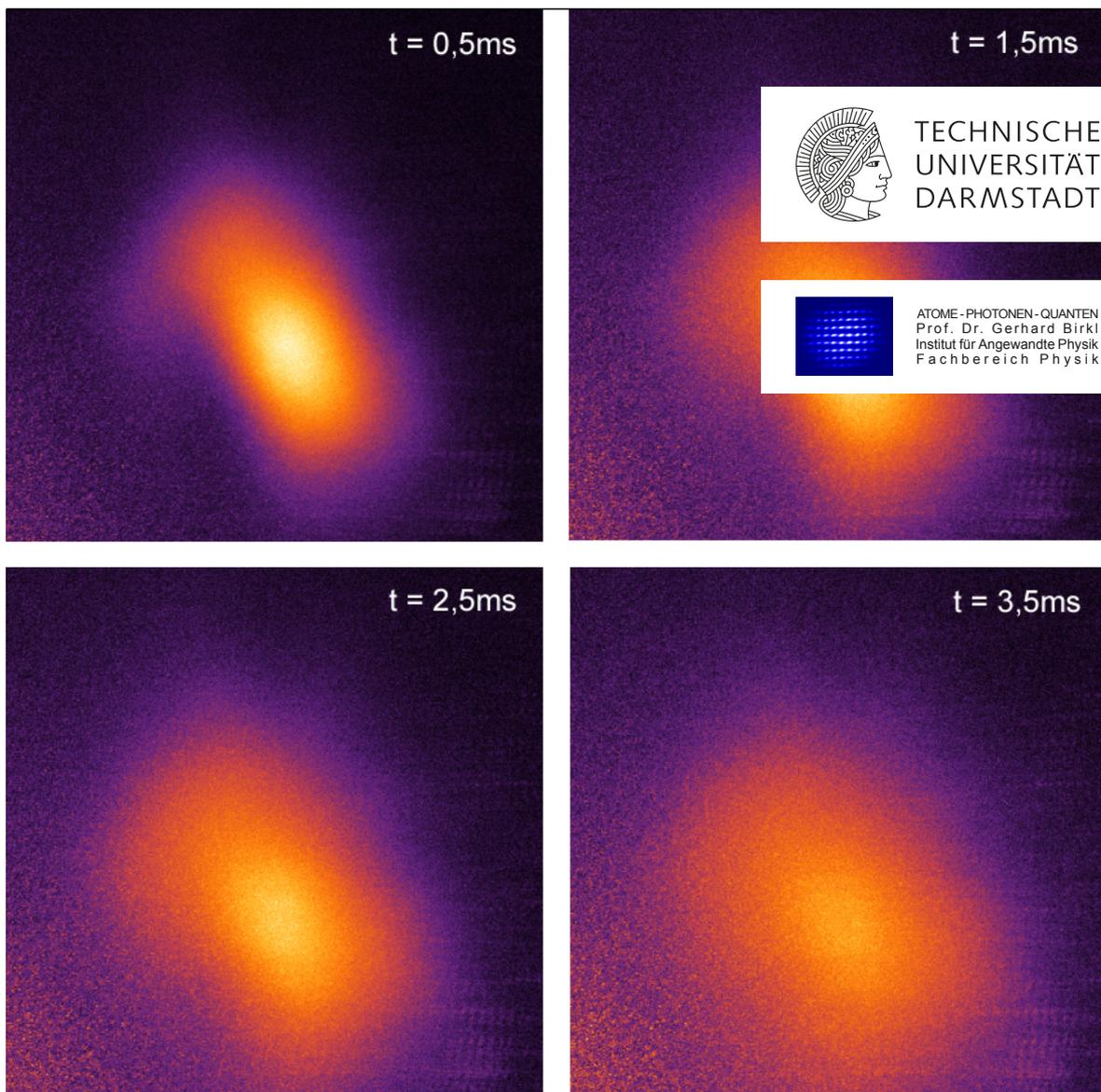

Fortgeschrittenenpraktikum - Abteilung A

4.3 Kühlen und Fangen von Rubidiumatomen in einer magneto-optische Falle

Cooling and trapping of Rubidium atoms in a magneto-optical trap

Versuchsanleitung

Stand März 2025



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Aufgaben	3
2.1	Vorbereitungsaufgaben	3
2.2	Präsenzaufgaben	5
2.3	Auswertungsaufgaben	5
3	Literaturempfehlung	6
4	Überblick über den Versuchsaufbau	7
5	Wichtige Bauteile	10
5.1	Akustooptischer Modulator (AOM)	10
5.2	Verzögerungsplatten	11
5.3	Polarisationsstrahlteilerwürfel (PST)	12
5.4	Photodiode	12
5.5	Ionen-Getter-Pumpe	13
5.6	Regelung	14
6	Theorie zur Laserstabilisierung	16
6.1	Aufbau der Laserstabilisierung	16
6.2	Verwendete Lasertypen	16
6.3	Dopplerfreie Sättigungsspektroskopie	17
6.4	Offsetlock	17
7	Theorie zur MOT	19
7.1	Optisches Kühlen	19
7.1.1	Spontankraft	19
7.1.2	Optische Melasse	20
7.2	Fangen der Atome	21
7.3	Rubidium-MOT	24
8	Fragenkatalog	27
8.1	Vorbereitungsfragen	27
8.2	Fakultative Fragen zum Selbsttest	27

Warnhinweise und Spielregeln

Die folgenden Warnhinweise dienen der eigenen Sicherheit und sollten daher unbedingt beachtet werden.

- Während der gesamten Versuchsdurchführung ist eine geeignete Laserschutzbrille zu tragen!
- Achtung, Laserlicht! Die Laser haben zusammen überlagert etwa eine Gesamtleistung von 15 mW, was bei einer Wellenlänge von 780 nm ausreicht, um die menschliche Netzhaut nachhaltig zu schädigen. Beim Justieren darf daher kein Schmuck getragen werden und die Augen dürfen sich nie auf Strahlhöhe befinden. Es sind unbedingt die Richtlinien zum Laserschutz auf der letzten Seite dieser Anleitung zu beachten.

Weitere Informationen sind online verfügbar:

[IAP Laser- und Arbeitsschutz](#)

- Achtung, Hochspannung! Die Ionen-Getter-Pumpe wird mit einer Hochspannung von 7 kV betrieben. Die Pumpe und das Hochspannungskabel sollten daher mit dem nötigen Respekt behandelt werden.
- Achtung, Magnetfelder! Von der Ionen-Getter-Pumpe gehen hohe Magnetfelder aus. Die Warnhinweise an der Pumpe sind daher unbedingt zu beachten.

Zu den Spielregeln.

- Beide Praktikumpartner müssen gleichwertig und zu allen Themen auf den Versuch vorbereitet sein.
- Weitere Informationen können den [FP-Spielregeln](#) entnommen werden.

1 Einleitung

Betrachtet man die Themen der aktuellen Grundlagenforschung, so erkennt man, dass ein besonderer Fokus auf Präzisionsmessungen mit ultrakalten Atomen gerichtet ist. Zu diesen Experimenten zählen zum Beispiel die Untersuchung von kalten Stößen, die Realisierung von Atomuhren sowie die Quanteninformationsverarbeitung und die Erzeugung eines Bose-Einstein-Kondensats.

Das Kühlen bzw. Vorkühlen dieser Atome erfolgt dabei stets durch den Einsatz von Laserlicht. Eine spezielle Art zum Kühlen und Fangen von neutralen Atomen ist die magneto-optische Falle (engl.: magneto-optical trap, kurz: MOT). In diesem Praktikumsversuch soll eine MOT für ^{85}Rb -Atome gefangen werden. Ziel ist es zu messen, welche Temperatur die Atome in der MOT schließlich haben.

Die Falle besteht, wie ihr Name schon sagt, aus zwei wesentlichen Komponenten: der optischen und der magnetischen.

Während es sich bei der magnetischen Komponente um ein Quadrupolfeld handelt, besteht die optische Komponente aus Laserlicht sehr genau definierter Frequenzen. Da die Wellenlänge des Lichts auf wenige Pikometer genau stabil gehalten werden muss, ist die Stabilisierung der Laser eine wesentliche Voraussetzung zur Erzeugung einer MOT. Daher teilt sich dieser Versuch in zwei Teile:

Im ersten Teil soll auf die beiden Diodenlaser sowie deren Stabilisierungen eingegangen werden. Im Versuch werden zwei verschiedene Arten der Stabilisierung eingesetzt, die es einzustellen und zu vermessen gilt. Im zweiten Teil des Versuchs wird eine MOT erzeugt und vermessen. Dabei sollen Daten zur Bestimmung der Laderate der Falle und die Temperatur der gefangenen Atome ermittelt werden.

In [Kapitel 4](#) wird ein Überblick über den gesamten Versuchsaufbau gegeben.

Zuvor sollen jedoch im folgenden [Kapitel 2](#) die benötigten **Voraussetzungen zur Versuchsteilnahme** und die Präsenzaufgaben spezifiziert werden.

2 Aufgaben

Die Aufgaben gliedern sich zum einen in die **Vorbereitungsaufgaben**, welche vor der Versuchsdurchführung zu Hause zu bearbeiten sind, die **Präsenzaufgaben**, welche am Tag der Versuchsdurchführung zu erledigen sind und die **Auswertungsaufgaben**, welche nach der Versuchsdurchführung wiederum zu Hause zu erledigen sind.

Hinweis: Bringen Sie zur Versuchsdurchführung einen **USB-Stick** mit, um die während der Versuchsdurchführung gemessenen Daten zur Auswertung mitnehmen zu können.

2.1 Vorbereitungsaufgaben

Zur Vorbereitung auf den Versuch sind einerseits die in 1. bis 4. aufgelisteten Themen zu erarbeiten. Andererseits soll sich mit den im Anschluss aufgeführten Fragen zu beschäftigen werden, sodass diese im Vorbereitungsgespräch am Versuchstag beantwortet werden können.

1. **Versuchsaufbau:** Übersicht über den gesamten Aufbau, Laserstabilisierung, MOT
2. **Wichtige Bauteile:** Akustooptischer Modulator (AOM), Verzögerungsplatten ($\lambda/2$ -, $\lambda/4$ -Platten), Polarisationsstrahlteilerwürfel (PST), Photodiode, Ionen-Getter-Pumpe, PID-Regler
3. **Theorie Laserstabilisierung:** Diodenlaser mit externem Resonator, dopplerfreie Sättigungsspektroskopie, Offsetlock
4. **Theorie MOT:** Dopplerkühlung, Energieniveaustuktur ^{85}Rb , Quadrupolfeld, Sub-Dopplerkühlung

Anmerkung: Die Anleitung zum Versuch stellt eine Einführung in das Thema dar. Um die Vorbereitung zu erleichtern sind die unter 1. und 2. aufgeführten Punkte in der Anleitung in der zur Versuchsdurchführung hinreichenden Tiefe dargestellt. Hier muss keine zusätzliche Literatur zurate gezogen werden. Die unter 3. und 4. aufgeführten Themen werden hingegen lediglich andiskutiert. Zu deren Verständnis ist es *unerlässlich* zusätzliche Literatur durchzuarbeiten. Hierzu existiert eine [Literaturempfehlung](#). Insbesondere zum Thema der Subdopplerkühlung sei auf die Quellen v. und vi. hingewiesen.

Fragen:

In den jeweiligen Abschnitten finden Sie Fragen, die Sie zur Vorbereitung beantworten sollen (Frage 4.1 bis 7.1 (siehe unten)). In [Kapitel 8](#) finden Sie zudem einen Fragenkatalog mit zusätzlichen fakultativen Fragen, welchen Sie zur Überprüfung Ihres Vorbereitungsstandes nutzen können.

- **Frage 4.1:** Welchen Vorteil bietet es den Aufbau der MOT durch ein Glasfaserkabel von dem Aufbau der Laserstabilisierung zu trennen?

-
- **Frage 5.1:** Inwiefern ist die durch den AOM verursachte Frequenzverschiebung des Laserlichts in Bezug auf die Stabilisierung des Rückpump- und Kühllasers bzw. die an der MOT benötigte Frequenz relevant?
 - **Frage 5.2:** Zu welchem Zweck werden die in den schematischen Skizzen zur Laserstabilisierung und der MOT eingezeichneten Verzögerungsplatten jeweils verwendet?
 - **Frage 5.3:** Zu welchem Zweck werden die PST verwendet und warum kommen sie stets in Kombination mit einer $\lambda/2$ -Platte vor?
 - **Frage 6.1:** Durch welche Größen/Faktoren werden die Laserfrequenzen beeinflusst? Welche dieser Faktoren sind gewollt beziehungsweise ungewollt und wie können diese beseitigt werden?
 - **Frage 7.1:** Welche Elemente werden zur Erzeugung einer MOT benötigt? Wo wird das Licht in die drei Strahlen aufgeteilt? Wie verlaufen die Strahlen?

2.2 Präsenzaufgaben

- **Stabilisierung der Laser:** Zur Stabilisierung der Laser betrachten Sie zunächst das Spektroskopiesignal des Rückpumpasers und stabilisieren Sie diesen auf den Übergang $F = 2 \rightarrow F' = 1$. Betrachten Sie dazu das Spektroskopiesignal des Rückpumpasers und das zugehörige Dispersionssignal. Nehmen sie beide Signale mit Hilfe des digitalen Oszilloskops und der zugehörigen Computersoftware auf.
- **Spektroskopie des Kühllasers:** Durch Verschieben der Rubidiumdampfzelle in den Strahlengang des Kühllasers können Sie eine Spektroskopie an diesem durchführen. Nehmen Sie dieses Signal ebenfalls mit Hilfe des digitalen Oszilloskops auf.
- **Ladephase der MOT:** Nehmen Sie eine Messreihe zur Untersuchung der Ladephase der MOT auf und teilen Sie diese dazu in geeignete Zeitabschnitte ein.
- **Temperatur in der MOT:** Nehmen Sie eine geeignete Messreihe zur Bestimmung der Temperatur in der MOT auf.
- **Temperatur nach der Melassephase:** Nehmen Sie eine Messreihe zur Bestimmung der Temperatur nach der Melassephase auf.

2.3 Auswertungsaufgaben

- **Spektroskopie:** Stellen Sie die aufgenommenen Spektroskopiesignale des Rückpump- (inkl. Dispersionssignal) und Kühllasers graphisch dar und diskutieren Sie das Ergebnis.
- **Ladephase:** Betrachten Sie Ihre aufgenommene Messreihe zur Ladephase der MOT. Stellen Sie deren zeitlichen Verlauf dar und approximieren Sie diesen mit einer geeigneten Funktion. Beschreiben Sie das Ergebnis. (Zur Charakterisierung des Ladezustandes bietet es sich an, die Gesamtintensität der aufgenommenen Bilder zu betrachten - also die Summe über alle einzelnen Pixelwerte.)
- **Temperatur in der MOT:** Bestimmen Sie mit Hilfe Ihrer aufgenommenen Messreihe die Temperatur in der MOT. Dazu soll zunächst die mittlere Geschwindigkeit der Atome aus den gewonnenen Daten ermittelt werden.
- **Temperatur nach der Melassephase:** Bestimmen Sie analog zur Temperatur in der MOT nun die Temperatur nach der Melassephase. Erklären Sie auftretende Abweichungen im Vergleich zu der Temperatur der Atome in der MOT.

3 Literaturempfehlung

- i. D. Meschede. *Optik, Licht und Laser*. Vieweg-Teubner, 2008.
- ii. F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch, and H. Schmidt. *Optik für Ingenieure - Grundlagen (3. Auflage)*. Springer, 2005.
- iii. W. Demtröder. *Laserspektroskopie - Grundlagen und Techniken*. Springer 2007. Seiten 328 - 335
- iv. H. Metcalf and P. van der Straten. *Laser cooling and trapping*. Springer 1999. Kapitel 3, 4.1, 7, 8, 11.4
- v. W. D. Philips. *Laser cooling and trapping of neutral atoms (Noble Prize Lecture)*. Nobel Prize Lecture 1997. Seiten 218 - 226
- vi. J. Dalibard and C. Cohen-Tannoudji. *Laser cooling below the Doppler limit by polarization gradients: simple theoretical models*. Journal of the Optical Society of America B (1989)

4 Überblick über den Versuchsaufbau

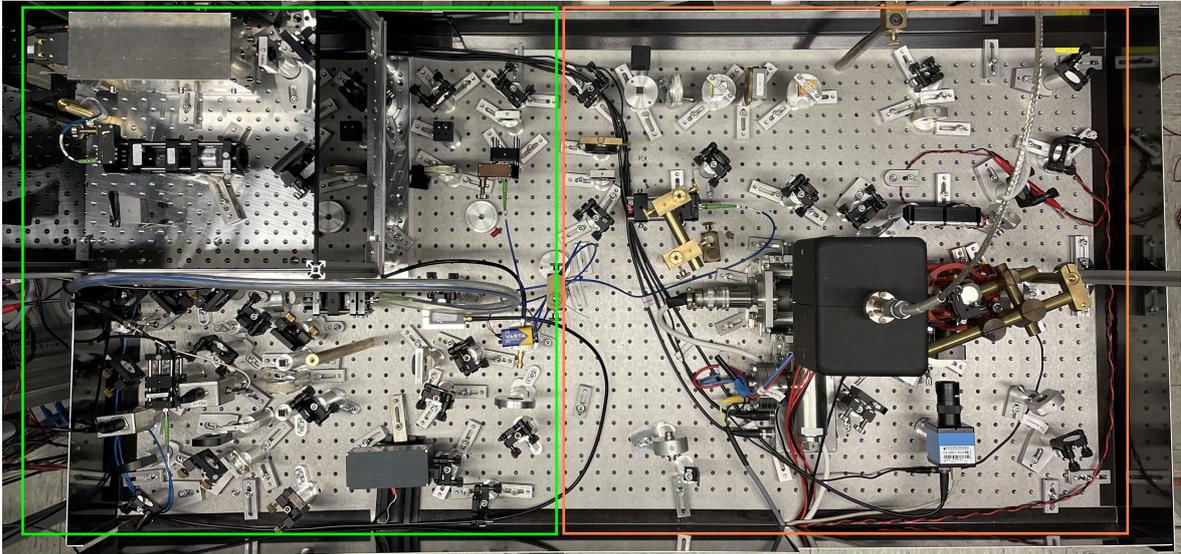


Abb. 4.1: Übersicht über den Versuchsaufbau. Die linke grün markierte Seite dient der Bereitstellung und Stabilisierung des Lichtes, das dann auf der rechten orange markierten Seite für die MOT benötigt wird.

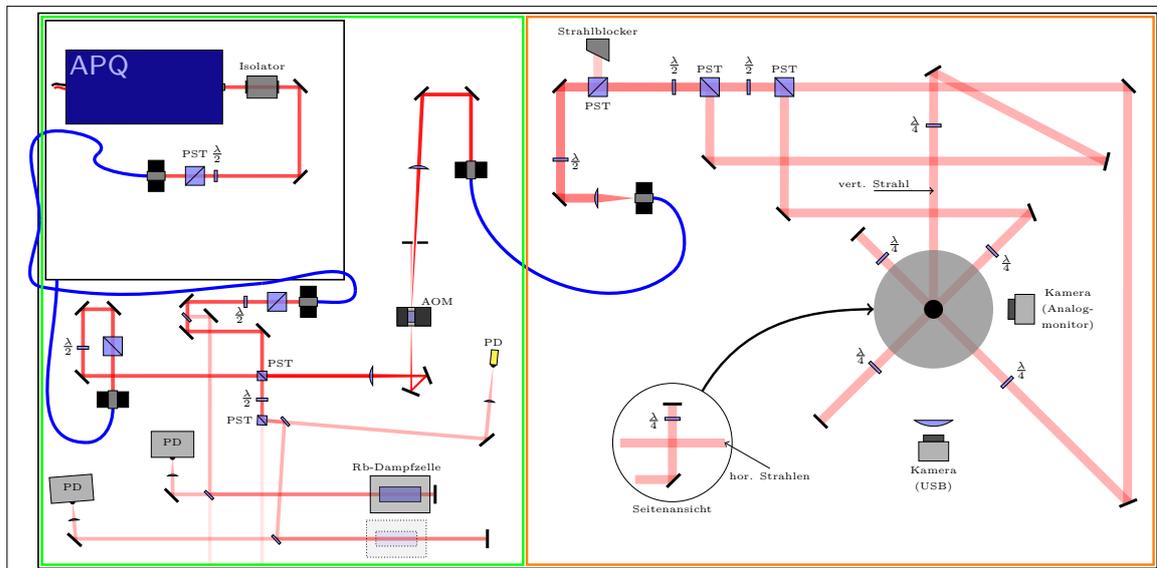


Abb. 4.2: Schematische Skizze des Aufbaus.

Ziel dieses Kapitels ist es, einen Überblick über den gesamten Versuchsaufbau zu schaffen. Anschließend soll näher auf die beiden wesentlichen Teile, die Laserstabilisierung und die

MOT eingegangen werden. Es empfiehlt sich dieses Kapitel als Lageplan ähnlich dem eines Reiseführers zu verstehen und diesen als Ausgangspunkt zur Beschäftigung mit den einzelnen „Sehenswürdigkeiten“ zu verwenden.

In [Abbildung 4.1](#) ist auf der linken Seite ([grün](#) umrandet) der Aufbau zur Laserstabilisierung und auf der rechten Seite ([orange](#) umrandet) der Aufbau zur MOT zu erkennen. In [Abbildung 4.2](#) ist der Aufbau zur besseren Übersichtlichkeit zusätzlich als schematische Skizze dargestellt. In [Abbildung 4.3](#) ist das Rack zu sehen, in dem die Elektronik zur Versorgung und Stabilisierung der Laser untergebracht ist. Um den Versuch zu verstehen und möglichst viel aus

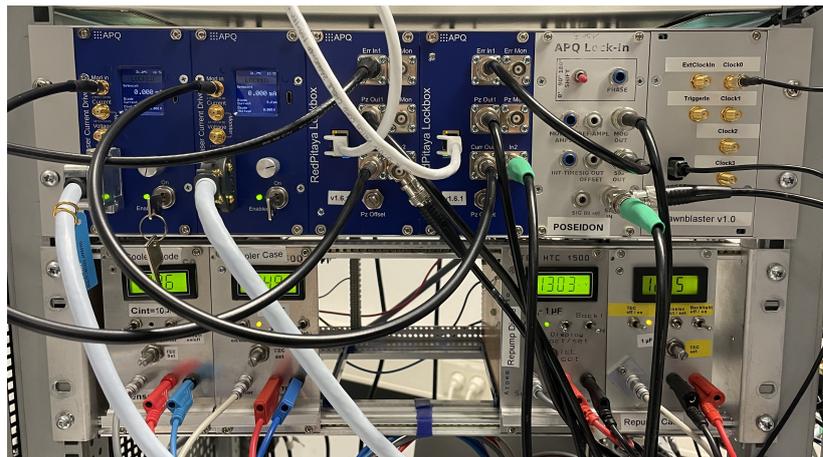


Abb. 4.3: Ausschnitt des Racks inklusive der Stromtreiber und Lockboxen zur Frequenzstabilisierung der Laser. Weiterhin sind die Controller für die temperaturstabilisierung der Laser zu sehen.

der Durchführung mitzunehmen, sollten Sie sich schon während der Vorbereitung intensiv mit der Realisierung des Versuchsaufbaus vertraut machen. Die Steuerung der einzelnen Phasen

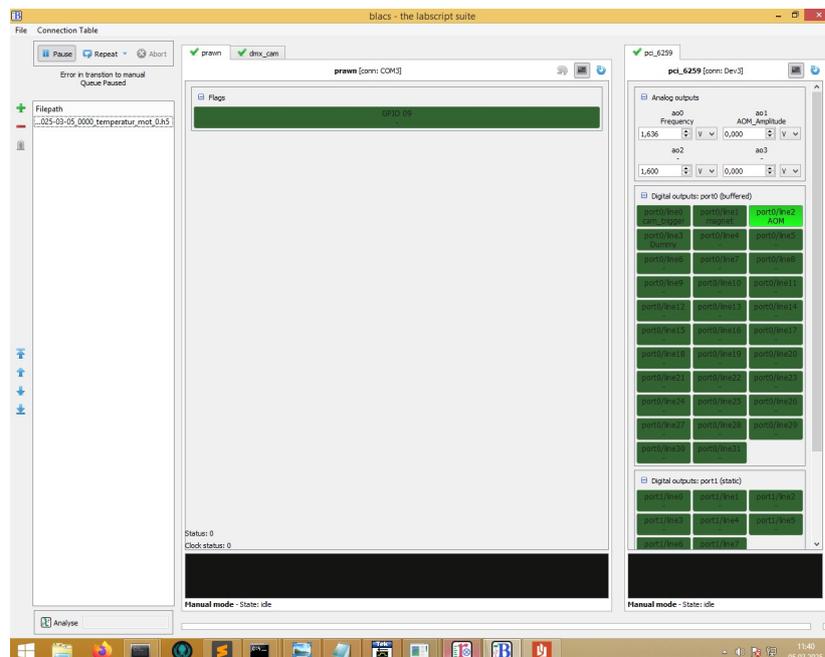


Abb. 4.4: Beispielhafte Benutzeroberfläche zur Experimentensteuerung mittels *labscript*

des Versuchsablaufs findet mittels *labscript* statt. Die Ansteuerung der einzelnen steuerbaren Elemente des Versuchs erfolgt über *BLACS*, während über den *runmanager* vollständige Experimentabläufe geladen werden. Die Auswertung beziehungsweise Weiterverarbeitung der Daten erfolgt mittels *lyse*. Die Benutzeroberfläche ist beispielhaft in [Abbildung 4.4](#) dargestellt.

5 Wichtige Bauteile

5.1 Akustooptischer Modulator (AOM)

Ein akustooptischer Modulator besteht im Wesentlichen aus einem Kristall, an dessen einer Seite ein Piezoelement zur Erzeugung von Schallwellen und an der anderen Seite ein Schallabsorber zur Unterdrückung von Reflexionen oder stehenden Wellen angebracht ist (siehe [Abbildung 5.1](#)). Die durch den Kristall propagierende Schallwelle, welche durch eine mechanische Schwingung des Piezoelements hervorgerufen wird, verursacht in diesem periodische Dichteschwankungen, welche eine ebenfalls periodische Variation der Brechzahl im Kristall zur Folge hat. [1] Diese Modulation wirkt für das einfallende Licht wie ein bewegtes optisches Gitter, an welchem Beugung des einfallenden Lichtes stattfindet. Dabei kommt es beim Betrieb im sogenannten Bragg-Regime lediglich zur Ausbildung der ersten Beugungsordnung. An dieser kann außerdem eine Frequenzverschiebung entsprechend der Schallfrequenz beobachtet werden. Um dies zu verstehen, kann das Phänomen entweder klassisch oder im Teilchenbild betrachtet werden. Abhängig von der Betrachtungsweise kann der Effekt entweder mit Hilfe des Dopplereffekts durch das sich in Relation zum einfallenden Licht „bewegende Gitter“ oder unter Anwendung der Impuls- und Energierhaltung auf die wechselwirkenden Photonen und Phononen beschrieben werden. Bei Phononen handelt es sich um Quasiteilchen, mit welchen die den Kristall durchlaufenden Schallwellen beschrieben werden können. [2] Im Versuch wird der AOM im Wesentlichen als Schalter verwendet, um das Laserlicht zur MOT hin gezielt an- und abschalten zu können.

Frage 5.1. Inwiefern ist die durch den AOM verursachte Frequenzverschiebung des Laserlichts in Bezug auf die Stabilisierung des Rückpump- und Kühllasers bzw. die an der MOT benötigte Frequenz relevant?

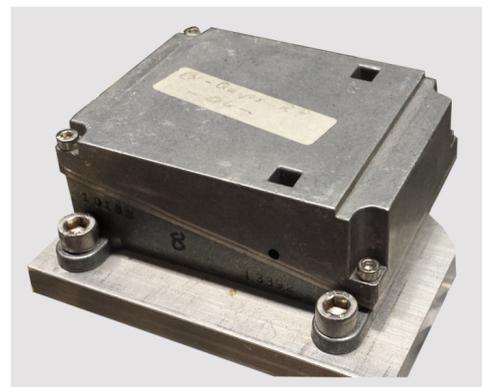
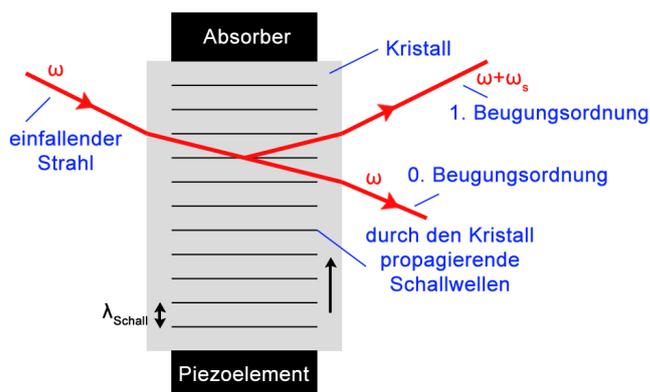


Abb. 5.1: Schematischer Aufbau eines AOMs mit skizziertem Strahlenverlauf des Laserlichts (links) und Darstellung des AOM-Gehäuses aus dem Versuchsaufbau (rechts)

5.2 Verzögerungsplatten

Verzögerungsplättchen funktionieren nach dem Prinzip der doppelbrechender Kristalle und spielen sowohl bei der Erzeugung als auch bei der Analyse verschiedener Polarisationsformen des Lichtes eine zentrale Rolle. Dabei liegt die optische Achse des Kristalls parallel zur Eintrittsfläche beziehungsweise senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des einfallenden Lichts. Aus diesem Grund verlaufen sowohl der außerordentliche als auch der ordentliche Strahl, in welche der einfallende Lichtstrahl innerhalb des Materials durch Projektion auf die optische Achse zerlegt wird, parallel durch den Kristall. Allerdings besitzen die beiden Strahlen dort unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Aufgrund der Dicke des Kristalls und der damit verbundenen optischen Weglänge, welche beide Strahlen innerhalb des Kristalls zurücklegen, ergibt sich beim Austritt eine Phasendifferenz zwischen dem außerordentlichen und ordentlichen Anteil des Strahls. Dabei ist jedoch beispielsweise die einer Phasendifferenz von $\pi/2$ entsprechende Plättchendicke meist zu gering, um sie technisch realisieren zu können. Dies kann entweder dadurch behoben werden, dass auf die gewünschte Phasendifferenz ein Vielfaches von 2π addiert wird, um so eine größere Dicke zu erzielen, oder es werden zwei Plättchen mit gekreuzten optischen Achsen für den ordentlichen und außerordentlichen Strahl mit der gewünschten Gangdifferenz kombiniert. Falls nun linear polarisiertes Licht auf das Verzögerungsplättchen trifft, kann beispielsweise zirkular, elliptisch, oder wieder linear polarisiertes Licht mit veränderter Polarisation erzeugt werden. [1]

Das Prinzip einer Verzögerungsplatte ist in [Abbildung 5.2](#) am Beispiel einer $\lambda/4$ -Platte dargestellt.

Frage 5.2. Zu welchem Zweck werden die in den schematischen Skizzen zur Laserstabilisierung und der MOT eingezeichneten Verzögerungsplatten jeweils verwendet?

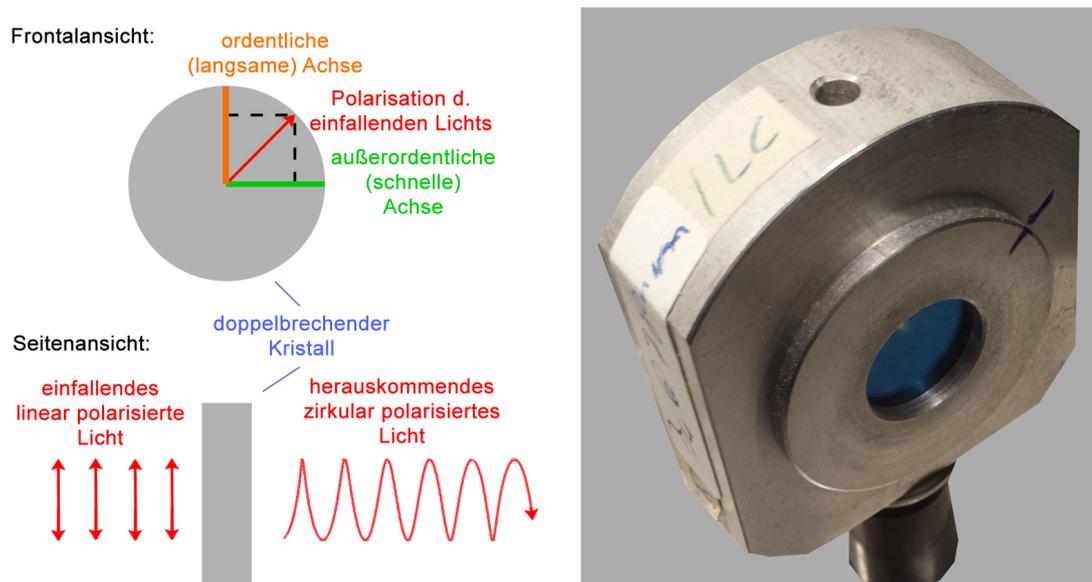


Abb. 5.2: Schematische Skizze zur Funktion einer $\lambda/4$ -Platte (links) und Darstellung einer der im Versuch verwendeten $\lambda/4$ -Platte (rechts)

5.3 Polarisationsstrahlteilerwürfel (PST)

Zur Realisierung von Strahlteilerwürfeln gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Eine dieser Möglichkeiten beruht auf dem zuvor diskutierten Prinzip der Doppelbrechung. Hier wird der unterschiedliche Brechungsindex für die beiden Polarisationsrichtungen verwendet, um die Bedingungen für Totalreflexion für eine dieser Komponenten zu erfüllen.

Es gibt allerdings auch andere Möglichkeiten Strahlteilerwürfel herzustellen. Diese zweite Realisierungsmöglichkeit entspricht dem Aufbau der im Versuch verwendeten Strahlteilerwürfel (siehe Abbildung 5.3).

Statt doppelbrechenden Kristallen werden hier Dünnschichtpolarisatoren verwendet. Der zugehörige Aufbau besteht aus einem Würfel aus isotropem Glas, welcher diagonal aufgeschnitten wird. Zwischen die beiden entstandenen Prismen wird ein Dünnschichtpolarisator eingebracht, bevor alles wieder miteinander verkittet wird. Dieser besteht, ähnlich einem Bragg-Spiegel, aus vielen dünnen dielektrischen Schichten, welche ein unterschiedliches Reflexionsvermögen für die beiden betrachteten Polarisationsrichtungen besitzen (siehe Abbildung 5.3). Wählt man die Schichtdicke so, dass sich die an den einzelnen Schichten reflektierten (s-polarisierten) Anteile konstruktiv überlagern, hat man die Bedingungen für eine erfolgreiche Polarisationsstrennung erfüllt. [3]

Frage 5.3. Zu welchem Zweck werden die PST verwendet und warum kommen sie stets in Kombination mit einer $\lambda/2$ -Platte vor?

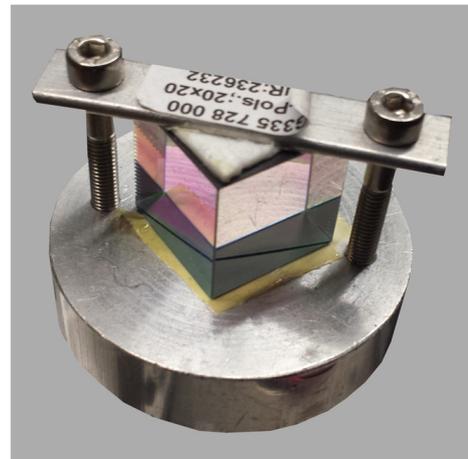
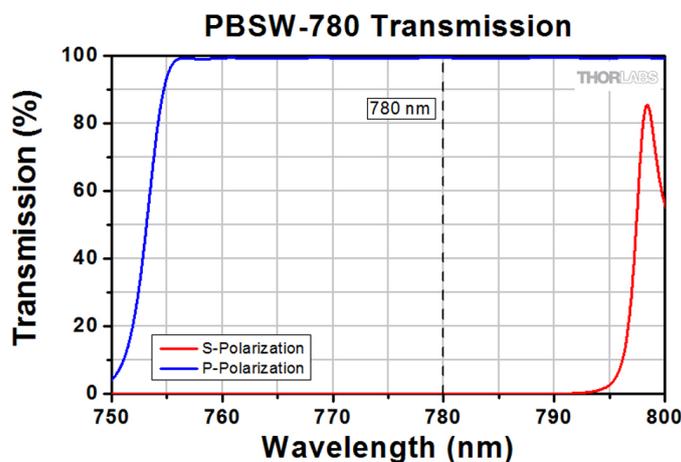


Abb. 5.3: Reflektivität in Abhängigkeit von der Wellenlänge für s- und p-Polarisation (links) [4] und Darstellung eines im Versuch verwendeten Strahlteilerwürfels (rechts)

5.4 Photodiode

In diesem Abschnitt soll kurz auf den Aufbau und das Funktionsprinzip einer Photodiode eingegangen werden, da diese sowohl zur Aufnahme des Spektroskopiesignals des Rückpump- und Kühllasers als auch zur Aufnahme des Schwebungssignals für den [Offsetlock](#) zur Stabilisierung des Kühllasers verwendet wird. Dies soll am Beispiel einer pin-Photodiode erfolgen.

Diese besteht aus einem n-dotierten Halbleiter, der un- oder sehr schwach dotierten i-Schicht, welche zur Vergrößerung der Raumladungszone führt und einem p-dotierten Halbleiter (siehe [Abbildung 5.4](#)). Durch Rekombination der Elektronen des n-dotierten Halbleiters mit den Löchern des p-dotierten Halbleiters kommt es zur Ausbildung einer Raumladungszone, bis die entstehende Diffusionsspannung ein weiteres Eindringen der jeweiligen Ladungsträger in das andere Gebiet verhindert. Wird nun die Diode mit Licht bestrahlt, kommt es bei der Absorption von Photonen zur Ausbildung von Elektron-Loch-Paaren, welche im elektrischen Feld der Raumladungszone (in der i-Schicht) voneinander getrennt werden. Diese Ladungsträger fließen als messbarer Photostrom über die Kontakte ab. Die p-Schicht der Diode ist hier vergleichsweise dünn ausgeführt, damit in dieser möglichst wenig Licht absorbiert wird und dieses ungehindert in die i-Schicht gelangen kann, um die dort benötigten Elektron-Loch-Paare zu erzeugen.

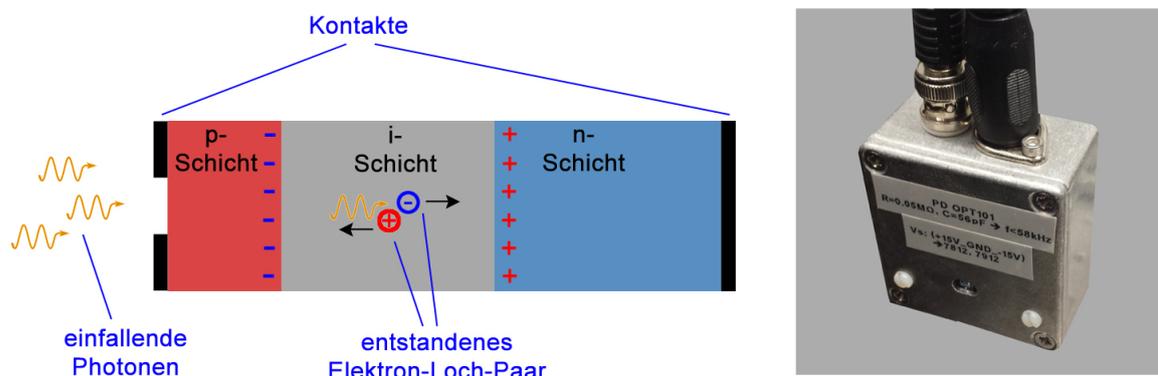


Abb. 5.4: Aufbau einer pin-Photodiode (links) und Darstellung einer im Versuch verbauten Version (rechts).

5.5 Ionen-Getter-Pumpe

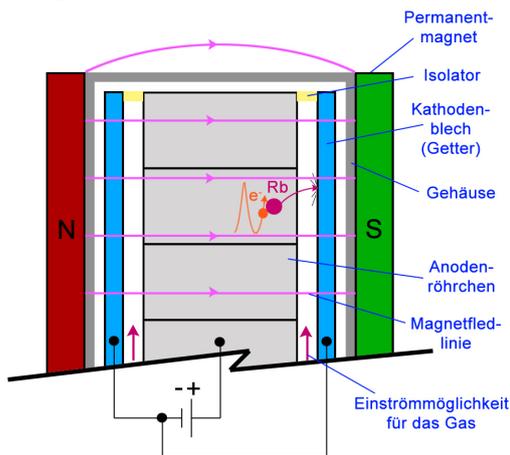
Eine wichtige Rolle für den Versuch spielt die Ionen-Getter-Pumpe, da diese zur Erzeugung und Aufrechterhaltung des für die Realisierung der MOT benötigten Vakuums verwendet wird. Dementsprechend ist die Pumpe auch dauerhaft in Betrieb, um die Leckrate des Systems zu kompensieren. Der etwas komplexere Aufbau der Ionen-Getter-Pumpe lässt sich in mehrere benötigte Komponenten zerlegen. Der Hauptteil der Pumpe besteht aus vielen aneinander geschweißten Metallröhrchen, welche sich zwischen zwei äußeren Blechen befinden (siehe [Abbildung 5.5](#)). Zwischen den Röhrchen und den Blechen existiert ein kleiner Spalt, welcher einerseits dem Gas erlaubt in die Röhrchen einzuströmen und andererseits zur elektrischen Isolation (in Kombination mit Keramikisolatoren) zwischen Röhrchen und Blechen dient. Nun wird zwischen den Blechen (Kathoden) und den Röhrchen (Anode) eine Hochspannung angelegt, wobei die Bleche auf gleichem Potential sind. Dadurch wird eine Elektronenwolke erzeugt. Durch zwei von außen angebrachte Permanentmagnete und das daraus resultierende Magnetfeld werden die freien Elektronen auf eine Spiralbahn gezwungen.

Treffen diese nun auf Atome des eingeströmten Gases (hier Rubidium) kommt es zu einer Stoßionisation dieser Atome. Die zurückbleibenden positiven Ionen werden durch das elektrische Feld in Richtung Kathode beschleunigt. Auf ihrem Weg zur Kathode besteht die Möglichkeit, dass sie durch Stöße mit neutralen Atomen weitere Ionen erzeugen. Im Idealfall treffen

die Ionen mit hoher kinetischer Energie auf das Kathodenmaterial, dass sie durch den Aufprall „aufwirbeln“, und so dafür sorgen, dass stets frisches Material an der Oberfläche zur Verfügung steht. Letztendlich gehen sie nach dem Aufprall eine chemische Bindung mit dem Kathodenmaterial ein und stehen dadurch nicht mehr im gasförmigen Zustand bereit.

ACHTUNG: Für die Vorbereitung muss nur das grundlegende Prinzip der Pumpe verstanden sein. Die genauen Ausführungen der technischen Details sind für besonders Interessierte gedacht.

Längsschnitt:



Anordnung der Röhrchen im Querschnitt:

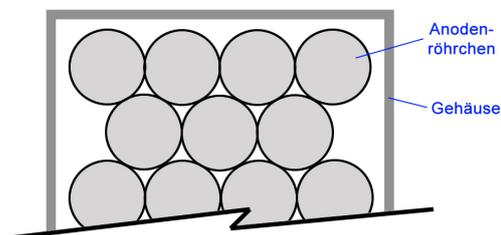


Abb. 5.5: Schematische Skizze des Aufbaus einer Ionen-Getter-Pumpe (links) und Darstellung der im Versuch verwendeten Ionen-Getter-Pumpe (rechts)

5.6 Regelung

Zur Stabilisierung der Frequenz beider Laser werden im Versuch PI-Regler verwendet. Drei der einfachsten und wichtigsten Regeleinrichtungen bei der Regelung einer Messgröße auf einen Sollwert sind der proportionale (P-), der integrierende (I-) und der differenzierende (D-) Regler. In realen Anwendungen werden häufig, so auch in diesem Versuch, Kombinationen dieser einzelnen Regelelemente verwendet.

Ziel eines Regelkreises ist es eine physikalische Größe x (die Regelgröße) unabhängig von wirkenden Störgrößen z auf einen gewählten Sollwert x_S zu stabilisieren. Um dies zu gewährleisten wird der Istwert der Regelgröße x_I (also der momentane tatsächliche Wert) mit dem Sollwert verglichen. Die Abweichung dieser beiden Größen voneinander (die Regelabweichung)

chung e) bestimmt abhängig von der Art des Reglers die Ausgabe der sogenannten Stellgröße y , durch deren Einfluss auf die Regelstrecke der Istwert verändert wird, um möglichst die Abweichungen vom Sollwert auszugleichen.

Der Proportionalregler (kurz P-Regler) ist der einfachste bekannte stetige Regler. Seine Ausgangsgröße y (Stellgröße) ist proportional zur Eingangsgröße e (Regelabweichung). Die Vorteile dieses Reglers liegen in seiner zuverlässigen Regelung und relativ schnellen Stellgeschwindigkeit, sofern der Proportionalitätsfaktor zur Regelung passend gewählt ist. Der entscheidende Nachteil des Reglers liegt jedoch darin, dass er eine mögliche bleibende Regelabweichung mit sich bringt. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die zur Regelabweichung e passende Stellgröße y über die Zeit konstant bleibt, weil sie eine zeitlich konstante Änderung des Istwertes genau kompensiert. In diesem Fall ist das System dann stabil geregelt, Ist- und Sollwert sind aber nicht identisch. Das heißt, dass eine Regelabweichung nur eingeschränkt, jedoch nicht vollständig beseitigt werden kann.

Dafür ist der Integralregler (kurz I-Regler) zuständig. Er gibt eine Stellgröße y aus, welche proportional dem zeitlichen Integral über die Regelabweichung e ist. Dadurch ist er in der Lage, auch kleine durch den P-Regler nicht beseitigte Abweichungen zu eliminieren. Dabei ist der I-Regler allerdings vergleichsweise langsam und würde als alleiniger Regler schwingendes Verhalten zeigen.

Ein differentieller Regler wird verwendet, um die Reaktionsgeschwindigkeit, speziell bei schnell entstehenden großen Abweichungen zu verbessern. Er zeichnet sich dadurch aus, dass er eine Stellgröße y ausgibt, die durch die Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße bestimmt wird. Er reagiert also auf den Differentialquotienten der Regelabweichung e . Offensichtlich ist der D-Regler in alleiniger Verwendung nicht sinnvoll, da er auf eine zeitlich konstante (auch sehr große) Regelabweichungen gar nicht reagiert.

Erst das Zusammenspiel dieser drei einzelnen Regeleinrichtungen in Hinblick auf ihr jeweiliges charakteristisches Verhalten führt zu den gewünschten positiven Eigenschaften eines PID-Reglers, wie er vielfach Anwendung findet. [5]

Bei der Frequenzstabilisierung im Versuch selbst wird der Einfachheit wegen ein PI-Regler verwendet, da die schnelle Reaktionszeit eines D-Anteils nicht benötigt wird. [Abbildung 5.6](#) zeigt das Schema eines PI Reglers, wie er im Versuch verwendet wird.

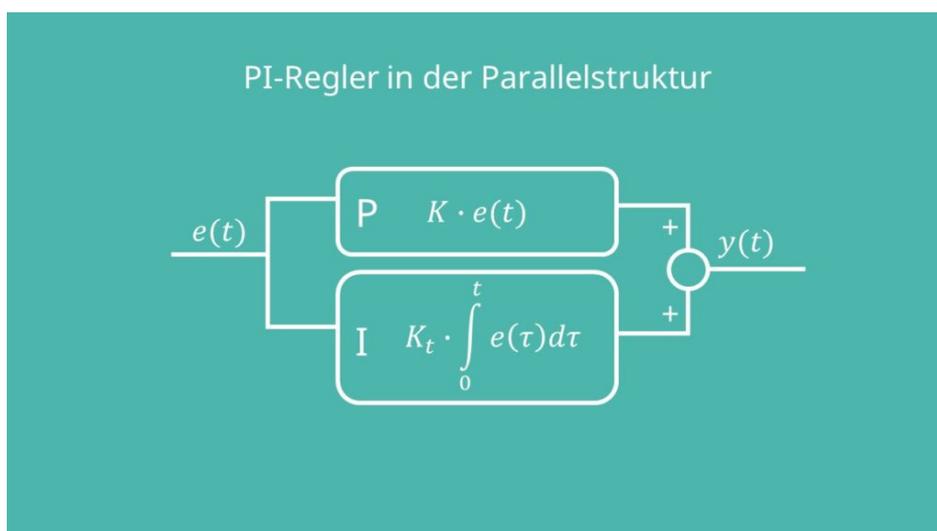


Abb. 5.6: Schematische Skizze der Funktionsweise eines PI-Reglers.

6 Theorie zur Laserstabilisierung

6.1 Aufbau der Laserstabilisierung

Das Lasersystem befindet sich auf der einen Hälfte einer optischen Tischplatte und wurde auf eine Strahlhöhe von 100 mm einjustiert. Im Wesentlichen besteht es aus den zwei Lasern und deren Stabilisierungen. Ein Laser wird durch eine dopplerfreie Sättigungsspektroskopie auf die Frequenz des Rückpumpübergangs stabilisiert. Er soll im Folgenden als Rückpumpplaser bezeichnet werden. Der zweite Laser soll auf die Frequenz des Kühlübergangs gelockt werden. Diese Stabilisierung erfolgt durch einen Offsetlock relativ zur Frequenz des Rückpump拉斯ers. Er soll im Folgenden Kühllaser genannt werden.

In [Abbildung 4.2](#) ist der Aufbau des Systems schematisch dargestellt. Das Licht des Rückpump拉斯ers durchläuft zuerst einen Faraday-Isolator, um Rückreflexe in den Laser zu unterdrücken, und wird dann in eine Glasfaser eingekoppelt. Nach der Auskopplung aus der Faser werden von dem Strahl des Rückpump拉斯ers etwa 4% für die Spektroskopie über eine geringfügig reflektierende Glasplatte abgezweigt.

Der transmittierte Hauptteil des Lichts trifft nach Durchlaufen einer $\lambda/2$ -Verzögerungsplatte auf einen polarisierenden Strahlteiler. In dem Strahlteiler wird der Strahl des Rückpump拉斯ers mit dem des Kühllasers überlagert.

Ein ausgehender Strahl bestehend aus Kühl- und Rückpumplicht wird durch einen akustooptischen Modulator (AOM) geleitet, um dann in die Glasfaser eingekoppelt zu werden, in der das Licht zur MOT geleitet wird. Der zweite ausgehende Strahl durchläuft wiederum eine $\lambda/2$ -Verzögerungsplatte und trifft auf einen zweiten, polarisierenden Strahlteiler.

Der s-polarisierte Anteil wird abgelenkt und mittels einer Linse auf eine schnelle Photodiode fokussiert. Das überlagerte Licht kann dort zur Stabilisierung des Kühllasers mittels eines Offsetlocks verwendet werden. Das Licht, das durch den zweiten Strahlteiler transmittiert, kann, indem die Rubidiumdampfzelle verschoben wird, ebenfalls für eine dopplerfreie Sättigungsspektroskopie des Kühllasers eingesetzt werden.

6.2 Verwendete Lasertypen

Zur Erzeugung des Lichts werden zwei Diodenlaser verwendet, deren Emissionswellenlänge mit Hilfe von Stromänderungen und Änderungen am externen Resonator beeinflusst werden kann.

Die Diodenlaser besitzen als frequenzselektives Element einen Interferenzfilter. Durch Längenänderung des externen Resonator (hier: ein Auskoppelspiegel auf einem Piezokristall) und über den Strom durch die Laserdiode kann die emittierte Frequenz durchgestimmt werden.

Frage 6.1. *Durch welche Größen/Faktoren werden die Laserfrequenzen beeinflusst? Welche dieser Faktoren sind gewollt beziehungsweise ungewollt und wie können diese beseitigt werden?*

6.3 Dopplerfreie Sättigungsspektroskopie

Die Frequenz, auf welche der Rückpumpplaser stabilisiert werden soll, muss, da es sich um eine absolute Stabilisierung handelt, klar definiert sein. Da der Laser einen atomaren Übergang von ^{85}Rb anregen soll, liegt es nahe, mit Hilfe einer dopplerfreien Sättigungsspektroskopie einen atomaren Übergang von ^{85}Rb als Referenz zu verwenden.

Dazu wird ein Teil des Laserlichts durch eine mit Rubidiumdampf gefüllte Glaszelle gestrahlt und anschließend in sich selbst zurückreflektiert. Der Strahl trifft, nachdem er auf dem gleichen Weg durch die Glaszelle zurück gestrahlt wurde, auf eine Photodiode (siehe [Abbildung 6.1](#)). Ist das Licht in seiner Frequenz gegenüber der Resonanz zu einem atomaren Übergang rotverstimmt (geringere Frequenz), so „sehen“ Atome, die sich mit der entsprechenden Geschwindigkeit dem Licht entgegen bewegen, aufgrund des optischen Dopplereffekts, eine Frequenz des Lichts, die der des Übergangs entspricht. Atome, die sich dem Strahl entgegen bewegen, können Photonen absorbieren. Aus der statistischen Verteilung der Bewegungsrichtung verschiedener Atome resultiert sowohl für den hinlaufenden als auch für den rücklaufenden Strahl Absorption. Analoges gilt für blauverstimmt (höhere Frequenz) Licht.

Hat das Licht jedoch die Resonanzfrequenz zu dem Übergang, so werden die Photonen nur von Atomen absorbiert, die bezüglich der Raumrichtung der Propagation des Lichtes ruhen. Dies hat auf Grund der Lebensdauer des daraus entstehenden angeregten Zustands eine Sättigung des Übergangs zu Folge. Durch den hinlaufenden Strahl angeregte Atome können keine Photonen des rücklaufenden Strahls absorbieren. Wird der Frequenzbereich des Lasers durchgestimmt, so ergeben sich an den Stellen des Absorptionsspektrums, an denen das Licht resonant zu einem atomaren Übergang ist, Einbrüche in der Absorption, so genannte „Lambdips“. Zur Stabilisierung des Lasers auf solch eine Resonanz wird das Absorptionssignal elektronisch abgeleitet. Dieses am Ausgang des Lock-in-Verstärkers anliegende (zur ersten Ableitung proportionale Signal), wird von der Regelbox (PI-Regler) zur Stabilisierung des Lasers verwendet. Dadurch kann die Frequenz der Laser auf einem solchen Lambdip „gehalten“ werden.

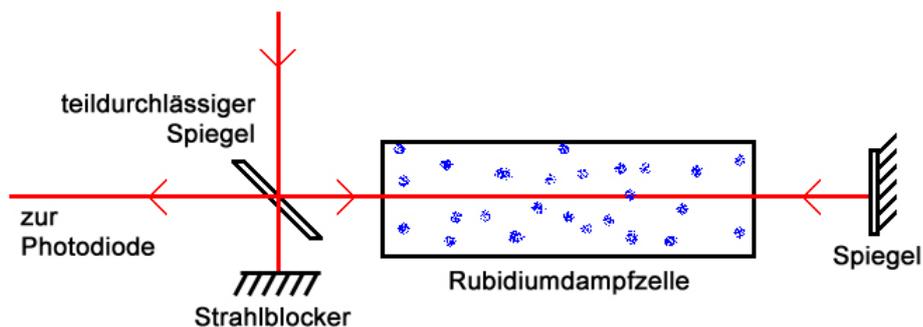


Abb. 6.1: Schematische Skizze des Aufbaus einer dopplerfreien Sättigungsspektroskopie.

6.4 Offsetlock

Der Kühllaser wird über eine relative Stabilisierung zu dem Rückpumpplaser auf seiner Frequenz gehalten. Dazu werden beide Strahlen überlagert und auf eine schnelle Photodiode

fokussiert. Sind die beiden Laser nur um wenige GHz zueinander verstimmt, so kann auf der Diode ein Schwebungssignal der Intensität aufgenommen werden. Die Schwebung kann nun elektronisch aufgenommen und ausgewertet werden. Im Versuch ist ein Frequenz-zu-Spannungs-Wandler verbaut. Im relevanten Arbeitsbereich geben diese eine Spannung aus, die proportional zur eingehenden Frequenz, hier von der Schwebung stammend, ist. Dieses Signal kann zur Stabilisierung des Kühllasers verwendet werden, wenn der Rückpumper selbst stabil auf der gewünschten Frequenz läuft.

7 Theorie zur MOT

Die Idee, mit Licht Atome zu kühlen, wurde erstmals 1975 formuliert und schon im gleichen Jahr nachgewiesen.[6] Eine magnetooptische Falle wurde 1987 erstmals realisiert und 1997 mit einem Nobelpreis ausgezeichnet.[7] Zum Verständnis einer MOT kann ihre Funktionsweise in zwei Aspekte unterteilt werden: einerseits das Kühlen, andererseits das Fangen der Atome.

7.1 Optisches Kühlen

Die Temperatur eines Ensembles von Atomen entspricht der gemittelten Bewegung der Atome. Da aufgrund der Erhaltung der Energie die Wärmeenergie $E_W = \frac{f}{2} k_B T$ der Bewegungsenergie $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2$ gleichgesetzt werden kann, folgt, dass die Temperatur mit $T = \frac{m v^2}{k_B f}$ quadratisch abhängig von der Geschwindigkeit ist.

Soll ein atomares Ensemble gekühlt werden, muss die relative Geschwindigkeit der einzelnen Atome zueinander verringert werden. Im Falle der Laserkühlung nutzt man hierzu die Wechselwirkung zwischen Atomen und elektromagnetischer Strahlung definierter Richtung, Frequenz und Polarisation.

7.1.1 Spontankraft

Ein Photon, dessen Energie der Energiedifferenz zwischen zwei Energieniveaus in einem Atom entspricht, kann von diesem Atom absorbiert werden. Die Spontankraft entsteht durch stimulierte Absorption von Photonen aus einem Laserstrahl und anschließende spontane Reemission. Beim Absorptionsvorgang wird sowohl der Impuls $\vec{p} = \hbar \vec{k}$ als auch die Energie $E = \hbar \omega$ des Photons an das Atom weitergegeben, wobei $|\vec{k}| = 2\pi/\lambda$ die Wellenzahl und $\nu = \omega/2\pi$ die Frequenz des Photons ist. Nach einer von Atom und Übergang abhängigen Lebensdauer τ werden die Photonen wieder unter spontaner Emission vom Atom abgegeben. Da der Impuls und die Energie Erhaltungsgrößen sind, sind ihre Beträge bei Absorption und Emission konstant. Das spontan emittierte Photon verleiht dem Atom einen Rückstoßimpuls. Die Wahrscheinlichkeit der Rückstoßrichtung ist über den gesamten Raum gleichverteilt. Somit mittelt sich die atomare Nettoimpulsänderung bei Emission statistisch zu Null.

Werden Photonen aus einer festen Richtung eingestrahlt, so addieren sich die Impulsüberträge bei Absorption derart, dass eine gerichtete Kraft auf das Atom entsteht (siehe [Abbildung 7.1](#)). Zum Kühlen von Rubidiumatomen werden elektronische Übergänge im Atomspektrum verwendet. Diese können vereinfacht als atomare Zweizustandssysteme im elektromagnetischen Strahlungsfeld einer festen Frequenz betrachtet werden. Die Besetzungszustände können durch Absorption und spontane Reemission der Photonen des Strahlungsfeldes beeinflusst werden. Eine quantenmechanische Beschreibung dieses Modells in Form von Bewegungsgleichungen bieten die optischen Blochgleichungen. Unter Betrachtung des Gleichgewichtszustandes der in diesen Gleichungen beschriebenen Dynamik, lässt sich die Streurate Γ_{sc} der

Photonen des Strahlungsfeldes an einem Zweiniveaunatom herleiten:

$$\Gamma_{\text{sc}} = \frac{\Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + \left(\frac{2\Delta}{\Gamma}\right)^2} \quad (7.1)$$

Hierbei ist Γ die Zerfallsrate des angeregten Zustandes des Zweiniveausystems, $\Delta = \omega_L - \omega_R$ ist die spektrale Verstimung des Strahlungsfeldes der Frequenz ω_L gegenüber der atomaren Resonanz ω_R und s_0 ist der Sättigungsparameter im Falle der Resonanz. Er stellt das Verhältnis aus der Intensität des Lichtes I und der Sättigungsintensität des atomaren Übergangs I_0 dar. Es gilt $s_0 = I/I_0$, wobei $I_0 = \frac{\pi h c \Gamma}{3 \lambda^3}$ gilt.

Wird das Licht aus einer festen Richtung auf ruhende Atome eingestrahlt, so ergibt sich unter Beachtung des bei jedem Streuvorgang auf das Atom übertragenen Photonenimpulses $\vec{p} = \hbar \vec{k}$ eine gerichtete Kraft, die Spontankraft

$$\vec{F}_D = \hbar \vec{k} \cdot \Gamma_{\text{sc}}. \quad (7.2)$$

Mit Gleichung (7.1) folgt

$$\vec{F}_D = \hbar \vec{k} \cdot \frac{\Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + \left(\frac{2\Delta}{\Gamma}\right)^2}. \quad (7.3)$$

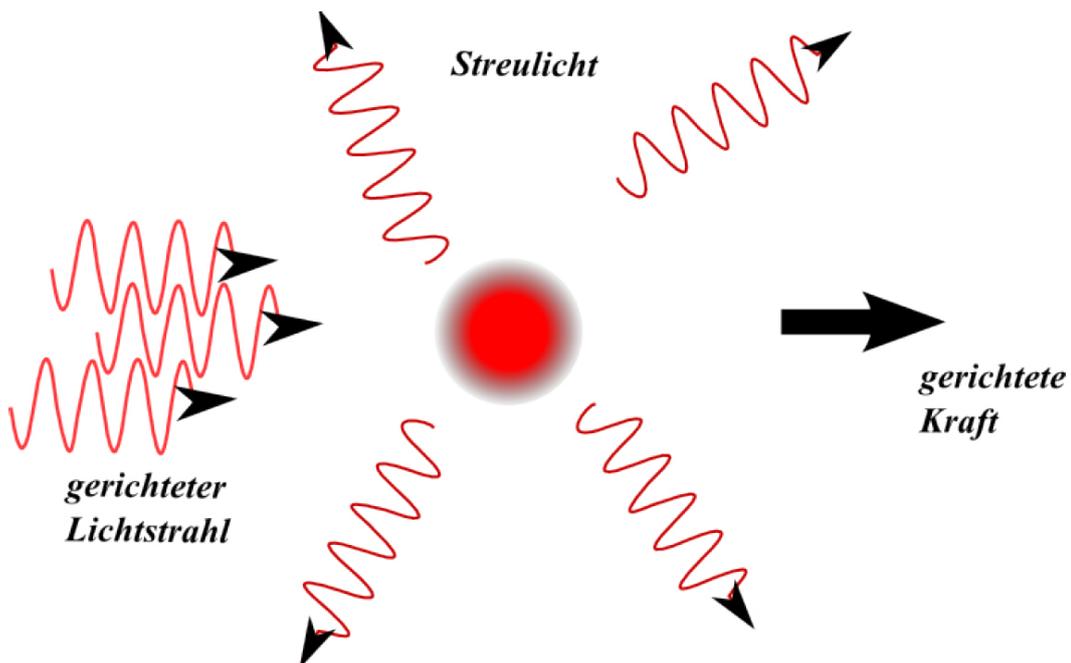


Abb. 7.1: Skizze zum Prinzip der Spontankraft.

7.1.2 Optische Melasse

Um eine Kühlung eines atomaren Gases zu realisieren, muss die auf die Atome wirkende Kraft abhängig vom Betrag und Richtung der atomaren Geschwindigkeiten sein. Eine entsprechende Konfiguration des Lichtfeldes wird durch sechs aus allen Raumrichtungen kommenden, gegenüber der atomaren Resonanz rotverstimmen Laserstrahlen implementiert.

Da die Kühlung entlang der drei Raumachsen voneinander unabhängig ist, wird der Einfachheit halber nur die Wirkung der Laserstrahlen in einer Dimension x erläutert. Ergänzt wird die Betrachtung der Kraftausübung eines Laserstrahls auf Atome aus [Abschnitt 7.1.1](#) durch das Hinzuziehen eines weiteren, diesem Strahl entgegengerichteten, Laserstrahls. Die auf ein Atom resultierende Gesamtkraft ergibt sich dann aus der Überlagerung der beiden in Richtung $-x$ und $+x$ wirkenden Kräfte F_{x-} und F_{x+} (aus Gleichung (7.3)) zu

$$F_{OM} = F_{x+} + F_{x-} \quad (7.4)$$

mit

$$F_{x+ \setminus x-} = \pm \hbar k \cdot \frac{\Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + \left(\frac{2\Delta_{OM\pm}}{\Gamma}\right)^2} \quad (7.5)$$

Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Kraft wird im Parameter

$$\Delta_{OM\pm} = \Delta \mp kv_x \quad (7.6)$$

berücksichtigt, wobei v_x die Geschwindigkeit der Atome in x -Richtung ist. Er korrigiert die Verstimmung des Lichtes um die Dopplerverschiebung, bedingt durch die Geschwindigkeit der Atome. Die Summe der beiden Kräfte ergibt sich nach Entwicklung für kleine Geschwindigkeiten unter Vernachlässigung der Terme ab der Ordnung $(kv/\Gamma)^4$ zu

$$F_{OM} = \frac{8\hbar k^2 \Delta s_0}{\Gamma \left[1 + s_0 + \left(\frac{2\Delta}{\Gamma}\right)^2\right]^2} \cdot v_x = -\beta v_x \quad (7.7)$$

Ist das Licht rotverstimmt ($\Delta < 0$), so sieht ein in positive x -Richtung fliegendes Atom das entgegenkommende Licht zur Resonanz hin dopplerverschoben, womit die Wahrscheinlichkeit der Absorption eines Photons zunimmt.

Es erfährt eine lineare rücktreibende Kraft ($\beta > 0$), die zur Abbremsung führt. Die Kraft auf das Teilchen ist genau dann maximal, wenn die Verstimmung des Lasers die Dopplerverschiebung kompensiert: $\Delta = kv_x$. Wegen der Analogie des Abbremsvorgangs (Gleichung (7.7)) zur viskosen Dämpfung in einer nahen Umgebung von $v_x = 0$, wird dieser Prozess **optische Melasse** genannt.

Auf Grund der zentralen Bedeutung des Dopplereffektes bei dieser Art von Kühlung spricht man von **Dopplerkühlung**. Die Temperatur der optischen Melasse ergibt sich aus dem Gleichgewicht aus Dopplerkühlung und Aufheizen des Ensembles durch die reemittierten Photonen. Die minimal erreichbare Temperatur, die mittels der Dopplerkühlung erreicht werden kann, das so genannte Dopplerlimit, beträgt

$$T_{\text{Doppler}} = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B}. \quad (7.8)$$

7.2 Fangen der Atome

Mit dem oben beschriebenen Verfahren lassen sich Atome kühlen. Jedoch stellt es noch keine Falle für Atome dar. Teilchen werden zwar im Impulsraum gefangen, haben aber im Ortsraum volle Bewegungsfreiheit, sodass sie nach einer gewissen Zeit aus der optischen Melasse herausdiffundieren können. Um Atome zu fangen, wird der oben beschriebene rotverstimmt Strahlenkonfiguration in ihrem Schnittpunkt ein inhomogenes magnetisches Feld überlagert

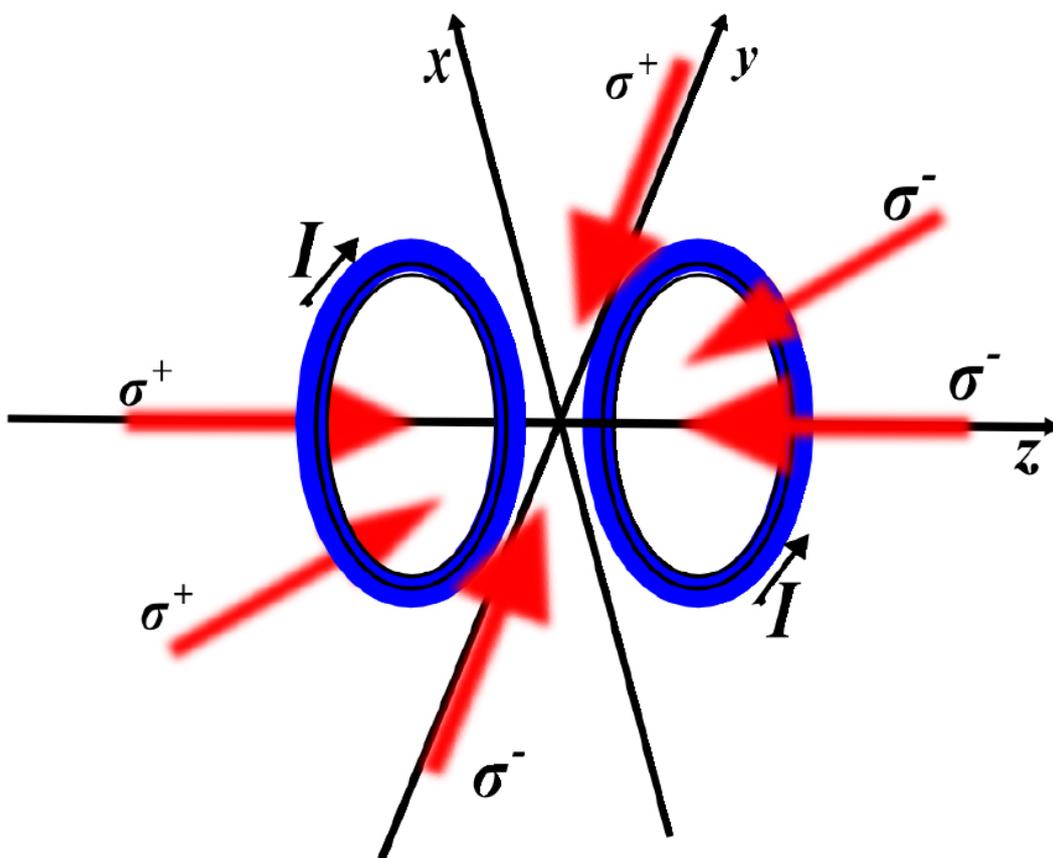


Abb. 7.2: Schematische Skizze der MOT: Durch das Spulenpaar wird ein Quadrupolfeld induziert, das im Mittelpunkt der MOT - dem Schnittpunkt der drei senkrecht zueinander stehenden Strahlenpaare - Null ist. Jedes antiparallele Strahlenpaar besteht aus einem σ^+ - und einem σ^- -polarisierten Strahl.

(siehe [Abbildung 7.2](#)). Dieses Feld (Quadrupolfeld) wird durch zwei stromdurchflossene Spulen in Anti-Helmholtz-Konfiguration erzeugt. Das Prinzip der so erzeugten magneto-optischen Falle (MOT) wird nachfolgend in einer Dimension x anhand eines atomaren Übergangs von einem Grundzustand $|\phi_{n,F=0,m_F}\rangle$ in einen angeregten Zustand $|\phi_{n,F'=1,m_{F'}}\rangle$ erklärt. n ist hierbei die Hauptquantenzahl, F bzw. F' ist der Gesamtdrehimpuls des entsprechenden Zustandes und m_F bzw. $m_{F'}$ die dazugehörige magnetische Quantenzahl. Diese hat für den Zustand $|\phi_{n,F=0,m_F}\rangle$ den Wert $m_F = 0$ und für den Zustand $|\phi_{n,F'=1,m_{F'}}\rangle$ die Werte $m_{F'} \in \{-1, 0, 1\}$. Zur Erklärung des Mechanismus muss die Polarisation der Strahlen, welche zirkular ist, mit betrachtet werden.

Das durch die Spulen hervorgerufene Quadrupolfeld kann in der Fallenmitte linearisiert und mit der Gleichung

$$B_x = B(x) = B_0 \cdot x \quad (7.9)$$

beschrieben werden, wobei B_0 der Gradient des Magnetfeldes in x -Richtung ist. Durch den Zeemaneffekt wird innerhalb des Zustandes $|\phi_{n,F'=1,m_{F'}}\rangle$ eine energetische Aufspaltung der drei magnetischen Unterzustände $m_{F'}$ um den Term ΔE hervorgerufen.

$$\Delta E = g_{F'} m_{F'} \mu_B B_x \quad (7.10)$$

Hierbei ist $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ das Bohrsche Magneton mit der Elektronenmasse m_e und $g_{F'}$ der Landé-Faktor des Zustands $|\phi_{n,F'=1,m_{F'}}\rangle$. **Abbildung 7.3** visualisiert die Energieverschiebung durch den Zeemaneffekt sowie den sich daraus ergebenden Mechanismus einer MOT. Bewegt sich ein Atom aus der Fallenmitte heraus, so wird je nach Bewegungsrichtung der Zustand $m_{F'} = \pm 1$ energetisch abgesenkt, so dass die atomare Resonanz zur eingestrahlten Lichtfrequenz hin verschoben wird. Fliegt beispielsweise ein Atom in positive x -Richtung, so steigt die Wahrscheinlichkeit der Absorption eines σ^- -Photons, welches einen elektronischen Übergang in den Zustand $m_{F'} = -1$ induziert. Da dieses Photon in negative x -Richtung fliegt, erfährt das Teilchen einen Rückstoß in Richtung Fallenmitte. Entsprechend verhält es sich mit Teilchen, die in die entgegengesetzte Richtung propagieren. Durch diesen Mechanismus, der sowohl im Impuls-, als auch im Ortsraum wirkt, wird sowohl eine Kühlung, als auch eine Verdichtung der Atome erreicht. Die in Gleichung (7.5) hergeleitete Kraft wird ortsabhängig.

$$F_{x_+/x_-} = \pm \hbar k \cdot \frac{\Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + \left(\frac{2\Delta_{OM\pm}}{\Gamma}\right)^2} \quad (7.11)$$

Dabei gilt

$$\Delta_{OM\pm} = \Delta \mp kv_x \pm \frac{g_{F'}m_{F'}\mu_B B_0}{\hbar} x. \quad (7.12)$$

Wird dies in $F_{\text{MOT}} = F_{x_+} + F_{x_-}$ eingesetzt und entwickelt unter der Annahme, die Teilchen hätten kleine Geschwindigkeiten und befänden sich nahe der Fallenmitte, so lässt sich unter Vernachlässigung höherer Ordnungen, vereinfacht schreiben:

$$F_{\text{MOT}} = -\beta v_x - \kappa x \quad (7.13)$$

mit β wie in Gleichung (7.7) und $\kappa = \frac{g_{F'}m_{F'}\mu_B B_0}{\hbar k}$. Gleichung (7.13) zeigt, dass sich die Teilchen im MOT-Betrieb wie gedämpfte harmonische Oszillatoren verhalten.

Frage 7.1. Welche Aufbaukomponenten werden zur Erzeugung einer MOT benötigt? Wo wird das Licht in die drei Strahlen aufgeteilt? Wie verlaufen die Strahlen?

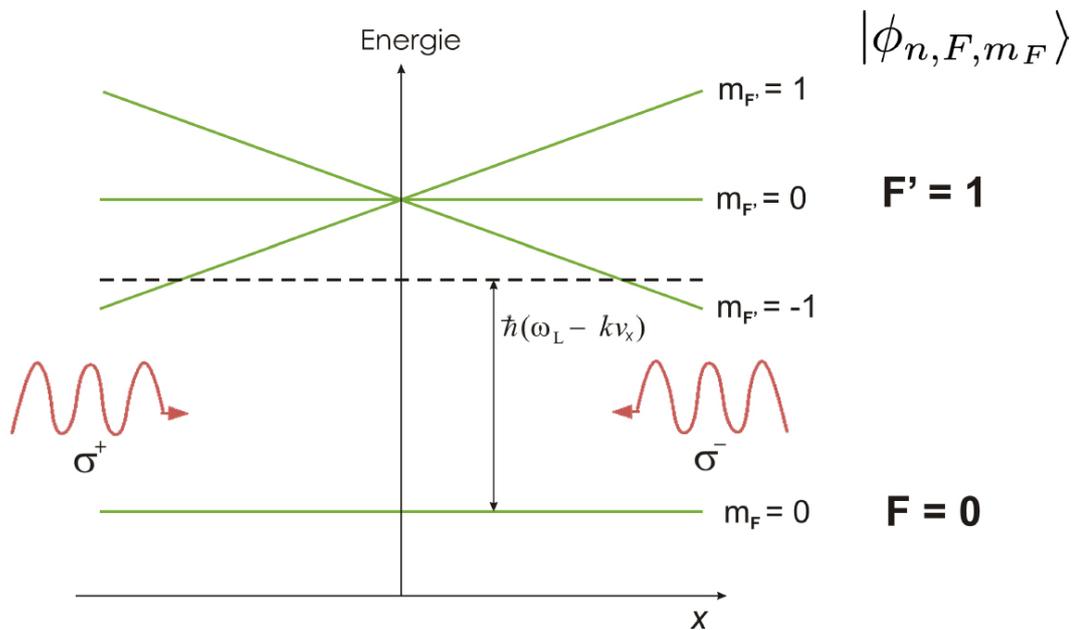


Abb. 7.3: Durch Anlegen eines Magnetfeldes spaltet der angeregte Zustand auf. Für das rotverstimmtte Kühllicht (ω_L) ist die Resonanzbedingung erfüllt, wenn die Atome weit genug von der Fallenmitte entfernt sind. Sie ist auf Grund der Dopplerverschiebung ($-kv$) ebenfalls auch für Atome mit hohen Geschwindigkeiten erfüllt. Die Absorption der Photonen bewirkt eine Kraft in Richtung Fallenmitte.

7.3 Rubidium-MOT

Bei Rubidium handelt es sich um ein Alkalimetall, welches verschiedene Isotope besitzt. Das im Versuch verwendete stabile Isotop ist ^{85}Rb . Aus diesem Grund soll auf dessen Termschema kurz etwas genauer eingegangen werden.

Für den Versuch spielt insbesondere die Aufspaltung des Energieniveaus in die Fein- und Hyperfeinstruktur eine zentrale Rolle (siehe [Abbildung 7.4](#)).

Um sich die Aufspaltung in die Fein- beziehungsweise Hyperfeinstruktur herzuleiten ist es zudem noch wichtig zu wissen, dass ^{85}Rb einen Kernspin von $I = \frac{5}{2}$ besitzt.

Die verwendeten Übergänge zur Laserstabilisierung beziehungsweise zur Anregung der Atome befinden sich zwischen dem $5^2S_{1/2}$ und dem $5^2P_{3/2}$ Niveau beziehungsweise deren Unterniveaus der Hyperfeinstruktur. Dies entspricht einer Wellenlänge von circa 780 nm.

Der in **rot** eingezeichnete Übergang a) von $F = 2$ nach $F' = 1$ wird zur Stabilisierung des Rückpumpasers verwendet. Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass durch den AOM eine Frequenzverschiebung um 96 MHz (Blauerstimmung) stattfindet, sodass die Frequenz des Rückpumpasers nach Durchlaufen des AOMs der Frequenz des Übergangs von $F = 2$ nach $F' = 3$ (Übergang b)) entspricht, der als Rückpumpübergang verwendet werden soll.

Als Kühlübergang wird der Übergang von $F = 3$ nach $F' = 4$ verwendet (Übergang c)). Des- sen Verstimmung in Bezug auf den Rückpumpaser kann entsprechend der Energiedifferenz zwischen Übergang b) und c) vor dem AOM eingestellt werden (2915 MHz Rotverstimmung), da dieser beim Durchlaufen des AOMs die gleiche Frequenzverschiebung erfährt.

Die Auswahl der Übergänge erscheint zunächst etwas willkürlich. Macht man sich jedoch klar, dass für die erfolgreiche Realisierung der MOT ein Zweiniveausystem ideal ist, legitimiert

dies die Auswahl der Übergänge, da man durch diese einem Zweiniveausystem am nächsten kommt.

Betrachtet man als Erweiterung nun noch die Aufspaltung in die m_F Niveaus gleicher Energie (siehe [Abbildung 7.4](#)), so sieht man, dass bei Anregung durch σ^- - oder σ^+ -Licht nach wenigen Absorptions- und Emissionsprozessen auch hier eine Festlegung in Richtung eines Zweiniveausystems stattfindet.

Dies kann man sich anhand der Auswahlregeln für Dipolstrahlung überlegen. Vom $F' = 4$ Niveau kann gemäß $\Delta F = 0, \pm 1$ nur ein Zerfall nach $F = 3$ stattfinden. Da jedoch der Laser eine endliche Linienbreite hat, existiert eine von Null verschiedene Wahrscheinlichkeit, dass beim Kühlübergang ein Atom in den $F' = 3$ Zustand gelangt, von welchem ein Zerfall nach $F = 2$ möglich ist. Um also sowohl einen günstigen Anfangszustand herzustellen und diesen auch beizubehalten wird der Rückpump laser benötigt, um die Atome wieder in das $F = 3$ Niveau zu bringen.

Um die nun betrachteten Übergänge jedoch in Einklang mit dem Spektroskopiesignal zu bringen, muss ein weiterer Effekt beachtet werden. Bei diesem handelt es sich um sogenannte Crossover-Resonanzen. Diese treten auf, wenn sich die Frequenz des Laserlichtes gerade zwischen zwei oberen Energieniveaus befindet. Dies ist in [Abbildung 7.4](#) durch den **grünen** Pfeil dargestellt.

Bei dieser Anregungsfrequenz „sehen“ Atome, die sich dem Sättigungsstrahl beispielsweise entgegen bewegen, eine Frequenz die dem Übergang von $F = 2$ nach $F' = 3$ entspricht und werden angeregt. Für den zurücklaufenden Probestrahl bewegen sich diese angeregten Atome gerade vom Strahl weg und so entspricht die Frequenz durch die Dopplerverschiebung der Übergangsfrequenz von $F = 2$ nach $F' = 2$. Da die Atome aber bereits angeregt sind kommt es wiederum zu einem Einbruch der Absorption und es entsteht ein weiterer Lambdip.

Ein solches Sättigungsspektrum kann [Abbildung 7.5](#) (von $F = 2$ aus) für ^{85}Rb entnommen werden.

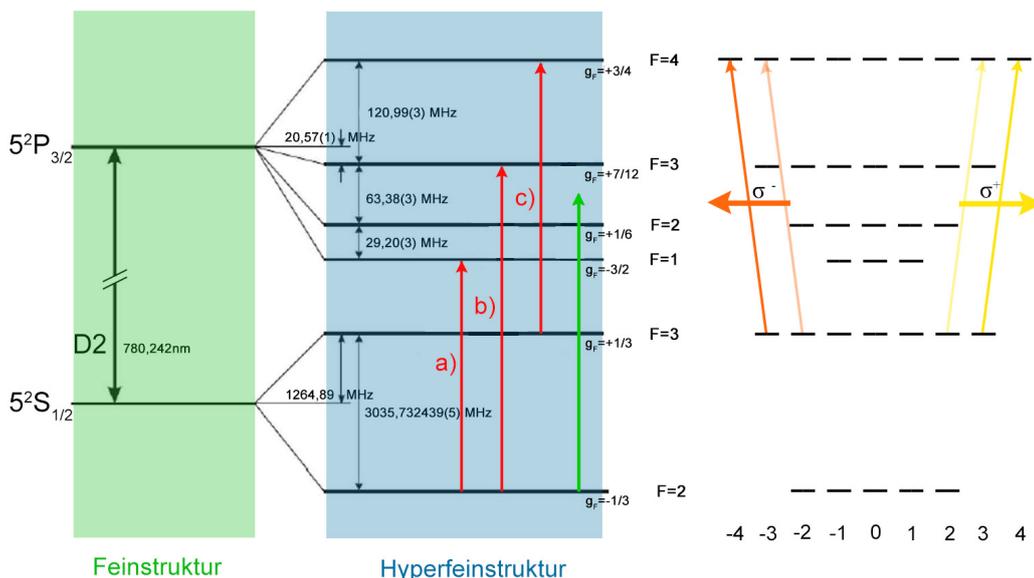


Abb. 7.4: Ausschnitt aus dem Termschema von ^{85}Rb (D2-Linie) mit entsprechenden Übergangsfrequenzen.

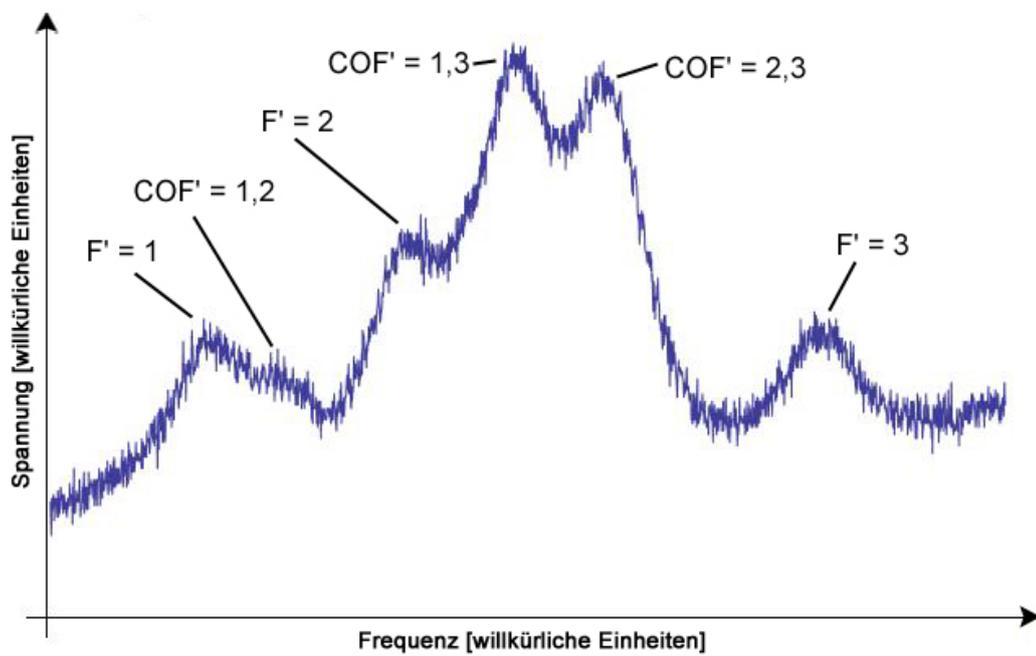


Abb. 7.5: Spektroskopiesignal mit markierten Übergängen (F' für normale Übergänge und COF' für Crossover-Resonanzen.)

8 Fragenkatalog

8.1 Vorbereitungsfragen

- **Frage 4.1:** Welchen Vorteil bietet es, den Aufbau der MOT durch ein Glasfaserkabel von dem Aufbau der Laserstabilisierung zu trennen?
- **Frage 5.1:** Inwiefern ist die durch den AOM verursachte Frequenzverschiebung des Laserlichts in Bezug auf die Stabilisierung des Rückpump- und Kühllasers bzw. die an der MOT benötigte Frequenz relevant?
- **Frage 5.2:** Zu welchem Zweck werden die in den schematischen Skizzen zur Laserstabilisierung und der MOT eingezeichneten Verzögerungsplatten jeweils verwendet?
- **Frage 5.3:** Zu welchem Zweck werden die PST verwendet und warum kommen sie stets in Kombination mit einer $\lambda/2$ -Platte vor?
- **Frage 6.1:** Durch welche Größen/Faktoren werden die Laserfrequenzen beeinflusst? Welche dieser Faktoren sind gewollt beziehungsweise ungewollt und wie können diese beseitigt werden?
- **Frage 7.1:** Welche Elemente werden zur Erzeugung einer MOT benötigt? Wo wird das Licht in die drei Strahlen aufgeteilt? Wie verlaufen die Strahlen?

8.2 Fakultative Fragen zum Selbsttest

- Beschreiben Sie den Aufbau des Lasersystems. Welche Funktion haben die einzelnen Elemente? Wo befinden sich die Elemente zur Stabilisierung der Laser?
- Wo kann das Licht geschaltet werden?
- Welche Stabilisierungstechniken werden verwendet und wie funktionieren diese?
- Wie ist es möglich, die Laserfrequenz für die Spektroskopie kontrolliert durchzustimmen?
- Welche Möglichkeiten gibt es für die Aufnahme einer Messreihe zur Temperaturbestimmung?
- Welche Funktionen erfüllen die Elemente der MOT und warum werden diese benötigt, um Atome zu fangen?
- Welcher Temperatur entspricht das Dopplerlimit für ^{85}Rb ?
- Auf welchem Prinzip beruht die sogenannte Sub-Dopplerkühlung und welche Möglichkeiten eröffnet diese?

-
- Welche Übergänge von ^{85}Rb werden zur Laserstabilisierung beziehungsweise zum Kühlen der Atome verwendet und warum ist dies sinnvoll?
 - Welche natürliche Linienbreite und Lebensdauer ist für die D2-Linie von ^{85}Rb charakteristisch?
 - Welche Verstimmung des Laserlichts ist zum Kühlen der Atome ideal und welchen Wert muss diese für ^{85}Rb annehmen?

Literaturverzeichnis

- [1] D. Meschede, *Optik, Licht und Laser*, Vieweg-Teubner (2008).
- [2] F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch und H. Schmidt, *Optik für Ingenieure - Grundlagen, 3. Auflage*, Springer (2005).
- [3] W. Demtröder, *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik, 5. Auflage*, Springer (2009).
- [4] RP Photonics, *Thin-film Polarizers*, Webseite.
- [5] G. Pressler, *Regelungstechnik - 1. Grundelemente*, Hochschultaschenbücher (1967).
- [6] T. Hänsch und A. Schawlow, *Cooling of gases by laser radiation*, **Optics Communications** **13**, 68–69 (1975).
- [7] W. D. Philips, *Laser cooling and trapping of neutral atoms*, Nobel Prize Lecture (1997).

Internetquellen letztmalig im September 2024 aufgerufen.

Wichtige Punkte zum Laserschutz

Ganz allgemein gilt: **Im Umgang mit Lasern ist der gesunde Menschenverstand nicht zu ersetzen!** Einige spezielle Hinweise werden im folgenden angeführt.

1. Die Laserschutzvorschriften sind **immer** zu beachten.
2. Kopf **niemals** auf Strahlhöhe.
3. Richtige Schutzbrille aufsetzen; Wellenlänge und Leistung müssen bei der Wahl berücksichtigt werden. Bitte beim Betreuer oder Laserschutzbeauftragten, oder an den Aushängen an den Labortüren informieren!
4. Achtung: praktisch alle Laser für Laboranwendungen sind mindestens Klasse 3, also von vornherein für die Augen gefährlich, ggf. auch für die Haut – evtl. auch hierfür Schutzmaßnahmen ergreifen.
5. Zur Justage kann der Laserstrahl mittels Wandlerkarten sichtbar gemacht werden. Zu beachten ist: Diese halten keine sehr hohen Leistungen aus und besitzen im allgemeinen eine reflektierende Oberfläche. Achtung deshalb vor **Reflektionen!** Auch Kameras besitzen eine **Zerstörschwelle!**
6. Spiegel und sonstige Komponenten nie in den **ungeblockten** Laserstrahl einbauen! Vor Einbau immer überlegen, in welche Richtung der Reflex geht! Diese Richtung zunächst blocken, bevor der Strahl wieder frei gegeben wird.
7. **Nie mit reflektierenden Werkzeugen im Strahlengang hantieren!** Unkontrollierbare Reflexe! Vorsicht ist z.B. auch mit BNC-Kabeln geboten, die in den Strahlengang gelangen könnten! Gleiches gilt auch für Uhren und Ringe. Diese vorsichtshalber ausziehen, wenn Sie mit den Händen im Strahlengang arbeiten.
8. Auch Leistungsmessgeräte können Reflexe verursachen! Unbeschichtete Silizium-Fotodioden reflektieren über 30% des Lichtes!
9. Achtung im Umgang mit **Strahlteilerwürfeln!** Diese haben immer einen zweiten Ausgang! Ggf. abblocken!
10. **Warnlampen** bei Betrieb des Lasers anschalten und nach Beendigung der Arbeit wieder ausschalten.
11. Dafür sorgen, dass auch Dritte im Labor die richtigen Schutzbrillen tragen, oder sich außerhalb des Laserschutzbereiches befinden.
12. Filtergläser in Laserschutzbrillen dürfen **grundsätzlich nicht** aus- oder umgebaut werden!!!
13. In besonderem Maße auf Beistehende achten.

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorstehenden Punkte gelesen und verstanden habe. Ich bestätige, dass ich eine Einführung in den Umgang mit Lasern sowie eine arbeitsplatzbezogene Unterweisung erhalten habe.

Name:
Unterschrift:

Arbeitsgruppe:
Datum: