

**VERSUCH NUMMER 21**

## **Optisches Pumpen**

Irgendjemand

irgend.jemand@tu-dortmund.de

Durchführung: 15.05.2023

Someone

some.one@tu-dortmund.de

Abgabe: 20.05.2023

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>1</b>
2.1 Quantenzahlen und Aufspaltungen . . . . .	1
2.2 Optisches Pumpen . . . . .	1
2.3 Transparenz . . . . .	2
2.4 Quadratischer Zeeman-Effekt . . . . .	3
2.5 Magnetfeld einer Spule . . . . .	3
<b>3 Versuchsaufbau und Durchführung</b>	<b>3</b>
3.1 Versuchsaufbau . . . . .	3
3.2 Durchführung . . . . .	4
<b>4 Auswertung</b>	<b>4</b>
4.1 Erdmagnetfeld . . . . .	4
4.2 Landé Faktor . . . . .	6
4.3 Kernspin . . . . .	6
4.4 Isotopenverhältnis . . . . .	7
4.5 Quadratischer Zeeman Effekt . . . . .	7
<b>5 Diskussion</b>	<b>7</b>
5.1 Erdmagnetfeld . . . . .	7
5.2 Landé Faktoren und Kernspins . . . . .	8
5.3 Isotopenverhältnis . . . . .	8
5.4 Quadratischer Zeeman Effekt . . . . .	8
<b>Literatur</b>	<b>8</b>

## 1 Zielsetzung

In diesem Versuch werden die Rubidium-Isotope  $^{85}\text{Rb}$  und  $^{87}\text{Rb}$  mit der Methode des optischen Pumpens untersucht. Durch diese Untersuchungen werden verschiedenen Eigenschaften des Rubidiums sowie das Erdmagnetfeld bestimmt.

## 2 Theoretische Grundlagen

Für das Verständnis der zu untersuchenden Effekte werden diese zunächst genauer erläutert.

### 2.1 Quantenzahlen und Aufspaltungen

Um diese Effekte zu beschreiben sind die Überlegungen aus der Quantenmechanik von essenzieller Bedeutung. Da Elektronen Fermionen sind, und damit einen Spin von  $1/2$  tragen, sind die Spin und Drehimpuls Eigenschaften von großer Bedeutung. Dem Spin wird eine Quantenzahl  $S$  und dem Drehimpuls eine Quantenzahl  $L$  zugeordnet. Dazu kommt ein Gesamtdrehimpuls  $J$ . Das magnetische Moment eines Zustandes  $(S, L, J)$  ist gegeben durch

$$\mu_J = \mu_B g_J \sqrt{J(J+1)}.$$

Dabei beschreibt  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$  [1, S. 205] das Bohrsche Magneton und  $g_J$  den Landé-Faktor mit [1, S. 225]

$$g_J = \frac{3J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}.$$

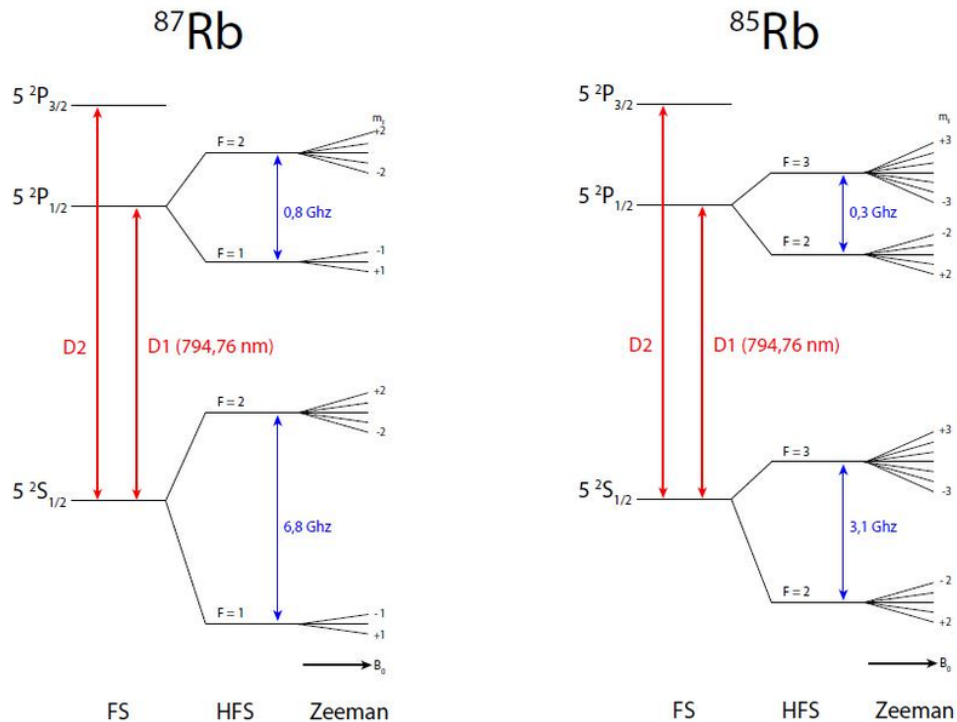
Für die Beschreibung eines Atoms in einem Magnetfeld ist noch die magnetische Quantenzahl  $m_J$  von Bedeutung. Diese kann alle ganzzahligen Werte von  $J$  bis  $-J$  annehmen. Wird das Atom in ein Magnetfeld der Stärke  $B$  gebracht ändern sich die möglichen Energiezustände der Elektronen und es kommt zum sogenannten Zeeman-Effekt. Die Elektronen der Atome können im Magnetfeld weitere Zustände mit der Energie  $E_{\text{mag}} = m_J \mu_B g_J B$  besetzen. Das bedeutet, dass für größere  $J$  mehr Energieniveaus zur Verfügung stehen. Ein weiterer Effekt der diese Energieniveaus beeinflusst ist der Kernspin  $I$ , welcher über die Anzahl der Protonen und Neutronen im Kern bestimmt wird. Dieser ist in der Rechnung zu beachten und führt zu einer weiteren Aufspaltung der Energieniveaus. Dazu wird eine neue Quantenzahl  $F = J + I$  eingeführt. Ähnlich wie beim Zeeman-Effekt kommt es zu einer Aufspaltung in Energien die gegeben sind durch  $E_{\text{hyper}} = g_F \mu_B B$ . Dabei ist  $g_F$  wie bei dem Zeeman-Effekt die der Landé Faktor. Dieser ist für diese, auch Hyperfeinstruktur genannte, Aufteilung verantwortlich.

$$g_F \approx g_J \frac{F(F+1) + J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)}. \quad (1)$$

Für  $F$  sind alle ganzzahligen Werte von  $I+J$  bis  $|J-I|$  möglich.

### 2.2 Optisches Pumpen

Durch die in Unterabschnitt 2.1 beschriebenen Aufspaltungen kann das optische Pumpen erklärt werden. Da der Versuch mit Rubidium durchgeführt wird, ist die Aufspaltung für dieses Element in Abbildung 1



**Abbildung 1:** Feinstruktur- Hyperfeinstruktur- und Zeeman-Aufspaltung der Energieniveaus von Rubidium [2].

dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nur die Anregung der verschiedenen Energieniveaus durch unterschiedliches Licht möglich ist. Für einen Übergang von Zuständen die sich in der Quantenzahl  $m_j$  nicht unterscheiden wird linear-polarisiertes Licht emittiert beziehungsweise absorbiert. Dieser Übergang wird auch als  $\pi$ -Übergang bezeichnet. Für die Änderung der Quantenzahl  $m_j$  gibt es zwei verschiedene Szenarien. Ist  $\Delta m_j = +1$  geschieht der Übergang mit rechtszirkular-polarisiertem Licht. In diesem Fall spricht man von einem  $\sigma^+$  Übergang. Ähnlich muss wenn  $\Delta m_j = -1$  der Übergang mit linkszirkular-polarisiertem Licht geschehen. Dieser wird dem entsprechend als  $\sigma^-$  bezeichnet. Diese Eigenschaft der Energieniveaus erlaubt es also bestimmte Übergänge zu bevorzugen. So kann mit zirkular-polarisiertem Licht der niedrigere Zustand Leergepumpt werden. Die Elektronen werden in das höhere der beiden s-Orbital Energiezustände. Auch wenn diese weiter in das niedrigste Niveau fallen werden sie durch das Licht wieder hoch gepumpt.

## 2.3 Transparenz

Während die magnetische Feldstärke variiert wird verändert sich die Transparenz der untersuchten Atome. Transparenz ist dabei definiert als der Quotient aus der Intensität des transmittierten Lichts und der Intensität des einfallenden Lichts. Ein idealisierter Verlauf der Transparenz ist in

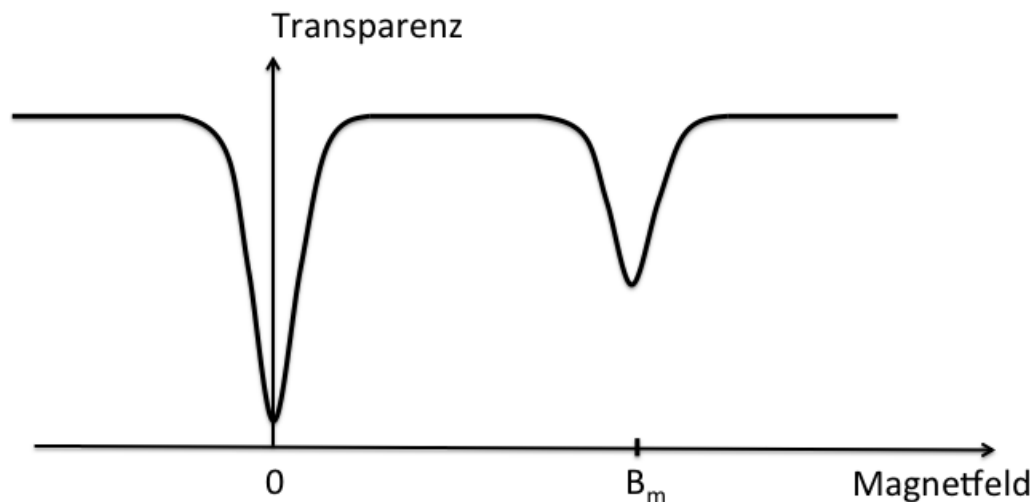


Abbildung 2: Transparenz in Abhängigkeit des Magnetfeldes [3].

zu erkennen. Wenn das Magnetfeld einen Nulldurchgang hat wird die Aufspaltung der Energieniveaus aufgehoben und alle Elektronen sind im unangeregtem Zustand. Die Transparenz wird dann 0, da das Licht absorbiert wird bis die Elektronen wieder gepumpt wurden. Dazu kommt aber noch ein weiterer Einbruch der Transparenz bei einer Frequenz

$$h f_m = g_F \mu_B B. \quad (2)$$

Dieser ist durch die stimulierte Emission zu erklären. Ein Übergang kann durch eine Photon mit der exakt übereinstimmenden Frequenz ausgelöst werden. Also Emittieren die Elektronen mit der höheren s-Energie ihre Energie und fallen in das tiefste s-Niveau. Damit können sie wieder Licht absorbieren und die Transparenz sinkt. Dieses Emittieren von Licht geschieht auch zufällig, allerdings tritt diese Art der Emission etwa um den Faktor  $1,0 \cdot 10^{25}$  weniger auf und kann daher vernachlässigt werden.

## 2.4 Quadratischer Zeeman-Effekt

Ein weiterer Effekt der untersucht werden kann ist der quadratischer Zeeman-Effekt. Dieser verändert die Energie um

$$E_{\text{quadrat}} = g_F \mu_B B + g_F^2 \mu_B^2 B^2 \frac{1 - 2m_F}{\Delta E_{\text{hyper}}}. \quad (3)$$

Damit hängt die Energie also mit der Aufspaltung der Hyperfeinstruktur zusammen.

## 2.5 Magnetfeld einer Spule

Da in diesem Versuch Helmholtzspulen verwendet werden ist es nötig den Strom durch diese mit ihrem Magnetfeld zu verbinden. Für eine Helmholtzspule der Länge  $L$ , der Windungszahl  $N$  und der Stromstärke  $I$  gilt für das Magnetfeld

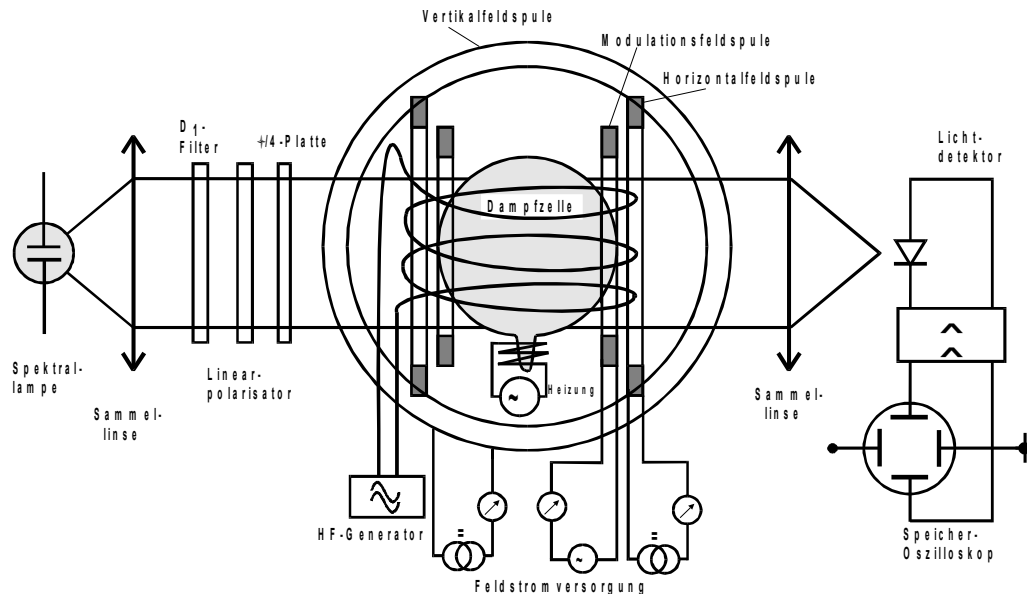
$$B = \frac{\mu_0 8NI}{\sqrt{125}L}. \quad (4)$$

Dies wird im weiteren verwendet um Magnetfelder zu bestimmen.

# 3 Versuchsaufbau und Durchführung

## 3.1 Versuchsaufbau

Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3 zu erkennen.



**Abbildung 3:** Schematischer Aufbau der Messapparatur [3].

Es wird eine Rubidium-Spektrallampe verwendet, da diese Licht aussendet, welches in der Lage ist die Isotope im Gas anzuregen. Das ausgesendete Licht wird erst durch einen Polarisationsfilter linear polarisiert und dann durch ein  $\lambda/4$ -Plättchen geleitet. Aus dem linear-polarisierten Licht wird so zirkular-polarisiertes Licht, welches für das Experiment benötigt wird. Mit Hilfe von Linsen wird dieses Licht dann durch die Versuchskammer geleitet und am Ende in einem Photomultiplier fokussiert. In dieser befindet sich das Gasgemisch aus den in der Natur vorkommenden Isotopen  $^{85}\text{Rb}$  und  $^{87}\text{Rb}$ . Damit diese tatsächlich als Gas vorliegen werden sie durch das erwärmen der Kammer in die Gasphase gebracht. Zusätzlich sind noch einige Helmholtzspulen angebracht. Dabei wird eine vertikal und eine horizontal angebrachte Spule verwendet um das Erdmagnetfeld aufzuheben. Es wird eine andere Spule verwendet, die sogenannten Sweepspule, um das variieren des horizontalen Magnetfeldes zu erlauben. Die Anzahl der Windungen der horizontalen Spule beträgt 154 und die der Sweepspule 11 [3]. Die Längen der Spulen sind 16 cm für die horizontale und 16 cm für die Sweepspule. Die zu untersuchenden Magnetfelder liegen in der Größenordnung des Erdmagnetfeldes weshalb dieses beachtet werden muss. Dazu wird der Versuch nach Norden ausgerichtet um die horizontale Komponente des Erdmagnetfeldes in Richtung der horizontalen Spule zu bringen, sodass es einfach ausgeglichen werden kann.

### 3.2 Durchführung

Für die Messung wird zuerst die Apparatur ausgerichtet und das Erdmagnetfeld ausgeglichen. Dabei wird das Signal des Photomultipliers auf dem Oszilloskop beobachtet und die Spulen so eingestellt, dass die Ausschläge des Signals minimal klein werden. Damit dies möglich ist muss der Versuch abgedunkelt werden, da das Umgebungslicht als Störung zu sehen ist. Um zu messen wird dann eine Sinusspannung auf die RF-Spule gegeben. Die Frequenz der Sinusspannung wird über einen Wertebereich von 100 kHz bis 1,0 MHz in 100 kHz-Schritten verändert. Dabei ist auf dem Oszilloskop die Intensität gegen die vertikale Feldstärke zu erkennen. In den Minima der Intensität wird dann die horizontale Feldstärke gemessen.

## 4 Auswertung

### 4.1 Erdmagnetfeld

Zur Bestimmung des Erdmagnetfeldes wird das gesamte Magnetfeld in horizontaler Richtung an den Stellen der Einbrüche der Transparenz bestimmt. Dazu werden die Spannungen der Spulen bestimmt. Diese werden dann über ihre Widerstände zu den Strömen durch die umgerechnet. Der Strom der Spule kann mit Gleichung 4 zu den Magnetfeldstärken umgerechnet werden. Für die Bestimmung der Ströme werden die horizontalen Messwerte mit 2

multipliziert und die der Sweep Spule mit 0.1. Die Spannungen haben eine Ableseungenauigkeit von 0,10 mV für die horizontal Spule und 0,010 V für die Sweep Spule.

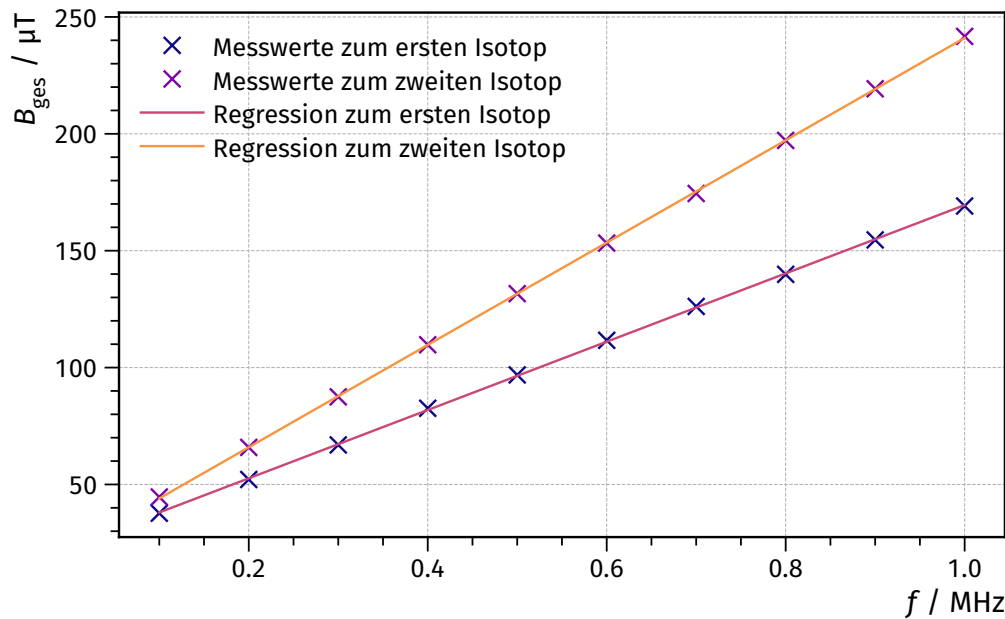
**Tabelle 1:** Daten der ersten Messung

$f$ / kHz	$U_{\text{hori}}$ / mV	$U_{\text{sweep}}$ / V	$B_{\text{ges}}$ / T
100	0,0	6,5	$(3,77 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
200	6,4	7,0	$(5,21 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
300	18	5,9	$(6,69 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
400	35	3,6	$(8,26 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
500	46	2,8	$(9,69 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
600	58	1,8	$(11,17 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
700	67	1,6	$(12,62 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
800	64	4,9	$(14,00 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
900	75	4,0	$(15,46 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
1000	82	4,5	$(16,91 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$

**Tabelle 2:** Daten der zweite Messung

$f$ / kHz	$U_{\text{hori}}$ / mV	$U_{\text{sweep}}$ / V	$B_{\text{ges}}$ / T
100	0,0	7,6	$(4,46 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
200	6,4	9,4	$(6,59 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
300	18	9,5	$(8,75 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
400	35	8,3	$(10,98 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
500	46	8,8	$(13,16 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
600	58	8,9	$(15,33 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
700	67	9,9	$(17,45 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
800	87	7,6	$(19,73 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
900	100	7,1	$(21,93 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$
1000	130	3,8	$(24,17 \pm 1,05) \cdot 10^{-5}$

Die Ermittelten Daten sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführt und in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4:** Gesamtes Magnetfeld der Resonanzstelle in Abhängigkeit der Frequenz.

Zudem wurde eine lineare Ausgleichsrechnung mit Hilfe von Scipy[4] durchgeführt. Die Unsicherheiten werden durch Uncertainties[5] bestimmt. Zur Ausgleichsrechnung wird die Gerade  $B(f) = a_i f + b_i$  verwendet. Die errechneten Parameter sind

$$a_1 = (1,461 \pm 0,006) \cdot 10^{-10} \frac{\text{T}}{\text{Hz}} \quad b_1 = (2,34 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

$$a_2 = (2,189 \pm 0,006) \cdot 10^{-10} \frac{\text{T}}{\text{Hz}} \quad b_2 = (2,21 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} \text{ T}.$$

Die horizontal Komponente des Erdmagnetfeldes ist durch die y-Achsenabschnitte  $b_i$  gegeben.

## 4.2 Landé Faktor

Für die Bestimmung der Landé Faktoren  $g_{F,1}$  und  $g_{F,2}$  wird Gleichung 2 verwendet. Die Steigung der Geraden ist also mit dem Faktor verknüpft. Für den Landé Faktor ergeben sich nach der Gleichung  $g_{F,i} = \frac{h}{\mu_B a_i}$ . Damit werden die Werte

$$g_{F,1} = 0,489 \pm 0,002 \quad (5)$$

$$g_{F,2} = 0,3264 \pm 0,0009 \quad (6)$$

berechnet.

## 4.3 Kernspin

Nach Gleichung 1 hängt der Kernspin  $I$  von dem Landé Faktor ab.  $g_j = 2$  kann durch die Quantenzahlen  $J = S = \frac{1}{2}$  und  $L = 0$  bestimmt werden. Diese sind für die s-Orbitale der Alkalimetalle. Der Kernspin kann somit durch

$$I = \frac{1}{g_{F,i}} - \frac{1}{2}$$

bestimmt werden. So ergeben sich die Werte

$$I_1 = 1,545 \pm 0,008$$

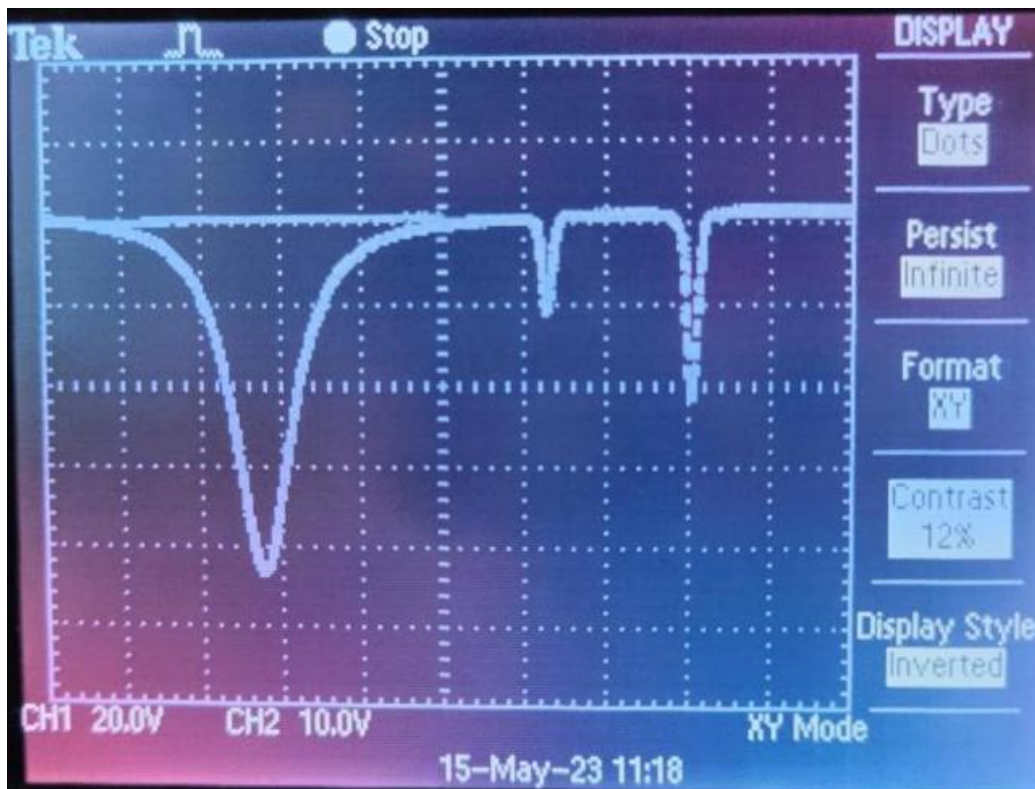
$$I_2 = 2,564 \pm 0,008$$

für den Kernspin.



#### 4.4 Isotopenverhältnis

Ein typisches Bild auf dem Oszilloskop ist in Abbildung 5 zu erkennen.



**Abbildung 5:** Typisches Oszilloskop Bild mit den drei erkennbaren Peaks

Das linke Minima ist der Einbruch der Transparenz beim Nulldurchgang. Die anderen beiden Extrema entstehen durch die Rubidium Isotope. Wie stark die Transparenz abfällt hängt mit der Anzahl der Rubidium Atome zusammen. Somit kann über die Ausschläge das Verhältnis von den Isotopen bestimmt werden. Der erste Peak hat eine Amplitude von 61 Pixeln. Für den zweiten wurden 126 Pixel gezählt. Damit ergibt sich eine Verteilung von 33 %  $^{87}\text{Rb}$  und 67 %  $^{85}\text{Rb}$ .

#### 4.5 Quadratischer Zeeman Effekt

Durch die Bestimmung der magnetischen Feldstärke kann zusätzlich die Größenordnung des quadratischen Zeeman Effekts abgeschätzt werden. Nach Gleichung 3 kann die Aufspaltung bestimmt werden. Dazu wird für jedes der Isotope die grösste magnetische Feldstärke ausgesucht.  $^{85}\text{Rb}$  hat einen Kernspin von  $5/2$  und damit eine maximal mögliche Quantenzahl  $m_F = 3$ . Ähnlich ist der Kernspin von  $^{87}\text{Rb}$   $3/2$  und damit  $m_F = 2$  die maximale Quantenzahl [6]. Somit ergeben sich die Werte

$$E_{\text{quadrat},1} = (7,66 \pm 0,03) \cdot 10^{-28} \text{ J}$$

$$E_{\text{quadrat},2} = (1,351 \pm 0,004) \cdot 10^{-28} \text{ J}.$$

### 5 Diskussion

#### 5.1 Erdmagnetfeld

Das Erdmagnetfeld wird in Unterabschnitt 4.1 zu  $b_1 = (2,34 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} \text{ T}$  für die erste Messung beziehungsweise  $b_2 = (2,21 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} \text{ T}$  für die zweite Messreihe bestimmt. Für die horizontale Komponente des Erdmagnetfeldes

wird der Literaturwert  $1,9 \cdot 10^{-5} \text{ T}$  [7] verwendet. Damit ergibt sich eine relative Abweichung von  $\Delta B_{\text{Erde horizontal},1} = (20,8 \pm 1,8) \%$  und  $\Delta B_{\text{Erde horizontal},2} = (14,2 \pm 1,8) \%$ . Diese Abweichungen lassen sich über die Störkomponenten von äusseren Einflüssen erklären. Da das Magnetfeld der Erde klein ist im Vergleich zu Magnetfeldern von Magneten oder Ähnlichem wird die Messung leicht gestört.

## 5.2 Landé Faktoren und Kernspins

Über die bestimmten Kernspins von  $I_1 = 1,545 \pm 0,008$  und  $I_2 = 2,564 \pm 0,008$  lassen sich die Peaks den Isotopen zuordnen. Der erste Peak entsteht durch das Rubidium-Isotop  $^{87}\text{Rb}$  und der zweite durch  $^{85}\text{Rb}$ . Damit lassen sich auch die Landé Faktoren mit ihren Literaturwerten vergleichen. Für  $g_{F,1}$  ist ein theoretischer Wert von  $\frac{1}{2}$  zu erwarten. Dies entspricht einer Abweichung von  $(2,2 \pm 0,4) \%$ . Die theoretische Erwartung für  $g_{F,2}$  entspricht  $\frac{1}{3}$ . Damit ergibt sich eine Abweichung von  $(8,8 \pm 0,3) \%$ . Die relativen Abweichungen der Kernspins sind somit  $\Delta I_1 = (3,0 \pm 0,5) \%$  und  $\Delta I_2 = (2,54 \pm 0,32) \%$ .

## 5.3 Isotopenverhältnis

Das bestimmte Isotopenverhältnis weicht von dem in der Natur erwartetem ab. In der Natur kommt das Element Rubidium zu 72 % im Isotop  $^{85}\text{Rb}$  und 28 % im Isotop  $^{87}\text{Rb}$  vor.[6] Diese Abweichung lässt sich damit erklären, dass die verwendete Probe mit  $^{87}\text{Rb}$  angereichert wurde um die Messung von diesem Isotop zu erleichtern. Sind nicht genug Atome eines Isotopes vorhanden wird der Peak immer kleiner und die Messung somit schwieriger.

## 5.4 Quadratischer Zeeman Effekt

Da die Aufspaltung des quadratischen Zeeman-Effektes sehr gering ist muss dieser erst bei höheren Energien und und stärkeren Magnetfeldern beachtet werden.

## Literatur

- [1] Wolfgang Pfeiler. Band 5 Quanten, Atome, Kerne, Teilchen. Berlin, Boston: De Gruyter, 2017. ISBN: 9783110445718. doi: doi:10.1515/9783110445718. URL: <https://doi.org/10.1515/9783110445718>.
- [2] Francesco Borgosano. „Studies of the influence of thermodynamical parameters on the production rate of hyperpolarised  $^{129}\text{Xe}$  and the degree of hyperpolarisation“. In: (Jan. 2012).
- [3] Versuch Nr. 21. Optisches Pumpen. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2023.
- [4] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. SciPy: Open source scientific tools for Python. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [5] Eric O. Lebigot. Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [6] Rubidium. URL: <https://www.webelements.com/rubidium/> (besucht am 17.05.2023).
- [7] Messung des Erdmagnetfeldes in der PTB. URL: <https://www.ptb.de/cms/nc/ptb/fachabteilungen/abt2/fb-25/ag-251/live-daten-erdmagnetfeldmessung.html> (besucht am 17.05.2023).