

## Optisches Pumpen: Messen und Beobachten der Zeeman-Übergänge im Grund- zustand von Rb-87 mit $\sigma^+$ - und $\sigma^-$ - Pumplicht

### Versuchsziel

- Beobachtung von Zeeman-Übergängen im Grundzustand von  $^{87}\text{Rb}$  mit  $\sigma^+$ - und  $\sigma^-$ - Pumplicht.
- Bestimmung des Kernspins  $I$  von  $^{87}\text{Rb}$ .
- Zuordnung der Übergänge und Bestimmung der Übergangsfrequenzen.

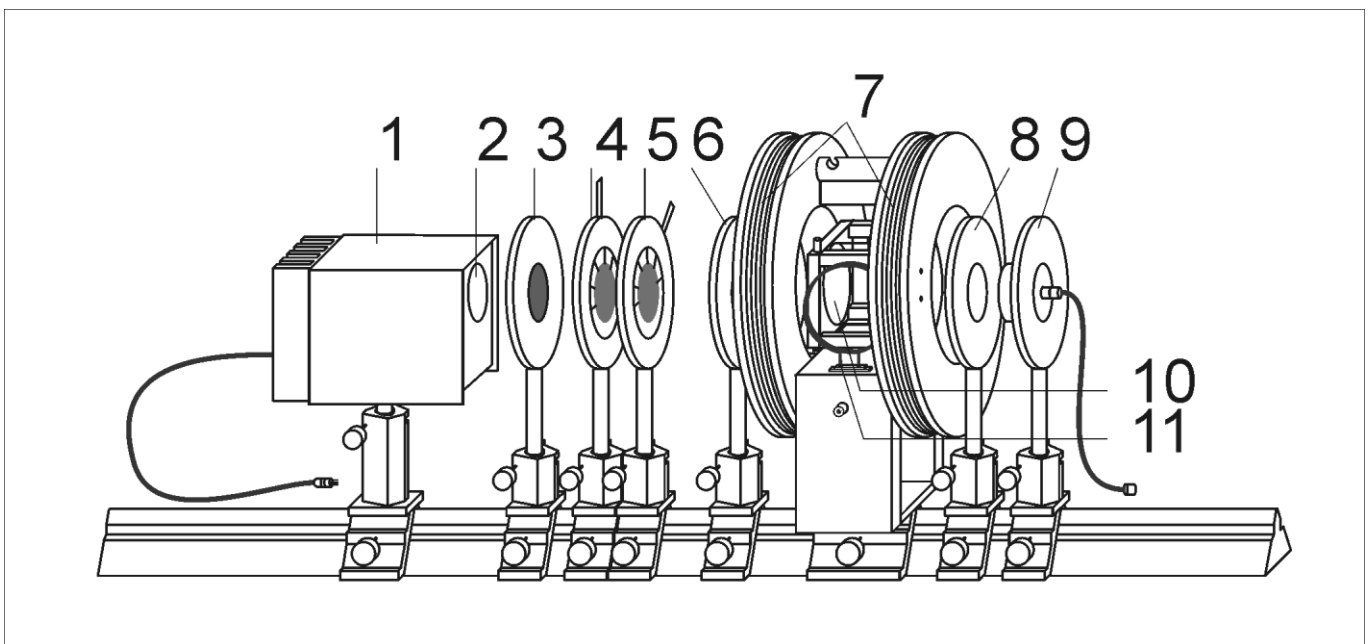


Fig. 1: optische und magnetische Komponenten des Versuchs Optisches Pumpen

- |  |  |
|--|--|
| 1 Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte        | 6 Linse auf Messing-Stiel, $f = + 100$ mm          |
| 2 Linse, $f = + 50$ mm                 | 7 Helmholtz-Spulenpaar                             |
| 3 Linienfilter, 795 nm                 | 8 Linse auf Messing-Stiel, $f = + 50$ mm           |
| 4 Polarisationsfilter für Rotstrahlung | 9 Silizium-Photodetektor                           |
| 5 Viertelwellenlängen-Platte, 200 nm   | 10 Absorptionskammer mit Rubidium-Absorptionszelle |
|  | 11 Hochfrequenz-Spulen                             |

### Grundlagen

Optisches Pumpen [1,2,3] ermöglicht die Spektroskopie von atomaren Energiezuständen in einem Energiebereich, der der direkten optischen Beobachtung nicht zugänglich ist.

In schwachen Magnetfeldern sind die Besetzungszahldifferenzen zwischen den Zeeman-Niveaus im Grundzustand von  $^{87}\text{Rb}$  verschwindend gering, da der Energieabstand zwischen diesen Niveaus weniger als  $10^{-8}$  eV beträgt. Durch Optisches

Pumpen wird eine von der thermischen Gleichgewichtsbesetzung stark abweichende Besetzung erzielt. Dazu wird Rubidiumdampf in einer Absorptionszelle mit der zirkular polarisierten Komponente des  $D_1$ -Lichts aus einer Rubidiumlampe bestrahlt. Die Besetzung der Zeeman-Niveaus richtet sich nach der Polarität des einfallenden Lichts. Bei Einstrahlung eines hochfrequenten magnetischen Wechselfeldes beobachtet man die Änderung der Transparenz des Rubidiumdampfes für Rubidium- $D_1$ -Licht.

Als Pumplicht-Quelle dient eine Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte. In einer Glasampulle werden Rubidiumatome im elektromagnetischen Feld eines HF-Senders angeregt.

Die Kombination aus einem Interferenzfilter, einem Polarisationsfilter und einer Viertelwellenlängen-Platte separiert die gewünschte zirkular polarisierte Komponente der D<sub>1</sub>-Linie aus dem Emissionsspektrum der Lichtquelle. Abhängig von der Stellung der Viertelwellenlängen-Platte entsteht  $\sigma^+$ - oder  $\sigma^-$ -Polarisation.

Ein System konvexer Linsen fokussiert das Pumplicht auf die Mitte einer ebenfalls mit Rubidiumdampf gefüllten Absorptionzelle und den transmittierten Anteil des Pumplichts auf einen Photodetektor (vgl. Fig. 4).

Das Zeeman-Magnetfeld wird mit Helmholtz-Spulen erzeugt. Je nach Vorzeichen des Spulenstroms verlaufen die Feldlinien parallel oder antiparallel zur optischen Einstrahlung.

Mit einem Hochfrequenz-Spulenpaar kann ein hochfrequentes Wechselfeld senkrecht zum Zeeman-Magnetfeld eingestrahlt werden. Stimmt seine Frequenz mit der Energiedifferenz zweier benachbarter Zeeman-Niveaus überein, kann ein Übergang zwischen diesen Niveaus stattfinden. Die Besetzung der Zeeman-Niveaus ändert sich dann und damit die Transparenz des Rubidiumdampfes.

Zur Bestimmung der Transparenzänderung wird die Intensität des transmittierten Lichts mit einem Silizium-Photodetektor gemessen. Ein Strom/Spannungs-Konverter verstärkt dessen Ausgangssignal. Aufgezeichnet wird die transmittierte Intensität in Abhängigkeit von der Frequenz des eingestrahlenen HF-Feldes. Diese Frequenz wird mit einem Funktionsgenerator linear zwischen einer einstellbaren Start-Frequenz und einer einstellbaren Stopp-Frequenz variiert.

### Physikalische Grundlagen

Rubidium hat wie alle Alkalimetalle im Grundzustand einen Gesamtspin der Elektronenhülle mit der Quantenzahl  $J = \frac{1}{2}$ . Der Grundzustand spaltet daher in zwei Hyperfeinzustände mit den Gesamtdrehimpulsen  $F = I + \frac{1}{2}$  und  $F = I - \frac{1}{2}$  auf.

In einem Magnetfeld spalten die Hyperfeinzustände in jeweils  $2F+1$  Zeeman-Niveaus mit den magnetischen Quantenzahlen  $m_F = -F, \dots, F$  auf. Fig. 2 zeigt als Beispiel das Niveauschema von <sup>87</sup>Rb.

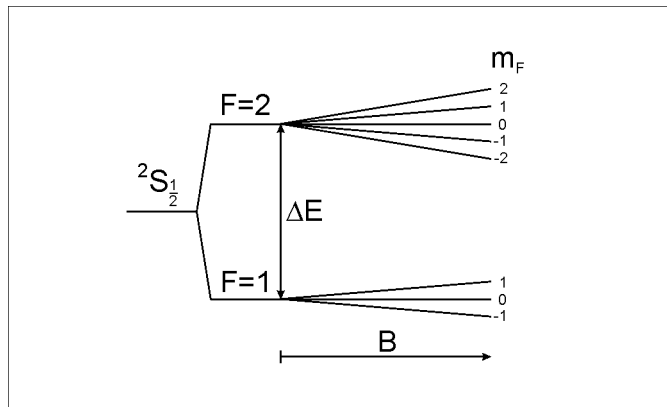


Fig. 2: Schema der Zeeman-Niveaus im Grundzustand von <sup>87</sup>Rb. Hyperfeinaufspaltung  $\Delta E$  und Zeeman-Aufspaltung sind nicht maßstabgetreu gezeichnet.

Die Energie  $E$  der Zeeman-Niveaus kann man bei den hier verwendeten Magnetfeldern mit der Breit-Rabi-Formel [4,5] berechnen:

Für  $F = I \pm \frac{1}{2}$  ist

$$E(F, m_F) = -\frac{\Delta E}{2(2I+1)} + \mu_K g_I B m_F \pm \frac{\Delta E}{2} \left( 1 + \frac{4m_F}{2I+1} \xi + \xi^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

mit  $\xi = \frac{g_J \mu_B - g_I \mu_K}{\Delta E} B$  (I)

$F$ : Gesamtdrehimpuls

$I$ : Kernspin

$J$ : Drehimpuls der Elektronenhülle

$m_F$ : magnetische Quantenzahl zum Gesamtdrehimpuls  $F$

$g_I$ : g-Faktor des Kerns

$g_J$ : g-Faktor der Elektronenhülle

$\Delta E$ : Hyperfeinstrukturabstand

$\mu_B$ : Bohrsches Magneton

$\mu_K$ : Kernmagneton

$B$ : magnetische Flußdichte

Bei Einstrahlung von  $\sigma^+$ -Pumplicht reichern sich innerhalb eines Hyperfeinzustandes die Zeeman-Niveaus mit positiven Quantenzahlen  $m_F$  auf Kosten der Niveaus mit negativen Quantenzahlen an. Im Grundzustand von <sup>87</sup>Rb z.B. wird das Niveau mit  $F = 2$ ,  $m_F = +F$  am stärksten besetzt. Man erhält also eine Abweichung der Besetzung von der thermischen Besetzung.

Bei Einstrahlung eines linear polarisierten, magnetischen Wechselfelds passender Frequenz finden mehr Übergänge vom jeweils höheren Zeeman-Niveau  $m_F$  zum nächst niederen Niveau mit  $m_F - 1$  statt als umgekehrt. Mit  $\sigma^-$  Pumplicht sind die Verhältnisse genau umgekehrt, da sich die Zeeman-Niveaus mit negativen Quantenzahlen anreichern.

Die Frequenz  $f$  dieser Übergänge beträgt in jedem Fall

$$f(m_F \leftrightarrow m_F - 1) = \pm \frac{\mu_K g_I B}{h} + \frac{\Delta E}{2h} \left( \left( 1 + \frac{4m_F}{2I+1} \xi + \xi^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left( 1 + \frac{4(m_F - 1)}{2I+1} \xi + \xi^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (II)$$

## Sicherheitshinweise

### Schutz von Personen

Verbrühungsgefahr: Aus schlecht befestigten oder schadhafte Wasserschläuchen zwischen Umwälzthermostat und Absorptionskammer kann heißes Wasser austreten:

- nur Silikonschläuche mit dem angegebenen Schlauchdurchmesser verwenden.
- Schläuche in die Halterung zwischen den Helmholtz-Spulen klemmen und gegen Verrutschen sichern

### Schutz der Apparatur

Die Absorptionskammer ist aus Acrylglas gefertigt und kann thermisch zerstört werden.

- nur destilliertes Wasser in die Absorptionskammer füllen.
- Absorptionskammer höchstens bis 80°C heizen.
- niemals die Absorptionskammer mit Lösungsmitteln reinigen

Wenn die Helmholtz-Spulenkörper verformt werden, ist die Homogenität des Helmholtz-Feldes beeinträchtigt.

- Helmholtz-Spulen vor Schlag oder Stoß schützen.

Der HF-Sender in der Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte kann durch zu hohe Spannung zerstört werden:

- Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte nur mit dem Versorgungsgerät zum Optischen Pumpen betreiben.

### optimaler Versuchsablauf

Der experimentelle Aufbau ist empfindlich gegen störende Magnetfelder:

- sämtliche Netz-, Versorgungs- und Nachweisgeräte möglichst weit entfernt vom Versuchsaufbau aufstellen.
- ferromagnetische Materialien oder Geräte, die Magnetfelder erzeugen, aus der Nähe des Versuchsaufbaus entfernen.
- nur Linsen auf Messing-Stiel (460 021 u. 460 031) verwenden

Bei Raumbelichtung kann das Nachweissignal am Silizium-Photodetektor durch Netzfrequenz überlagert werden. Fremdlicht erhöht den Gleichstromanteil des Photodetektor-Signals unnötig:

- elektrische Raumbelichtung ausschalten.
- Einstreuung von Fremdlicht vermeiden.
- Experimentierraum verdunkeln.
- spiegelnde Seite des Linienfilters zur Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte drehen.

Die Durchflußrichtung des Heizwassers in der Absorptionskammer ist konstruktiv vorgegeben:

- Wasser-Zulauf und -Ablauf nicht verwechseln.

Hochfrequenz stört spannungsempfindliche Messgeräte:

- Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte nur zusammengebaut betreiben.

## Geräte

1 Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte.....	558 823
1 Paar Helmholtz-Spulen auf Stativreiter .....	558 826
1 Absorptionskammer mit Rubidium-Absorptionszelle.....	558 833
1 Silizium-Photodetektor .....	558 835
1 I/U-Konverter zum Silizium-Photodetektor .....	558 836
1 Versorgungsgerät zum Optischen Pumpen .....	558 814
1 Funktionsgenerator 1mHz - 12 MHz .....	522 551
1 DC-Netzgerät, 0...±15 V .....	521 45
1 Umwälzthermostat, +30°C bis +100°C.....	666 768
1 Digital-Speicheroszilloskop, z.B. ....	575 294
1 Steckernetzgerät, 9,2V-, stabilisiert.....	530 88
1 Digital-Analog Multimeter MetraHit24S .....	531 281
1 Wechselschalter.....	504 48
1 Optische Bank mit Normalprofil, 1m.....	460 32
1 Linienfilter, 795 nm.....	468 000
1 Polarisationsfilter für Rotstrahlung .....	472 410
1 Viertelwellenlängen-Platte, 200 nm.....	472 611
1 Linse auf Messing-Stiel, f = +50 mm .....	460 021
1 Linse auf Messing-Stiel, f = +100 mm .....	460 031
6 Optische Reiter 60/34.....	460 370
1 Optischer Reiter 95/50 .....	460 374
2 Silikonschläuche, 1,5 m lang, 6,0x2,0 LN-Nr. 20066843	
4 Experimentierkabel, schwarz 50 cm.....	501 28
2 Experimentierkabel, schwarz 200 cm.....	501 38
3 HF-Kabel, 1 m .....	501 02
1 HF-Kabel, 2 m .....	501 022

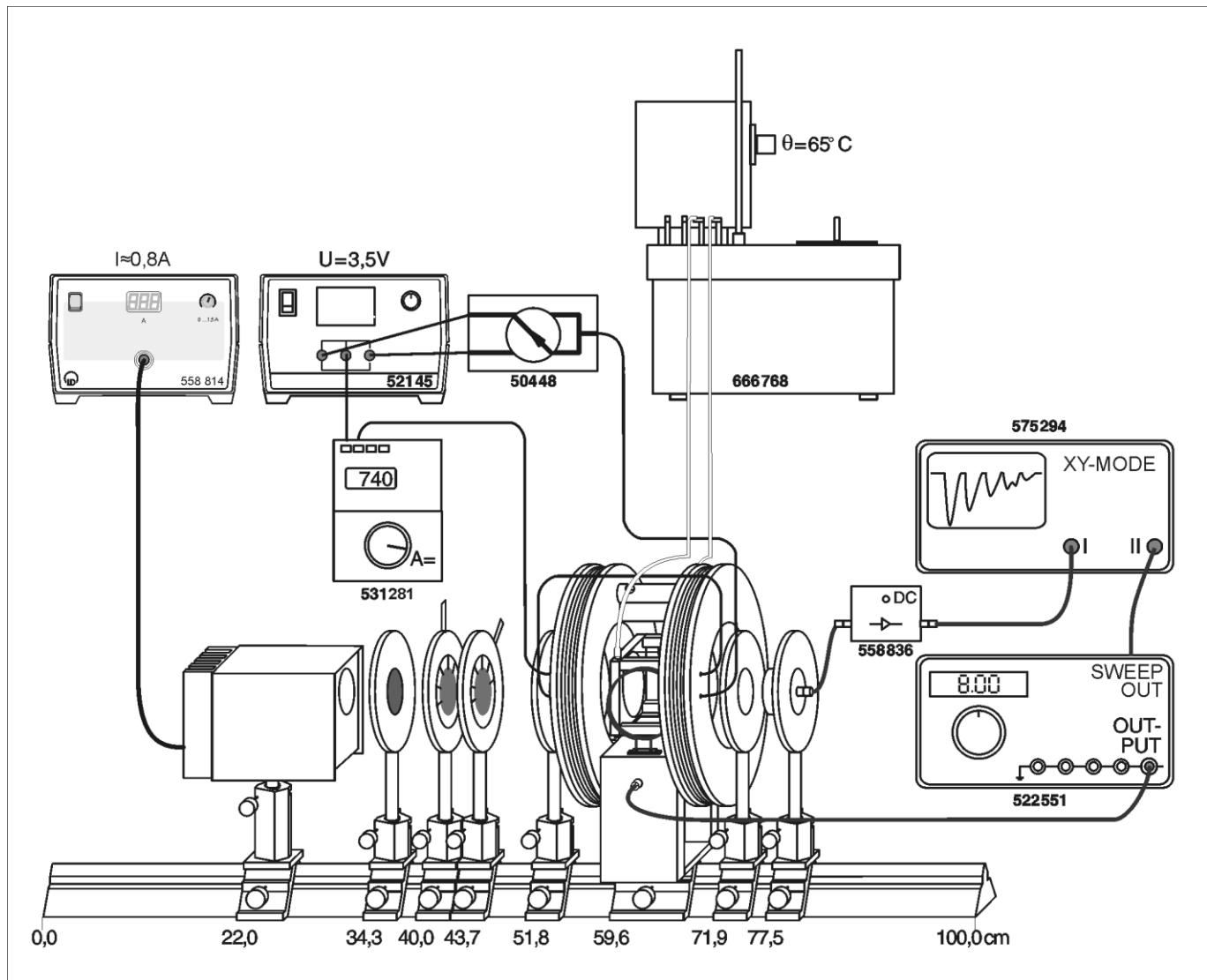


Fig.3: Übersicht über den gesamten experimentellen Aufbau mit Positionsangabe für den linken Rand der optischen Reiter.

## Aufbau

### Optischer und elektrischer Aufbau

- optische und magnetische Komponenten gemäß Fig. 1 und Fig. 3 auf der optischen Bank mit Normalprofil (460 32) montieren.
- Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte mit dem Versorgungsgerät Optisches Pumpen (558 814) verbinden.
- Helmholtz-Spulen und Vielfachmeßgerät (531 281) in Reihenschaltung an das Netzgerät (521 45) schließen.
- Wechselschalter (504 48) zur bequemen Umpolung des Magnetfelds einsetzen.
- Ausgang des Funktionsgenerators (522 551) mit den HF-Spulen verbinden.
- Photodetektor-Ausgang über den I/U-Konverter (558 836) in Kanal I des Oszilloskops (575 294) speisen.
- Sweep Out des Funktionsgenerators mit Kanal II des Oszilloskops verbinden

### Thermische Inbetriebnahme

- Mit Silikonschläuchen einen Heizwasser-Kreislauf zwischen Absorptionskammer und Umwälzthermostat (666 768) herstellen (vgl. Fig.3).
  - Umwälzthermostat einschalten und Solltemperatur  $\theta$  auf 65°C einstellen.
  - Versorgungsgerät Optisches Pumpen einschalten und Betriebsstrom auf ca. 0,8 A einstellen (s. Gebrauchsanweisung zu Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte 558 823).
  - stabilisiertes Netzgerät einschalten.
  - mindestens 15 min bis zum Erreichen der Betriebstemperatur warten.
- Falls die Lichtstärke der Rubidium-HF-Leuchte instabil ist:
- Betriebsstrom um ca. 0,1 A erhöhen.

### Optische Vorjustierung

- Optik-Reiter mit Linienfilter, Polarisationsfilter und Viertelwellenlängen-Platte von der optischen Bank entfernen.
- Absorptionskammer aus dem Stativ der Helmholtz-Spulen nehmen.
- weißes Blatt Papier an die Stelle der Absorptionszelle in die Mitte zwischen den Helmholtz-Spulen halten.
- Linse (6) und Rubidium- Hochfrequenz-Leuchte so verschieben, daß auf dem Papier ein möglichst kleiner, gleichmäßig ausgeleuchteter Lichtfleck entsteht (vgl. Fig. 4).
- Optik-Reiter mit dem Silizium-Photodetektor von der optischen Bank entfernen.
- mit dem Blatt Papier die Stelle suchen, an der ein möglichst kleiner, gleichmäßig ausgeleuchteter Lichtfleck erscheint.
- Linse (8) so verschieben, daß die Ausleuchtung verbessert wird (vgl. Fig.4).
- anstelle des Papiers den Silizium-Photodetektor aufstellen.

Wenn die Vorjustierung beendet ist:

- entfernte Komponenten wieder auf der optischen Bank montieren.

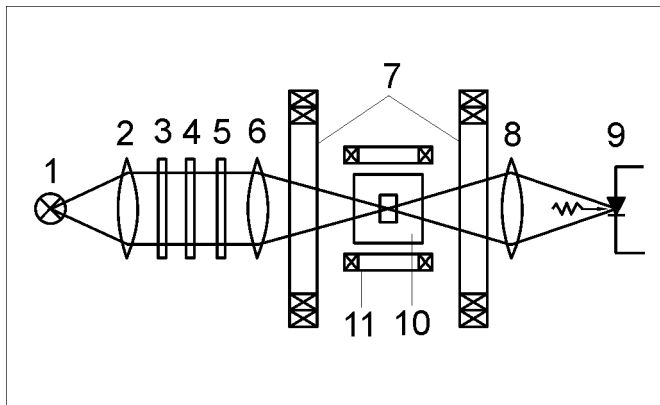


Fig. 4 Schematische Darstellung des Strahlengangs beim Optischen Pumpen, Bezeichnung der optischen und magnetischen Komponenten siehe Fig.1.

### Feinjustierung

Um maximale Beleuchtungsstärke auf dem Silizium-Photodetektor zu erreichen:

- Photodetektor-Signal am Oszilloskop beobachten.
- Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte, Linsen (6) und (8), Absorptionskammer und Silizium-Photodetektor abwechselnd in Höhe und Position so feinjustieren, daß das Photodetektor-Signal maximal wird.
- ggf. mit Offsetpotentiometer des I/U-Konverters das Signal wieder auf die Mitte des Oszilloskop-Bildschirms bringen.

### Einstellungen:

Oszilloskop:  
Kanal I: 10-20 mV/DIV. (DC)

I/U-Konverter:  
Umschalter: DC

### Aufsuchen des Absorptionssignals

Für  $^{87}\text{Rb}$  liegen die Frequenzen der Zeeman-Übergänge im Grundzustand bei einem Helmholtz-Feld von 1,2 mT (Spulenstrom 740 mA) bei etwa 8 MHz. Das Absorptionssignal erreicht bei sorgfältiger Justierung eine Amplitude von ca. 20 mV (bei Erhöhung des Betriebsstromes der Rubidium-Hochfrequenzleuchte sind ggf. höhere Signale möglich, das erniedrigt aber die Lebensdauer der Rubidium-Gasentladungslampe):

- Polarisationsfilter auf  $0^\circ$  und Viertelwellenlängen-Platte auf  $+45^\circ$  oder  $-45^\circ$  ausrichten.
- gewünschte Betriebsart und gewünschten Frequenzbereich am Funktionsgenerator einstellen.
- Funktionsgenerator durch Drücken der Taste MANUAL starten.
- Helmholtz-Spulenstrom variieren, bis auf dem Oszilloskop ein möglichst großes (negatives!) Absorptionssignal erscheint.
- ggf. Umschalter des I/U-Konverters auf AC stellen oder mit Offsetpotentiometer des I/U-Konverters das Signal wieder auf die Mitte des Oszilloskop-Bildschirms bringen.
- Absorptionssignal durch Verändern der Betriebsparameter der Rubidium-HF-Leuchte maximieren.

### Einstellungen:

Polarisationsfilter:  
Winkel:  $0^\circ$

Viertelwellenlängen-Platte:  
Winkel:  $+45^\circ$  oder  $-45^\circ$

I/U-Konverter:  
Umschalter: DC

Oszilloskop:  
Betriebsart: X-Y Mode  
Kanal I:  $\geq 10$  mV/DIV. (DC)  
Kanal II: 0,5 V/DIV. (DC)

Funktionsgenerator:  
Function: ~ (Sinus)  
Amplitude: Mittelstellung  
Attenuation: 20 dB  
DC-Offset: 0 V (Taste DC gedrückt)  
Taste Sweep: gedrückt  
Mode\*: 'C u  
Stop\*: 8,5 MHz  
Start\*: 7,5 MHz  
Period\*: ca. 100 ms (schneller Sweep)

\* Taste drücken und Sollwert mit Stellrad einstellen

**Messung****Vorbereitung**

Signalsuche:

- Oszilloskop im XY-Mode betreiben.
- storage mode des Oszilloskops ausschalten.
- ggf. Kanal I des Oszilloskops unempfindlich schalten.
- Umschalter des I/U-Konverters auf DC stellen.
- Start- und Stopp-Frequenz am Funktionsgenerator einstellen ( $f_A = 9,0$  MHz,  $f_E = 9,2$  MHz).
- Funktionsgenerator auf Period 100 ms umschalten (schneller Sweep).
- Funktionsgenerator durch Drücken der Taste MANUAL starten.
- Helmholtz-Spulenstrom  $I \approx 0,8$  A einstellen und variieren, bis auf dem Oszilloskop-Bildschirm ein Absorptionssignal zu sehen ist.

Speichermodus des Oszilloskops:

- storage mode des Oszilloskops einschalten.
- Taste START des Funktionsgenerators drücken.
- horizontale Ablenkung des Oszilloskops mit dem Drehknopf Y-Pos.II auf  $x_A = 1,0$  Skt stellen.
- Taste STOP des Funktionsgenerators drücken.
- horizontale Ablenkung des Oszilloskops mit dem Drehknopf VOLTS/DIV. des Kanals II auf  $x_E = 9,0$  Skt stellen.

Feineinstellung:

- Funktionsgenerator durch Drücken der Taste MANUAL starten.
- Funktionsgenerator auf Period 10 s umschalten (langsamer Sweep).
- vertikale Ablenkung des Oszilloskops empfindlich schalten.
- Viertelwellenlängen-Platte zwischen  $+45^\circ$  und  $-45^\circ$  hin- und herdrehen und überprüfen, ob alle Linien des Absorptionsspektrums auf dem Oszilloskop-Schirm zu sehen sind.
- ggf. Helmholtz-Spulenstrom  $I$  oder Start-Frequenz  $f_A$  und Stopp-Frequenz  $f_E$  nachregeln.

**Durchführung**

Hinweis: bei  $\sigma^+$ -Polarisation ist die Absorptionslinie mit der niedrigsten Frequenz die intensivste.

Erster Durchgang:

- Viertelwellenlängen-Platte auf  $\sigma^+$ -Polarisation stellen.
- Funktionsgenerator durch Drücken der Taste MANUAL starten.
- vollständige Aufzeichnung des Absorptionsspektrums abwarten.
- Aufzeichnung des Absorptionsspektrums durch Drücken der Oszilloskop-Tasten HOLD I und HOLD II beenden.
- Lage  $x$  der Absorptionslinien auf dem Oszilloskop-Bildschirm bestimmen.
- Amplitude  $U$  der Absorptionslinien bestimmen.

- Start-Frequenz  $f_A$  und Stopp-Frequenz  $f_E$  überprüfen.
- Helmholtz-Spulenstrom  $I$  überprüfen.

Zweiter Durchgang:

- Viertelwellenlängen-Platte auf  $\sigma^-$ -Polarisation stellen.
- Funktionsgenerator durch Drücken der Taste MANUAL starten.
- vollständige Aufzeichnung des Absorptionsspektrums abwarten.
- Aufzeichnung des Absorptionsspektrums durch Drücken der Oszilloskop-Tasten HOLD I und HOLD II beenden.
- Lage  $x$  der auf dem Oszilloskop-Bildschirm bestimmen.
- Amplitude  $U$  der Absorptionslinien bestimmen.
- Start-Frequenz  $f_A$  und Stopp-Frequenz  $f_E$  überprüfen.
- Helmholtz-Spulenstrom  $I$ überprüfen.

**Einstellungen:**

Oszilloskop:

Betriebsart:	X-Y Mode
	Storage mode
Kanal I:	10 mV/DIV. (DC)
Kanal II:	>0,5 V/DIV. (DC)
Aufzeichnungsbereich:	1,0 Skt - 9,0 Skt
Zeitablenkung:	1 s/DIV

Funktionsgenerator:

Stop:	9,0 MHz
Start:	9,2 MHz
Period:	10 s (langsamer Sweep)
Amplitude:	3. Teilstrich
Attenuation:	20 dB

**Meßbeispiel**

Meßparameter:

$$x_A = 1,0 \text{ Skt}, x_E = 9,0 \text{ Skt}, f_A = 9,05 \text{ MHz}, f_E = 9,20 \text{ MHz}$$

Tab. 1: Lage  $x$ , relative Amplitude  $U$  der  $^{87}\text{Rb}$ -Absorptionslinienlinks: Messung mit  $\sigma^+$ -Licht bei  $I=0,795$  Arechts: Messung mit  $\sigma^-$ -Licht bei  $I=0,795$  A

Nr.	$\frac{x}{\text{Skt}}$	$\frac{U}{\%}$
1	2,5	100
2	3,8	39
3	5,1	14
4	5,8	13
5	6,4	4
6	7,1	3

Nr.	$\frac{x}{\text{Skt}}$	$\frac{U}{\%}$
1	2,6	4
2	3,9	14
3	5,2	36
4	5,9	4
5	6,5	100
6	7,2	13

### Auswertung

#### Bestimmung des Kernspins $I$ von $^{87}\text{Rb}$

Das eingestrahlte magnetische Wechselfeld ermöglicht Übergänge mit den Auswahlregeln  $\Delta F = 0, \pm 1$  und  $\Delta m_F = \pm 1$ . Der zur Verfügung stehende Frequenzbereich läßt dabei nur  $\Delta F = 0$  zu. Also besteht zwischen dem Kernspin  $I$  und der Zahl  $n$  der Übergänge der Zusammenhang

$$n = 2F_+ + 2F_- = 4I \quad (\text{III})$$

Es sind sechs Linien zu beobachten. Gemäß (III) hat der Kernspin von  $^{87}\text{Rb}$  also den Wert  $I = \frac{3}{2}$ .

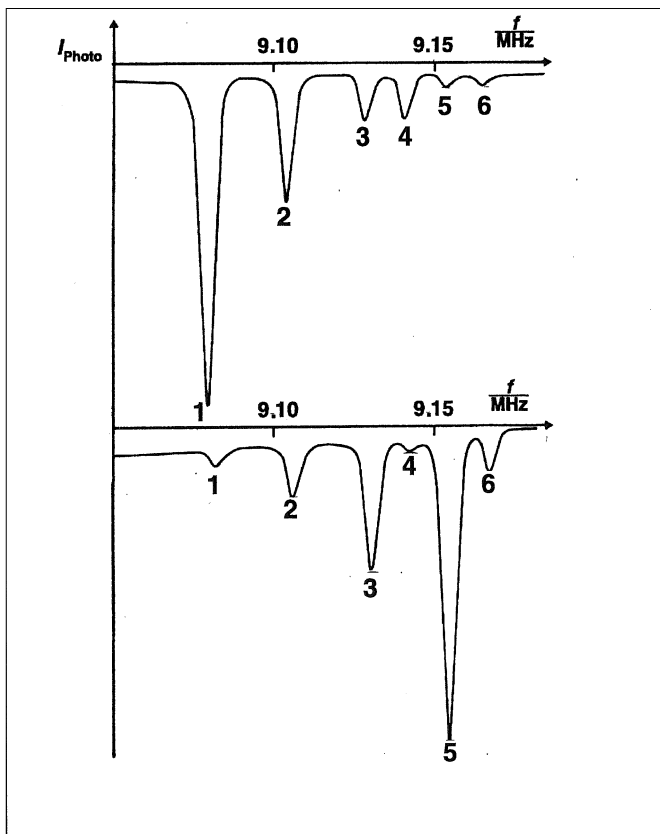


Fig. 5: Absorptionsspektrum  $^{87}\text{Rb}$  mit  $\sigma^+$ -Licht (oben) und mit  $\sigma^-$ -Licht (unten).

Zur Identifizierung der Absorptionslinien siehe Tab.2

#### Bestimmung der Übergangsfrequenzen

Aus der Lage  $x$  auf dem Oszilloskop-Bildschirm werden die Frequenzen  $f_M$  der Absorptionslinien gemäß

$$f_M = f_A + (f_E - f_A) \frac{x - x_A}{x_E - x_A} \quad (\text{IV})$$

$x_A$ : Skalenanfang (eingestellt mit Y-POS.II)

$x_E$ : Skalende (eingestellt mit Drehschalter VOLTS/DIV.)

$f_A$ : Start-Frequenz

$f_E$ : Stopp-Frequenz

bestimmt. Die Ergebnisse sind als Größen  $f_M(\sigma^+)$  bzw.  $f_M(\sigma^-)$  in Tab. 2 zusammengefaßt. Die Standardabweichung für diese Größen beträgt  $\sigma_F = 0,002$  MHz.

#### Zuordnung der Übergänge

Folgende Zahlenwerte entnimmt man der Literatur:

$$\mu_K = 5,05083(4) \cdot 10^{-27} \text{ JT}^{-1} \quad [9]$$

$$\mu_B = 9,27410(7) \cdot 10^{-24} \text{ JT}^{-1} \quad [9]$$

$$g_J = 2,002332(2) \quad [6]$$

$$h = 6,6260(5) \cdot 10^{-34} \text{ Js} \quad [9]$$

$$\frac{\Delta E}{h} = 6834,682614(1) \text{ MHz} \quad [8]$$

$$g_I = -1,827231(2) \quad [7]$$

Innerhalb des Hyperfeinzustandes  $F = 2$  erhält man gemäß (II) vier Übergänge mit den Frequenzen

$$f_{F=2} = -0,01393 \text{ MHz} \cdot \frac{B}{\text{mT}} + 3417,34 \text{ MHz} \left( \left( 1 + m_F \xi + \xi^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left( 1 + (m_F - 1) \xi + \xi^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

und innerhalb des Hyperfeinzustandes  $F = 1$  zwei Übergänge mit den Frequenzen

$$f_{F=1} = 0,01393 \text{ MHz} \cdot \frac{B}{\text{mT}} + 3417,34 \text{ MHz} \left( \left( 1 + m_F \xi + \xi^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left( 1 + (m_F - 1) \xi + \xi^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

Dabei ist  $\xi = 4,10243(4) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{B}{\text{mT}}$ .

Durch geeignete Variation des Parameters  $B$  in (I) und (II) lassen sich die gemessenen Übergangsfrequenzen rechnerisch reproduzieren. Tab. 2 vergleicht die mit  $\sigma^+$ -Licht gemessenen Übergangsfrequenzen, die mit  $\sigma^-$ -Licht gemessenen Übergangsfrequenzen und die berechneten Übergangsfrequenzen  $f$ . Die einer Liniennummer zugeordneten Werte stimmen innerhalb des Meßfehlers  $\sigma_F = 0,002$  MHz überein. Der für die Rechnungen benutzte Wert der magnetischen Flußdichte ist  $B = 1,3031$  mT. Die Quantenzahlen  $F$  und  $m_F$  der am Übergang beteiligten Zeeman-Niveaus sind in Tab. 2 ebenfalls angegeben.

Tab. 2:  $^{87}\text{Rb}$ -Übergangsfrequenzen bei  $B = 1,3031$  mT

Nr.	$f_M(\sigma^+)$ MHz	$f_M(\sigma^-)$ MHz	$f$ MHz	$F$	$m_F(1) \leftrightarrow m_F(2)$
1	9,078	9,080	9,080	2	$2 \leftrightarrow 1$
2	9,103	9,104	9,104	2	$1 \leftrightarrow 0$
3	9,127	9,129	9,128	2	$0 \leftrightarrow -1$
4	9,140	9,142	9,140	1	$1 \leftrightarrow 0$
5	9,151	9,153	9,153	2	$-1 \leftrightarrow -2$
6	9,164	9,166	9,165	1	$0 \leftrightarrow -1$

Beim Wechsel von  $\sigma^+$ - zu  $\sigma^-$ -Pumplicht ändern sich die Amplituden  $U$  der Absorptionslinien. Tab. 3 vergleicht die Intensitäten der Übergänge. Innerhalb des Meßfehlers für  $U$  entspricht der Wechsel von  $\sigma^+$  zu  $\sigma^-$  einem Wechsel von  $m_F$  zu  $-m_F$ .

Tab. 3: Relative  $^{87}\text{Rb}$ -Übergangintensitäten bei  $B=1,3031$  mT

Nr.	$U(\sigma^+)$	$U(\sigma^-)$	$F$	$m_F(1) \leftrightarrow m_F(2)$
1	100%	4%	2	$2 \leftrightarrow 1$
2	39%	14%	2	$1 \leftrightarrow 0$
3	14%	36%	2	$0 \leftrightarrow -1$
4	13%	4%	1	$1 \leftrightarrow 0$
5	4%	100%	2	$-1 \leftrightarrow -2$
6	3%	13%	1	$0 \leftrightarrow -1$

## Literatur

- [1] A.Kastler: Journal de Physique, 11 (1950) 255
- [2] H. Kopfermann: Über optisches Pumpen an Gasen, Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften, Jahrgang 1960, 3. Abhandlung
- [3] J. Recht, W. Klein: LH-Contact 1 (1991) S. 8 –11
- [4] G. Breit, I. Rabi: Phys. Rev. 38 (1931) 2002
- [5] Kopfermann, H.: Kernmomente, 2.Aufl., S. 28ff
- [6] S. Penselin: Z.Physik 200 (1967) 467
- [7] C.W.White et al.: Phys.Rev. 174 (1968) 23
- [8] G.H.Fuller et al.: Nuclear Data Tables A5 (1969) 523
- [9] B.N.Taylor et al.: Rev. Mod. Phys. 41 (1969) 375