

Versuch IQ 13

Magnetooptische Falle

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsvorbereitung	2
1.1	Kontrolle der Justage	2
1.2	Dispenser feuern	2
2	Verwendung der Kamera	4
2.1	Starten der Kamera	4
2.2	Aufnahme einer Videosequenz	4
3	Bestimmung des Strahldurchmessers	4
4	Eichung der Kamera	5
4.1	Bestimmung des Eichfaktors	5
4.2	Bestimmung des Abbildungsmaßstabes	6
5	Das Auswertungsprogramm	7
5.1	Bestimmung des Skalierungsfaktors	8
6	Vermessung der MOT	10
6.1	Bestimmung der Füllzeit der MOT	10
6.2	Abhängigkeit der Teilchenzahl von der Verstimmung des Kühllasers	10
6.3	Abhängigkeit der Teilchenzahl in der MOT vom Magnetfeld	11
6.4	Die Optische Melasse	11

1 Versuchsvorbereitung

1.1 Kontrolle der Justage

Bevor Sie mit dem eigentlichen Versuch beginnen können, müssen Sie zunächst prüfen ob alle optischen Komponenten richtig justiert sind. Dazu messen Sie mit dem Leistungsmesskopf die Lichtleistungen an den in Abbildung 1.1 markierten Stellen und vergleichen die Werte. Tragen Sie Ihre Messergebnisse in den Vordruck ein und geben Sie ihn am Ende Ihres Praktikums ab.

Achtung: Stellen Sie das Messgerät niemals senkrecht in den Strahl! Dabei können Rückreflexionen entstehen, die die Laserdiode oder den Trapezverstärker zerstören können. Stellen Sie das Messgerät deshalb mit einem kleinen Winkel in den Strahl, so dass eine mögliche Reflexion zur Seite und nicht nach oben entsteht (Verletzungsgefahr). Falls sich Ihre Werte nur um wenige Prozent von den Sollwerten unterscheiden können Sie mit dem nächsten Abschnitt fortfahren. Sollten die Werte stark abweichen wenden Sie sich an Ihren Betreuer.

1.2 Dispenser feuern

Das Vakuumsystem des Versuch steht unter Ultrahochvakuum (UHV). Der Druck befindet sich im Bereich von 10^{-9} mbar und niedriger. Um solch extreme Drücke zu erreichen muss das Vakuumsystem kontinuierlich gepumpt werden. Dies geschieht mit Hilfe einer sogenannten Ionengetterpumpe. In ihr werden Restgaspartikel durch Elektronenstöße ionisiert und mit einer hohen elektrischen Spannung (3 – 7 kV) auf eine reaktive Oberfläche beschleunigt und, dort werden sie chemisch gebunden oder implantiert. Damit sind die Restgaspartikel gebunden und der Druck fällt. Wie gut der Druck ist können Sie am Pump-Controller überprüfen. Der fließende Strom lässt sich mit Hilfe einer Eichkurve in einen Druck überführen. Die Ionengetterpumpe pumpt auch das Rubidium ab, dass Sie im System brauchen. Deshalb müssen Sie dafür sorgen, dass Rubidium in die Vakuumapparatur eingebracht wird. Dies geschieht mittels Dispenser. Diese enthalten Rb-Atome, die beim Erhitzen des Dispensers frei werden. Dazu schicken Sie einen Strom von 4,5 A durch den Dispenser. Da die Menge an Rb begrenzt ist sollten Sie die Dispenser nur betreiben wenn Sie tatsächlich mit den Atomen arbeiten. Bitte tragen Sie die Uhrzeiten zu denen Sie die Dispenser ein- bzw. ausschalten in das Laborbuch ein und vermerken sie den Strom an der Ionengetterpumpe. Die Stromwerte am Pump-Controller(@ 3 kV) sollten $1 * 10^{-6}$ mA vor dem Feuern der Dispenser sein und während des Feuerns nicht über $1 * 10^{-5}$ mA steigen. Ist der Strom größer informieren Sie bitte umgehend den Betreuer.

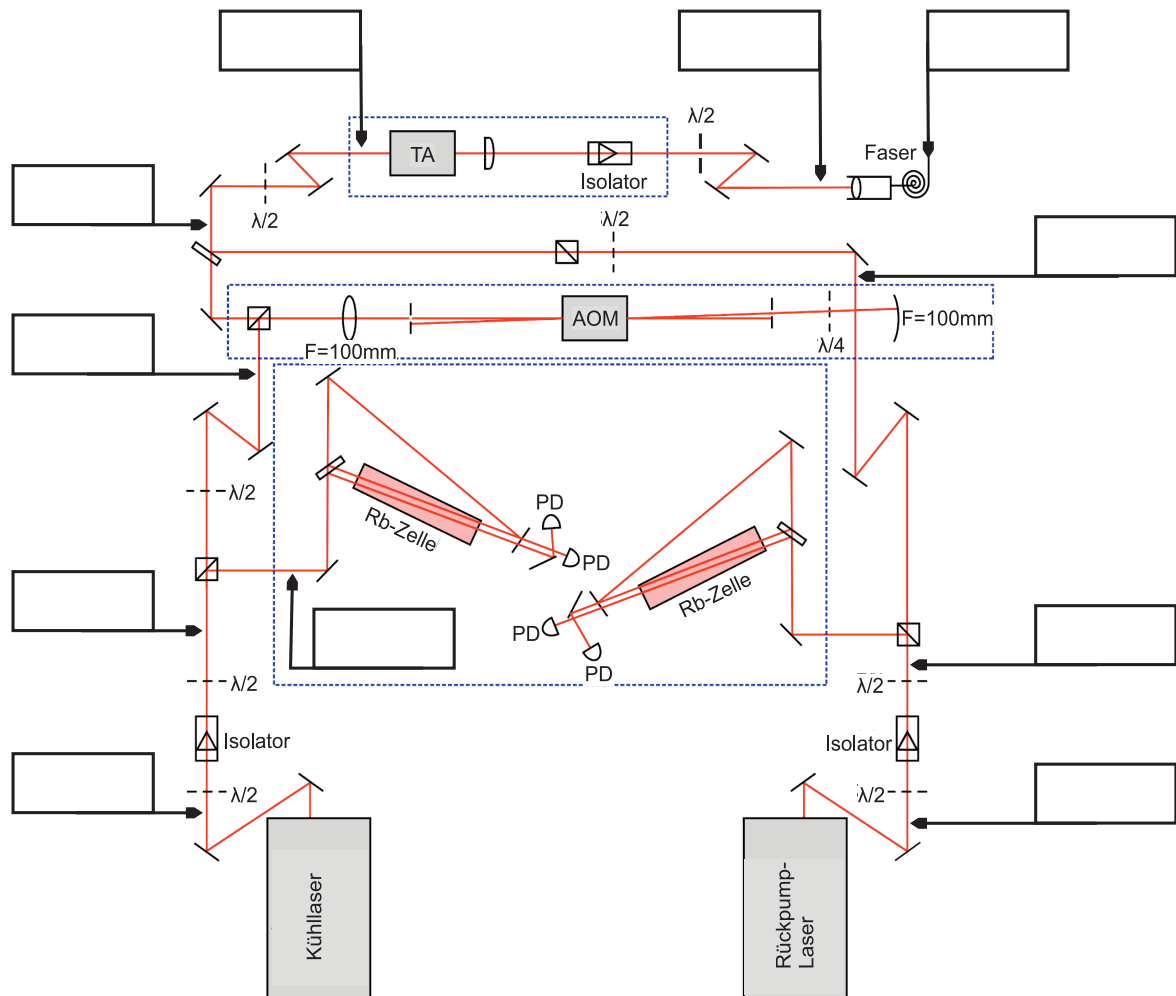


Abbildung 1.1.1: Aufbau des Lasersystems. Tragen Sie hier die von Ihnen gemessenen Leistungen ein. Der Trapezverstärker soll bei 800 mA vermessen werden.

2 Verwendung der Kamera

Am Experiment haben Sie zwei Kameras zur Verfügung. Mit der kleinen Fingerkamera können Sie einfach und schnell kontrollieren ob Laserlicht auf die Glaszelle der Vakuumapparatur trifft, ob der Dispenser eingeschaltet ist (er glüht) und ob die MOT zu sehen ist und wie groß sie ist. Die Fingerkamera verfügt über eine automatische Helligkeitsanpassung, damit ist sie nur für rein qualitative Messungen geeignet. Für die quantitative Analyse der MOT gibt es eine zweite Kamera von IDS. Bei dieser Kamera können Sie viele Parameter anpassen wie zum Beispiel die Belichtungszeit, Bildrate, Helligkeitsanpassung (diese muss natürlich für die Versuche deaktiviert sein), Verstärkung und vieles weitere.

2.1 Starten der Kamera

Die IDS-Kamera ist per USB-Kabel mit einem Computer verbunden. Starten Sie ihn und melden sich beim Studenten-Account an. In der rechten oberen Ecke des Desktops sind zwei Verknüpfungen. Starten Sie zunächst **uEye Cockpit**. Dieses Programm steuert die Kamera. Wählen sie im Programm unter **uEye** → **Öffnen und Livebild** aus. Nun sollten Sie ein Video von der Kamera empfangen, außerdem sollte die LED an der Rückseite der Kamera grün leuchten.

2.2 Aufnahme einer Videosequenz

Damit sie später Ihre Aufnahmen an das Auswerteprogramm übergeben können müssen Sie sie in dem richtigen Format abspeichern. Sie können Videosequenzen aufnehmen in dem Sie auf **Datei** → **Videosequenz aufnehmen** auswählen. Klicken Sie auf **erzeugen...** Erzeugen Sie im Ordner Messungen einen neuen Ordner in dem Sie alle ihre Aufnahmen und Programme unter einem nachvollziehbaren Namen abspeichern. Nennen Sie diesen bitte *Jahr-Block-Namen* also zum Beispiel **2013-Block2-MaxMustermannundHansMeier**. Das Videoformat ist **.avi**. Über die **Max. Bildanzahl** legen sie die Länge der Sequenz fest. Klicken Sie auf **aufnehmen**. Wenn die maximale Bildanzahl erreicht ist werden sie informiert. Das Video ist nun gespeichert.

3 Bestimmung des Strahldurchmessers

Für die spätere Berechnungen von Teilchenzahlen in der MOT müssen Sie die Intensität des Laserstrahls kennen. Über die zur Verfügung stehenden Messgeräte können Sie aber nur die Leistung bestimmen. Daher ist es erforderlich, dass Sie den Strahldurchmesser bestimmen. Dies wird mit der “Knife-edge”-Methode gemacht. Stellen Sie den Mikrometertisch mit der Rasierklinge so in den Strahl, dass bei maximaler Auslenkung des Tisches

der gesamten Strahl auf das Leistungsmessgerät fällt. Da der Leistungsmesskopf kleiner ist als der Laserstrahl ist es nötig, dass sie hinter der Rasierklinge eine Linse positionieren. Kontrollieren Sie ob der so verkleinerte Strahl vollkommen auf den Messkopf fällt mit der Infrarotkarte.

Achtung: von der Rasierklinge kann es eine starke Reflexion geben. Stellen sie sicher, dass keine Gefahr für Sie und andere entsteht!

Notieren Sie die Leistung für verschiedene Positionen der Mikrometerschraube bis kein Licht mehr auf den Leistungsmesskopf fällt. Sie können den Strahlradius (*waist* w) bestimmen indem Sie aus dem Messgraph die Positionen x ablesen an dem die Leistung 70% und 30% beträgt. Der waist berechnet sich nach

$$w = 2,828233463 (x_{70\%} - x_{30\%}) \quad (3.1)$$

Bestimmen Sie den waist in horizontaler und vertikaler Richtung. Dann könne Sie die Strahlfläche F bestimmen

$$F = \pi w_h w_v \quad (3.2)$$

und damit ergibt sich die Intensität I aus der Leistung P zu

$$I = \frac{P}{F} \quad (3.3)$$

Damit haben Sie die Strahlfläche am Ort der Rasierklinge bestimmt. Sie können annehmen, dass sich der Strahl auf dem kurzen Weg zur Glaszelle nicht stark verändert.

4 Eichung der Kamera

4.1 Bestimmung des Eichfaktors

Zur späteren Umrechnung Ihrer gemessenen Fluoreszenz-Daten in Atomzahlen müssen Sie wissen wie viel Counts im Kameraprogramm wie viel Photonen entsprechen (Eichfaktor). Schicken Sie dazu den Laserstrahl direkt auf die Kamera. Die Kamera wird höchstwahrscheinlich sättigen. Benutzen Sie deshalb ein Filter um den Strahl abzuschwächen. Der Strahl darf nicht vom Halter des Filters abgeschnitten werden! Ob die Kamera gesättigt ist sehen Sie daran ob vollständig weiße Pixel auf dem Bild zu sehen sind. Oder verringern Sie den TA-Strom. Der Strahl muss vollständig auf der Kamera abgebildet werden, benutzen Sie gegebenenfalls Linsen. Wenn Sie eine Konfiguration gefunden haben in der die Kamera nicht gesättigt ist und der Strahl vollständig abgebildet wird, entfernen Sie vorübergehend den Filter und messen vor der Kamera mit dem Leistungsmesskopf die Lichtleistung. Stellen Sie den Filter wieder hinein und nehmen Sie ein Bild mit der Kamera auf (uEye → Einzelbild) und speichern Sie es unter einem (sinnvollen) Namen.

Blocken Sie anschließend den Laserstrahl und nehmen sie ein Hintergrundbild auf.

Nun müssen Sie die Bilder von einander subtrahieren und die Anzahl an Gesamtcounths bestimmen. Die können Sie zum Beispiel mit **Mathematica** realisieren. Falls Sie **Mathematica** verwenden möchten aber noch nicht sehr erfahren sind: Starten Sie **Mathematica** und öffnen Sie ein leeres Notebook. Um nun Dateien einzulesen wird der Befehl **Import[]** verwendet. Tragen Sie in Anführungsstrichen den gesamten Pfad und Namen mit Endung ein. Die Trennzeichen sind `\\`. Damit **Mathematica** die Datei nicht als Bild auffasst, sondern die Counts als Zahlen darstellt, müssen Sie den Zusatz „**RawData**“ mit Anführungszeichen in den Klammern ergänzen. Damit ist die eingelesene Datei eine zweidimensionale Liste. Mit dem Befehl **Flatten** können Sie die Dimension der Liste reduzieren und mit dem Befehl **Total** können sie Listenelemente aufsummieren. Achtung: Groß- und Kleinschreibung macht einen Unterschied. **Mathematica** verfügt über eine sehr gute Hilfe. Klicken Sie einfach im Notebook auf den Befehl zu dem Sie Hilfe möchten und drücken die F1-Taste. Sollten Sie dennoch nicht zurechtkommen wenden Sie sich an Ihren Betreuer.

Nun fehlt Ihnen noch die Anzahl der Photonen, die dieses Bild erzeugt haben. Sie kennen die Wellenlänge des Lichts und können die Energie eines Photons berechnen. Sie haben die Leistung des Lichts gemessen und die Abschwächung der Filter ist bekannt. Die Belichtungszeit der Kamera können sie unter **uEey** → **Eigenschaften** → **Belichtungszeit** nachsehen. Damit können Sie den Eichfaktor Photonen pro count bestimmen.

4.2 Bestimmung des Abbildungsmaßstabes

Erzeugen Sie eine MOT und richten Sie die Kamera aus. Als Orientierung können Sie die Quadrupolspulen verwenden, die Sie nur sehen können wenn sie die Kamera leicht kippen. Fixieren Sie die Kamera mit einer Pratze. Das Objektiv hat zwei Verstellmöglichkeiten. Um eine maximale Photonenausbeutung zu erreichen öffnen Sie die Blende vollständig indem Sie den Einstellring bis zum Anschlag im Uhrzeigersinn drehen wenn die Kamera auf Sie zu zeigt. Nun können Sie durch Drehen des Objektivs auf die MOT scharf stellen. Ändern Sie diese Einstellungen nicht mehr, da sonst Ihre Ergebnisse verfälscht werden. Falls Sie mit der Einstellung des Objektivs an den Anschlag kommen sind sie mit der Kamera nicht im richtigen Abstand zur Glaszelle. (Sollwert 22 bis 28 cm) Markieren Sie die Position und die Ausrichtung der Kamera auf dem Tisch mit einem Marker. Messen Sie den Abstand von der Objektiv Linse zum Zentrum der MOT. Stellen Sie nun das Millimeterpapier in dem selben Abstand zur Kamera auf. (Wenn Sie die Kamera umgestellt haben sichern Sie sie mit einer Pratze gegen Umfallen.) Ob der Abstand stimmt sehen Sie daran ob das Millimeterpapier scharf abgebildet wird (verstellen Sie nicht das Objektiv, sondern bewegen Sie das Papier). Je nach Position und Raumbeleuchtung kann es nötig sein, dass Sie den Verstärkungsfaktor der Kamera erhöhen müssen. Dies können Sie unter **uEye** → **Eigenschaften** → **Bild** einstellen. Vergessen Sie nicht am Ende der

Abbildungsbestimmung diesen Verstärkungsfaktor wieder auf Minimum zu setzen. Nun beschneiden Sie das Bild so, dass sie eine ganzzahlige Anzahl an Kästchen im Ausschnitt sehen. Unter dem Reiter **Größe** können sie die Anzahl der Pixel entnehmen und den Abbildungsmaßstab $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ bestimmen.

5 Das Auswertungsprogramm

Die Analyse der Daten wird mit einem MATLAB-Programm durchgeführt. Klicken Sie auf die Verknüpfung rechts oben im Desktop. Wählen Sie bei **current directory** den Ordner `C:\Dokumente und Einstellungen\Studenten\Desktop\MOT_FPVersuch` aus. Geben Sie im **Command Window** "start" ein und drücken Sie enter. Das Programm *Diagnosis of thermal clouds* öffnet sich. Dies ist ein Programm wie es heute in ähnlicher Form an vielen Experimenten am Institut für Quantenoptik eingesetzt wird.

Das Programm bestimmt aus Ihren Fluoreszenz-Aufnahmen die Teilchenzahl und -dichte, die Größe der Wolke usw. Damit diese Zahlen korrekt sind müssen Sie dem Programm Ihre Eichwerte der Kamera übergaben. Tragen Sie in das Feld **PixelSize** Ihren Abbildungsmaßstab in $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ ein. Als zweiten Wert müssen Sie die Counts/Atom eingeben. Dieser Wert hängt von der Verstimmung des Lasers, der Lichtleistung und dem Eichfaktor ab. Eine Anleitung wie Sie diesen Wert bestimmen finden Sie im Kapitel 5.1.

Für Video-Dateien (.avi), wie Sie sie z.B. für die MOT Ladekurve aufnehmen, muss als Pfad der gesamte Dateipfad inkl. Dateiname und Endung eingetragen werden. Außerdem müssen Sie die Checkbox **avi** auswählen. Das Programm zerlegt die Video-Datei automatisch in Einzelbilder. Sie sollten das erste Bild der Video-Datei als Hintergrund festlegen (es wird von allen Bildern abgezogen und eliminiert so störendes Streulicht wie z.B. von den Reflexionen der Laserstrahlen an der Glaszelle - Natürlich müssen Sie bei der Aufnahme des Videos darauf achten, dass zu Beginn der Aufnahme keine Atome gefangen sind). Das Timing des Videos wird ausgelesen und als **Time[s]** angezeigt. Das Feld **Base name** hat keine Bewandtnis. Für einzelne Bmp-Bilder wird nur der Ordner in dem sich die Bilder befinden angegeben. Der Dateiname wird dann aus dem **Base name**, der jeweiligen Nummer und der Endung .bmp zusammen gesetzt. In der Voreinstellung ist das **MOT_1.bmp**, **MOT_2.bmp** usw. Die Zeit **Time[s]** bleibt hier immer 0.

Mit der **Save picture**-Box können die Bilder als Falschfarbenbild gespeichert werden. **Write results to file** schreibt die Daten in der im Header des Files angegebenen Reihenfolge in die Datei.

Der Radius der Wolke ist die Standardabweichung des Gauss, 68% der Atome sind im Radius. Mit der **ROI** (Region of interest) wird der Bildausschnitt verändert. **NFitx** und **NFity** werden über Gaussfits über die jeweiligen Reihen bzw. Spalten Pixelsummen bestimmt. **Nsum** wird über die gesamte Pixelsumme bestimmt.

5.1 Bestimmung des Skalierungsfaktors

Die Bestimmung der Anzahl der Atome, die in der MOT gefangen sind, erfolgt über die Fluoreszenz der Atome. Das gesamte Fluoreszenzlicht, das von den Atomen abgestrahlt wird, lässt sich berechnen, wenn man den Bruchteil α kennt, der mit Hilfe des Objektives von der CCD-Kamera erfasst wird. α ergibt sich als Quotient aus dem kreisförmigen Bruchteil des Lichtes, das abgebildet wird und der Kugel mit dem Radius a , aus der ein Teil der Fluoreszenz abgebildet wird. Mit einem Abstand a von der Atomwolke zum Objektiv und einem Objektivdurchmesser d ergibt sich α aus

$$\alpha = \frac{4\pi(d/2)^2}{\pi a^2}. \quad (5.1)$$

Außerdem müssen noch die Verluste β betrachtet werden, die durch Reflexionen an den nicht-entspiegelten Glasflächen auftreten. Die Verluste werden mit 4% an der Vakuumzelle angesetzt. Die gesamte abgestrahlte Leistung der Atomwolke ist dann

$$P_{ges} = \frac{1}{\alpha(1 - \beta)} \cdot P_{gemessen}. \quad (5.2)$$

Nun können Sie die Zahl der gestreuten Photonen berechnen, indem Sie die gemessene Strahlungsleistung ins Verhältnis zur Strahlungsleistung P_{1Atom} eines Atoms setzen. Es gilt

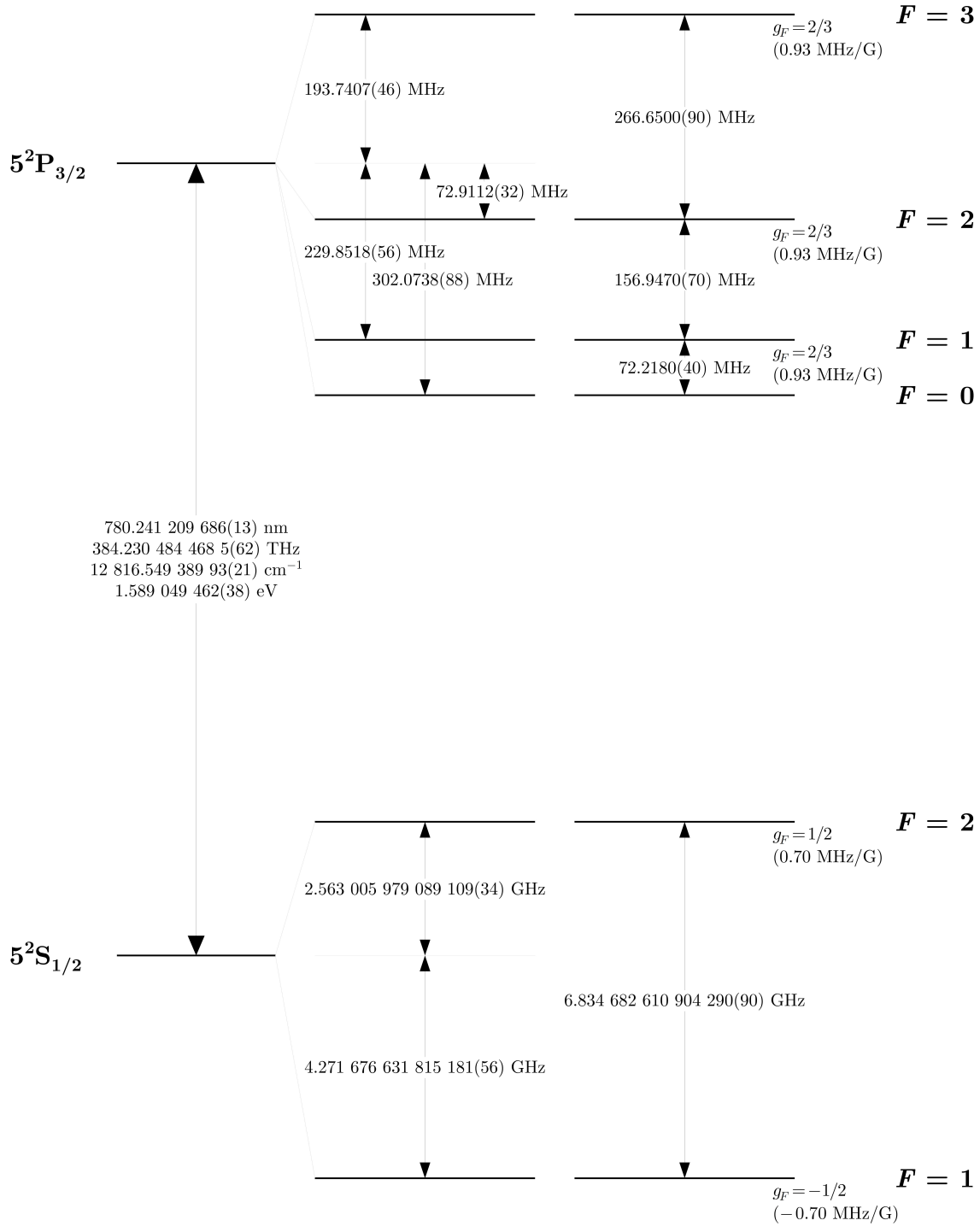
$$P_{1Atom} = \frac{\hbar\omega_L}{\tau_z}, \quad (5.3)$$

wobei $\frac{1}{\tau_z}$ die Absorptionsrate der Atome ist und ω_L die Laserfrequenz. Die Absorptionsrate (Streurrate) der Atome beträgt [?] (siehe auch Kapitel 2):

$$\frac{1}{\tau_z} = \frac{\Gamma}{2} \cdot \frac{\frac{I_{ges}}{I_0}}{1 + \frac{I_{ges}}{I_0} + \left(\frac{2\delta_L}{\Gamma}\right)^2}. \quad (5.4)$$

Die Sättigungsintensität für ^{87}Rb ist $I_0 = 16 \text{ W/m}^2$ und die Linienbreite $\Gamma \approx 2\pi \cdot 6 \text{ MHz}$. Die Verschiebung δ_L lässt sich aus der Frequenzverschiebung des AOMs (Eichkurve siehe Abb.3.3.6, Achtung: Doppelpass) und dem Spektroskopiesignal berechnen. Überlegen Sie sich dazu, welche Linie im Spektroskopiesignal welchem Übergang entspricht (siehe Abbildung 5.1) und auf welche Crossover-Frequenz Sie den Kühllaser stabilisieren. I_{ges} entspricht der Gesamtintensität aller sechs Laserstrahlen.

Über Ihren Eichfaktor Γ aus Kapitel 4.1 können Sie die Counts pro Atom bestimmen. Dies ist ein sehr wichtiges Zwischenergebnis. Besprechen Sie ihren Rechenweg mit ihrem Betreuer um sicher zustellen, dass sie keinen Fehler gemacht haben. Diesen Zahlenwert müssen Sie im Matlab-Programm eintragen. Da Sie für eine Messung diesen Faktor als Funktion von der Verstimmung brauchen empfiehlt es sich ein kleines Mathematica-

Abbildung 5.1.1: Termschema von ^{87}Rb

Programm (oder ein Programm ihrer Wahl) zu schreiben mit dem Sie diesen Faktor schnell bestimmen können.

6 Vermessung der MOT

6.1 Bestimmung der Füllzeit der MOT

Nach dem Anschalten der magnetooptischen Falle durch Einschalten des Magnetfeldes steigt die Anzahl der gefangenen Atome von $N = 0$ auf einen Gleichgewichtswert an. Dieser Vorgang wird für das Regime durch folgende Ratengleichung beschrieben [?]:

$$\frac{\partial N(t)}{\partial t} = R - \frac{N(t)}{\tau} - \beta \int n_R^2(\vec{r}) d^3r. \quad (6.1)$$

Dabei entspricht τ der Füllzeit, R der Rate, mit der die langsamen Atome in das Fallenvolumen gelangen, β der Zwei-Körper-Verlustrate und n_R der maximalen Dichte im Reabsorptionsregime (s.a. [?]). Der hintere Term dieser Ratengleichung ist im Anfangsverlauf, aufgrund der geringen Dichte zu dieser Zeit, zu vernachlässigen. Die Lösung der Ratengleichung wird durch

$$N(t) = N(0) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (6.2)$$

beschrieben.

Um die Füllkurve der MOT aufzunehmen bereiten Sie die Kamera vor um eine Videosequenz mit einer Länge von einigen Sekunden aufzunehmen. Starten Sie die Aufnahme und schalten Sie direkt danach das Quadrupolfeld der MOT ein. Über das Matlab-Programm können sie sich zeitaufgelöst die Teilchenzahl ansehen. Die exportierten Daten können sie mit zum Beispiel Mathematica öffnen und über einen Fit die Füllzeit τ bestimmen.

6.2 Abhängigkeit der Teilchenzahl von der Verstimmung des Kühlasers

In diesem Experiment soll die optimale Verstimmung des Lasers gegenüber dem Kühlübergang von ^{87}Rb bestimmt werden, indem die Frequenzverschiebung durch den AOM variiert wird. Die Frequenz können Sie über die Spannung variieren und die Frequenz über die Eichung aus Abbildung 3.3.7. Beachten Sie, dass die Effizienz des AOM-Doppelpass von der Frequenz abhängen kann wenn dieser nicht sauber einjustiert ist bzw. die Frequenzänderungen zu groß sind. Deshalb ist es wichtig, dass Sie für jeden Messpunkt einzeln die Leistung hinter der optischen Faser messen (und den Skalierungsfaktors im Auswertprogramm anpassen).

Tragen Sie die Teilchenzahlen in Abhängigkeit von der Frequenzverstimmung des La-

sers auf. Bestimmen Sie daraus die optimale Verstimmung und interpretieren Sie das Ergebnis.

6.3 Abhängigkeit der Teilchenzahl in der MOT vom Magnetfeld

Bestimmen Sie die Abhängigkeit der Teilchenzahl in der MOT vom Magnetfeld. Nehmen Sie dazu bei einer konstanten Frequenzverschiebung durch den AOM das Fluoreszenzsignal der MOT in Abhängigkeit von dem Strom, der durch die Quadrupolspulen fließt, auf.

6.4 Die Optische Melasse

Versuchen Sie, die optische Melasse sichtbar zu machen. Schalten Sie dazu das Quadrupolmagnetfeld ab. Das Intensitätsungleichgewicht, das durch die Laserstrahlen, die durch das Fallenzentrum laufen, verursacht wird führt dazu, dass die Optische Melasse nur schwer sichtbar gemacht werden kann.