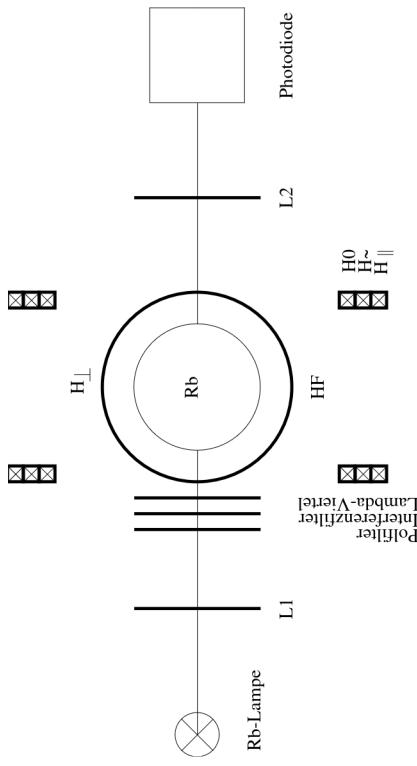
- Messen Sie die Hochfrequenz-Modulationspunkte (50 Hz und 100 Hz-Signale) in Abhängigkeit von der Amplitude des Modulationserregerstromes (0 – 300 mA) bei festem  $H_0$  (Stromstärke etwa 100 mA). Tragen Sie die am Messsender abgelesenen Frequenzwerte gegen die Stromamplituden auf und überprüfen Sie die Daten auf Konsistenz. Welches Kurventriplet gehört zu  $^{85}\text{Rb}$ , welches zu  $^{87}\text{Rb}$ ?

- Da das Modulationsfeld nicht kalibriert ist, können die  $g$ -Faktoren noch nicht bestimmt werden, wohl aber deren Verhältnis. Wählen Sie für die folgenden Aufgaben eine Amplitude für  $H_\sim$ , bei dem die Triplets der beiden Isotope deutlich getrennt sind, sich aber noch nicht überlagern.

- Mit der Variation des Hauptfeldes und dem Aufsuchen der HF-Resonanzfrequenzen sind die  $g$ -Faktoren der Rb-Isotope zu messen und daraus die Kernspins zu bestimmen. Zeichnen Sie bereits während der Messung ein Frequenz-Strom-Diagramm und überprüfen Sie den Verlauf der Signaltripletts auf Richtigkeit.

- Messen Sie die Signalgroße in Abhängigkeit von der Temperatur der Absorptionszelle für beide Isotope. Variieren Sie die Temperatur zwischen ca. 25 °C und 60 °C (Schrittweite < 3 °C). Achten Sie auf eine gleichmäßige Erwärmung der Zelle durch genügend lange Wartezeiten. Zeichnen Sie sofort die Signalstärke als Funktion der Temperatur. Bei der endgültigen Auswertung zeichnen Sie die Signalstärke als Funktion der Teilchendichten der Isotope. Erklären Sie den Verlauf der Datenpunkte. Berechnen Sie hieraus die Isotopenhäufigkeiten für  $^{85}\text{Rb}$  und  $^{87}\text{Rb}$  und vergleichen Sie die Ergebnisse mit den Literaturwerten.

## P404.6 Anhang



**Abbildung P404.3:** Versuchsaufbau

### 1. Versuchsaufbau

- Der Aufbau ist in der Abbildung skizziert. Eine hochfrequenzbetriebene Rubidiumdampflampe erzeugt das notwendige Licht. Ihre Betriebswerte sind auf einem Schildchen aufgedruckt und sollten nicht von den Praktikanten verändert werden. Die Istwerte können am Versorgungsgerät abgelesen werden. Die Wärmelaufzeit beträgt etwa 30 Minuten. Entscheidungskriterium für eine rauscharme Lichtquelle ist die Signalform. Die Linse  $L_1$  erzeugt einen nahezu parallelen Strahlengang, der den Polarisator  $P$ , ein Lambdavariertplättchen, das Interferenzfilter  $I$  und die Absorptionszelle durchsetzt. Lambdavariertplättchen und Polarisator sind so gegeneinander verdreht, dass zirkular polarisiertes Licht entsteht. Linse  $L_2$  fokussiert den Strahlengang auf die Photodiode. Ihre Betriebsspannung ist durch das Netzgerät fest vorgegeben und wird nicht verändert. Das Netzgerät ist abzuschalten, wenn die volle Raumbeleuchtung benötigt wird. Abgedämpftes Licht vom Arbeitstisch stört dagegen nicht.

- Die heizbare Absorptionszelle (beste Arbeitstemperatur ca. 43 °C) enthält festes Rubidium in natürlicher Zusammensetzung. Die Temperatur wird mit einem batteriebetriebenem

Digitalthermometer mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  bestimmt. Die Teilchendichte der Rubidumatome wird über den Dampfdruck bestimmt, der über die angegebene Formel aus der gemessenen Temperatur berechnet wird.

Die Absorptionszelle wird von Helmholzspulen umgeben, die parallel zur optischen Achse stehende statische oder 50 Hz-Magnetfelder erzeugen. Die Stärke der Felder wird durch Potentiometerregelung eingestellt und – soweit nötig – aus den gemessenen Strömen und den angegebenen Eichfaktoren bestimmt:

- Das Hauptfeld  $H_0$  (Stromstärke variabel bis ca. 100 mA) mit dem Eichfaktor  $32,5 \frac{\text{G}}{\text{A}}$ .
- Das 50 Hz-Modulationsfeld  $H_\sim$  (Stromstärke variabel bis ca. 500 mA), das das Hauptfeld überlagert.

- Die Korrekturfelder  $H_{\parallel}$  und  $H_{\perp}$ , die zur Kompensation des Erdmagnetfeldes dienen.

Zusätzlich kann ein Hochfrequenzfeld  $H_{\text{hf}}$  (geeignete Amplitude 0,5–1,0 V) überlagert werden, dessen Achse senkrecht zur Strahlrichtung steht. Es wird durch eine Spule erzeugt, die an einem geeichten und regelbaren Messsender von Rohde & Schwarz angeschlossen ist. Auf einen Zweistrahlzillographen werden die Spannung an der Modulationsfeldspule und das Detektorsignal gegeben. Beachten Sie bitte, dass die Spannung dem Feld um 90 Grad vorausläuft. Das Rauschen des Detektorsignals ist im wesentlichen durch die Lampe bedingt. Die resonanzartigen Änderungen in der Transmission der Absorptionszelle sind jedoch klar zu erkennen.

## 2. Zusatzinformationen Rubidium

Die Dampfdruck lässt sich im interessierenden Temperaturbereich gut durch den Ansatz

$$\log(p) = -A/T + B$$

nähern.  $\log$  bedeutet den Zehnerlogarithmus. Der Druck  $p$  ist in Torr, die Temperatur  $T$  in Kelvin anzugeben. Hierbei haben die Konstanten  $A$  und  $B$  für die zwei möglichen Zweiphasensysteme die Werte in Tabelle P404.1

fest/gastförmig	$A = 4503,74 \text{ K}$	$B = 8,21$
flüssig/gastförmig	$A = 4347,11 \text{ K}$	$B = 7,70$
Temperatur des Tripelpunktes	312 K	
Gaskinetischer Querschnitt	$5,8 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$	
Lebensdauer der $P$ -Niveaus	10 ns	
Isotopenhäufigkeit	$^{85}\text{Rb}$	72,2 %
	$^{87}\text{Rb}$	27,8 %

**Tabelle P404.1:** Konstanten für Rubidium

## P422 Rastertunnelmikroskopie

### P422.1 Versuchsziel

Zweck dieses Versuchs ist es zunächst, die Funktionsweise eines Rastertunnelmikroskops zu verstehen. Das beinhaltet neben dem physikalischen Hintergrund auch die technologischen Erfordernisse für den erfolgreichen Aufbau eines Rastertunnelmikroskops. Des Weiteren sollen unterschiedliche Proben untersucht werden. Ziel im Praktikumsversuch soll die Abbildung der Oberfläche von hochordentlichem pyrolytischem Graphit (HOPG) mit atomarer Auflösung sein.

### P422.2 Notwendige Vorkenntnisse

- Grundlagen zu Tunneleffekt, Tunnelstrom, Austrittsarbeit, Fermi-Niveau
- Technische Realisierung eines Rastertunnelmikroskops
  - Strom-Spannungswandler
  - Regelkreis (PID-Regler)
  - Piezoelektrische Stellelemente (Piezoeffekt)
  - Stick-Slip Annäherung (Piezelektrischer Trägheitsantrieb)
  - Schwingungsdämpfung
- Betriebsmodi: *constant height* – und *constant current mode*
- Kristallstruktur von hochgeordnetem pyrolytischem Graphit  
(HOPG *Highly Oriented Pyrolytic Graphite*)

### P422.3 Literatur

- Ein Buch zur Quantenmechanik  
→ Tunneleffekt
- Ein Buch zur Festkörperphysik  
→ Austrittsarbeit, Fermi-Niveau, Piezoeffekt, Rastertunnelmikroskop
- G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, Phys. Rev. Lett. 49, 57 (1982);  
“Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy”

Sollten Sie Fragen zur Vorbereitung haben, wenden Sie sich an Ihren Tutor!

## P422.4 Physikalisch historischer Hintergrund

Als Begründer der optischen Mikroskopie gilt A. van Leeuwenhoek, der Mitte des 17. Jhd. ein kleines Glaskügelchen nutzte, damit eine 270-fache Vergrößerung erreichte und als Erster z.B. rote Blutkörperchen direkt beobachtete und ihre Größe von wenigen  $\mu\text{m}$  bestimmte. Den nächsten Meilenstein setzte E. Abbe, der ca. 1870 erkannte, dass die Auflösungsgrenze von optischen Mikroskopen durch das inzwischen nach ihm benannte (und Ihnen spätestens aus dem Optik-Praktikum bekannte) Abbe-Limit gegeben ist ( $d = \lambda/(2n \sin \alpha)$ ). Als Faustregel gilt, dass die maximal mögliche Auflösung bei ca. der halben Wellenlänge liegt, bei der Verwendung von sichtbarem Licht ( $\lambda_{\text{grün}} \approx 500 \text{ nm}$ ) also bei ca. 250 nm. Eine Verbesserung der Auflösung ist bei optischen Mikroskopieverfahren zunächst nur durch Verwendung kürzerer Wellenlängen, also ultraviolettem Licht, möglich.

Basierend auf der Entdeckung des Welle-Teilchen-Dualismus im Jahre 1924 durch L. de Broglie (Nobelpreis 1929) baute E. Ruska (Physiknobelpreis 1986) in den 1930er Jahren ein Elektronenmikroskop und konnte erstmals die Auflösungsgrenze optischer Mikroskope substanziell unterschreiten. Die weit verbreiteten Rasterelektronenmikroskope (REM) erreichen heute eine Auflösung von wenigen Nanometern. Die Auflösungsgrenze von Transmissionselektronenmikroskopen (TEM) liegt derzeit bei 0,045 nm.

Einen grundsätzlich anderen Ansatz nutzt das Rastertunnelmikroskop. Hier wird mit einer scharfen Spitzel die Oberfläche abgetastet, wobei die detektierte Messgröße der (quantenmechanische) Tunnelstrom zwischen der Spitze und der (leitfähigen) Oberfläche ist. Bei hinreichend scharfer Spitzel ist so die atomare Auflösung der Oberfläche möglich. Das Rastertunnelmikroskop (RTM bzw. gebräuchlicher STM: *Scanning Tunneling Microscope*) wurde Anfang der 1980er Jahre von G. Binnig und H. Rohrer entwickelt, die beide dafür, zusammen mit E. Ruska, den Physiknobelpreis 1986 erhielten.

**Das Rastertunnelmikroskop** wurde ursprünglich nicht (!) für die höchstauflösende Abbildung von Oberflächen entwickelt. Vielmehr war das Ziel, die Austrittsarbeiten von Metallen und Halbleitern zu messen. Um mit der Spitzt an eine geeignete, saubere Stelle an der Oberfläche zu gelangen, musste diese über die Oberfläche bewegt werden können. Bei der Beobachtung des Tunnelstrones mit dem Oszilloskop während der Bewegung fiel den Forschern eine regelhähige Wellenform des Signals auf ( $\rightarrow$  *constant height modus* später in dieser Anleitung). Die Interpretation dieser, zunächst überraschenden Beobachtung führte dann zur Entwicklung des STM als oberflächen-abbildendes Instrument mit atomarer Auflösung.

Das Grundprinzip eines STM ist wie folgt: Zwischen einer elektrisch leitfähigen Spitzt und einer ebensolchen Probe wird eine Spannung angelegt und der Tunnelstrom zwischen Spitzt und Probe gemessen. Letzterer hängt vom Abstand zwischen Spitzt und Probe, der angelegten Spannung, sowie den jeweiligen Austrittsarbeiten ab. Scannt man mit der Spitzt über eine Probe, die aus nur einer Atomsorte besteht, erhält man z.B. über den Tunnelstrom ein direktes Abbild der Oberflächentopographie. Besteht die Probe aus unterschiedlichen Atomensorten mit lokal unterschiedlichen Austrittsarbeiten, so besagt eine Änderung im Tunnelstrom nicht notwendigerweise eine topographische Korruagation der Oberfläche. Aus dem Tunnelstrom kann folglich nicht eindeutig auf die Oberflächentopographie der Probe geschlossen werden.

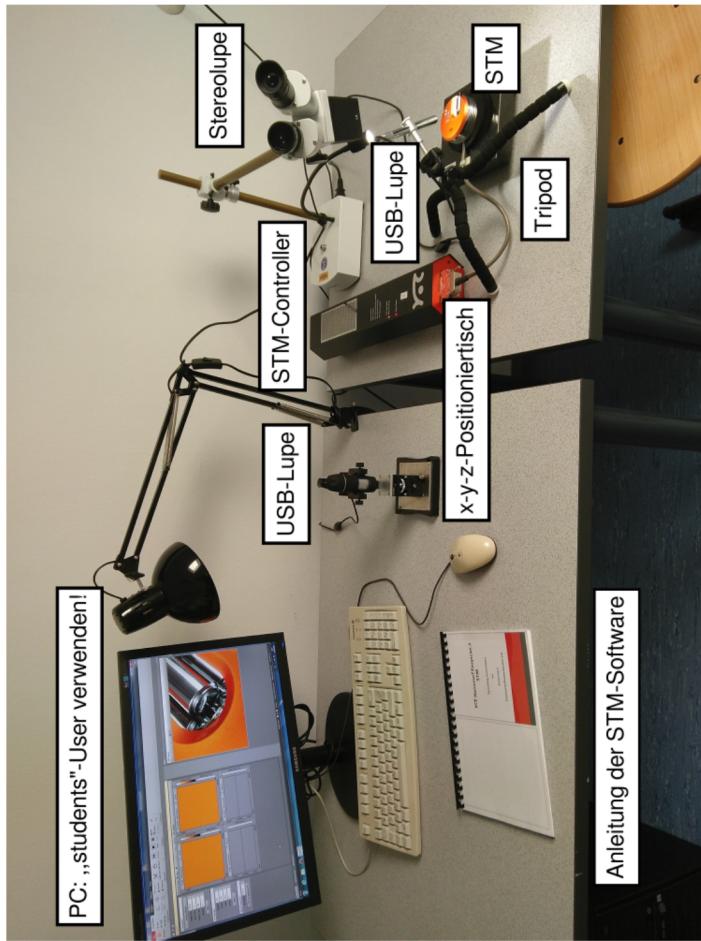
Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Abbildung einer Oberfläche mit dem STM betrifft die Tatsache, dass nicht nur die Oberfläche eine ggf. atomare Struktur aufweist, sondern auch die abbildende Spitzt. Folglich misst man mit einem STM grundsätzlich eine Faltung der Topographien von Spitzt und Probe. Mit einer „zweiatomigen Spitzt“ (d.h. zwei tunnelnde Atome an der Spitzt) erhält man somit eine Verdopplung des Bildes.

Die Größenordnungen, die in der Rastertunnelmikroskopie eine Rolle spielen, seien hier kurz unirissen. Typische Atomdurchmesser liegen bei  $0,1\text{ nm}$  und die Gitterkonstanten von Kristallen im Bereich von wenigen  $\text{nm}^2$  der Oberfläche. Der Abstand zwischen Spitzt und Probe ist im sub-nm Bereich und muss auf  $0,01\text{ nm}$  konstant gehalten werden. Für die technische Realisierung des STM sind offensichtlich Stellelemente erforderlich, die kontrollierte Bewegungen im sub-Nanometer-Bereich ermöglichen (Piezokeramiken).

Zu guter Letzt noch ein Ausblick auf eine andere Spieltart der Rastersondennmikroskopie. Das STM hat nämlich als historisch erstes Instrument einen entscheidenden Nachteil: Da es den Tunnelstrom als Regelgröße nutzt, ist die elektrische Leitfähigkeit der Probe für STM-Messungen unabdingbar. Das limitiert erheblich die Auswahl der untersuchbaren Proben. Weit vielfältiger ist das Rasterkraftmikroskop (RKM) einsetzbar. Hier nutzt man als Regelgröße, je nach gewünschtem Abstand zwischen Spitzt und Probe, die abstößende Kraft aufgrund des Pauli-Verbotes oder die langreichweitige, anziehende van-der-Waals-Kraft. Beide Kräfte sind zwischen Spitzt und Probe immer vorhanden und somit können alle Proben mit dem RKM untersucht werden. Allerdings ist es mit einem RKM schwieriger, die Probenoberfläche mit atomarer Auflösung abzubilden.

## P422.5 Experimentierplatz

Im Versuchsräum finden sich zwei Experimentierplätze. Diese unterscheiden sich lediglich in der Generation des verwendeten STMs und der zugehörigen Software. Einer dieser Experimentierplätze sieht wie folgt aus:



PC: „students“-User verwenden!

Anleitung der STM-Software

Das hier gezeigte STM benötigt einen externen Controller und arbeitet mit der Software „Easyscan 2“. Das STM am anderen Experimentierplatz hat einen intern verbauten Controller und arbeitet mit der Software „NaoiSTM“. Details zu den STM und der Software sind auf [www.nanosurf.com](http://www.nanosurf.com) zu finden.

Die USB-Lupe über dem Positioniertisch dient zur Aufnahme der verwendeten Probe vor und der verwendeten Spitzt nach der Messung mit dem STM. Um das beobachtete Objekt zu fixieren, ist im *x-y-z*-Positioniertisch ein Magnet verbaut. Die Aufnahmen können mit dem Programm *amcap* getätig werden.

Die USB-Lupe über dem STM dient der Beobachtung des Anfahrvorgangs und kann direkt im STM-Programm verwendet werden. Sie ist dazu auf einem Tripod montiert (Achtung: Den Tripod stabil hinstellen, er kann sonst umkippen.) Die Stereolupe ist fest am Tisch montiert und sollte bereits passend über dem STM justiert sein. Falls dies nicht der Fall ist, wenden Sie sich an Ihren Tutor.

## P422.6 Durchführung und Analyse

Zusätzlich gehört zu jedem Experimentierplatz eine Box mit folgendem Inhalt:



Betriebsmodi:

Ein STM kann generell in zwei Betriebsmodi arbeiten: *constant height* oder *constant current*.

**constant current mode:** Der Regelkreis sorgt dafür, dass der Tunnelstrom immer den selben Wert hat. Dies wird durch eine geeignete Spannung am z-Piezo realisiert. Da der z-Piezo kalibriert ist, erhält man über die Spannung direkt die Höhe der Spalte über der Probe und dadurch (bei monatomaren Proben) die Oberflächentopographie. Die Integrationszeit des Regelkreises ist kurz zu wählen → großer Wert für I.

Die Spalte muss in diesem Betriebsmodus aktiv bewegt werden, was die Scangeschwindigkeit limitiert. Proben sollten allerdings zunächst immer (!) in diesem Betriebsmodus abgebildet werden (um die Spalte zu schonen).

Startparameter: P = 1000, I = 2000, D = 0

**constant height mode:** Der Abstand zwischen Spalte und Probe wird nicht (!) nachgefahren, und man erhält die Information über die Oberfläche durch das Strombild. Dieser Betriebsmodus benötigt eigentlich keinen Regelkreis (hzw. die Integrationszeit des PID-Reglers wird sehr lang eingestellt → kleiner Wert für I).

Da der Regelkreis quasi inaktiv ist, kann in diesem Betriebsmodus sehr schnell gescannt werden. Nutzen Sie diesen Betriebsmodus aber bitte ausschließlich für kleine Bilder ( $< 10 \times 10 \text{ mm}^2$ ) und erst, wenn Sie sicher sind, dass keine großen Oberflächenkorngenerationen in Ihrem Bildausschnitt sind. Andernfalls zerstören Sie mit großer Wahrscheinlichkeit Ihre Spalte.

Startparameter: P = 0, I = 4, D = 0

Zur Handhabung der HOPG-Probe sollte die flache Pinzette, für die anderen Proben die Probenpinzette verwendet werden. Z.T. stehen mehr Proben als hier dargestellt zur Verfügung (Spezifikation siehe Anhang). Zudem ist für jede Gruppe eine Halterung vorhanden, die der Reinigung der Probenteller von unten und der Handhabung der HOPG-Probe beim Abziehen dient. Gemeinsam zu benutzen ist der Spaltenreissplatz (Schraubstock mit Pt-Ir Draft) sowie die zugehörigen Feinmechanizangen. Mit dem TEM-Netzchen kann zu jeder Aufnahme der USB-Lupe der zugehörige Maßstab bestimmt werden.

**Zusätzliche Hinweise:**

- Das STM-Programm zeigt immer zwei Bilder: Das Strombild (in [A]) und die Höhe der Spitze (in [m]). Je nach Betriebsmodus (bzw. je nach Integrationswert) wird die Oberflächeninformation in einem dieser Bilder dargestellt.
- "Spielen" Sie mit den Parametern, große Ströme, schnelle Rastergeschwindigkeit, Änderung der Polarität der Spannung zwischen Spitze und Probe, mehr Pixel, ...
- Abhängig von der Größe des Bildes muss die *Time per Line* angepasst werden (weil in der Software unsinnigerweise die Rastergeschwindigkeit nicht in m/s sondern in Time per Line angegeben werden muss und letztere sich aber mit jedem Ändern der Bildgröße ändert).
- Zur Auswertung der Bilder kann die frei verfügbare Software gryddion genutzt werden.
- Zu jedem (!) STM Bild notieren Sie sämtliche Abbildungsparameter in der Bildunterschrift (SetPoint  $I$ , TipVoltage  $\pm U$ , Rastergeschwindigkeit in [nm/s] (nicht die unsinnige Angabe Time per Line), die PID Regelparameter sowie die verwendete Spitzte). Die verwendete Spitzte müssen Sie sich aufschreiben, die anderen Parameter werden zusammen mit dem Bild abgespeichert. Sie erhalten die Parameter, indem Sie die RTM-Bilddatei (Endung .nid) mit einem Texteditor öffnen.

**P422.7 Aufgaben**

- Machen Sie sich zunächst mit der Handhabung der vorhandenen Gerätschaften bekannt. Achtung: An diversen Stellen sind (starke) Magnete verbaut. Die Probenteller sind magnetisch.
- **Proben:** Dokumentieren Sie den Zustand der Proben mit dem USB-Mikroskop. Machen Sie dazu Bilder mit unterschiedlicher Vergrößerung. Kalibrieren Sie das USB-Mikroskop jeweils mit Hilfe des TEM-Netzchens. Ihr Versuchsbericht muss von jeder Probe Bilder mit (!) Maßstab aufweisen.

- **Spitzen:** Üben Sie den Spitzeneinbau mit alten Spitzen und dem „Innenleben“. Der Durchmesser des Platin-Iridium Drahtes beträgt 0,3 mm. Diese Information können Sie zur Kalibrierung nutzen. Ihr Versuchsbericht sollte von den Spitzen, die Sie für die STM-Bilder genutzt haben, Bilder beinhalten. (Selbstverständlich kann mit dem USB-Mikroskop keine Aussage über die Qualität der Spitzte getroffen werden.)
- **Annäherung der Probe:** Putzen Sie einen Probenhalter mit Isopropanol und achten Sie im Folgenden darauf, dasselben nur am Plastikstiel zu berühren. Nehmen Sie einen (leeren) Probenteller, bauen Sie diesen (mit dem Probenhalter) in das STM ein, und führen Sie die Annäherung. Beobachten Sie dafür die Annäherung (*Advance*) mit der Stereolupe oder einer mit einem Tripod über dem STM aufgestellten USB-Lupe. Wenn Sie keine Bewegung beobachten, legen Sie den Beschwerer auf den Probenhalter (zur verbesserten Kopplung an den Stick-Slip Piezo). Geht es immer noch nicht, putzen Sie nochmals den Probenhalter. Wenn es dann immer noch nicht geht, rufen Sie Ihren Tutor.

- **Beginn / Ende einer Messung:** Die automatische Annäherung bis hin zum Tunnelkontakt geschieht mit *Approach*. Aufgrund der sehr feinen Annäherung von *Approach* ist es essentiell die Probe so nah wie möglich an die Spitze mit *Advance* anzunähern, bis man in der Stereolupe quasi keinen Abstand mehr erkennen kann. Dies kann einige Zeit dauern (10 Minuten) – je nachdem wie nah Sie zuvor mit *Advance* angenähert hatten. Wählen Sie  $U = 1\text{ V}$  und  $I = 1\text{ nA}$  als Parameter bei der Annäherung.

- Wenn Sie eine Messung abbrechen wollen, z.B. um die Spitzte oder die Probe zu tauschen, sollte die Spitzte zuerst mit *Withdraw* von der Probe entfernt werden, bevor die Probe mit *Retract* zurück gefahren wird. *Withdraw* ist wesentlich vorsichtiger als *Retract*.

Sie sollten sich jetzt mit dem Equipment soweit vertraut fühlen, dass Sie mit den Messungen beginnen können.

- Reißen Sie eine neue Spitzte und bauen STM ein. Denken Sie daran, nach Abschluss aller Messungen mit einer Spitzte im STM, die Spitzte in das Innenleben zu transferieren und mit der USB-Lupe zu dokumentieren.

- Bauen Sie eine der **Goldkugel-Proben** ein und nehmen Sie Bilder unterschiedlicher Größe auf. Hier sollten Sie, unabhängig von der Qualität der gerissenen Spitze, "schöne" STM-Bilder bekommen. Überlegen Sie, welche Bildgrößen sinnvoll sind. Die Probe ist sehr rau, nutzen Sie daher den *constant current mode*. Wichtig(!): In den Bericht gehört auch die Angabe welche Goldprobe untersucht worden ist.
- Ziel: Schöne (!) Bilder machen, als garantiertes Erfolgsberlebnis.

- Präparieren Sie die **Graphit (HOPG) Probe** mit dem zugehörigen Halter. Dazu bauen Sie die Probe zunächst „kopfüber“ ein und putzen die Rückseite des Probentellers mit Isopropanol, dann setzen Sie die Probe anders herum ein und ziehen die Graphit-Oberfläche mit Tesaflim ab. Beobachten Sie unter der USB-Lupe wie die Oberfläche vor bzw. nach dem Abziehen aussieht und achten Sie darauf, dass nach dem Abziehen eine glatte Fläche vorhanden ist. Bauen Sie die Probe dann ins STM ein und nehmen Sie Bilder unterschiedlicher Größe auf. Nehmen Sie Bilder sowohl im *constant height*- als auch im *constant current mode* auf. Versuchen Sie, atomar aufgelöste Bilder zu erhalten.

HOPG wird als Eichprobe für die Kalibrierung der *x*- und *y*-Piezos verwendet. Vermessen Sie die Atomabstände und Winkel und vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den Werten aus der Literatur. Mitteln Sie ggf. über mehrere Abstände. Weiterhin sollten Winkel an verschiedenen Stellen in der Struktur ermittelt werden. Versuchen Sie herauszufinden, ob die Piezos am STM richtig gerichtet sind.

- Im Versuch stehen **weitere Proben** (Bestand ständig wechselnd) zur Verfügung. Suchen Sie sich eine aus und nehmen Sie Bilder verschiedener Größe auf. Identifizieren Sie Besonderheiten der von Ihnen gewählten Probe. Variieren Sie die STM-Parameter so, dass Sie möglichst schöne Bilder erhalten.

- **Dokumentation der verwendeten Spitzen:** Wann immer Sie die Spitze tauschen, dokumentieren Sie die Spitzte, mit der Sie zuvor STM-Aufnahmen gemacht haben. Dazu bauen Sie die Spitzte in das STM-Innenleben ein und legen dieses auf den *x-y-z*-Positioniertisch.

**Tipps zur Aufnahme von HOPG-Bildern:** Um auf HOPG atomare Auflösung zu erreichen, muss die Spitzte einatönig und die zu untersuchende Graphitoberfläche innerhalb der letzten Stunden abgezogen sein. Zudem sollte die Probe im abgerasterten Bereich keine Stufen aufweisen. Schließlich müssen geeignete Parameter für den Betrieb des STMs genutzt werden: typische Werte liegen bei  $50\text{ mV} < U < 500\text{ mV}$  und  $5\text{ nA} > I > 0,5\text{ nA}$ . Da es im Vorfeld nicht möglich ist, zu überprüfen, ob Spitzte und Probe die o.g. Kriterien erfüllen, ist es ratsam, zunächst STM-Bilder mit Standard-Betriebsparametern aufzunehmen. Gehen Sie dazu folgendermaßen vor:

- Nehmen Sie ein  $200\text{ nm} \times 200\text{ nm}$  Bild auf.
- Evtl. muss man die Verkipfung der Probe ausgleichen (*Adjust Slope*).

- Wenn Sie ein brauchbares STM-Bild erhalten haben, identifizieren Sie aus obigem Bild einen flachen Bereich, zoomen Sie dort hinein und nehmen Sie ein  $10\text{ nm} \times 10\text{ nm}$  Bild auf (Anpassung von *Time per Line* nicht vergessen).
- Wenn auch das kleinere Bild gut gelungen ist, versuchen Sie, ein  $4\text{ nm} \times 4\text{ nm}$  Bild aufzunehmen (Anpassung von *Time per Line* nicht vergessen). Hier sollten Sie die HOPG-Struktur atomar-aufgelöst sehen.

#### Atomare Auflösung von HOPG nicht gelungen - was tun?

- Ändern Sie die Parameter von *I* und *U*. Nutzen Sie in den *constant height* Betriebsmodus. Scannen Sie ggf. möglichst schnell!
- Geben Sie einen "Tip Cleaning Pulse" auf die Spitzte. Da die Spitzte extrem scharf ist (oder zumindest sein sollte) haben Sie dort eine sehr hohe Feldstärke und mit einem Spannungspuls kann es gelingen, (aufgesammelten) Dreck von der Spitzte zu entfernen.
- Wenn Sie mit obigen Maßnahmen keinen Erfolg hatten, bleibt nur noch ein letzter brutaler Versuch, mit der eingebauten Spitzte doch noch atomar aufgelöste Bilder zu erhalten: Klopfen Sie 1× (kräftig) auf den Tisch. Manches Mal hilft das.
- Wenn sämtliche obige Schritte keinen Erfolg gebracht haben, dann müssen Sie eine neue Spitzte reißen. Vergessen Sie nicht, die neue Spitzte wieder mit dem USB-Mikroskop zu dokumentieren. Auch die Probe sollte neu abgezogen werden und die Oberfläche erneut mit dem USB-Mikroskop dokumentiert werden.  
Nach maximal 5 neuen Spitzten hören Sie auf damit!

## P422.8 Allgemeine Hinweise

- USB-Speichermedium mitbringen
- Merke: Ein Bild ohne Maßstab ist wertlos!
  - Ganz gleich ob es ein klassisches Auflichtmikroskop-Bild ist, ein REM-Bild, ein Bild aufgenommen mit dem USB-Mikroskop oder ein STM-Bild.
- Der Versuchsbericht:
  - Fassen Sie sich kurz! Es gibt schon ausführliche Bücher zum Thema STM.
  - Nicht sämtliche Bilder, die Sie mit dem USB-Mikroskop bzw. dem STM aufgenommen haben, gehören in den Versuchsbericht. Ggf. verbannten Sie Bilder auch in den Anhang.
  - Nicht nur Erfolge, auch Misserfolge können wertvoll sein und daher berechtigterweise einen Platz im Versuchsbericht finden.



## Anhang

Anhang: bitte beachten

Halben Sie sich gut auf den Versuch vorbereitet?

Dann sollten Sie mit diesen Fragen etwas anfangen können ...

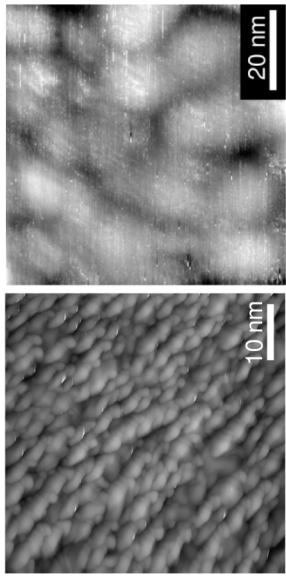
- Für welche Proben ist Tunnelmikroskopie möglich und wie sieht es mit Alternativen aus?
- Welche Größen bestimmen den Transmissionskoeffizienten des Tunnelprozesses?
- Wie hängt der Tunnelstrom vom Spitz-Probe-Abstand ab?
  - Warum lassen sich mit sehr einfach präparierten Spitzen atomare Auflösungen erzielen?
- Worin besteht in einem realen Experiment die Tunnelbarriere?
- Wie ist ein STM aufgebaut und wie funktioniert es?
- Warum darf für die Bildaufnahme niemals eine Tunnelspannung von 0 V eingestellt werden?
- Was ist ein Piezo?
- Welche Messmodi sind mit dem STM möglich?
- Welche Information über die Probenoberfläche erhält man mit dem jeweiligen Messmodus?
- Welcher der beiden Messmodi erfordert mehr Zeit zum Messen?
- Welcher der beiden Messmodi ist für sehr ebene Proben besser geeignet?
- Wieso sind beide Messmodi idealisierte Grenzfälle?
- Warum kann man nur durch Veränderung der Integrationszeit des Reglers vom *constant current-* zum *constant height modus* übergehen?
- Wie verändert sich die Abbildung einer Kante bei Erhöhung der Rastergeschwindigkeit?
- Welche Besonderheit findet sich bei den Goldproben ?

## Die Proben

Die hier gezeigten STM-Bilder wurden mit dem im Versuch verwendeten Equipment aufgenommen.

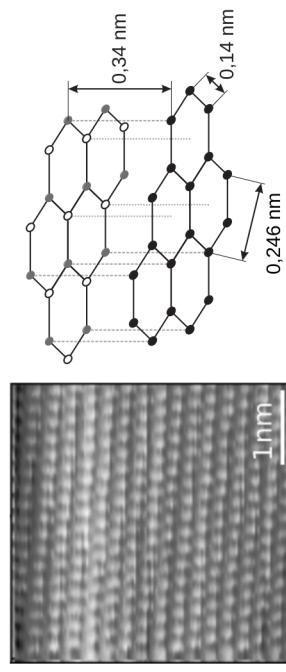
### Goldkugel-Proben

Es handelt sich hierbei um Silizium bzw. Saphir, auf das Gold aufgedampft wurde. Im Anschluss wurden die Proben erhitzt. links: Gold auf Silizium, rechts: Gold auf Saphir



### HOPG-Probe

Große Bilder zeigen eine gestufte Oberfläche, bei kleinen Bildern ( $\ll 10 \times 10 \text{ nm}^2$ ) sollten Sie atomare Auflösung erzielen.



### Weitere Proben

Im Versuchsräum steht ein ständig wechselnder Bestand an anderen, zusätzlichen Proben zur Verfügung. Sie müssen sich auf diese nicht vorbereiten. Ihr Tutor hilft Ihnen dabei, eine Probe auszuwählen und deren Besonderheiten zu identifizieren.



## P425 Elektronisches Rauschen

### P425.1 Versuchsziel

Dieser Versuch beschäftigt sich mit der Messung des elektronischen Rauschens, welches in jedem elektrischen Schaltkreis vorhanden ist. Bei einer Präzisionsmessung ist die Größe des auftretenden Rauschens oft der begrenzende Faktor. Wird das Rauschen jedoch genauer untersucht, so kann es verwendet werden um fundamentale Konstanten der Physik zu bestimmen.

Johnson-Rauschen, oder auch thermisches Rauschen genannt, entsteht durch thermodynamische Fluktuationen. Daher hängt das Rauschen von der Temperatur und der Boltzmann-Konstanten,  $k_B$ , ab. Im ersten Teil dieses Versuchs soll die Größe der Boltzmann-Konstanten gemessen werden. Das Schrottrauschen, welches im zweiten Versuchsteil untersucht wird, entsteht durch die Quantisierung der elektrischen Ladungsträger und hängt somit von der Größe der Ladung der Elektronen ab. Im diesem Versuchsteil soll anhand des Schrottrauschen die Größe der Elementarladung bestimmt werden.

### P425.2 Notwendige Vorkenntnisse

- Frequenz-Filter und effektive Bandbreite
- Johnson Noise: Nyquist's Formel.
- Schrottrauschen: Schottky's Formel.
- Verstärker
- Photodioden

### P425.3 Literatur

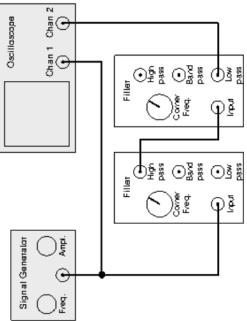
- Horowitz: „The art of electronics“ oder andere einführende Elektronik-Bücher
- U. Tietze, Ch. Schenk: „Halbleiterschaltungstechnik“
- Ergänzende Literatur sollte 1–2 Wochen vor der Durchführung des Experiments beim zuständigen Tutor ausgeliehen werden.

## P425.4 Effektive Bandbreite

Das Ansprechverhalten von elektronischen Filtern ist charakterisiert durch die Verstärkung

$$G(f) = \frac{\text{RMS Output}}{\text{RMS Input}},$$

wobei RMS (root-mean-square) das quadratische Mittel der Stärke des Signals angibt.  
Um das Ansprechverhalten der Filter zu untersuchen, schalten Sie die Elektronik der HLE-Box wie in Abbildung P425.1 gezeigt.



**Abbildung P425.1:** Schaltplan zur Messung des Ansprechverhaltens der Frequenzfilter [Teach-Spin].

Stellen Sie das Oszilloskop so ein, dass das quadratische Mittel (RMS) für beide Eingangskanäle angezeigt wird. Stellen Sie die Filter auf die folgenden Werte:

$$\text{Hochpass: } f_{\text{gr}} = 1 \text{ kHz} \quad , \quad \text{Tiefpass: } f_{\text{gr}} = 10 \text{ kHz} .$$

Notieren Sie beide RMS-Werte für verschiedene Frequenz-Einstellungen am Frequenzgenerator. Verteilen Sie Ihre Frequenzwerte gleichmäßig, so dass 2 oder 3 Datenpunkte in jeder Frequenz-Dekade liegen, z.B. 2 Hz, 8 Hz, 20 Hz, 800 Hz, 2001 Hz, 800 Hz, usw.. Messen Sie dabei mindestens bis 10 MHz. Achten Sie darauf, dass der Frequenzgenerator ein Sinus-Signal erzeugt.

Tragen Sie die Verstärkung  $G(f)$  als Funktion der Frequenz auf, wobei die Achse der Frequenz logarithmisch gezeichnet werden soll. An welcher Stelle sind die ausgewählten Werte für den Hoch- und Tiefpass in dem Diagramm sichtbar?  
Das Ansprechverhalten der hier verwendeten Filter (*Butterworth-Filter 2. Ordnung*) kann mit den folgenden Funktionen beschrieben werden:

$$\text{Tiefpass: } G_{\text{LP}}(f) = [1 + (f/f_1)^4]^{-1/2}$$

$$\text{Hochpass: } G_{\text{HP}}(f) = (f/f_h)^2 [1 + (f/f_h)^4]^{-1/2},$$

wobei  $f_1$  und  $f_h$  die tatsächlich eingestellten Grenzfrequenzen des Hoch- und des Tiefpasses sind.  
Passen Sie die oben stehenden Funktionen an Ihre Messwerte an.  
Da die Stärke der Johnson-Noise unabhängig von der Frequenz sein sollte, können die obigen

Funktionen dazu verwendet werden die effektive Bandbreite jeder bisher durchgeführten Messung zu bestimmen. Anhand der Formeln kann numerisch oder analytisch integriert werden, um so die effektive Bandbreite zu bestimmen. Die effektive Bandbreite ist definiert als

$$\Delta f_{\text{eff}} = \int G^2(f) df = \int G_{\text{LP}}^2 \cdot G_{\text{HP}}^2 df ,$$

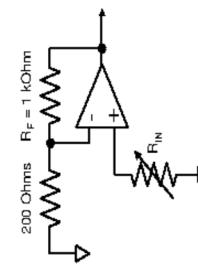
mit dem Integrationsbereich  $[0, \infty]$ . Wählen Sie bei einer numerischen Integration einen Bereich, in dem  $G(f)$  ausreichend klein ist. Durch Variation von  $f_1$  und  $f_2$  in  $G(f)$  ist es möglich die effektive Bandbreite für jede eingestellte Frequenz des Hoch- oder Tiefpasses zu bestimmen.

Für die weiteren Versuchsteile können Sie annehmen, dass der Fehler  $\Delta f_{\text{eff}}$  relativ von der effektiven Bandbreite abhängt.

## P425.5 Johnson-Rauschen

### P425.5.1 Beobachten des Johnson-Rauschens mit dem Oszilloskop

Der Schaltkreis, mit welchem das Johnson-Rauschen beobachtet werden soll, ist in Abbildung P425.2 dargestellt. Hierbei beträgt die Verstärkung des Vorverstärkers  $G_1 = 600$ .



**Abbildung P425.2:** Schaltplan des Vorverstärkers der LLE-Box zur Messung des Johnson-Rauschens [TeachSpin].

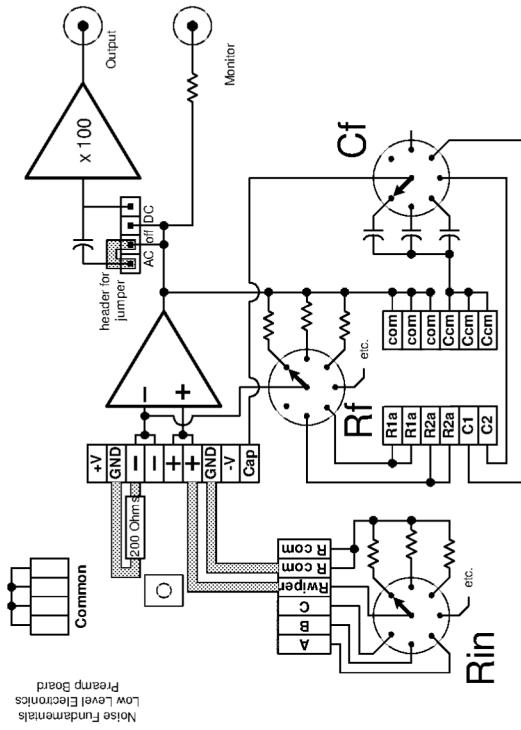
Um den Vorverstärker wie oben gezeigt zu verwenden, muss die interne Schaltung der LLE-Box (LLE: Low-level electronics) wie in Abbildung P425.3 verkabelt werden. Lösen Sie dazu die Schrauben der Front-Platte der LLE-Box und drehen Sie diese um, so dass Sie die Rückseite sehen können. Schalten Sie die Elektronik der LLE-Box mit dem Schalter auf der Rückseite aus, bevor Sie mit der Verkabelung der einzelnen Komponenten beginnen.

Um das Johnson-Rauschen erstmals beobachten zu können, sollten die folgenden Einstellungen an der LLE-Box vorgenommen werden:

$$R_{\text{in}} = 100 \text{ k}\Omega , \quad R_f = 1 \text{ k}\Omega .$$

Um das Rauschen auf dem Oszilloskop zu sehen, verbinden Sie den Ausgang des Vorverstärkers mit dem Oszilloskop und verwenden Sie die folgenden Einstellungen:

$$10 \text{ mV/div} , \quad 5 \text{ ns/div} , \quad \text{Triggerlevel } \approx 0 .$$



**Abbildung P425.3:** Interner Schaltplan der LLE-Box zur Messung des Johnson-Rauschens [TeachSpin]

Als nächsten Schritt sollten Sie das Signal der Vorverstärkers mit den HLE-Box (High-level electronics) verbinden. Verkabeln Sie dazu den Ausgang des Vorverstärkers mithilfe eines BNC-Kabels mit dem Eingang eines Filters der HLE-Box. Der Schaltkreis der HLE-Box sollte wie in Abbildung P425.4 dargestellt aussehen.

Verwenden Sie die folgenden Einstellungen an der HLE-Box:

$$\text{Hochpass: } f_{\text{gr}} = 0,1 \text{ kHz} , \quad \text{Tiefpass: } f_{\text{gr}} = 100 \text{ kHz} , \quad \text{Gain} = 300 , \quad \text{Schalter auf AC} .$$

Das Johnson-Rauschen sollte auf dem Oszilloskop mit den folgenden Einstellungen sichtbar sein:

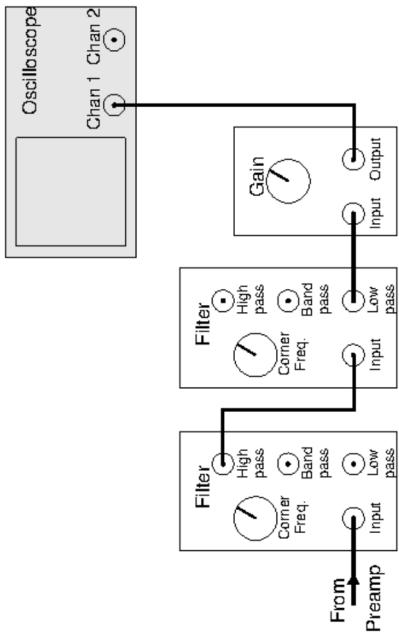
$$2 \text{ V/div} , \quad 10 \text{ ps/div} , \quad \text{Triggerlevel } \approx 0 , \quad \text{Eingangsimpedanz Oszilloskop} = 1 \text{ M}\Omega .$$

## P425.5.2 Messung des Johnson-Rauschens mit der HLE-Box

Zur Messung des Johnson-Rauschens verkabeln Sie bitte die HLE-Box wie in Abbildung P425.5 dargestellt.

Die Einstellungen der HLE-Box bleiben dieselben wie beim letzten Versuchsteil, zusätzlich gilt für die neuen Komponenten:

$$\text{Multiplier : } AxA , \quad \text{Zeitkonstante} = 1 \text{ s}$$



**Abbildung P425.4:** Schaltung der HLE-Box zum Visualisieren des Johnson-Rauschens [TeachSpin].

Wird der Multiplier im *AxA*-Modus betrieben, so gilt für das Signal am Ausgang der HLE-Box:

$$V_{\text{out}} = \frac{(V_{\text{in}}(t))^2}{10 \text{ V}} .$$

Das Ausgangssignal des Multipliers wird intern durchgeschleift und über die eingestellte Zeitkonstante gemittelt. Die Funktionsweise des Multipliers alleine kann wie folgt überprüft werden: Verbinden Sie dazu den Monitor-Ausgang des Multipliers mit dem Kanal 2 des Oszilloskops und wählen Sie am Oszilloskop als Darstellungsart Kanal 1 gegen Kanal 2 aus. Was sehen Sie und warum?

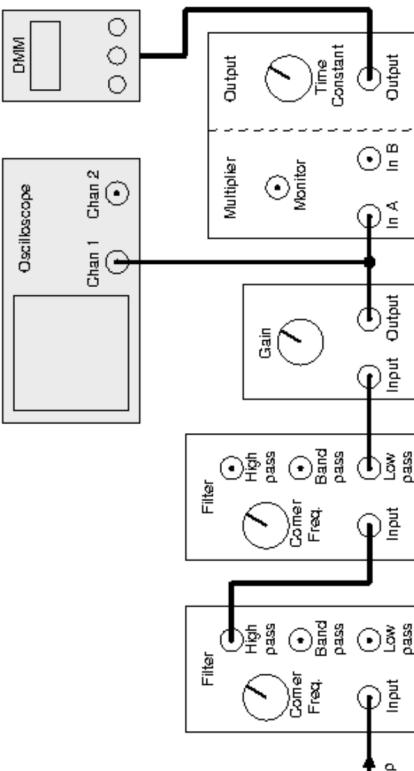
Die gesamte Schaltung hat nur einen schmalen Bereich, in dem die Ausgangssignale stabil und linear zum Eingangsräuschen sind. Um sicherzustellen, dass die abgelesenen Werte in diesem Bereich liegen, variiert die Verstärkung der HLE-Box, so dass die Ausgabe auf dem digitalen Multimeter (DMM) Werte zwischen 0,6 V und 1,2 V anzeigt. Notieren Sie in den Messreihen die Werte des DMM. Diese Werte schwanken anfangs stark. Warten Sie mit dem Ablesen der Werte bis die Fluktuationen nachgelassen haben. Der Zusammenhang zwischen dem über die Zeit gemittelten Johnson-Rauschen ( $\overline{V_j^2(t)}$ ) und den abgelesenen Werten am DMM ( $V_{\text{meter}}$ ) ist (solange das Ausgangssignal im richtigen Spannungsbereich liegt)

$$V_{\text{meter}} = \overline{V_j^2(t)} \frac{(600 \cdot G_2)^2}{10 \text{ V}},$$

wobei  $G_2$  der Wert des Verstärkers der HLE-Box ist.

Die Ausgangsspannung  $V_{\text{meter}}$  kann auch grob am analogen Zeigerinstrument abgelesen werden, dessen Messbereich über einen Kippschalter darunter auf 0–2 V oder 0–10 V eingestellt werden.

**Wichtig:** Notieren Sie immer die zugehörige Verstärkung der HLE-Box ( $G_2$ ), wenn Sie Werte vom DMM ablesen.



**Abbildung P425.5:** Verkabelung zur Messung des Johnson-Rauschens [TeachSpin].

### P425.5.3 Abhängigkeit des Johnson-Rauschen vom Widerstand

Nicht das gesamte gemessene Rauschen entsteht durch Johnson-Rauschen im Widerstand. Es gibt noch weitere Rauschquellen im Aufbau, so z.B. das Rauschen der Verstärker. Um den Anteil der anderen Rauschquellen vom gewünschten Johnson-Rauschen trennen zu können, wird das Rauschen als Funktion des Widerstands gemessen.

In der Nyquist-Formel hängt das Johnson-Rauschen linear vom Widerstand ab. Alle Anteile, die nicht vom Widerstand abhängen, müssen somit von anderen Rauschquellen stammen. Um dies zu bestimmen, wird die Spannung am DMM und die Verstärkung  $G_2$  für verschiedene Widerstände  $R_{\text{in}}$  gemessen. Mögliche Widerstandswerte sind:

$$R_{\text{in}} = 1 \Omega, 10 \Omega, 100 \Omega, 1 \text{ k}\Omega, 10 \text{ k}\Omega, 100 \text{ k}\Omega, 1 \text{ M}\Omega.$$

**Wichtig:** Achten Sie darauf, dass die Werte des DMM nahe 1 Volt liegen. Ändern Sie den Wert des HLE-Verstärkers  $G_2$  um Werte zwischen 0,6–1,2 V auf dem DMM zu erhalten. Notieren Sie sowohl den abgelesenen DMM-Wert, als auch die eingestellte Verstärkung  $G_2$ .

Der Zusammenhang zwischen dem abgelesenen Wert des DMM ( $V_{\text{meter}}$ ) und des Johnson- und Verstärker-Rauschens ( $V_N$ ) ist gegeben durch:

$$V_{\text{meter}} = \overline{V_j^2(t)} + \overline{V_N^2(t)} \frac{(600 \cdot G_2)^2}{10 \text{ V}} .$$

Warum gibt es keine Korrelation zwischen den beiden Signalen? (Oder auch: Warum gibt es keinen gemischten Term in dieser Gleichung?)

Tragen Sie das jeweils gemessene Rauschen gegen den Widerstand  $R$  auf und zerlegen Sie es durch geeignete Anpassung in seine beiden Anteile ( $V_j^2$  und  $V_N^2$ ). Um die Anpassungsqualität

besser zu beurteilen, visualisieren sie zusätzlich noch die Residuen der einzelnen Messpunkte zur angepassten Funktion. Vergleichen Sie die berechneten Residuen mit ihren Unsicherheiten (d. h. Fehlerbalken). Sind ihre Messwerte für das Johnson-Rauschen mit der zugrundegelegten Nyquist-Formel kompatibel?

#### P425.5.4 Abhängigkeit des Johnson-Rauschens von der Bandbreite

Um die Abhängigkeit des Johnson-Rauschens von der Bandbreite ( $\Delta f$ ) zu untersuchen, nehmen Sie Werte verschiedener Hochpass- und Tiefpass-Filtereinstellungen auf.

Auch hier tritt neben dem Johnson-Rauschen noch Rauschen aus anderen Quellen auf, das in seiner Stärke auch wieder frequenzabhängig sein sollte. Um dieses sinnvoll zu separieren, muss für jede(!) Frequenz eine Widerstandreihe wie in P425.5.3 vermessen werden. Wählen Sie deshalb einen Widerstand bei dem das Johnson-Rauschen das Rauschen aus anderen Quellen dominiert und führen Sie die frequenzabhängige Messung nur für diesen Widerstand (und somit ohne entsprechende Korrektur) durch.

**Wichtig:** Notieren Sie sowohl Hochpass- als auch Tiefpass-Abschaltfrequenz für jeden Messpunkt

Zeichnen Sie Ihre Werte als Funktion von  $\Delta f$  in ein log-log-Diagramm, d. h. zeichnen Sie beide Achsen logarithmisch. Passt das Verhalten Ihrer Kurve zur Nyquist-Formel?

#### P425.5.5 Bestimmung der Boltzmann-Konstanten

Zu diesem Zeitpunkt stehen alle Informationen zur Verfügung die notwendig sind, um die Größe der Boltzmann-Konstanten  $k_B$  zu bestimmen. Vergleichen Sie die Ergebnisse beider Messreihen. Beziehen Sie alle Unsicherheiten in Ihre Fehlerrechnung mit ein.

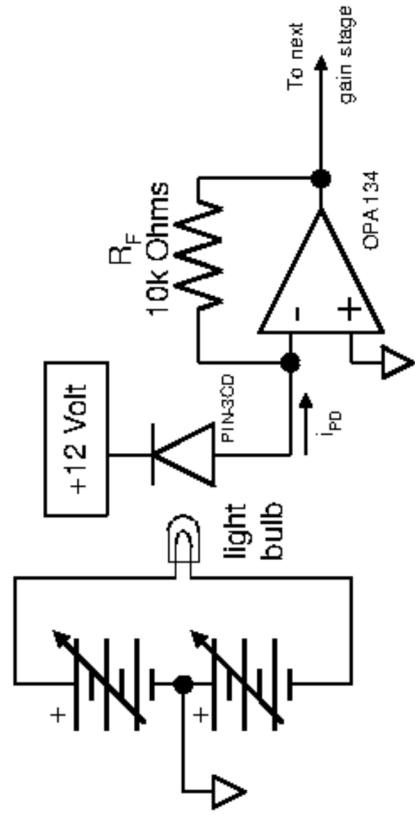
### P425.6 Schrotrauschen

Um das Schrotrauschen beobachten zu können, muss ein Strom an unkorrelierten Elektronen erzeugt werden. Die thermische Emission von Photonen einer leuchtenden Glühlampe stellt eine Quelle von unkorrelierten Photonen dar. Mit einer zusätzlichen Photodiode können aus diesen Photonen ein Strom von Elektronen erzeugt werden. Der erzeugte Strom sollte  $n$  Elektronen pro Zeiteinheit liefern mit einer Standardabweichung von  $\sqrt{n}$ . Um diesen Strom zu erzeugen, verwenden Sie bitte die Schaltung wie in Abbildung P425.6 gezeigt ist.

Setzen Sie den Schaltplan der LLE-Box wie in Abbildung P425.7 dargestellt um.

Führen Sie für die Verkabelung die folgenden Schritte durch:

- Befestigen Sie die Beinchen der Photodiode in den Klammern zum Verkabeln des Vorverstärkers. Achten Sie dabei darauf, dass das Beinchen mit der roten Ummantelung in



**Abbildung P425.6:** Schaltung für die LLE-Box zur Beobachtung des Schrotrauschen [TeachSpin].  
den +V Eingang des Vorverstärkers gesteckt ist. **Biegen Sie die Beinchen der Diode nur sehr vorsichtig um diese nicht abzubrechen!**

- Verdrahten Sie die Glühlampe mit der bipolaren Spannungsversorgung.
- Platzieren Sie sowohl die Glühlampe, als auch die Photodiode in der Plastik-Halterung und schrauben Sie die Halterung an der Leiterplatine fest. **Achtung: Ziehen Sie die Plastik-Schrauben, welche die Glühlampe und die Photodiode festhalten, nur sehr, sehr leicht an. Das Glas der Glühlampe ist sehr empfindlich und zerbricht dabei schnell.**

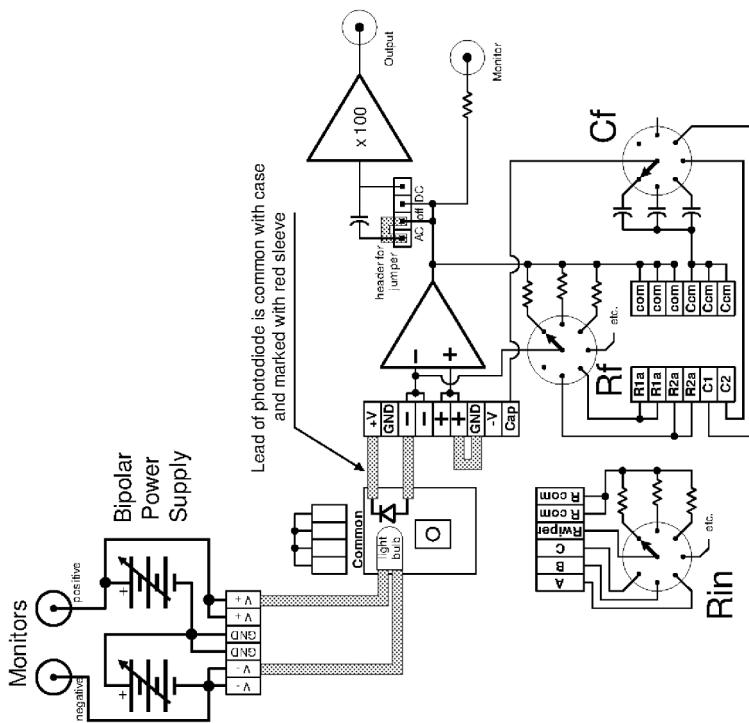
Nachdem Sie die Schaltung verkabelt haben, schalten Sie die LLE-Box an und bauen Sie diese wieder zusammen. Stecken Sie das digitale Multimeter (DMM) an den Monitor-Ausgang des Vorverstärkers. Die Einstellung des Widerstands der LLE-Box beträgt:

$$R_f = 10\text{k}\Omega$$

Auf dem Monitor des DMM sollte die Ausgangsspannung angezeigt werden, welche negativ ist und negativer wird, wenn die Eingangsspannung über die Spannungsversorgung der LLE erhöht wird. Der Strom, welcher durch den Draht fließt, ist  $i_{dc}$  in Schottky's Formel. Da der invertierende Eingang des Operationsverstärkers Strom zieht, welcher hier vernachlässigbar klein ist, fließt  $i_{dc}$  vollständig durch den Widerstand  $R_f$ . Dies stellt sicher, dass

$$V_{\text{monitor}} = -R_f i_{dc} .$$

Die Spannungsversorgung kontrolliert die Spannung der Glühlampe und hat daher einen Einfluss auf die Spannung und die Stromstärke am Ausgang. Dies ist der Strom, welcher das Schrotrauschen enthält.



**Abbildung P425.7:** Interner Schaltplan der LLE-Box für die Schaltung aus Abbildung P425.6 [TeachSpin].

### P425.6.1 Beobachten des Schrotrauschen

Das Schrotrauschen ist zu diesem Zeitpunkt zu klein um es zu beobachten, daher muss es noch mit der HLE verstärkt werden. Der Schaltplan, um das Schrotrauschen beobachten zu können, ist in Abbildung P425.8 dargestellt.

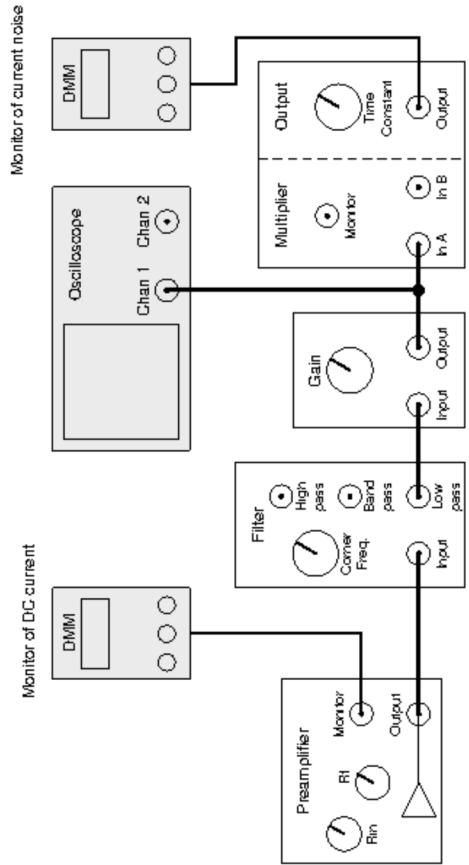
Die Einstellungen für die HLE-Box sind:

- Tiefpass:  $f_{gr} = 100 \text{ kHz}$  , Alle Schalter auf AC.

Jetzt können erste Messungen des Schrotrauschen durchgeführt werden.

**Wichtig:** Um sicherzustellen, dass im „guten“ Bereich der Elektronik gemessen wird, sollte die Verstärkung der HLE so eingestellt werden, dass Werte zwischen 0.6 und 1.2 Volt auf dem DMM ablesbar sind.

**Wichtig:** Notieren Sie sich die Verstärkung der HLE, die Spannung am HLE-Ausgang, die Einstellung des Tiefpasses und die Spannung am Monitor-Ausgang des Vorverstärkers.



**Abbildung P425.8:** Schaltung zur Messung des Schrotrauschenes [TeachSpin].

Das quadratische Mittel (RMS) der zeitgemittelten Stromschwankungen  $\overline{\delta i^2}$  ist gegeben durch

$$\overline{\delta i^2} = \frac{V_{\text{meter}}(t)}{(100 G_2 R_f)^2},$$

wobei  $V_{\text{meter}}(t)$  der abgelesene Wert auf dem DMM und  $G_2$  die Verstärkung der HLE ist.

### P425.6.2 Untergrundbeiträge

Das aufgenommene Signal entsteht nicht allein durch das Schrotrauschen. Unter anderem müssen noch folgende Punkte beachtet werden:

- Andere Rauschquellen (wie Johnson-Rauschen im  $10\text{k}\Omega$  Widerstand); Um den Beitrag aus anderen Rauschquellen zu messen, drehen Sie die Lampenspannung auf Null und notieren Sie die Ausgabe  $V_{\text{meter}}$ .
- Offset-Spannung des Operationsverstärkers; Der Vorverstärker hat eine geringe Offset-Spannung, welche die Messung von  $i_{dc}$  am Vorverstärker verfälscht. Ebenfalls bei ausgeschalteter Lampe sollte  $i_{dc} = 0\text{V}$  betragen,  $V_{\text{monitor}}$  müsst dann die noch verbleibende Offset-Spannung. Diese kann sowohl positiv als auch negativ sein und ist ebenfalls (*vorzeichenrichtig!*) bei der Berechnung von  $i_{dc}$  zu berücksichtigen.

- Überprüfen Sie das Feedback vom DMM am Monitor-Ausgang des Vorverstärkers; Beobachten Sie den Effekt, den das Aus- und Einsticken des DMM hat. Denkbar ist, dass das Multimeter zur Messung von  $i_{dc}$  ein zusätzliches Rauschen in die Schaltung induziert. Beobachten

Sie hierfür die gemessene des Multimeters am HLE-Ausgang bei einem ausgestecktem DMMs am Monitor-Ausgang des Vorverstärker.

Versuchen Sie die angesprochenen Untergrundterme bei Berechnung des Schrot-Rauschens sinnvoll zu berücksichtigen.

#### P425.6.3 Abhängigkeit des Schrotrauschens von $i_{dc}$

Nehmen Sie mehrere Messwerte mit unterschiedlichen Spannungen der Glühbirne. Dies führt zu verschiedenen Werten von  $i_{dc}$ . Tragen Sie den Wert von  $\overline{\delta r^2}$  gegen  $i_{dc}$  auf.

#### P425.6.4 Abhängigkeit des Schrotrauschens von $\Delta f$

Lassen Sie  $i_{dc}$  konstant und variieren Sie jetzt den Wert des Tiefpass-Filters um die „Weißheit“ des Schrotrauschens zu überprüfen. Nehmen Sie mehrere Messwerte in jeder Größenordnung von Frequenzen des Tiefpass-Filters. Tragen Sie in einem Diagramm  $\overline{\delta r^2}$  gegen  $\Delta f$  auf. Welchen Verlauf erwarten Sie?

#### P425.6.5 Berechnen der Elementarladung $e$

Jetzt sollten Sie die Elementarladung  $e$  bestimmen können. Gehen Sie dabei analog zu Abschnitt P425.5.5 vor.

#### P425.7 Literatur

Die gezeigten Abbildungen sind aus folgender Originalanleitung entnommen:

[TeachSpin] Noise Fundamentals NFI-A, Instructor's Manual, Teach Spin Inc. (2010).

Viel Erfolg bei der Durchführung!

Stand: 03/2024

## P428.4 Aufgaben

Bestimmen Sie mit Hilfe der Bragg-Reflektion an einem NaCl-Einkristall die Wellenlänge und Energie der charakteristischen Röntgenstrahlung einer unbekannten Röntgenröhre. Untersuchen Sie anschließend die Feinstruktur der  $K_{\alpha}$ -Linie von Molybdän in der vierten Beugungsordnung und bestimmen Sie den Wellenlängenabstand  $\Delta\lambda$  innerhalb des Dubletts.

## P428.1 Versuchsziel

- Untersuchung der charakteristischen Röntgenstrahlung einer unbekannten Anode und Auflösung der Feinstruktur der  $K_{\alpha}$ -Linie von Molybdän mittels Bragg-Reflexion an einem NaCl-Einkristall.
- Anwendung der Röntgenfluoreszenz zur zerstörungsfreien Analyse chemischer Zusammensetzungen.
- Untersuchung der Gitterstruktur kristalliner Stoffe mit Hilfe des Laue-Verfahrens.

## P428 Röntgenstrahlung und Materialanalyse

Weiterhin nehmen Sie mit dem Röntgenenergiedetektor das Fluoreszenz-Spektrum von vier verschiedenen Legierungen auf und bestimmen die einzelnen Komponenten der vier Legierungen. Zusätzlich werden die Massenanteile der einzelnen Komponenten einer dieser Proben bestimmt.

Am zweiten Versuchstag wird eine Laue-Aufnahme eines Einkristalls (NaCl- bzw. LiFl-Kristall) aufgenommen. Der Röntgenfilm wird entwickelt und die Symmetrie sowie die Gitterstruktur des Kristalls werden untersucht.

## P428.2 Notwendige Vorkenntnisse

- Röntgenstrahlen (Erzeugung und Nachweis, kontinuierliches und charakteristisches Röntgenspektrum, Feinstruktur)
- Bragg-Reflektion (Röntgenbeugung, Bragg-Bedingung, Glanzwinkel)
- Röntgenfluoreszenz (Grundlagen, Bestimmung der Massenanteile einzelner Komponenten)
- Laue-Verfahren (Laue-Bedingung, Miller'sche Indizes, Elementarzelle, Glanzwinkel, Netzebenenabstand)
- Geiger-Müller-Zählrohr (Aufbau, Funktionsweise, Totzeit)
- Röntgenenergiedetektor (Aufbau, Funktionsweise, PIN-Photodiode, Vielkanalanalysator)

## P428.5 Durchführung und Analyse

### P428.5.1 Bragg-Reflektion

#### Geräte

- Vollschutzzröntgengerät mit unbekannter Anode 1, 2 oder 3
- Kollimator mit 1 mm Spaltbreite
- Gonimeter
- Zählrohr im Zählrohrhalter (Sensorarm) mit 1 mm Spaltebreite
- NaCl-Kristall (25(1) mm × 25(1) mm × 3–4 mm)
- PC (USB-Stick bitte mitbringen)

## P428.3 Literatur

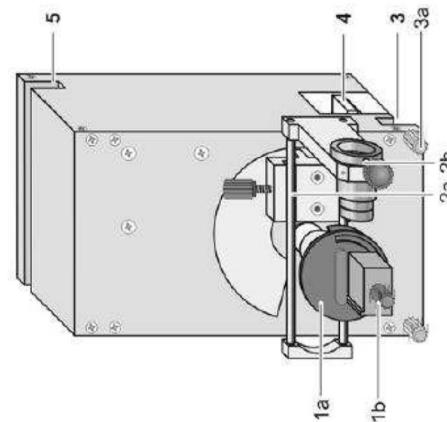
- L. Bergmann, C. Schäfer: „*Lehrbuch der Experimentalphysik IV*“
- W. R. Leo: „*Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*“
- C. Grupen: „*Teilchendetektoren*“
- J. Bienlein, R. Wiesendanger: „*Einführung in die Struktur der Materie*“
- Demtröder: „*Experimentalphysik 3*“
- Haken, Wolf: „*Atom- und Quantenphysik*“
- Für die Auswertung: „*X-Ray Data Booklet*“ (<http://xdb.lbl.gov/>)
- Röntgengerät ausschalten, Röntgenröhre gegebenenfalls mehrere Minuten abkühlen lassen.
- Rotes Hochspannungskabel senkrecht nach oben aus dem Kühlkörper ziehen.
- Festigungsschraube am runden Röhrensockel lösen (nicht abschrauben!).
- Röntgenkörper am Kühlkörper fassen und vorsichtig aus dem Sockel ziehen.

- Röntgenröhre am Glaskörper fassen und Kühlkörper abschrauben (normales Rechtsgewinde).

- Kühlkörper entnehmen und auf das Gerät stellen.
- Röntgenröhre entnehmen und in die vorgesehene Schachtel legen.
- Unbekannte Röntgenröhre aus der Schachtel nehmen und in den Bleiglas-Zylinder eintauchen. Röntgenröhre so in die Fassung stecken, dass die Schräge der Anode zum Messraum weist. Röntgenröhre bis zum Anschlag herunterdrücken.
- Befestigungsschraube am runden Röhrensockel festzuschrauben.
- Kühlkörper handfest aufzuschrauben.

- Hochspannungskabel senkrecht von oben soweit in die Bohrung des Kühlkörpers einführen, dass auch die Isolierung in die Bohrung eintaucht.

- Röntgengerät einschalten.



**Abbildung P428.1:** Aufbau Goniometer; 1: Targetarm mit Targethalter (1a), Targettisch (1b); 2: Sensorarm mit Sensorhalter (2a), Sensorsaufnahme (2b); 3: untere Führungsnut (LD Handblätter Physik) Rändelschrauben (3a); 4: Pfostenbuchse; 5: obere Führungsnut

Der Kollimator mit der größeren Spaltbreite (1 mm) wird in die Kollimatoraufnahme eingebaut (Führungsnut beachten). Der Sensorarm (ebenfalls mit der größeren Spaltbreite) mit dem Zahrohr wird am Goniometer befestigt und das Zahrohrkabel an die Buchse „GM-Tube“ angelassen und festgeschraubt. Zuletzt wird der Targethalter in das Loch im Goniometer eingesetzt und festgeschraubt.

Der Abstand zwischen der Spaltblende des Kollimators und dem Targethalter soll ca. 5 cm betragen, der Abstand zwischen Targethalter und Zahrohr ca. 6 cm. Den NaCl-Kristall flach auf den

- Targettisch legen, Targettisch vorsichtig bis zum Anschlag anheben und Schraube anziehen (dabei mögliches Verkanten durch leichtes Anpressen vermeiden).

#### Hinweis:

Der NaCl-Kristall ist hygroskopisch und zerbrechlich: Kristall möglichst trocken lagern, mechanische Belastungen auf den Kristall vermeiden, nur die Stirnseiten des Kristalls anfassen (beiliegende Handschuhe und/oder Pinzette verwenden).

#### Durchführung

Starten Sie das Programm „Röntgengerät“ am PC. Mit F5 gelangen Sie in die „Einstellungen“ wo Sie folgende Parameter wählen:

- Röhrenhochspannung  $U = 35,0\text{ kV}$ .
- Emissionsstrom  $I = 1,00\text{ mA}$ .
- Messzeit pro Winkelschritt  $\Delta t = 10\text{ s}$ .
- Winkelschrittweite  $\Delta\beta = 0,1^\circ$ .
- Taster COUPLED bei den Goniometereinstellungen aktivieren (Warum?).
- Winkelinstellungen  $\beta_{\min} = 2,0^\circ$  und  $\beta_{\max} = 25,0^\circ$ .
- Mit SCAN Messung und Datenübertragung zum PC starten.
- Um das Spektrum zu speichern, drücken Sie mit der rechten Maustaste auf die Tabelle links neben dem Spektrum. Wählen Sie den Menüpunkt „Tabelle kopieren“. Öffnen Sie den „Windows-Editor“ (Verknüpfung auf dem Desktop) und fügen Sie die Tabelle ein. Speichern Sie Ihre Ergebnisse für die weitere Auswertung in einem neuen Ordner mit Ihrem Gruppennamen.

#### Achtung:

Die Messung der Feinstruktur der charakteristischen Röntgenlinien in der vierten Beugungsordnung wird nach der Materialanalyse durchgeführt und über Nacht laufen gelassen, da die gesamte Messdauer knapp 12 Stunden beträgt.

Für die Feinstrukturmessung wird die Molybdän-Anode sowie der hochauflösende Kollimator und der entsprechende Zählrohrhalter mit dünnem Spalt (0,3 mm Spaltbreite) verwendet. Am PC werden die folgende Parameter eingestellt:

- Röhrenhochspannung  $U = 35,0 \text{ kV}$ .
- Emissionsstrom  $I = 1,00 \text{ mA}$ .
- Messzeit pro Winkelschritt  $\Delta t = 120 \text{ s}$ .
- Winkelschrittweite  $\Delta\beta = 0,1^\circ$ .
- Taster COUPLED bei den Goniometereinstellungen aktivieren.
- Winkelinstellungen  $\beta_{\min} = 28,5^\circ$  und  $\beta_{\max} = 32,0^\circ$ .
- Mit SCAN Messung und Datenübertragung zum PC starten.
- Bildschirm über Nacht ausschalten.

#### Auswertung

Durch das Anpassen von Gaussfunktionen an die Daten oder über das Programm „Röntgengerät“ (mit der rechten Maustaste auf das Spektrum klicken, Menüpunkt „Peakschwerpunkt berechnen“ wählen, gewünschten Bereich markieren, Wert wird unten links angezeigt) können die Schwerpunkte der charakteristischen Röntgenlinien berechnet werden. Mit Hilfe der erhaltenen Peakschwerpunkte und dem Bragg'schen Reflektionsgesetz kann die Wellenlänge  $\lambda$  der charakteristischen Röntgenstrahlung sowie deren Energie bestimmt werden. Dadurch kann das Anodenmaterial bestimmt werden. Bei der Feinstrukturmessung geben Sie zusätzlich den Wellenlängenabstand  $\Delta\lambda$  des Doublets an.

Vergleichen Sie alle Ergebnisse mit den in der Literatur vorhandenen Werten. Diskutieren Sie, woher die Aufspaltung bei der Feinstrukturmessung zusteht und warum sie erst bei höherer Ordnung sichtbar wird!

#### P428.5.2 Zerstörungsfreie Analyse chemischer Zusammensetzungen

##### Geräte

- Vollschatzröhrtengenerator mit Cu-Anode
- Kollimator mit 1 mm Spaltbreite
- Goniometer
- Sensorarm mit Röntgenenergiedetektor
- Kalibriertarget (FeZn-Plättchen)
- Targetsatz Legierungen (1-4)
- Targetsatz Fluoreszenz (verschiedene Materialien)
- PC (USB-Stick bitte mitbringen)

##### **Aufbau**

Für die Materialanalyse wird die Cu-Röntgenröhre verwendet. Dazu wechseln Sie die Röhre wie in P428.5.1 beschrieben.  
Zusätzlich wird für diese Messung der Röntgenenergiedetektor verwendet. Dazu muss der Sensorarm mit dem Zährohr entfernt werden und der Energiedetektor eingebaut werden:

- Anschlusskabel des Tischnetzgeräts zur Stromversorgung des Energiedetektors durch den Leerkanal des Röntgengeräts führen (falls noch nicht geschehen) und an die Mini-DIN-Buchse des Energiedetektors anschließen.
- Sensorarm mit Energiedetektor am Goniometer befestigen.
- Signalausgang des Detektors mittels BNC-Kabel an die SIGNAL IN-Buchse des Röntgengeräts anschließen.
- Anschlusskabel soweit nachführen, dass ein vollständiger Schwenk des Sensorarms möglich ist.
- Tischnetzgerät ans Netz anschließen (nach ca. 2 min leuchtet die Leuchtdiode des Energiedetektors grün und er ist betriebsbereit).
- Die Abstände zwischen Spaltblende des Kollimators und Drehachse sowie zwischen Drehachse und Eintrittsöffnung des Energiedetektors jeweils auf ca. 5 – 6 cm einstellen.
- Taster COUPLED am Röntgengerät drücken und den Winkel mit Drehheinsteller Adjust auf  $45^\circ$  einstellen. Das Target steht dann  $45^\circ$ , der Sensor bei  $90^\circ$ .

## Durchführung

Legen Sie das Kalibriertarget (FeZn-Plättchen) auf den Targettisch. Starten Sie am PC das Programm „*Cassy Lab*“. Wählen Sie für die Messparameter folgende Einstellungen:

- Vielkanalmessung aktivieren; 512 Kanäle; negative Pulse; Verstärkung = -2,5; Messdauer = 180 s.

- Am Röntgengerät stellen Sie  $U = 35,0 \text{ kV}$ ,  $I = 1,00 \text{ mA}$  ein und schalten mit dem Schalter HV ON/OFF die Hochspannung ein.
- Die Spektraufnahme wird nun mit der Taste F9 am PC gestartet.

- Um das Spektrum zu speichern, drücken Sie mit der rechten Maustaste auf die Tabelle links neben dem Spektrum. Wählen Sie den Menüpunkt „*Tabelle kopieren*“. Öffnen Sie den „*Windows-Editor*“ (Verknüpfung auf dem Desktop) und fügen Sie die Tabelle ein. Speichern Sie Ihre Ergebnisse für die weitere Auswertung.

Anschließend nehmen mit den selben Messparametern die Spektren der vier unbekannten Legierungen sowie die Referenzspektren der Elemente Blei (Pb), Eisen (Fe), Gold (Au), Indium (In), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Silber (Ag), Titan(Ti), Wolfram (W), Zinn (Sn), Zink (Zn) und Zirkonium (Zr) auf.

Hinweis: Nicht alle Referenzspektren werden für die spätere Auswertung gebraucht.

## Auswertung

Das Spektrum des FeZn-Plättchens wird zur Energiezeichung verwendet. In diesem Spektrum sind die  $K_{\alpha}$ - sowie  $K_{\beta}$ -Linien von Eisen und Zink deutlich zu sehen. Führen Sie anhand dieser vier Linien eine Energiekalibrierung durch (Geradenfit) und übertragen Sie diese auf die Spektren der Legierungen. Bestimmen Sie somit die Bestandteile der Plättchen.

Hinweis: Fehlende Vergleichswerte können dem *X-Ray Data Booklet* entnommen werden.

## Massenanteilstimmung

Zum Berechnen der Massenanteile wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Höhe eines Peaks zur Anzahl der strahlenden Atome  $n$  proportional ist. Im Referenzspektrum ist die Anzahl  $n_0$  durch die Dichte des Stoffes  $\rho$ , sein Atomgewicht  $A$ , die bestrahlte Fläche  $S$  und die effektive Dicke  $d$  der durchstrahlten Schicht bestimmt:

$$n_0 = S \cdot d \cdot \frac{\rho}{A}$$

Für die Anzahl der Atome jeder Sorte in der Legierung kann in der ersten Näherung der Ausdruck

$$n = n_0 \cdot \frac{H}{H_0} = V \cdot \frac{\rho}{A} \cdot \frac{H}{H_0}$$

benutzt werden. Dabei sind  $H$  und  $H_0$  die Höhen entsprechender Peaks im zu analysierenden Spektrum bzw. im Referenzspektrum,  $V = S \cdot d$  ist das bestrahlte Volumen. Damit wird der Massenanteil  $C_i$  der Elementnummer  $i$  in der Legierung zu:

$$C_i = \frac{n_i \cdot A_i}{\sum_i n_i \cdot A_i} = \frac{\rho_i \cdot \frac{H_i}{H_0 \cdot d_i}}{\sum_i \rho_i \cdot \frac{H_i}{H_0 \cdot d_i}}$$

Bestimmen Sie somit anhand der jeweiligen Resonanz-Linien der Referenzspektren, sowie der Resonanz-Linien im Spektrum einer von Ihnen gewählten Legierung die Massenanteile der jeweiligen Elemente.

Mit welcher chemischen Zusammensetzung stimmen die von Ihnen ermittelten Legierungskomponenten und deren Massenanteile überein?

Wodurch wird das Spektrum evtl. verfälscht (sekundäre Fluoreszenz etc.)? Wie verändert sich das Ergebnis wenn zwischen Drehachse und Eintrittsöffnung des Energiedetektors ein anderer Abstand gewählt wird?

## P428.5.3 Laue-Aufnahme

### Geräte

- Vollsichtröntgengerät mit Cu- oder Mo-Anode
- Kollimator mit 1 mm mm Spaltbreite
- Lochblende mit angebrachtem NaCl- bzw. LiF-Kristall zur Laue-Aufnahme
- Filmhalter auf Experimentierschiene
- AGFA Dentus M2 Comfort Röntgenfilm

### Aufbau

Für die Laue-Aufnahme wird ein hochempfindlicher Film für Röntgenaufnahmen zur sofortigen Entwicklung verwendet. Jeder einzelne Film ist zur Verwendung bei Tageslicht lichtdicht in eine Kunststoffhülle eingeschweißt.

- Targethalter und Sensorsarm ausbauen. Das Goniometer selber kann im Experimentieraum verbleiben.
- Röntgenfilm mittig auf der markierten Fläche des Filmhalters festklemmen und darauf achten, dass der Film möglichst über seine gesamte Fläche plan aufliegt.
- Filmhalter auf der Experimentierschiene verschieben und somit Abstand zwischen Kristall und Film einstellen (15 mm bei NaCl und 11 mm bei LiF).
- Lochblende auf Kollimator aufsetzen und sorgfältig so drehen, dass die Außenkanten des Kristalls möglichst genau horizontal bzw. vertikal verlaufen.

- Experimentierschiene im Experimentierraum des Röntgengeräts montieren (weiße Seite des Films sollte zum Kollimator zeigen).

### Durchführung

- Röhrenhochspannung  $U = 35\text{kV}$ , Emissionsstrom  $I = 1,0\text{mA}$  und  $\Delta\beta = 0,0^\circ$  einstellen.
- Messzeit  $\Delta t$  einstellen (1800 s für NaCl und 1200 s für LiF).
- Belichtungsuhr mit Taster SCAN starten.
- Nach Ablauf der Belichtungszeit den Filmhalter mit Experimentierschiene aus dem Experimentierraum entnehmen.
- Röntgenfilm entnehmen und gemäß ausliegender „Gebrauchsanweisung zum Röntgenfilm“ entwickeln.
- Entwicklerdose und Zubehör gründlich säubern.

### Auswertung

Ziel der Auswertung ist die Zuordnung der für die Streuung verursachenden Netzebenenschar zu einem auf dem Röntgenfilm beobachteten Reflex. Dazu wird das Koordinatensystem so gewählt, dass sein Ursprung  $O$  dem Aufpunkt des einfallenden Röntgenstrahls auf dem Röntgenfilm entspricht.

Der Röntgenfilm liegt in der  $x$ - $y$ -Ebene (siehe Abb. P428.2). Der Röntgenstrahl durchdringt den flachen Kristall im Punkt  $K$ ; sein ungebeugter Anteil trifft im Punkt  $O$  auf den Röntgenfilm. Der Anteil der Röntgenstrahlung, der in  $K$  gestreut wird und die *Lauw-Bedingung* erfüllt, verlässt den Kristall unter dem Winkel  $2\vartheta$  zur Primärstrahlung und trifft im Punkt  $P = (x_p, y_p, 0)$  auf den Röntgenfilm. Es ist also:

$$\tan(2\vartheta) = \frac{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}}{L} \quad (\text{P428.1})$$

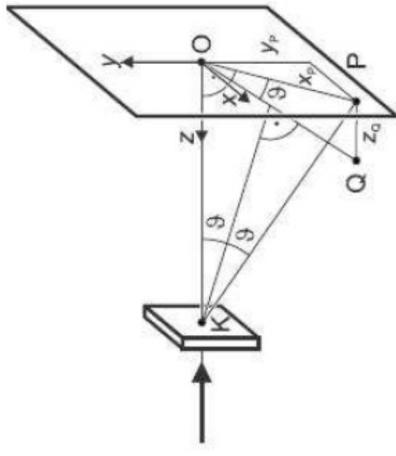
$L$ : Abstand zwischen Kristall und Röntgenfilm

- Indizes  $h$ ,  $k$  und  $l$  gemäß Gleichung (P428.4) identifizieren.
  - Netzebenenabstand  $d$ , Glanzwinkel  $\vartheta$  und Wellenlänge  $\lambda$  aus den Indizes  $h$ ,  $k$ ,  $l$  berechnen.
  - Reflex verursacht. Die auf der Winkelhalbierenden errichtete Senkrechte durch  $O$  bildet mit der Strecke  $\overline{OP}$  den Winkel  $\vartheta$  und schneidet eine Parallele zur  $z$ -Achse durch  $P$  im Punkt  $Q$ . Der Vektor  $\vec{OQ}$  hat die Koordinaten  $(x_Q, y_Q, z_Q)$  mit
- Viel Erfolg bei der Durchführung!

$$\tan(\vartheta) = \frac{z_Q}{\sqrt{x_Q^2 + y_Q^2}} \quad (\text{P428.2})$$

Die Winkelhalbierende des Winkels  $2\vartheta$  gibt die Richtung der Netzebenenschar  $(hkl)$  an, die den Reflex verursacht. Die auf der Winkelhalbierenden errichtete Senkrechte durch  $O$  bildet mit der Strecke  $\overline{OP}$  den Winkel  $\vartheta$  und schneidet eine Parallele zur  $z$ -Achse durch  $P$  im Punkt  $Q$ . Der Vektor  $\vec{OQ}$  hat die Koordinaten  $(x_Q, y_Q, z_Q)$  mit

Stand: 1/2014



**Abbildung P428.2:** Geometrische Beschreibung zur Auswertung (LD Handblätter Physik)

Wegen  $x_p = x_Q, y_p = y_Q$  und Gleichung (P428.1) ist:

$$z_Q = \sqrt{x_Q^2 + y_Q^2 + L^2 - L} \quad (\text{P428.3})$$

Die im Versuch verwendeten Kristalle sind parallel zur (100)-Ebene geschnitten, ihre Kristallachsen stimmen also mit dem Laborkoordinatensystem überein. Daher folgt aus der Parallelität der Vektoren  $\vec{G}$  und  $\vec{OQ}$ :

$$h : k : l = x_Q : y_Q : z_Q \quad (\text{P428.4})$$

Die gesuchten Indizes  $h, k, l$  eines Reflexes auf dem Röntgenfilm sind daher das **kleinste, ganzzählige, ungerades Zahlentriple** (Was bedeutet das?), dass Gleichung (P428.4) erfüllt. Aus ihnen können alle Parameter der den Reflex verursachenden Beugung berechnet werden:

- Transparentes Millimeterpapier passend auf Röntgenfilm legen (alternativ am PC einscannen und ausmessen),  $x_Q$  – bzw.  $y_Q$  – Koordinate der Reflexe ablesen und  $z_Q$  – Koordinate gemäß Gleichung (P428.3) berechnen.
- Indizes  $h$ ,  $k$  und  $l$  gemäß Gleichung (P428.4) identifizieren.
- Netzebenenabstand  $d$ , Glanzwinkel  $\vartheta$  und Wellenlänge  $\lambda$  aus den Indizes  $h$ ,  $k$ ,  $l$  berechnen.

Diskutieren Sie zusätzlich den Fehler bei der Zuordnung der Miller'schen Indizes.

$$\tan(\vartheta) = \frac{z_Q}{\sqrt{x_Q^2 + y_Q^2}}$$

und verläuft parallel zum Vektor  $\vec{G}$  des reziproken Gitters ( $G = (h, k, l) \cdot \frac{1}{a_0}; a_0$ : Gitterkonstante).



## P442 Laser

### P442.1 Versuchsziel

Das Ziel des vorliegenden Versuches ist es, ein Verständnis für die Funktionsweise eines Lasers zu erlangen. Zu diesem Zweck soll ein Helium-Neon Laser aus Einzelkomponenten aufgebaut und bezüglich seiner Wellenlänge, Polarisation und Modenstruktur untersucht werden.

### P442.2 Notwendige Vorkenntnisse

1. aktives Medium
  - Voraussetzungen für Lichtverstärkung
  - Einstein-Koeffizienten
  - homogene und inhomogene Linienbreite
  - Niveau-Schemata gepumpter aktiver Medien
2. Resonatoren
  - Stabilitätskriterien
  - Frequenzspektrum und Modenabstände
3. Funktionsweise des HeNe Lasers
  - Niveau-Schema
  - Verstärkungsprofil eines Gaslasers
  - (semi-) sphärischer Resonator
  - Polarisation von Laserlicht (und ihre Manipulation mit Verzögerungsplatten)
  - Verluste
  - Modenkonkurrenz
4. Mischung von longitudinalen Lasermoden auf einer Photodiode
5. Mischung hochfrequenter Signale auf einem elektronischen Bauelement (Mischer)

Fragen Sie Ihren Assistenten nach der Literatur - er hält aktuelle Auszüge für Sie bereit.

### P442.3 Literatur

- Siegman: *Lasers*
- Kneubühl/Sigrist: *Laser* (Teubner Studienbücher)
- Demiröder: *Laserspektroskopie oder Laser Spectroscopy* (Springer)
- Meschede: *Optik, Licht und Laser* (Teubner Studienbücher)
- Pohl: *Optik und Atomphysik*, §§ 86, 87, 88 (Springer 1963)

### P442.4 Aufgaben

1. Aufbau des HeNe-Experimentierlasers
2. Bestimmung der HeNe Laser-Wellenlänge mit einem Reflexionsgitter (Lineal)
3. Messung des Strahlprofils und des Stabilitätsgebietes des Experimentierlasers
4. Untersuchung der Polarisierung des Laserstrahls des Experimentierlasers
5. Aufbau einer optischen Diode
6. Bestimmung des Modenabstandes mit einem optischen Spektrumanalysator
7. Präzise Messung des Modenabstandes mittels Frequenzmischung
8. Wiederholen Schritte 6 und 7 für eine weitere Resonatorlänge.

### P442.5 Durchführung und Analyse

Die Details zur Versuchsdurchführung werden in der ausführlichen Versuchsbeschreibung angegeben.

Viel Erfolg bei der Durchführung!

Stand: März 2018



## P443 Kernmagnetische Relaxation

Die MRT (Magnetresonanztomographie) ist eine der fundamentalen bildgebenden Verfahren in der modernen Medizin. Ihr zugrunde liegt das physikalische Phänomen der Kernspins resonanz, welches erstmals 1946 von Felix Bloch und Edward M. Purcell nachgewiesen wurde. Dem vorranging entwickelte Isidor Rabi 1936 die Rabi-Methode zur genauerer Bestimmung des Kernspins mithilfe eines statischen und eines rotierenden Magnetfeldes. Der folgende Versuch soll ein Verständnis für die physikalischen Grundlagen geben, die unter anderem zur Entwicklung der MRT's geführt haben.

### P443.1 Versuchsziel

In diesem Versuch wird die Dynamik von Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen in einem äußeren Magnetfeld untersucht. Es soll die longitudinale und transversale Relaxationszeit der Kernspins von Protonen in Mineralöl gemessen werden. Dazu wird zunächst ein RF-Puls verwendet, welcher die Kernspins aus ihrem Gleichgewichtszustand um  $90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$ ) dreht. Anschließend wird die Zeit gemessen, die das System braucht, um von diesem gestörten Zustand in seinen Gleichgewichtszustand zurückzukehren. Als Meßmethode wird dabei die Kernspins resonanz (NMR; Nuclear Magnetic Resonance) verwendet. Die Beschreibung der NMR mit Hilfe der semi-klassischen Bloch-Gleichungen ermöglicht einen intuitiven Zugang zu den optischen Bloch-Gleichungen, die in der modernen Atomphysik und Quantenoptik einen bedeutenden Platz einnehmen.

### P443.2 Notwendige Vorkenntnisse

- Magnetfeld einer Spule
- Prinzip der Kernspins resonanz
- Spin - Gitter Relaxation
- Verhalten von Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen im Magnetfeld
- Dynamik des Gesamtspins unter dem Einfluß eines äußeren magnetischen Wechselfeldes (Rabiosillation, Inversion, drehendes Bezugssystem, Blochkugel)
- Spinecho-Sequenzen (Carr-Purcell und Meiboom-Gill)

## P443.3 Literatur

- Teach Spin Manual (beim Assistenten zu entleihen)
- als Vorraussetzung für den Versuch werden folgende Abschnitte benötigt: Kapitel B.1 und B.2 für ein grundlegendes theoretisches Verständnis
- Abbildung 2.1 in Kapitel A.1 für ein grundlegendes Verständnis der elektronischen Komponenten

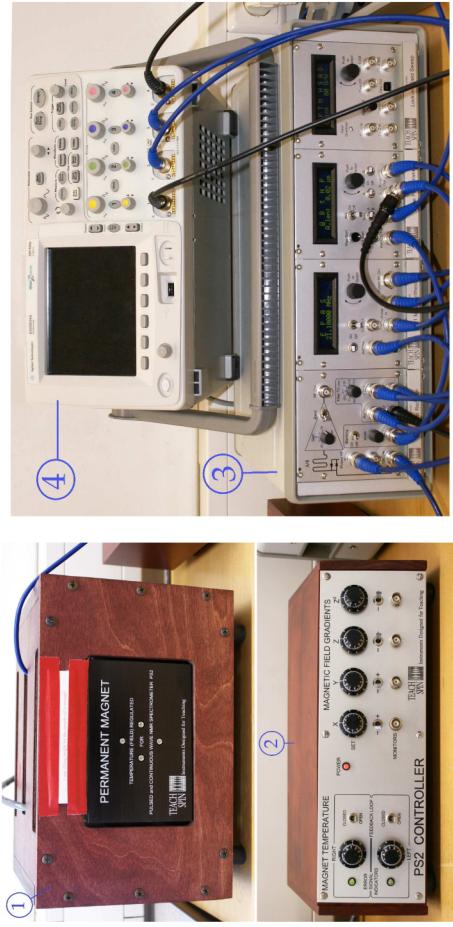
- C. J. Foot: Atomic Physics, Oxford Master Series in Atomic, Optical, and Laser Physics 2005

- N. F. Ramsey: Nuclear Moments, John Wiley and Sons (1953)
- M. H. Levitt: Spin Dynamics – Basics of Nuclear Magnetic Resonance, John Wiley & Sons (2002)

- Skript aus der Vorlesung Organische Chemie IV der Uni Frankfurt: <http://schwalbe.org.chemie.uni-frankfurt.de/sites/default/files/attachments/organische.chemie.iv/skript.teil1.pdf>

## P443.4 Aufgaben

1. Vorbereitung des experimentellen Aufbaus (Abschnitt P443.5.1)
2. Kalibrierung des experimentellen Aufbaus (Abschnitt P443.5.2)
3. Rabi-Oszillationen (Abschnitt 'Rabi-Oszillationen' auf Seite 89)
4. Messung der longitudinalen Relaxationszeit  $T_1$  (Abschnitt 'Longitudinale Relaxationszeit  $T_1$ ' auf Seite 89)
5. Messung der transversalen Relaxationszeit  $T_2$  (Abschnitt 'Effektive Transversale Relaxationszeit  $T_2^*$ ' auf Seite 90)



**Abbildung P443.1:** Komponenten des NMR Versuchs: 1: MAGNET, 2: PS2 Controller, 3: MAINFRAME: Receiver, Synthesizer, Pulse Programmer, Lock-In / Field Sweep. 4: digitales Oszilloskop.

## P443.5 Durchführung und Analyse

Im Folgenden wird die Durchführung des Versuches und in jedem Teil die dafür vorgesehene Analyse beschrieben. Achten Sie darauf die gestellten Fragen und Anweisungen im Versuchsprotokoll zu bearbeiten.

### P443.5.1 Vorbereitung des experimentellen Aufbaus

Das Experiment besteht aus den folgenden vier Komponenten: dem MAGNETen mit eingebautem RF-Messkopf (Abbildung P443.1: 1); dem PS2 Controller (Abbildung P443.1: 2), bestehend aus der Regelung der Magnetttemperatur und Steuerung der Magnetfeldgradienten; dem MAINFRAME (Abbildung P443.1: 3), bestehend aus (von links nach rechts) einem Empfänger (Receiver), einem Synthesizer, einer Puls-Programmier Einheit (Pulse Programmer), einem Lock-In Verstärker (Lock-In / Field Sweep) und einer DC Stromversorgung (nicht abgebildet) und dem digitalen Oszilloskop (Abbildung P443.1: 4).

#### Verkabeln

Vergewissern Sie sich, dass alle Geräte wie folgt miteinander verbunden und voreingestellt sind:

1. *Pulsed RF-Out* (Synthesizer) mit *Pulsed RF-In* (Receiver)  
MAGNET mit *Sample* (Receiver)
2. *Q* (Pulse Programmer) mit *Q* (Synthesizer)  
*I* (Pulse Programmer) mit *I* (Synthesizer)

Blanking Out (Pulse Programmer) mit Blanking In (Receiver)

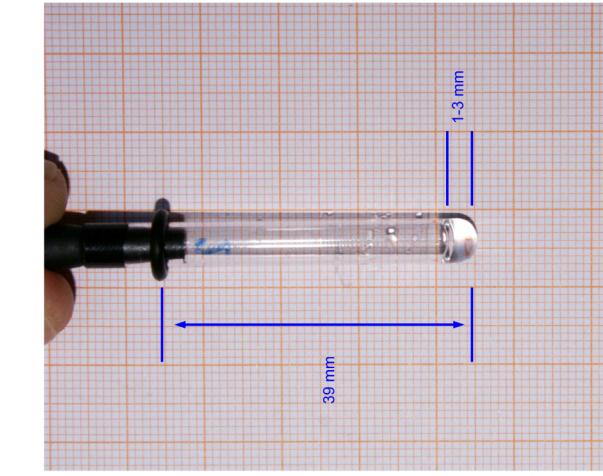
3. *Sync Out* (Pulse Programmer) mit *Input Trigger* (Digitales Oszilloskop)
  - Env. Out (Receiver) mit *Kanal 1* (Digitales Oszilloskop)
  - Q* (Receiver) mit *Kanal 2* (Digitales Oszilloskop)
  - I* (Receiver) mit *Kanal 3* (Digitales Oszilloskop)
4. Schalten Sie die linke und rechte Temperaturregelung (*PS2 Controller*) auf OPEN  
Stellen Sie *TC* auf 0.01 (Receiver)  
Stellen Sie *Gain* auf 50% (Receiver)  
Stellen Sie den Schalter *Blanking* (Receiver) auf On  
Stellen Sie den Schalter *Ref Out* (Synthesizer) auf On  
Stellen Sie den Schalter *CW Out* (Synthesizer) auf Off  
Stellen Sie den Schalter *MG* (Pulse Programmer) auf Off  
Stellen Sie den Schalter *Sync* auf A (Pulse Programmer)  
Stellen Sie den Schalter *Pulse A* auf On und *Pulse B* auf Off (Pulse Programmer)

Abbildung P443.1 zeigt das fertig vorbereitete MAINFRAME.

#### Vorbereiten der Probe

Für gewöhnlich können Sie die Probe der vorhergehenden Gruppe verwenden. Stellen Sie sicher, dass die Ihnen vorliegende Probe die folgenden Anforderungen erfüllt (vgl. Abbildung P443.2):

1. Die Probe sollte eine Füllhöhe von etwa 1–3 mm haben (siehe Abbildung P443.2: 1).
2. Der Gummiring (siehe Abbildung P443.2: 2), welcher die Höhe der Probe innerhalb des Magnetfeldes bestimmt, sollte etwa 39 mm von der unteren Kante des Röhrenges entfernt sein. Eine Feinjustage der Probenhöhe erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt.  
Falls Ihnen keine Probe vorliegt, können Sie diese mit den Materialien, welche in Abbildung P443.3 zu sehen sind selbst herstellen. Nehmen Sie dazu ein leeres Röhrchen aus der Box, Füllen Sie etwas Probensubstanz in das Röhrchen und schließen Sie dieses mit einem Gummistopfen ab. Üblicherweise wird leichtes Mineralöl als Substanz verwendet (Abbildung P443.3: 1). Zuletzt muss noch der Gummiring (siehe Abbildung P443.2: 2) angebracht werden.



**Abbildung P443.2:** Fertig vorbereitete Probe mit einer Füllhöhe von 1 – 3 mm und einem Abstand zum Gummiring von 39 mm.



**Abbildung P443.4:** Detailansicht des MAGNETen: links - 1a: Grober Tuning-Kondensator, 1b: Fine-Tuning-Kondensator, 2a: Fine-Matching-Kondensator, 2b: Grober Matching-Kondensator, rechts - Pickup Probe.

## P443.5.2 Kalibrierung des Experimentellen Aufbaus

### Temperatur Einstellung

Der PS2 Controller hat auf der linken Seite zwei Temperaturregelungen für das Magnetfeld. Benutzen Sie die zwei Potentiometer des PS2 Controller um den Sollwert der Temperatur einzustellen. Entspricht die eingestellte Temperatur der aktuellen Raumtemperatur erlischt die jeweilige LED. In diesem Zustand kann der Reglerskreis mittels Kippschalter geschlossen werden. Die Regelung sorgt für eine konstante Temperatur während des Experiments.

### Tuning des RF-Resonanzkreises

Benutzen Sie die Pickup Probe (siehe Abbildung P443.4) zur Impedanzanpassung. Die Höhe der Spule sollte mit der Höhe des Mineralöls übereinstimmen. Schließen Sie dazu zunächst die Sonde an Kanal 1 des Oszilloskops an und konfigurieren Sie anschließend alle Parameter wie folgt:

1. An der Pulse Programmer:  
A\_1len auf 2,5  $\mu$ s  
P auf 100 ms
2. Am Oszilloskops:  
Trigger: Ext, Normal, Rising, >0,1 V  
Sweep: 2  $\mu$ s/div  
Channel 1: 5V/div, DC, Full bandwidth

**Abbildung P443.3:** Materialien zum Herstellen einer Probe.



**Abbildung P443.3:** Materialien zum Herstellen einer Probe.  
A\_1len definiert die Dauer eines RF-Pulses und P ist die Periode zwischen zwei Sequenzen. In diesem Fall besteht die Pulsesequenz lediglich aus einem Puls.

**Achtung:** Die hier benutzten Einstellungen für den Sweep des Oszilloskops werden benutzt um das RF-Feld innerhalb der Zylinderspule während des RF-Pulses zu beobachten. Es handelt sich nicht um das Signal einer magnetischen Resonanz.

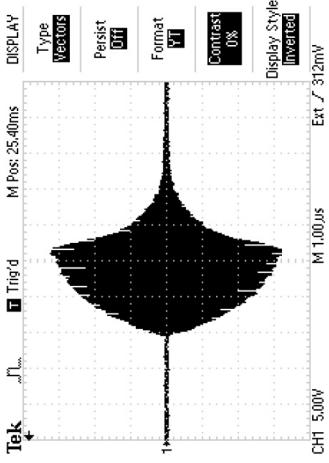
Abbildung P443.5 zeigt, wie das Signal der Pickup Probe auf dem Oszilloskop aussehen kann. Der *Gain* kann nach oben angepasst werden, solange das Signal nicht abgeschnitten wird. Durch Justieren der Tuning-Kondensatoren (siehe Abbildung P443.4: 1a/1b) ist die Form und Amplitude des Signals drastisch modellierbar. Nach erfolgreicher Justage sollte das Signal eine maximale Amplitude und eine Form wie in Abbildung P443.5 haben. Zum Erreichen der maximalen Amplitude kann eine längere Signaldauer helfen. Erklären Sie die Signalform. Schauen Sie sich hierfür den generierten RF-Puls an (Kanal 4). Bitte speichern Sie das optimierte Signal ab.

### Optimierung des Free Induction Decay Signals

Der experimentelle Aufbau ist nun soweit vor kalibriert, dass die eigentliche Probe eingesetzt werden kann. Schließen Sie hierzu das Signal Env. Out des Empfängers wieder an Kanal 1 des Oszilloskops an. Da nun die Antwort der Probe auf den RF-Puls beobachtet wird muss der Sweep auf dem Oszilloskop geändert werden. Es empfiehlt sich eine Einstellung von 0,5-1,0 ms/div zu verwenden. Das Antwortsignal der Probe auf einen RF-Puls wird Free Induction Decay genannt und wird im folgenden mit **FID** abgekürzt.

Stellen Sie die vier Potentiometer (X, Y, Z, Z<sup>2</sup>), welche die Gradienten des Magnetfeldes variieren, am PS2 Controller auf null. Sie sollten ein Signal auf dem Oszilloskop sehen. Was erwarten Sie von Seiten der Theorie als Antwort Ihrer Probe auf einen  $\frac{\pi}{2}$ -Puls? Optimieren Sie Ihr die Amplitude, die Dauer und die Form Ihres Signals auf ein möglichst hohes, langsam und exponentiell abfallendes FID-Signal. Warum sollte das Signal so aussehen? Zum Optimieren stehen Ihnen die folgenden Parameter zur Verfügung:

- Frequenz (Synthesizer: F)
- Magnetfeldgradienten (PS2 Controller: X, Y, Z, Z<sup>2</sup> Potentiometer)



**Abbildung P443.5:** Das optimierte Signal der Pickup Probe

Abbildung P443.6 zeigt ein optimiertes Signal. Versuchen Sie Ihr Signal so zu optimieren, dass sie in etwa die selbe (oder idealweise eine längere) Zerfallszeit von ~ 4 ms erhalten. Beachten Sie, dass die Magnetfeldgradienten miteinander (und mit der Frequenz) korreliert sind, so dass diese iterativ optimiert werden müssen. Sie werden feststellen, dass die Bestimmung der Frequenz nur mit dem FID-Signal nicht sehr präzise ist. Für ein Feintuning der Frequenz empfiehlt es sich, dass I und Q FID-Signal mittels Kanal 2 und 3 auf dem Oszilloskop anzuschauen. Trifft man die Resonanzfrequenz, sieht man deutlich weniger Nachschwünge auf dem Oszilloskop. Dies liegt daran, dass das I Signal (In Phase Signal) eine Überlagerung des eingehenden Signals in Phase und des ausgelösten Signals in Phase ist. Das Q Signal (Out of Phase Signal) ist dazu um 90° verschoben. Bitte speichern Sie das optimierte Signal ab.

**Häufige Fehlerquellen**

- Vergisst man den Sweep am Oszilloskop einzustellen, wird man kein FID-Signal auf dem Bildschirm sehen können.
- Die Einstellungen für die Magnetfeldgradienten können mit den Kippschaltern unterhalb der Drehpotentiometer umgepolzt werden, dies kann erforderlich sein um die optimalen Bedingungen zu finden.

### $\frac{\pi}{2}$ -Puls und $\pi$ -Puls Justage

Theoretisch sollten Sie durch verdoppeln der Pulslänge (**A1en**) einen  $\pi$  Puls erzeugen und damit das Antwortsignal der Probe völlig auslöschen. Warum wird das erwartet? Im Experiment werden Sie jedoch noch ein kleines Antwortsignal Ihrer Probe auf dem Oszilloskop sehen können. Durch Variation der Pulslänge und der Frequenz können Sie versuchen dieses Signal zu minimieren. Hierfür sollten Sie auch nach wie vor die Signale I und Q betrachten. Wie hängt das Envelopesignal mit den beobachtbaren Größen I und Q zusammen? Was ist hier zu beachten? Es kann bei einer zu großen Variation der Frequenz dazu kommen, dass Sie zu weit entfernt von der Resonanzfrequenz liegen und Ihre Probe deswegen keine Antwort mehr gibt. Dies kann leicht überprüft werden indem Sie die Pulslänge (**A1en**) halbieren. Sie sollten wieder das Signal aus dem vorherigen Abschnitt

**Achtung:** Die hier benutzten Einstellungen für den Sweep des Oszilloskops werden benutzt um das RF-Feld innerhalb der Zylinderspule während des RF-Pulses zu beobachten. Es handelt sich nicht um das Signal einer magnetischen Resonanz.

Abbildung P443.5 zeigt, wie das Signal der Pickup Probe auf dem Oszilloskop aussehen kann. Der *Gain* kann nach oben angepasst werden, solange das Signal nicht abgeschnitten wird. Durch Justieren der Tuning-Kondensatoren (siehe Abbildung P443.4: 1a/1b) ist die Form und Amplitude des Signals drastisch modellierbar. Nach erfolgreicher Justage sollte das Signal eine maximale Amplitude und eine Form wie in Abbildung P443.5 haben. Zum Erreichen der maximalen Amplitude kann eine längere Signaldauer helfen. Erklären Sie die Signalform. Schauen Sie sich hierfür den generierten RF-Puls an (Kanal 4). Bitte speichern Sie das optimierte Signal ab.

**Abbildung P443.6:** FID Signal eines  $\frac{\pi}{2}$ -Pulses mit einer Amplitude von ~ 7 V und einer Zerfallszeit von ~ 4 ms.

beobachten können. Für die anstehenden Versuche ist es nötig, dass sie mindestens ein Verhältnis von 1:6 der beiden Amplituden ( $U_{\max}(\pi)/U_{\max}(\pi/2)$ ) erhalten.

Notieren Sie sich die ermittelte Resonanzfrequenz, sowie die Dauer für einen  $\frac{\pi}{2}$  und einen  $\pi$ -Puls.

Diese werden für die nun anstehenden Versuche benötigt.

### P443.5.3 Messung der kernmagnetischen Relaxation

Sie haben den experimentellen Aufbau soweit kalibriert und können jetzt mit der Messung von kernmagnetischen Relaxation beginnen. Bei den austehenden Messungen sollten Sie stets beachten, dass das Envelopesignal einen konstanten Spannungsoffset besitzt. Damit Sie bei der anschließenden Auswertung die von der Theorie vorhergesagten Zusammenhänge erhalten muss dieser von den Messwerten abgezogen werden. Nehmen Sie dazu vor jedem Versuch eine Kurve ohne RF-Puls auf um diesen konstanten Spannungsoffset zu ermitteln.

#### Rabi-Oszillationen

Für diesen Versuchsteil benötigen Sie den Puls A. Stellen Sie sicher, dass die Periode (P) zwischen zwei Pulsen ausreichend groß ist. Gemessen wird sowohl die maximale Amplitude des Antwortsignals der Probe als auch das In-Phase Antwortignal auf einem Puls mit variierender Pulslänge (A\_1en) und für verschiedene Frequenzen. Variieren Sie hierfür die Pulslänge zwischen 0,5–12 µs in 0,5 µs Schritten. Achten Sie darauf, dass die Frequenzen einen relevanten Abstand zueinander haben. Stellen Sie die aufgezeichneten Daten grafisch dar und interpretieren Sie die Ergebnisse.

#### Longitudinale Relaxationszeit $T_1$

Die Relaxationszeit  $T_1$  kann mit der Sättigungs-Zurückgewinnungs-Methode und der Polarisations-Zurückgewinnungs-Methode über die Höhe des FID-Signals bestimmt werden. Zur besseren Übersicht sollten die Q und I Signale in folgenden Aufgabenteilen ausgebündet werden.

#### Sättigungs-Zurückgewinnung

Für die Sättigungs-Zurückgewinnungs-Methode wird die Probe zunächst einem  $\frac{\pi}{2}$ -Puls ausgesetzt und anschließend nach einer Wartezeit  $\tau$  einem weiteren  $\frac{\pi}{2}$ -Puls. Nach dem zweiten Puls beobachtet man das FID-Signal auf dem Oszilloskop. Diese Sequenz lässt sich zusammen fassen zu:

$$\pi/2 \rightarrow \text{FID} \rightarrow \tau\pi/2 \rightarrow \text{FID}. \quad (\text{P443.1})$$

Schalten Sie dafür Puls B ein und stellen Sie sowohl A\_1en, als auch B\_1en auf einen  $\frac{\pi}{2}$ -Puls. Zusätzlich sollte N auf 1 stehen, weil sonst kein Puls B gegeben wird. Variieren Sie nun die Verzögerung  $\tau$  und zeichnen Sie wieder die Amplitude des FID-Signals der Probe auf. Es empfiehlt sich die Verzögerung in 10 ms Schritten bis 200 ms zu variieren, danach die Amplituden bis 500 ms in 50 ms aufzunehmen und falls nötig darüber hinaus noch weitere Werte in geeigneten Abständen. Sie sollten eine exponentielle Zurückgewinnung des FID-Signals sehen. Beachten Sie, dass die Periode P zwischen zwei Sequenzen ausreichend groß ist, damit das System wieder in den Gleichgewichtszustand über gehen kann.

Ermitteln Sie die longitudinale Relaxationszeit  $T_1$  indem Sie die folgende Funktion an Ihre Daten anpassen:

$$M(\tau) = M_0 \left( 1 - \exp \left( -\frac{\tau}{T_1} \right) \right). \quad (\text{P443.2})$$

Wie kommt diese Funktion zu stande?

**Polarisations-Zurückgewinnung** Für die Polarisations-Zurückgewinnungs-Methode wird die folgende Pulsesequenz verwendet:

$$\pi \rightarrow \tau\pi/2 \rightarrow \text{FID}. \quad (\text{P443.3})$$

Stellen Sie hierfür Puls A mittels A\_1en auf einen  $\pi$ -Puls und Puls B mittels B\_1en auf einen  $\frac{\pi}{2}$ -Puls. Variieren Sie nun die Verzögerung  $\tau$  genau wie im vorigen Abschnitt beschrieben und zeichnen Sie wieder die Amplitude des FID-Signals der Probe auf. Es sollte zunächst ein Abnehmen auf die Höhe des Rauschens und anschließend eine Zunahme bis zum vollen FID-Signal beobachtet werden können.

Nachdem die Daten von Ihrem Offset bereinigt wurden, muss der erste Teil der aufgenommenen Daten noch so transformiert werden, dass sich die folgende Funktion an die resultierende Kurve anpassen lässt:

$$M(\tau) = M_0 \left( 1 - 2 \cdot \exp \left( -\frac{\tau}{T_1} \right) \right). \quad (\text{P443.4})$$

Wie sieht diese Transformation aus und woraus ergibt sich dieser Zusammenhang? Vergleichen Sie die aus den beiden Methoden ermittelten Werte von  $T_1$ .

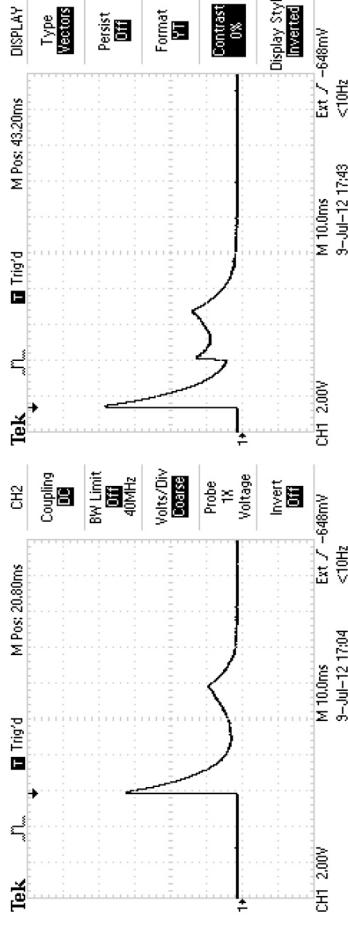
#### Effektive Transversale Relaxationszeit $T_2^*$

Die effektive transversale Relaxationszeit  $T_2^*$  setzt sich aus der inhomogenen transversalen Relaxationszeit  $T_{2,\text{inhom}}$  und der homogenen transversalen Relaxationszeit  $T_2$  wie folgt zusammen:

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_{2,\text{inhom}}} + \frac{1}{T_2}. \quad (\text{P443.5})$$

In den folgenden Abschnitten wird beschrieben, wie Sie die beiden Komponenten für Ihre Probe im Experiment vermessen können. Stellen Sie für die Messung Puls B aus und Puls A mittels A\_1en auf einen  $\frac{\pi}{2}$ -Puls. Sind die Einstellungen, welche in Abschnitt ‘Optimierung des Free Induction Decay Signals’ auf Seite 87 beschrieben wurden, sorgsam durchgeführt worden, so fällt das FID-Signal exponentiell ab. Aus der Messkurve lässt sich wie folgt die effektive transversale Relaxationszeit  $T_2^*$  bestimmen:

$$M(\tau) = M_0 \cdot \exp \left( -\frac{\tau}{T_2^*} \right). \quad (\text{P443.6})$$



**Abbildung P443.7:** Vergleich zwischen zwei Hahn-Spinecho-Signalen: Hahn Spinecho mit guter  $\pi$ -Puls Auslösung (links) und Hahn Spinecho mit unzureichender  $\pi$ -Puls Auslösung (rechts).

### Homogene Transversale Relaxationszeit $T_2$

**Hahn-Spinecho-Sequenz** Bevor wir uns den aufwendigeren Pulssequenzen widmen ist es sinnvoll sich das Spinecho der folgenden Pulssequenz auf dem Oszilloskop anzuschauen:

$$\pi/2 \rightarrow \tau \pi. \quad (\text{P443.7})$$

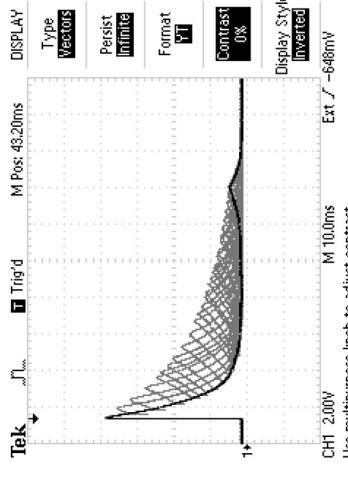
Stellen Sie für die Messung Puls A mittels A\_1en auf einen  $\frac{\pi}{2}$ -Puls und Puls B mittels B\_1en auf einen  $\pi$ -Puls. Falls Sie bei der anfänglichen Kalibration darauf geachtet haben, dass es zu einer optimalen Signalauflösung nach einem  $\pi$ -Puls kommt, solten Sie ein FID-Signal und das darauffolgende Spinecho auf dem Oszilloskop beobachten können (siehe Abbildung P443.7.a). In Abbildung P443.7.b sehen Sie zwischen dem Peak des FID-Signals und dem Peak des Spinechos einen weiteren Peak. Falls Sie einen solchen Peak in Ihrem Signal sehen, sollten Sie Abschnitt  $\frac{\pi}{2}$ -Puls und  $\pi$ -Puls Justage 1 auf Seite 88 wiederholen.

Variieren Sie die Zeit  $\tau$  zwischen den beiden Pulsen um ein Gefühl für das Spinecho-Signal zu bekommen. In Abbildung P443.8 ist mit der "Persist" Funktion des Oszilloskops das Spinecho für verschiedene Zeiten  $\tau$  gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Maxima des Spinechos exponentiell abnehmen. Zeichnen Sie für 10 verschiedene Zeiten  $\tau$  die maximale Amplitude des Spinechos auf und bestimmen Sie aus den Daten die homogene transversale Relaxationszeit  $T_2$  indem Sie Ihre Daten an Gleichung P443.9 anpassen

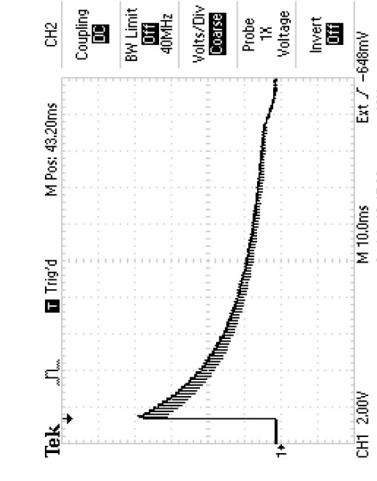
**Carr-Purcell-Sequenz** Die homogene transversale Relaxationszeit beschreibt die Zeitkonstante, mit der die Spins in der X-Y Ebene der Blochkugel auseinander laufen. Um diese mit einer Carr-Purcell-Sequenz zu messen, wird die folgende Pulssequenz verwendet:

$$\pi/2 \rightarrow \tau \pi \rightarrow 2\tau \pi \rightarrow 2\tau \dots. \quad (\text{P443.8})$$

Stellen Sie für die Messung Puls A mittels A\_1en auf einen  $\frac{\pi}{2}$ -Puls und Puls B mittels B\_1en auf einen  $\pi$ -Puls. Zusätzlich zur Hahn-Spinecho-Sequenz, welche lediglich ein einziges Spinecho hatte,



**Abbildung P443.8:** Hahn Spinecho für verschiedene Zeiten  $\tau$ ; aufgezeichnet mit der "Persist"-Funktion des Oszilloskops.



**Abbildung P443.9:** Signal einer Carr-Purcell-Sequenz mit  $N=100$

wird nun  $N$  auf 20 gesetzt. Stellen Sie sicher, dass die Periode  $P$  zwischen zwei Sequenzen groß genug ist und es nicht zu einer Überschneidung kommt.

Sie sollten nun ein Signal sehen, was dem in Abbildung P443.9 gezeigtem ähnelt. Speichern Sie Ihr Signal um es später auswerten zu können. Aus dem exponentiellen Abfall der Maxima der Spinechos können Sie über den folgenden Zusammenhang die homogene transversale Relaxationszeit  $T_2$  berechnen:

$$M(\tau) = M_0 \cdot \exp \left( -\frac{\tau}{T_2} \right). \quad (\text{P443.9})$$

Beobachten Sie was passiert, wenn die Pulslänge geändert wird. Welchen Einfluss hat der Feldgradient? Wie kann man sich die Beobachtungen erklären?

**Meiboom-Gill-Sequenz** Die Meiboom-Gill-Sequenz unterscheidet sich von der Carr-Purcell-Sequenz lediglich in der Pase der  $\pi$ -Pulse:

$$\pi/2 \rightarrow \tau + \pi \rightarrow 2\tau - \pi \rightarrow 2\tau + \pi \rightarrow 2\tau - \pi \rightarrow 2\tau \dots \quad (\text{P443.10})$$

Genauere Informationen hierzu sind im Anhang P443.6.1 zu finden. Sie schalten die Meiboom-Gill-Sequenz an, indem Sie den Kippschalter MG der Pulse Programmer auf On stellen. Sie sollten eine Verbesserung Ihres Signals sehen können, welche sich durch ein Zunehmen der Amplitude der Spinechos bemerkbar macht. Sie können sich den Unterschied der beiden Sequenzen noch besser im Q-Signal auf dem Oszilloskop anschauen. Während bei der Carr-Purcell-Sequenz die Amplitude gleichgerichtet ist, oszilliert sie bei der Meiboom-Gill-Sequenz (warum ist dies so?).

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erhalten Sie die homogene transversale Relaxationszeit  $T_2$  durch Anpassen von Gleichung P443.9 an die Maxima der Spinechos.

## P443.6 Anhang

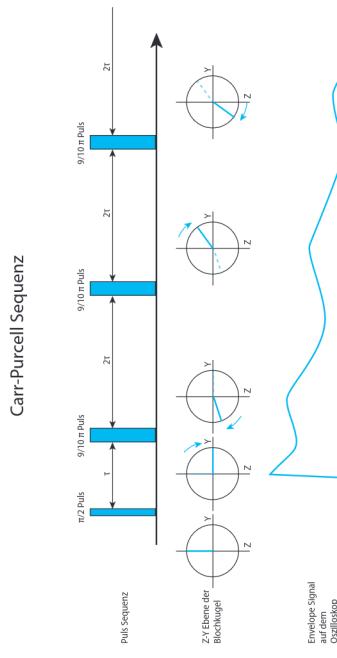
### P443.6.1 Carr-Purcell und Meiboom-Gill-Sequenz

Der Unterschied zwischen der Carr-Purcell und der Meiboom-Gill-Sequenz ist die alternierende Phase des  $\pi$ -Pulses bei Meiboom-Gill im Vergleich zu Carr-Purcell. In Abbildung P443.10 und Abbildung P443.11 wird dies anhand eines Beispiels verdeutlicht. In diesem Beispiel ist der  $\pi$ -Puls auf Grund unzureichender Justage nur ein  $\frac{9}{10}\pi$ -Puls. Für eine Carr-Purcell-Sequenz summiert sich dieser Fehler auf. In Abbildung P443.10 ist zu sehen, wie der Spin nach jedem  $\frac{9}{10}\pi$ -Puls stärker systematisch abweicht, so dass bereits nach drei Pulsen die Magnetisierung in der X-Y Ebene kaum noch messbar ist. Bei der Meiboom-Gill-Sequenz wird der Fehler des  $\pi$ -Pulses auf Grund der alternierenden Phase ausgeglichen. In Abbildung P443.11 sieht man dies durch die unterschiedlichen Drehrichtungen des Spins auf der Blochkugel. In Ihrem Experiment dreht der RF-Puls den Kernspin stets um die X-Achse der Blochkugel.

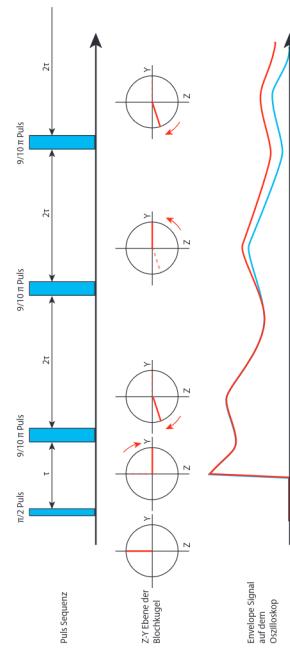
In den Abbildungen P443.10 und P443.11 wurden der Übersichtlichkeit halber andere Dephasierungs-Effekte vernachlässigt.

Viel Erfolg bei der Durchführung!

Stand: September 2024



**Abbildung P443.10:** Schematische Darstellung einer Carr-Purcell-Sequenz, der Projektion der Spins auf die Z-Y-Ebene der Blochkugel und das resultierende Envelope-Signal auf dem Oszilloskop



**Abbildung P443.11:** Schematische Darstellung einer Meiboom-Gill-Sequenz, der Projektion der Spins auf die Z-Y-Ebene der Blochkugel und das resultierende Envelope-Signal auf dem Oszilloskop



## P464 Spektroskopie von Sternen

### P464.1 Versuchsziel

In diesem Versuch werden wir mit Hilfe der Analyse von optischen Spektren physikalische Eigenschaften von Sternen untersuchen. Historisch gesehen markiert die Sternspektroskopie den Beginn der Astrophysik, da durch sie zum ersten Mal physikalische Aussagen über Himmelsobjekte gemacht werden konnten. Die Studenten sollen in diesem Versuch (1) die Spektroskopie als Werkzeug der modernen Astrophysik kennenlernen, (2) üben mit einem computergesteuerten Teleskop umzugehen und (3) einen Einblick in die astrophysikalische Datenanalyse, insbesondere das Verarbeiten von Bildern und Spektren, erhalten. Dafür stehen mehrere Themen abhängig vom Beobachtungszeitraum zur Auswahl.

1. Spektroskopische Doppelsterne
2. Abhängigkeit der H $\alpha$ -Linie von der Spektralklasse
3. Sternwinde
4. Wolf-Rayet-Sterne
5. Be-Sterne
6. Rotierende Sterne

### P464.2 Notwendige Vorkenntnisse

Die notwendigen Vorkenntnisse sind von den gewählten Themen abhängig. Eine detaillierte Aufstellung findet sich in der ausführlichen Versuchsbeschreibung, die von den Tutoren zur Verfügung gestellt wird.

### P464.3 Literatur

Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M. und Donner, K. J. (2017). *Fundamental Astronomy, 7. Auflage*

Unsöld, A. und Baschek, B. (2002). *Der neue Kosmos. Einführung in die Astronomie und Astrophysik, 7. Auflage*

Weigert, A. und Wendker, H. J. (2009). *Astronomie und Astrophysik – ein Grundkurs*

### P464.4 Aufgaben

1. Voraufgaben als Vorbereitung auf den Versuch. Eine schriftliche Ausarbeitung ist nicht nötig.
2. Aufnahme der Spektren am Teleskop.
3. Analyse der aufgenommenen Spektren. Für Zeitreihen werden Archivdaten zur Verfügung gestellt.
4. Je nach Thema Berechnung von verschiedenenstellaren Zustandsgrößen.
5. Protokollierung und Diskussion der Ergebnisse.

### P464.5 Durchführung und Analyse

Die Details zur Versuchsdurchführung werden in der ausführlichen Versuchsbeschreibung angegeben. Melden Sie sich dafür rechtzeitig bei den Tutoren. Die von den Studentinnen aufgenommenen Spektren werden aus Sciebo/eCampus hochgeladen. Es ist nicht nötig einen USB-Stick einzupacken.

Viel Erfolg bei der Durchführung!

Stand: März 2022



## P465 Die Vermessung der Milchstraße

### P465.3 Literatur

- Skript des Versuch
- Lauterbach, Thomas (2022), *Radio Astronomy: Small Radio Telescopes: Basics, Technology and Observations* ISBN 978-3-058-36035-1 (als kostenfreier download verfügbar)
- Unsöld, A. und Baschek, B. (2002). Der neue Kosmos. Einführung in die Astronomie und Astrophysik

### P465.1 Versuchsziel

In diesem Versuch werden HI 21-cm Linienbeobachtungen des neutralen atomaren Wasserstoffs durchgeführt. Diese Messungen erlauben es die Spiralstruktur der Milchstraße sowie deren Rotationskurve abzuleiten. Die Studierenden sollen in diesen Versuch die Radioastronomie, neben der optischen Astronomie, als eigenständiges Fenster zum Universum erfahren. Die 21-cm Linie weist die Verteilung des häufigsten Elements im Universum, des Wasserstoffs, in seiner neutralen atomaren Form nach. Die Beobachtungen können bei Tag oder Nacht mit der gleichen Empfindlichkeit durchgeführt werden. Erstes Ziel ist es die Rotationskurve der Milchstraße als Ganzes abzuleiten. Die Form dieser Kurve ergibt einzigartige Einblicke in die Massenverteilung der Milchstraße. Zudem erlauben es die aufgenommenen Daten die Spiralarme der Milchstraße in ihrer räumlichen Verteilung zu kartieren. Dies ist die zweite Aufgabe in diesem Experiment.

- Weigert, A. und Wendker, H. J. (2009). Astronomie und Astrophysik – ein Grundkurs
- Berechnen Sie die Winkelauflösung des 3,2-m Teleskops bei einer Wellenlänge von 21-cm. Diese Information bestimmt den Winkelabstand der Messpositionen.
- Bestimmen Sie den Zeitraum wann welcher Teil der Milchstraße, am Tag der Beobachtung, von Bonn aus sichtbar sein wird.
- Schätzen Sie die notwendige Integrationszeit für Ihre Beobachtungen ab.
- Führen Sie die Messungen durch.
- Lesen Sie die CSV-Daten in das Programm ein, welches Sie für die Analyse verwenden möchten.
- Ermitteln Sie die Rotationsgeschwindigkeit der Milchstraße als Funktion des Abstands vom Zentrum
- Untersuchen Sie die Position der HI 21-cm Linienmaxima als eine Funktion des Ortes.
- Bestimmen Sie die Systemtemperatur des verwendeten Instruments und die Größe der Unsicherheiten in Kelvin.

Es ist von großem Vorteil wenn Sie die "Einführung in die Radioastronomie" (astro123) besucht haben.

**P465.2 Notwendige Vorkenntnisse**

- Sie führen selbst astronomische Beobachtungen durch. Dies bedeutet, Sie müssen das Galaktische Koordinatensystem verstehen, ebenso wie die Bedeutung der geo-graphischen Koordinaten Ihres Beobachtungsortes und deren Zusammenhang mit der lokalen Sternzeit.
- Sie sollte die Konstruktion und Funktionsweise eines Radioteleskops kennen.
- Sie sollten die Entstehung der HI 21-cm Linie erklären können, ebenso wie den Begriff *local standard of rest*.
- Der Aufbau der Milchstraße sowie deren Dynamik sollte Ihnen bekannt sein.

Viel Erfolg bei der Durchführung!

Stand: Februar 2023

- Esentiell für das Experiment ist die sogenannte Tagentialpunktmethode. Diese wird ausführlich im Skript beschrieben.
- Sie sollten sich mit (visual)Python oder einem Tabellenkalkulationsprogramm zur Datenerstellung vertraut machen.