

Universität Stuttgart
Lehrstuhl Prof. Dr. Tilman Pfau
5. Physikalisches Institut

Aufbau einer magneto-optischen Falle für das Fortgeschrittenenpraktikum für Studierende der Physik

Wissenschaftliche Arbeit zur
Wissenschaftlichen Prüfung für das
Lehramt an Gymnasien

vorgelegt von
Andreas Kübler
Matrikelnr. 2264718
Studiengang Mathematik/Physik Lehramt
andreas-kuebler@web.de

Oktober 2009

Zwei Dinge sind zu unserer Arbeit nötig: Unermüdliche Ausdauer und die Bereitschaft, etwas, in das man viel Zeit und Arbeit gesteckt hat, wieder wegzuwerfen.

Albert Einstein

I hear - I forget; I see - I remember; I do - I understand!

Konfuzius

Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder Sinn nach anderen Werken, gegebenenfalls auch elektronischen Medien, entnommen sind, sind von mir durch Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Entlehnungen aus dem Internet sind durch Ausdruck belegt.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfachheit und der besseren Lesbarkeit halber meist nur die männliche Form der Grammatik verwendet. Die weibliche Form ist selbstverständlich stets mit eingeschlossen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	6
1.1	Gliederung der Arbeit	7
2	Theoretische Grundlagen	8
2.1	Dopplerkühlen im Zweizustandssystem	8
2.1.1	Abbremsen der Atome in einer Raumdimension	8
2.1.2	Abbremsen der Atome in allen Raumdimensionen - die <i>optische Melasse</i>	11
2.2	Kühlen von Rubidium und Rückpumpen	12
2.3	Räumliches Fangen der Atome	14
2.4	Konzept der magneto-optischen Falle	16
3	Experimenteller Aufbau	18
3.1	Vakuumkammer mit Dampfzelle	18
3.2	Der optische Aufbau	22
3.3	Anti-Helmholtz-Spulen	24
3.4	Lasersystem	25
4	Messprogramm und experimentelle Resultate	26
4.1	Fluoreszenz und Absorptionsspektrum von Rubidium	26
5	Didaktische und methodische Umsetzung	29
5.1	Das Physikalische Fortgeschrittenenpraktikum	29
5.1.1	Einbettung in den Studienplan	29
5.2	Das Fortgeschrittenenpraktikum allgemein	30
5.3	Studieren im Labor	32
5.3.1	Begründungsebenen für Laborarbeit	32
5.3.2	Verschiedene Stufen in der Laborarbeit	33
5.4	Bewertung der MOT als Praktikumsversuch	34
5.4.1	Inhaltliche Hauptgegenstände	34
5.4.2	Konkrete Inhalte und Zielsetzungen	35
5.5	Methodik des Versuchs	37
5.6	Versuchablauf und Zugangsvoraussetzungen	39
5.7	Evaluationbogen für Laborpraktika	39
6	Zusammenfassung und Ausblick	40

A	Daten zum Rubidium	41
A.1	⁸⁷ Rb-D2-Linie	41
A.2	Dampfdruckkurve	42
B	Ionisationsstromkurve der Ionenpumpe	43
C	Das optische Setup	44
C.1	Strahlengang der Versuchsanordnung	44
C.2	Übersicht über die verwendeten optischen Komponenten	45
D	Stromstärkeabhängigkeit des <i>B</i>-Feldes	46
E	Evaluationsbogen für Praktika	47
	Literatur	50
	Danksagung	53

1 Einführung

1997 erhielten die Physiker Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji und William D. Phillips den Nobelpreis in Physik "für ihre Entwicklung von Methoden zum Kühlen und Einfangen von Atomen mit Hilfe von Laserlicht"[1, 2]. Die Arbeit auf dem Gebiet der Kühlung von Atomen beschäftigt heute eine zunehmend größer werdende Zahl an Forschern, nicht zuletzt auf Grund der Ergebnisse der vorgenannten Wissenschaftler oder einer ersten erfolgreichen experimentellen Realisierung eines Bose-Einstein Kondensates durch Eric A. Cornell, Carl E. Wiemann und Wolfgang Ketterle zu Anfang dieses Jahrtausends [2, 3]. Auch diese Gruppen wurden 2001 mit dem Nobelpreis in Physik ausgezeichnet.

Kern der Arbeit von Chu, Cohen-Tannoudji und Phillips war der Aufbau einer Falle, die im Gegensatz zu Fallen wie Paul- und Penningfallen, welche geladene Teilchen fangen, das Kühlen und Einfangen von neutralen Atomen mittels einer Kombination von Magnet- und Lichtfeld erlaubt. Die magneto-optische Falle (kurz MOT¹) nutzt, wie aus der Bezeichnung ersichtlich ist, die Kraft von Licht auf Atome bei Absorptions-Emissionszyklen. Zudem dient ein inhomogenes Magnetfeld zur Resonanzverschiebung und so zur Adressierung dieser Lichtkräfte.

Solche magneto-optische Fallen stehen heutzutage im Mittelpunkt zahlreicher Experimente an kalten Atomen. Die Fortschritte der vergangenen Jahre erlauben es heute, Atome auf Temperaturen im Bereich von wenigen Mikrokkelvin zu kühlen und über große Zeiträume (Sekunden bis Minuten) hinweg auch räumlich zu fangen. Die so verlangsamten und gefangenen Atome erlauben die Untersuchung wichtiger Problemfelder. So konnte etwa die Dopplerverbreiterung von Spektrallinien um mehrere Größenordnungen reduziert werden, was in Folge eine hochauflösende Spektroskopie möglich macht. Ebenso lieferten magneto-optische Fallen erste Grundlagen in der Erzeugung des bereits angesprochenen Bose-Einstein-Kondensats.

Den ersten erfolgreichen Unternehmungen 1987 Atome mittels optischer Kräfte (also Lichtdruckkräften) zu fangen [4], gingen Experimente zur Bewegungsdämpfung von Atomen in sogenannten optischen Melassen voraus [5]. Die Überlagerung mit einem inhomogenen Magnetfeld führte letztlich zur Realisierung einer ersten magneto-optischen Falle. Diese war nun eine „echte“ Falle, die nicht nur die Geschwindigkeit der Atome reduzieren sondern diese auch räumlich fangen konnte.

An den Universitäten in der Bundesrepublik Deutschland werden physikalische Praktika für Fortgeschrittene als Pflichtveranstaltung durchgeführt, um den Studierenden einen ersten Umgang mit experimentellen Aufbauten sowie physikalischen Messmethoden und -geräten im Rahmen komplexerer Versuche zu ermöglichen. In der Kürze der Zeit eines Versuches soll jeweils eine kleine aber vollständige wissenschaftliche Arbeit, auch und besonders als Vorbereitung für Abschlussarbeiten aller Art, angefertigt werden. Die vorliegende Zulassungsarbeit für die wissenschaftliche Prüfung für das Lehramt an Gymnasien hat nun das Ziel, eine magneto-optische

¹von engl. *magneto-optical trap*

Falle für das Fortgeschrittenen-Praktikum für Studierende der Physik an der Universität in Stuttgart bereitzustellen. Dieser Versuch ermöglicht einen Einblick in die aktuelle Forschung, wie sie auch ein Schwerpunkt der Arbeit im physikalischen Institut der Universität ist. Zudem ermöglicht dieser Versuch auf Grund seiner Konzeption diesen Einblick bereits relativ früh nach dem Grundstudium. Durch die Realisierung als Blockpraktikumsversuch im 5. Physikalischen Institut werden die Studierenden direkt mit dem täglichen Betrieb der dortigen experimentellen Physik vertraut gemacht.

1.1 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einer Abhandlung über die Theorie, welche einer magneto-optischen Falle zu Grunde liegt. Grundlagen des Kühlmechanismus mittels Laserlicht werden ebenso beschrieben wie das Ausnutzen eines inhomogenen Magnetfeldes um die Atome letztlich räumlich zu fangen.

Im Kapitel zum experimentellen Aufbau wird die in Stuttgart realisierte Praktikums-MOT im Detail beschrieben. Es wird eine Übersicht über die verwendeten Geräte gegeben und die benötigten Strahlengänge des Laserlichts werden erläutert und aufgezeigt. Ebenso wird die Aufbauphase an sich in diesem Kapitel diskutiert.

Ein Kapitel zu den in der Aufbauphase erzielten experimentellen Ergebnissen schließt sich an. Mit einem Abschnitt über die didaktische und methodische Umsetzung des Versuches schließt diese Arbeit. Die grundsätzlichen didaktischen Ideen, die zur Umsetzung der Praktikums-MOT in dieser Form geführt haben, werden hier im Detail erläutert.

2 Theoretische Grundlagen

Laserlicht ermöglicht durch seinen großen Photonenimpuls bei Absorption und spontaner Emission eines Laserphotons von einem Atom einen Impulsübertrag, der eine effektive und schnelle Kühlung (Abbremsung) von Atomen auf Raumtemperatur hinunter auf ein Niveau weniger Mikrokkelvin erreichen lässt. Wie man sich diesen Impulsübertrag im Detail zu Nutze macht, um die Atome zu verlangsamen, und wie man mittels eines inhomogenen Magnetfeldes die gebremsten Atome dann auch räumlich fängt, ist Inhalt der folgenden Abschnitte.

2.1 Dopplerkühlen im Zweizustandssystem

In diesem Abschnitt wird zunächst ein ideales Zweizustandssystem zu Grunde gelegt. Somit schließt man aus, dass Atome in Energiezustände fallen können, welche ein weiteres Kühlen mit der hier beschriebenen Methode verhindern.

2.1.1 Abbremsen der Atome in einer Raumdimension

Wie aus dem Energieerhaltungssatz

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T \quad (1)$$

ersichtlich ist, lässt sich die Geschwindigkeit von Atomen direkt mit deren Temperatur identifizieren. Möchte man sie also abbremsen, so kommt dies einem Abkühlen gleich. Dies lässt sich durch Beschuss der Atome mit Laserstrahlen realisieren. Hierzu ist es nötig, andere Wechselwirkungen als jene des elektromagnetischen Feldes des Laserlichts mit dem Atom auszuschließen, weshalb die Dopplerkühlung stets mindestens im Hochvakuum erfolgt. Trifft ein Laserphoton auf ein Atom, so besteht die Möglichkeit, dass dieses Photon absorbiert wird und der energetische Ausgangszustand $|g\rangle$ des Atoms wird in einen angeregten Zustand $|e\rangle$ des Atoms überführt. Emittiert dieses Atom nun wieder jenes Photon, so geschieht dies entweder stimuliert oder spontan. Im ersten Fall wird das Photon in diejenige Richtung abgestrahlt, welche mit der des ursprünglich absorbierten Photons identisch ist. Folglich erhält man keinen Nettoimpulsübertrag. Geschieht die Emission allerdings spontan, so ist diese isotrop, was letztlich zu einem Nettoimpulsübertrag führt. Hat man nun Laserlicht mit einer vorgegebenen Richtung (Vorzugsrichtung), so lassen sich Atome gezielt abbremsen (bzw. beschleunigen). Abbildung 1 verdeutlicht die verschiedenen Absorptions-Emissions-Varianten.

Da sich die zu kühlenden Atome bewegen, spielt der Dopplereffekt bei diesem Prozess maßgeblich eine Rolle. Bewegt sich ein Atom in einem Laserstrahl mit der Geschwindigkeit v , dann sieht es die Laserfrequenz ν_{Laser} verschoben um einen Term $\Delta\nu_{\text{Doppler}} = -\left(\frac{v}{c}\right)\nu_{\text{Laser}} = k_{\text{Laser}}v$

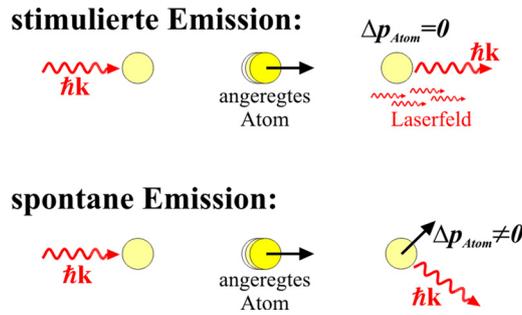


Abbildung 1: Ein Laserphoton mit dem Impuls $\vec{\hbar k}$ trifft auf ein Atom, wird absorbiert und regt dieses von seinem energetischen Grundzustand $|g\rangle$ in einen Zustand $|e\rangle$ an. Wird nun in der Folge wieder ein Photon absorbiert, so geschieht dies entweder stimuliert oder spontan. Im Falle der anisotropen stimulierten Emission ist der Impulsübertrag auf das Atom für diesen Gesamtvorgang gemittelt über viele Streuprozesse gleich Null. Im Falle der isotropen spontanen Emission kommt es zu einem Nettoimpulsübertrag der zur Beschleunigung bzw. Abbremsung des Atoms führt. Aus [6].

(k_{Laser} ist Wellenvektor). Dies setzt nun voraus, dass man Laserlicht einstrahlt, dass gegenüber der Resonanzfrequenz ν_0 des Atoms verstimmt ist. Ist diese Verstimmung nun zu kleineren Frequenzen hin (Rotverstimmung, d.h. $\nu_{Laser} < \nu_0$), so absorbiert ein Atom, dass sich auf den Laser zubewegt, ein Photon mit höherer Wahrscheinlichkeit, als wenn es sich davon wegbewegt. Dies liegt daran, dass bei Atomen, die sich auf den Laserstrahl zu bewegen, sich die Resonanzfrequenz hin zur rotverstimmtten Frequenz des Lasers verschiebt.

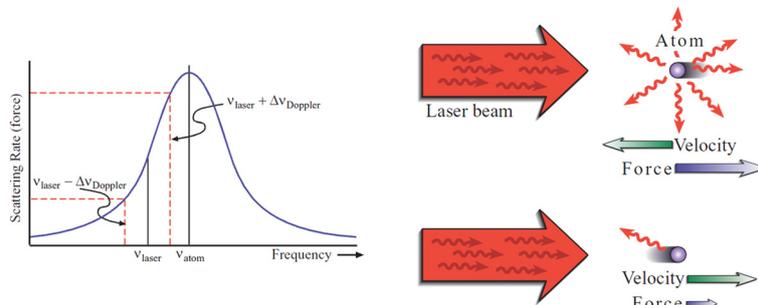


Abbildung 2: Links: Die Wahrscheinlichkeit für eine Absorption eines Photons ist dann am größten, wenn das Photon die Resonanzfrequenz des Atoms (hier: $\nu_0 = \nu_{Atom}$) besitzt. Je nach Bewegungsrichtung des Atoms wird die Dopplerverschiebung $\Delta\nu_{Doppler}$ zur Laserfrequenz addiert bzw. subtrahiert und es ergibt sich eine höhere bzw. niedrigere Wahrscheinlichkeit für eine Absorption. Rechts: Bewegt sich ein Atom auf einen rotverstimmtten Laser zu (oben), so ist die Wahrscheinlichkeit eines Absorptions-Emissionszyklus größer als wenn es sich davon wegbewegt (unten). In der Folge erhält man über die Zeit im ersten Fall eine höhere bremsende Kraft als im zweiten Fall. Aus [18].

Bewegt sich das Atom in einer Raumdimension innerhalb zweier gegenläufiger rotverstimmtter Laserstrahlen, so ergibt sich eine geschwindigkeitsabhängige Kraft, welche auf alle Atome

wirkt, deren Geschwindigkeit ungleich Null ist. Der Betrag dieser geschwindigkeitsabhängigen Kraft hängt vom Impuls $\hbar\vec{k}$ des Laserphotons sowie von der Zerfallsrate γ des Zustands $|e\rangle$ ab. Mit dem Sättigungsparameter $s_0 = I/I_0$ (Laserintensität I , Sättigungsintensität $I_0 = \pi\hbar c/(3\lambda^3\tau)$ mit optischer Wellenlänge λ und Lebensdauer des angeregten Zustands $\tau = 1/\gamma$) und der Verstimmung $\partial_{\pm} = \nu_{Laser} - \nu_0 \mp k_{Laser}v$ erhält man für die geschwindigkeitsabhängige Kraft einer Absorption mit nachfolgender spontaner Emission den Wert

$$F_{\pm} = \pm\hbar k \frac{\gamma}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + 4\left(\frac{\partial_{\pm}}{\gamma}\right)^2} =_{max} \hbar k \frac{\gamma}{2} \quad (2)$$

für die Kraft eines Lasers auf ein Atom in einer Raumdimension abhängig von der Bewegungsrichtung (Abb. 3, zur Ableitung der Formeln in diesem Abschnitt siehe [7]). Gleichung (2) gilt hierbei für sämtliche Laserintensitäten. Diese sogenannte *Spontankraft* wirkt immer der Ausbreitungsrichtung entgegen und hat so eine bremsende Wirkung auf das betreffende Atom.

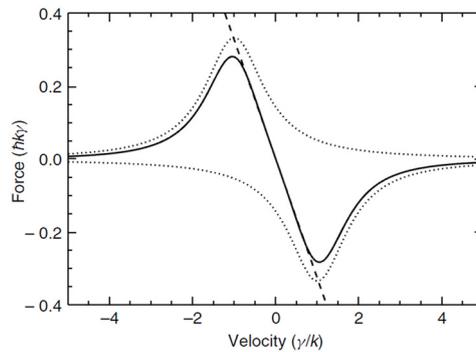


Abbildung 3: Die Kraft auf ein Atom, das sich in einer Raumdimension zwischen zwei gegenläufigen rotverstimmt Laserstrahlen bewegt ist geschwindigkeitsabhängig (durchgezogener Graph, die gestrichelten Graphen zeigen die Kräfte jedes einzelnen Laserstrahls). Sie hat dort ihr Maximum, wo einer der beiden Laserstrahlen in Resonanz mit dem Atom kommt. Ihr betragsmäßiges Minimum liegt im Ursprung, d.h. Atome die in Ruhe befindlich sind, werden durch die Laserstrahlen nicht beeinflusst. Am effektivsten werden Atome gebremst, deren Geschwindigkeit sich zwischen den beiden Maxima (Einfangbereich) befindet. Dort lässt sich die Kraft auch als reine Reibungskraft (analog zur Mechanik, siehe Gleichung (6)) beschreiben, sprich linearisiert darstellen. Aus [7].

Die Spontankraft ist für ein einzelnes Photon gering und verursacht Geschwindigkeitsänderungen im Bereich weniger $\frac{cm}{s}$. Die Tatsache jedoch, dass mehr als 10^7 Absorptions-Emissionszyklen pro Sekunden möglich sind, macht diese Kraft so effektiv. Entsprechend der Beziehung $F = m \cdot a$ erhält man hier Beschleunigungswerte a mit $a \approx 10^4 - 10^5 g$, wobei $g \approx 10m/s^2$.

2.1.2 Abbremsen der Atome in allen Raumdimensionen - die *optische Melasse*

Um die Atome in allen drei Raumrichtungen zu verlangsamen, nutzt man drei orthogonale Paare gegenläufiger identisch rotverstimmter Laser wie in Abbildung 4 dargestellt. Diese Anordnung bezeichnet man als *optische Melasse*, da sie für die Atome wie eine zähe Flüssigkeit wirkt in denen sie abgebremst werden. Die Größe der Fallenregion ergibt sich dann aus dem Kreuzungsvolumen der Laserstrahlen.

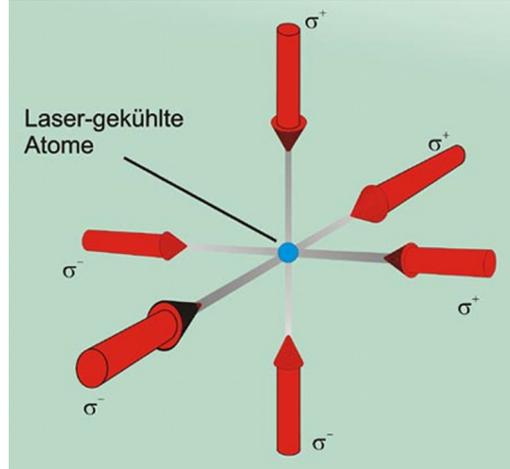


Abbildung 4: Drei orthogonale Paare gegenläufiger rotverstimmter Laserstrahlen erlauben die Abbremsung von Atomen in allen drei Raumrichtungen. Da sich im Kreuzungsbereich der Laserstrahlen die Atome ähnlich verhalten wie in einer zähen Flüssigkeit, bezeichnet man diese Anordnung als *optische Melasse*. Die Bedeutung der Polarisation der Laserstrahlen wird in Abschnitt 2.3 erläutert. Aus [19].

Für ein paar gegenläufiger Laser in einer Raumdimension ergibt sich für kleine Laserintensitäten ($s_0 \ll 1$) als Folgerung von Gleichung (2) die Beziehung

$$F_{ges} = F_+ + F_- \quad (3)$$

$$= \hbar k \frac{\gamma}{2} \left(\frac{s_0}{1 + s_0 + 4 \left(\frac{\partial_{\pm}}{\gamma} \right)^2} - \frac{s_0}{1 + s_0 + 4 \left(\frac{\partial_{\pm}}{\gamma} \right)^2} \right) \quad (4)$$

$$= \hbar k \frac{\gamma}{2} \left(\frac{s_0}{1 + 4 \left(\frac{\partial_{\pm}}{\gamma} \right)^2} - \frac{s_0}{1 + 4 \left(\frac{\partial_{\pm}}{\gamma} \right)^2} \right) \quad (5)$$

für die bremsende Gesamtkraft in einer Raumdimension als Funktion der Atomgeschwindigkeit (Abb. 3). Diese Kraft lässt sich für kleine Geschwindigkeiten v durch Taylorentwicklung um $v = 0$ linearisieren zu

$$F = 8\hbar k^2 \frac{\frac{I}{I_0} \frac{\partial}{\gamma}}{\left(1 + \left(\frac{2\partial}{\gamma}\right)^2\right)^2} v =: -\mu v. \quad (6)$$

Die in einer optischen Melasse minimal erreichbare Temperatur $T_{Doppler}$, das sogenannte *Doppler-Limit*, ergibt sich aus einem, bedingt durch spontane Streuprozesse, der Kühlung entgegenwirkenden Heizprozess (mit $\partial = -\gamma/2$), und berechnet sich bei maximaler Kühlkraft folglich aus der Beziehung

$$k_B T = \frac{\hbar \gamma}{2}. \quad (7)$$

Umstellen ergibt dann

$$T_{Doppler} = \frac{\hbar \gamma}{2k_B} \approx 140 \mu K, \quad (8)$$

wobei für ^{87}Rb der Wert $\gamma \approx 6 \text{ MHz}$ verwendet wurde. Mittels anderer Kühlmechanismen lässt sich dieses Temperaturlimit noch signifikant weiter herabsetzen. Für die Anwendungen in der Stuttgarter Praktikums-MOT ist dieses Limit jedoch ausreichend. Es bleibt festzuhalten, dass eine optische Melasse die Atome im Impulsraum einengen kann, jedoch nicht im Ortsraum. Die Erweiterung der optischen Melasse um ein magnetisches Quadrupolfeld macht dies letztlich möglich wie in den Abschnitten 2.3 und 2.4 beschrieben wird. Um die Funktion einer MOT aber vollständig nachvollziehen zu können, ist es zunächst nötig, sich mit der Multiniveaustuktur der zu fangenden Atome zu beschäftigen.

2.2 Kühlen von Rubidium und Rückpumpen

Bisher wurde das Prinzip der Dopplerkühlung von Atomen nur im Modell des Zweizustandssystem beschrieben. Im realen Versuch nutzt man das wasserstoffähnliche Alkalimetall Rubidium, das zu 72% aus dem Isotop ^{85}Rb und zu 28% aus dem Isotop ^{87}Rb besteht, wobei letztlich ^{87}Rb gefangen werden wird. Das Termschema dieses Elements ist deutlich komplizierter als das des einfachen Modells für ein Zweiniveausystem (siehe Anhang A). ^{87}Rb hat im Grundzustand $5S_{1/2}$ einen Drehimpuls² $J = \frac{1}{2}$ und im ersten angeregten Zustand $5P_{3/2}$ einen Gesamtdrehimpuls $J = \frac{3}{2}$. Die Kernspinquantenzahl beträgt $I = \frac{3}{2}$. Für den Grundzustand ergibt sich mit $F = I \pm J$ für den Gesamtdrehimpuls $F = 1$ bzw. $F = 2$ und $F' = 0, 1, 2, 3$ für den angeregten Zustand.

Zur Kühlung der Atome nutzt man den Hyperfeinstrukturübergang $F = 2 \longrightarrow F' = 3$ innerhalb der Feinstruktur-*D2*-Linie $^2S_{1/2} \longrightarrow ^2P_{3/2}$. Dieser Übergang ist geschlossen, da gemäß der Auswahlregel $\Delta F = 0, \pm 1$ der angeregte Zustand $F' = 3$ nur in den Zustand $F = 2$

²Drehimpuls $\hat{=}$ Gesamtdrehimpuls des Valenzelektrons

zurückfallen kann.

Ein Problem für den Dopplerkühlprozess ergibt sich aus der Tatsache, dass es eine nicht verschwindende Wahrscheinlichkeit dafür gibt, dass das Atom in den Zustand mit $F' = 2$ angeregt wird und von dort in den Zustand mit $F = 1$ zurückfällt. In diesem Zustand ist die Möglichkeit zur weiteren Interaktion des Atoms mit dem Licht des Kühllasers nicht mehr gegeben. Das Atom aus diesem *dark state* heraus wieder in den Zustand $F' = 2$, von dem aus es wieder in den Zustand $F = 3$ gelangen kann, zu bringen, wird mittels eines zusätzlichen Lasers, dem sogenannten Rückpumplaser erreicht. Pro 1000 Anregungen kommt dieser Fall des Zurückfallens in den Zustand $F = 2$ im Durchschnitt einmal vor.

Das Isotop ^{85}Rb lässt sich gleichermaßen fangen, wenn man als Kühlübergang die Linie $F = 3 \rightarrow F' = 4$ nutzt. Der Rückpumpübergang ist hier die $F = 2 \rightarrow F' = 3$ -Linie.

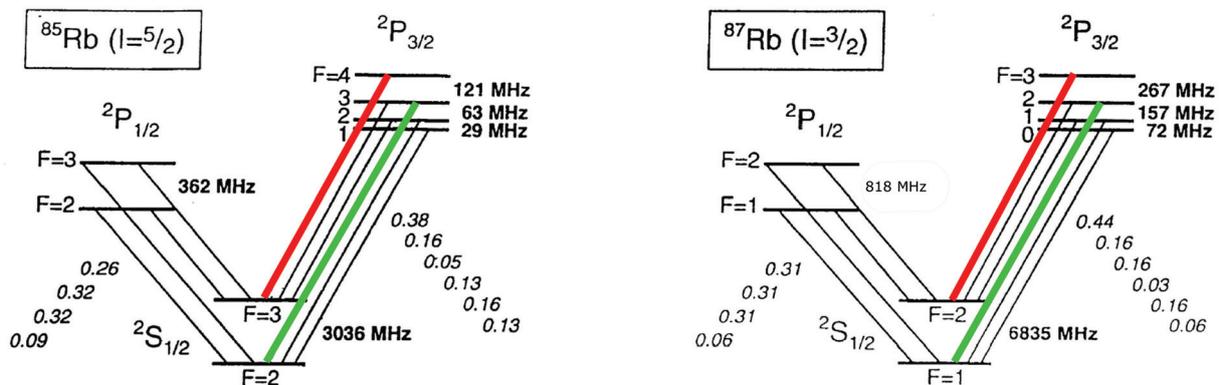


Abbildung 5: Zur Kühlung von Rubidium-Atomen wird (bei beiden Isotopen) jeweils die Feinstruktur-D2-Linie $2S_{1/2} \rightarrow 2P_{3/2}$ genutzt. Für ^{85}Rb (Abb. links) verwendet man den Hyperfeinstrukturübergang $F = 3 \rightarrow F' = 4$ zum Kühlen (rote Kennzeichnung) und den Übergang $F = 2 \rightarrow F' = 3$ zum Rückpumpen (grüne Kennzeichnung). Für ^{87}Rb (Abb. rechts) verwendet man den Hyperfeinstrukturübergang $F = 2 \rightarrow F' = 3$ zum Kühlen und den Übergang $F = 1 \rightarrow F' = 2$ zum Rückpumpen. Mit Änderungen übernommen aus [16].

2.3 Räumliches Fangen der Atome

Der Kühlprozess alleine reicht nicht aus, um die Atome in einer bestimmten Region zu fangen. Auch wenn mit der Temperatur der Atome deren Geschwindigkeit abnimmt, so würden die gekühlten Atome trotzdem im Laufe der Zeit aus dem Kühlbereich der optischen Melasse heraus diffundieren ³.

Um den Mechanismus des räumlichen Fangens zu verstehen, wird wieder ein Zweiniveausystem betrachtet. Dieses soll einen Grundzustand $F = 0$ und einen angeregten Zustand $F = 1$ aufweisen. Mit dem Ziel eine Ortsabhängigkeit der atomaren Resonanzfrequenz ν_0 zu erhalten, überlagert man diesem System nun ein inhomogenes Quadrupolmagnetfeld \vec{B} welches von einem Helmholtz-Spulenpaar erzeugt wird, dessen einzelne Spulen mit gegenläufigen Strömen identischen Betrages betrieben werden. Bei dieser Anordnung (siehe Abbildung 6) erzeugt man ein inhomogenes Magnetfeld, dessen Verlauf innerhalb der Spulen in einer Raumrichtung als nahezu linear angenommen werden kann und welches im Zentrum der Anordnung verschwindet.

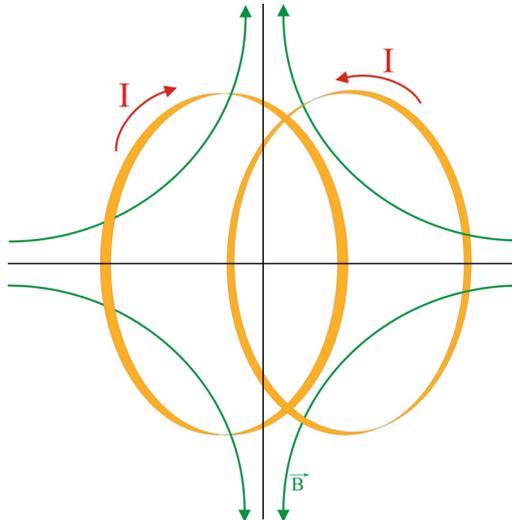


Abbildung 6: Betreibt man ein Helmholtz-Spulenpaar mit betragsmäßigen gleichen aber entgegengesetzt fließenden Strömen, so entsteht ein inhomogenes Magnetfeld, dessen Verlauf in der Anordnung in einer Raumrichtung als nahezu linear angenommen werden kann. Im Zentrum der Spulen (Kreuzungspunkt der beiden schwarzen Linien) enthält man einen Ort mit $|\vec{B}| \equiv 0$.

Atomare Übergänge des angesprochenen Zweizustandssystems in diesem Magnetfeld spalten nun bedingt durch den Feldgradienten in drei Zeeman-Komponenten auf. Zum besseren Verständnis beschränkt man sich hier auf die Behandlung des eindimensionalen Falles entlang

³Eine wissenschaftliche Begründung für dieses Nicht-Funktionieren einer dreidimensionalen Falle welche eine statische Laserkonfiguration besitzt und nur die elektromagnetische Wechselwirkung des Lichts nutzt lieferte der englische Physiker Samuel Earnshaw mit dem Beweis des nach ihm benannten Earnshaw-Theorems.

einer Spulenchse. Dieses Schema lässt sich aber problemlos auf alle drei Raumdimensionen erweitern (ähnlich der Erweiterung der Kühlung der Atome in einer Raumdimension auf die optische Melasse).

Betrachtet man die Energieniveaus im inhomogenen Magnetfeld der Form $B = B(z) = B'z$, ($B'=\text{konst.}$), so sieht man den angeregten Zustand $F = 1$ je nach Betrag des Magnetfeldes aufgespalten.

Für $B = 0$ ist diese sogenannte Zeeman-Verschiebung nicht messbar. Für den Fall $B > 0$ ist das Zeeman-Unterniveau mit $m = -1$ energetisch herabgesetzt, das Zeeman-Unterniveau mit $m = 1$ energetisch heraufgesetzt⁴. An einer Position z rechts des Ursprungs (d.h. im Bereich $B > 0$, siehe Abbildung 7) verstimmt die Zeeman-Verschiebung δ_Z den Übergang $\Delta m = -1$ näher an die Resonanz mit einem von rechts eingestrahlteten σ^- -Lasers und weiter entfernt von der Resonanz mit einem σ^+ -Laser. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Absorptions-Emissions-Zyklus rechts vom Ursprung größer ist für Photonen eines σ^- -polarisierten Lasers als für jene eines σ^+ -polarisierten Lasers. Diese Tatsache bewirkt nun die angesprochene Ortsabhängigkeit der Resonanzfrequenz des zu fangenden Atoms und in Folge eine ortsabhängige Kraft nach links in Richtung $z = 0$.

Betrachtet man einen Punkt links vom Ursprung so verhalten sich die eben angesprochenen Phänomene andersherum, was in Folge eine ortsabhängige Kraft nach rechts ebenfalls zur Fallmitte bewirkt. Obwohl die meisten Atome kein derart einfaches Zweiniveauschema wie hier aufweisen, funktioniert das Prinzip bei jedem Übergang mit $F_{|g\rangle} \rightarrow F_{|e\rangle} = F_{|g\rangle} + 1$.

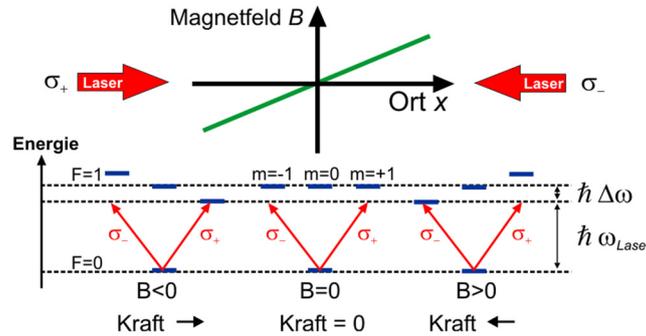


Abbildung 7: Das Magnetfeld verläuft in einer fixen Raumrichtung linear ansteigend mit Nulldurchgang im Ursprung. Von rechts strahlt man mit einem σ^- -polarisiertem Laserlicht, von links mit einem σ^+ -polarisiertem Laserlicht ein. Durch den Magnetfeldgradienten spaltet der Übergang in verschiedene Energieniveaus auf (Zeeman-Verschiebung $\hbar\Delta\omega$). Dieser Effekt schiebt die Übergänge $\Delta m = \pm 1$ in Resonanz mit σ^\pm -Licht. Hieraus resultiert eine ortsabhängige Kraft auf das Atom welche jeweils zum Ursprung hin wirkt.

Sowohl die Kühlung der Atome als auch das räumliche Fangen lassen sich von einer Raumdimension problemlos auf drei Raumdimensionen erweitern. Bringt man nun die optische Melasse

⁴Welches Energieniveau konkret energetisch herauf- oder herabgesetzt wird hängt letztlich vom Vorzeichen des Landé-Faktors g_F ab.

und das inhomogene Magnetfeld zusammen, so entsteht eine vollständige echte Falle wie im nächsten Abschnitt beschrieben.

2.4 Konzept der magneto-optischen Falle

Der optischen Melasse aus 2.1.2 wird nun ein inhomogenes Magnetfeld wie in 2.3 überlagert (siehe Abbildung 8). Dadurch erreicht man die Kühlung der Atome sowie die richtige Adressierung der Lichtkräfte, möglich durch den Zeeman-Effekt.

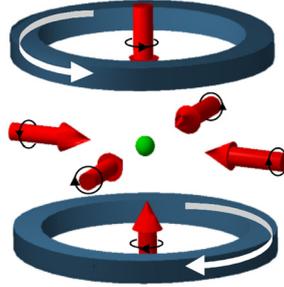


Abbildung 8: Geometrie einer MOT schematisch. Der optischen Melasse, bestehend aus den sechs zirkular polarisierten Laserstrahlen, wird das inhomogene Magnetfeld der beiden Helmholtz-Spulen überlagert. Im Zentrum der Spulenordnung verschwindet das Magnetfeld, hier befindet sich die Fangregion, die in ihrer Größe durch das Schnittvolumen der Laserstrahlen definiert wird. Aus [8].

Die Atome erfahren in dieser Anordnung in einer Raumdimension (hier die z -Richtung) eine Gesamtkraft $F_{ges}^{Atom} = F_{ges}^{Atom}(v, B(z))$ welche sich analog zu Gleichung (2) wie folgt beschreiben lässt:

$$F_{ges}^{Atom} = F_{+}^{Atom} + F_{-}^{Atom} \quad (9)$$

$$F_{\pm}^{Atom} = \pm \hbar k \frac{\gamma}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + 4 \left(\frac{\partial_{\pm}^{\mu}}{\gamma} \right)^2} \quad \partial_{\pm}^{\mu} = \nu_{Laser} - \nu_0 \mp kv \pm \mu B / \hbar. \quad (10)$$

μ ist hierbei das magnetische Moment für den verwendeten atomaren Übergang. Man beachte die unterschiedlichen Vorzeichen von Doppler-Verschiebung und Zeeman-Verschiebung für Laserstrahlen aus entgegengesetzten Richtungen.

Zur quantitativen Berechnung des Anti-Helmholtz-Feldes legt man das Magnetfeld einer Spule (kreisförmig) mit Radius R und n Windungen zu Grunde, welche etwa in der x - y -Ebene liegt und von einem Strom I durchflossen wird. Für einen Punkt auf der z -Achse gilt dann nach [20]:

$$B(z) = \frac{\mu_0 R^2 I n}{(R^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (11)$$

Verwendet man zwei solche Schleifen mit entgegengesetzten Strömen, die den Abstand d haben und symmetrisch zur x - y -Ebene liegen, so erhält man für das überlagerte Feld beider Schleifen den Ausdruck

$$B(z) = \frac{\mu_0 R^2 I n}{2} \left[\left(R^2 + \left(\frac{d}{2} - z \right)^2 \right)^{-3/2} - \left(R^2 + \left(\frac{d}{2} + z \right)^2 \right)^{-3/2} \right] \quad [22]. \quad (12)$$

Mit der Forderung $d = \sqrt{3}R$ erhält man zusätzlich einen bis auf Terme der Ordnung z^5 linearen Feldverlauf [22]. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Feldverlauf neben der 3-D-Abbildung 6 noch zweidimensional.

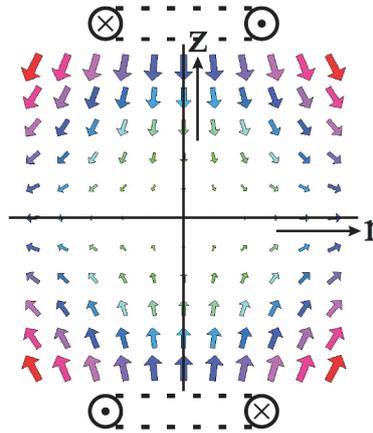


Abbildung 9: Die Abbildung zeigt das Quadrupolfeld der Anti-Helmholtz-Spulen, welches im Zentrum der Anordnung verschwindet. Oben und unten im Bild sind die mit einem gegenseitigen Strom gleicher Größe durchflossenen Spulen im Schnittbild dargestellt. Aus [21].

3 Experimenteller Aufbau

Der Aufbau der MOT an sich (d.h. ohne die Bereitstellung des benötigten Laserlichts) besteht im Wesentlichen aus den drei Hauptbereichen **Vakuumkammer mit Dampfzelle**, **optischem Setup** und **Helmholtz-Spulenpaar**. Das benötigte Laserlicht für Kühlung und Rückpumpen wird nicht separat bei der MOT bereitgestellt sondern von bereits vorhandenen experimentellen Aufbauten in diesem Labor entliehen und über Glasfaserleitungen zum Versuch geführt.

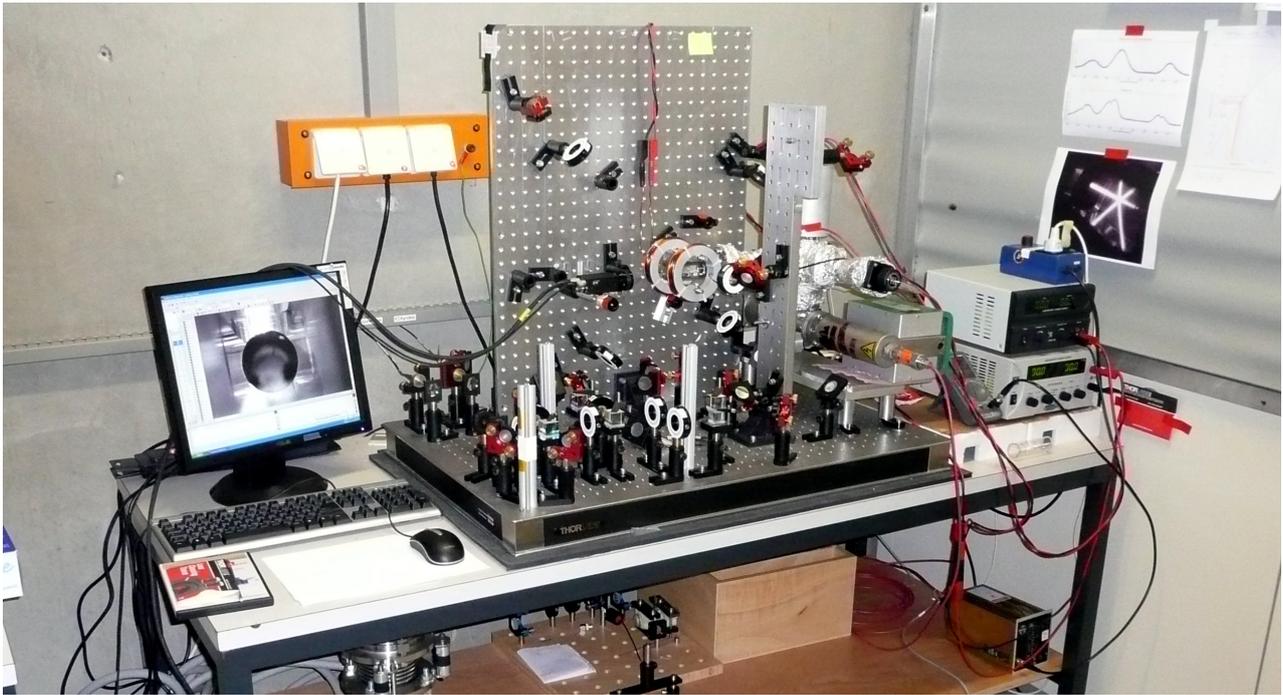


Abbildung 10: Der komplette Versuchsaufbau im 5. Physikalischen Institut. Die Laserstrahlen werden auf dem optischen Tisch ganz links hinten aus der Glasfaser ausgekoppelt und durch die Optik in die erforderlichen jeweils sechs Strahlen aufgeteilt. Die Vakuumpumpe befindet sich rechts auf dem optischen Tisch, die Dampfzelle zwischen dem Helmholtz-Spulenpaar.

3.1 Vakuumkammer mit Dampfzelle

Um die Wahrscheinlichkeit für Stöße (und die damit verbundene Erwärmung) der zu kühlenden Atome mit in der Zelle im Hintergrund vorhandenen Gasatomen zu minimieren, ist die Realisierung einer MOT nur im (Ultra-)Hochvakuum möglich. Das Abpumpen beim Versuchsaufbau erfolgte anfänglich aus einer Kombination einer Vorpumpe und einer Turbomolekularpumpe. Um den benötigten Enddruck (ca. $1 \cdot 10^{-8} \text{ mbar}$), der bei Raumtemperatur etwa eine Größenordnung unter dem ^{87}Rb -Dampfdruck (ca. $2,5 \cdot 10^{-7} \text{ mbar}$ bei 20°C) liegt, zu erreichen und um dieses Druckniveau stabil zu halten ist der Einsatz einer Ionenpumpe erforderlich. Eine

weitere Vorgehensweise zur Absenkung des Drucks in der Vakuumkammer ist das Verfahren des Ausheizens. Es wird benutzt, um durch Erwärmen der Wände der Kammer die Desorption von Verschmutzungen wie Wasser oder Kohlenwasserstoffen von diesen zu ermöglichen. Die desorbierten Restgase werden dann ebenfalls von der Vakuumpumpe abgesaugt. Während des Ausheizens ist der Einsatz von Pumpen mit Restgasausleitung noch zu empfehlen.

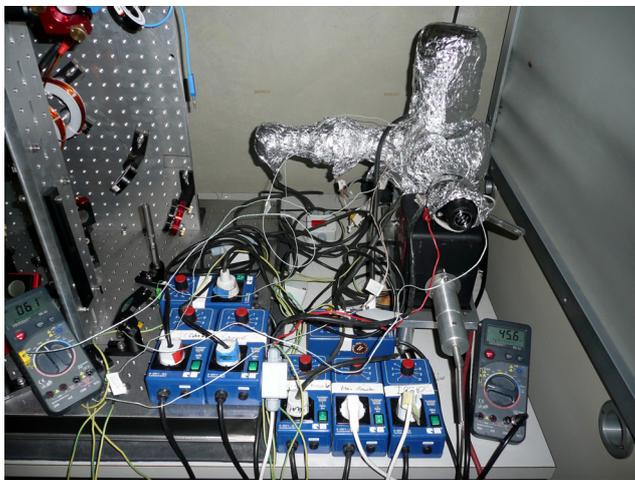


Abbildung 11: Um in der Vakuumkammer den erforderlichen Arbeitsdruck zu erreichen wurde der Druck zunächst mit einer Kombination aus Vor- und Turbomolekularpumpe (Pumpenstand) herabgesetzt. Zusätzlich wurden Heizbänder angebracht. Nach dem Erreichen eines bestimmten Druckniveaus erfolgte das Schließen des Hauptventils zum Pumpenstand und die dauerhafte Inbetriebnahme der Ionenpumpe. Zur Kontrolle der Ausheiztemperatur (Temperatur-Monitoring) und zur Messung des Ionisationsstroms in der Ionenpumpe dienen die beiden Multimeter.

Die Ionenpumpe ist fester Bestandteil der Vakuumkammer, der Pumpenstand mit Vor- und Turbomolekularpumpe wurde nach dem Schließen des Hauptventils wieder von der Kammer abgetrennt. Da in der Vakuumkammer selbst kein Druckmessgerät vorhanden ist muss der Arbeitsdruck mittels dem Ionisationsstrom in der Ionenpumpe indirekt gemessen werden (siehe hierzu Anlage B).

Die zunächst zum Einsatz kommende Zelle in welcher die Rubidiumatome gefangen werden sollen ist kein industrielles Produkt, sondern wurde in Eigenleistung hergestellt. Zum Aufkleben der Fenster aus Borsilikatglas auf den Zellenkörper wurde der Zweikomponentenkleber *EPO-TEK 353ND* verwendet. Beim Aushärten des Klebers im Ofen traten durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Glas und Metall im Kontaktbereich des Klebers Spannungen auf. Um sicher zu stellen, dass die Spannungen (und damit verbunden Stellen der Doppelbrechung) das Glas nicht global betreffen und an welchen Stellen das Durchstrahlen mit Laserlicht problemlos möglich ist, wurde die Zelle unter einer Polarisationslampe fotografiert. Zu einem Glasbruch kam es bei einer Aushärtezeit von 50min bei 80°C nicht, die entstandenen Spannungen aber sind verantwortlich, dass sich die Polarisation des Lichtes bei Durchgang

durch das Glas unkontrollierbar verändert und man sich entschieden hat, in einer nächsten Version, eine industriell gefertigte Zelle zu kaufen, die ausschließlich aus Glas besteht.

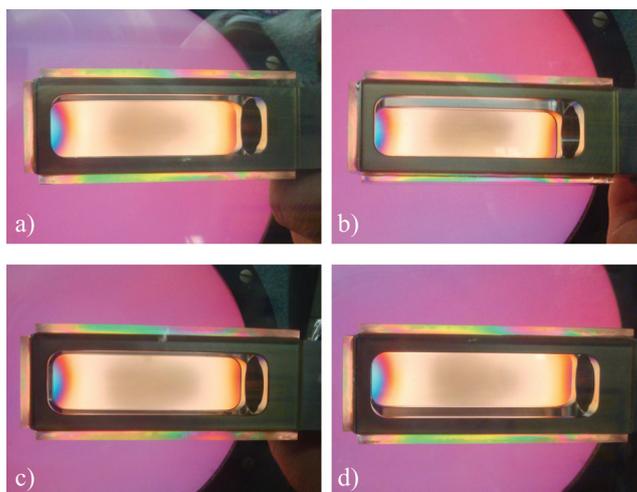


Abbildung 12: Die Bilder a) bis d) zeigen die vier für den Betrieb der MOT relevanten optischen Zugänge der Fangzelle, aufgenommen unter einer Polarisationslampe. Deutlich zu erkennen sind die durch den Aushärtvorgang des Zweikomponentenklebers entstandenen Spannungen im Glas. Diese treten augenscheinlich vorwiegend in den Randbereich auf. Jedoch waren trotzdem unkontrollierbare Polarisationsveränderungen des Laserlichts bei Durchgang durch die Zelle zu messen.

Um die Vakuumkammer mit Rubidium zu befüllen stehen zwei Möglichkeiten zur Wahl: Ein über ein zusätzliches Ventil angebrachtes Rubidium-Reservoir sowie ein Rubidium-Dispenser⁵. Das Rubidium im Reservoir wurde unter einer *Ar*-Schutzatmosphäre eingebracht. Durch den erreichten Arbeitsdruck in der Kammer, welcher bei Raumtemperatur etwa eine Größenordnung unter dem Dampfdruck der Probe liegt, genügt es prinzipiell, das Ventil zum Reservoir zu öffnen um die gesamte Kammer mit Rubidium zu fluten. Am Reservoir kann zusätzlich eine Heizung angebracht werden, um mit der Temperatur auch den Dampfdruck der Probe zu erhöhen.

Trotz sorgfältigen Umfüllens bildete sich nach dem Anbringen des Reservoirs an die Vakuumkammer eine Oxidschicht auf dem Rubidium. Diese erschwerte eine Diffusion der Probe in den Rezipienten. Jedoch konnte mit dieser Probe nach längerer Wartezeit ein erstes leichtes Rb-Absorptionsspektrum in der Kammer gemessen werden.

Höchstwahrscheinlich auf Grund eines Lecks am CF-Flansch zwischen Rb-Reservoir und Ventil kam es zu einem Kollaps des bis dahin guten Vakuums im Rezipienten. Diesem Kollaps schloss sich nach einem Stromausfall im Labor der Defekt der eingesetzten Ionenpumpe und deren Controller an, so dass diese Komponenten getauscht werden mussten. Das zum Tausch

⁵Aktive Länge des Dispenserschiffchens: 12mm, Rb-Inhalt: 4,5mg, durchschnittlicher zum Verdampfen notwendiger Strom: 5,3A (alles Herstellerangaben);

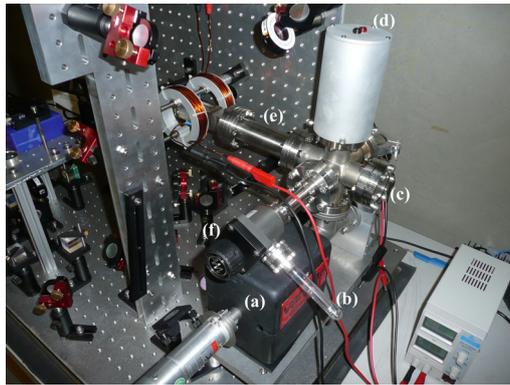


Abbildung 13: Übersicht über die Vakuumapparatur. Die Iononpumpe (a) (hier ist noch die erste zum Einsatz kommende Iononpumpe der Firma *Varian* installiert, welche im Laufe der Aufbauphase durch eine Iononpumpe des Herstellers *Meca 2000* ersetzt wurde) erhält den Druck in der Vakuumkammer aufrecht. Als Rubidiumquelle dient das Reservoir (b) (hier ohne angebrachte Heizung), welches über das Ventil (f) an die übrige Kammer angeschlossen ist. Eine weitere Quelle für Rubidium ist der Dispenser der sich in der Rohrleitung (e) befindet die zur MOT-Zelle führt. An Position (c) befindet sich ein Fenster, an Position (d) die Anschlüsse für den Rubidiumdispenser. Die eigentliche Fangzelle aus Glas befindet sich (hier durch die Helmholtz-Spulen verdeckt) am Ende der Rohrleitung (e).

der Iononpumpe notwendige Fluten der Vakuumkammer wurde auch dazu benutzt, das Dispenserschiffchen zu erneuern und das Leck zu schließen. Zudem wurde in den Rohrkanal, der zur Zelle führt, ein Duran-Glasrohr etwas geringeren Durchmessers eingebracht, in dem nun der Dispenser liegt. Das Glasrohr verhindert nun einen möglichen Kurzschluss mit der Wandung der Vakuumkammer.



Abbildung 14: Der Dispenser liegt in einem Duran-Glasrohr, welches einen Kurzschluss der Zuleitungen mit der Wandung der Kammer verhindert.

Ebenso in Folge des hohen Drucks in der Vakuumkammer durch das Leck oxidierte die Rubidiumprobe ganz durch und musste erneuert werden. Mit einer Kombination aus Vor- und Turbopumpe sowie der neuen Iononpumpe wurde in der nun dichten Kammer wieder ein

Arbeitsdruck in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{-8} \text{ mbar}$ erreicht.

3.2 Der optische Aufbau

Die beiden benötigten Laser (Kühl- und Rückpumpumplaser) werden über Glasfaserleitungen zum eigentlichen Praktikumsversuch geleitet (siehe hierzu auch das Kapitel zur didaktischen Umsetzung) und direkt auf dem optischen Tisch ausgekoppelt. Der Kühllaser hat nach dem Auskoppeln eine Intensität von $16,1 \text{ mW}$, der Rückpumpumplaser eine Intensität von $6,6 \text{ mW}$. Der gesamte optische Aufbau besteht nun im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- **Spiegel.** Diese dienen zur Richtungsänderung der Laserstrahlen in entsprechende Raumrichtungen.
- **Linsen.** Sie weiten, je zu zweit als Teleskop montiert, die Laserstrahlen auf.
- **Polarisierende Strahlteiler.** Dienen zur Aufspaltung der Laserstrahlen in beliebigen Intensitätsverhältnissen.
- **Verzögerungsplatten.** Notwendig zur Kontrolle der Polarisierungseinstellungen der Laserstrahlen.
- **Kamera.** Mit der Kamera werden die Vorgänge in der Fangzelle beobachtet.
- **Blende.** Sie dient zur Verkleinerung des Kühllaserstrahls für Justagezwecke.

Die aufwendige Optik ist notwendig, um die drei Paare gegenläufiger und orthogonaler Laserstrahlen zu erhalten, welche die optische Melasse bilden. Die Strahlen werden bei diesem Versuchsaufbau nicht in sich selbst zurückreflektiert sondern erreichen die Zelle aus der entsprechenden Richtung. Dies vermindert eine zu große Absorptionsstrecke für jeden Laserstrahl und garantiert somit, dass alle sechs Laserstrahlen mit derselben Intensität die Fallenregion passieren. Eine genaue Überlappung der Laserstrahlen in sich lässt sich durch Justage an den entsprechenden Spiegeln erreichen.

Nach der Auskopplung der Laserstrahlen aus den Glasfasern werden diese durch je ein Teleskop, bestehend aus zwei plan-konvexen Linsen, aufgeweitet um große Laserstrahlen für den Fallenbetrieb zu erhalten. Das Teleskop ist so eingestellt, dass der Strahl einen Durchmesser von ca. $8,5 \text{ mm}$ hat. Im Strahlengang des Kühllasers wird zusätzlich innerhalb des Teleskops eine Blende eingebracht, um den Strahl für Justagezwecke problemlos verkleinern zu können. Beide Laser durchlaufen dann eine $\lambda/2$ -Platte (Platten 1 und 6). Der nachfolgende polarisierende Strahlteiler 1 (kurz PBS⁶) spaltet die Strahlen dann in die benötigten Komponenten (Laserlicht in axialer und radialer Richtung) auf. Das Teilungsverhältnis der Strahlen durch

⁶von engl. *polarizing beam splitter*

den PBS wird durch die Polarisationsrichtung des Lichts bestimmt und lässt sich folglich über die ersten $\lambda/2$ -Platten 1 und 2 einstellen und sollte $2/3 : 1/3$ (radiale Richtung : axiale Richtung) betragen.

Der PBS 2 spaltet den Strahl für die radialen Richtungen dann erneut auf in die Strahlen für die Richtungen *Radial 1* und *Radial 2*. Diese werden letztlich durch die PBS 3 und 4 separiert in die Strahlen *Radial 1 oben*, *Radial 1 unten*, *Radial 2 oben* und *Radial 2 unten*. Der PBS 5 separiert das Licht für die axiale Beleuchtung in die Strahlen *Axial vorne* und *Axial hinten*. Mit den übrigen $\lambda/2$ -Platten lassen sich die Intensitäten aller sechs erzeugten Strahlen auf denselben Wert einstellen, um unsymmetrische Lichtdruckkräfte in der Fangregion der MOT zu vermeiden. In der Aufbauphase wurden mit einem Leistungsmesser die $\lambda/2$ -Platten derart justiert, dass die gewünschten Intensitätsverhältnisse erreicht wurden. Die Einstellwinkel der $\lambda/2$ -Platten (und der nachfolgend beschriebenen $\lambda/4$ -Platten) entnimmt man der Anlage C.2. Jeder der sechs Strahlen durchläuft dann vor dem Eintreten in die Dampfzelle eine $\lambda/4$ -Platte, mittels welcher das Licht zirkular in entsprechender Richtung polarisiert werden kann. Die Einstellung der zirkularen Polarisation erfolgte mittels eines Polarisationsmeters für σ^+ - und σ^- -Licht sowie einem weiteren Polarisationsmeter für die Einstellung des zirkular polarisierten Anteils.

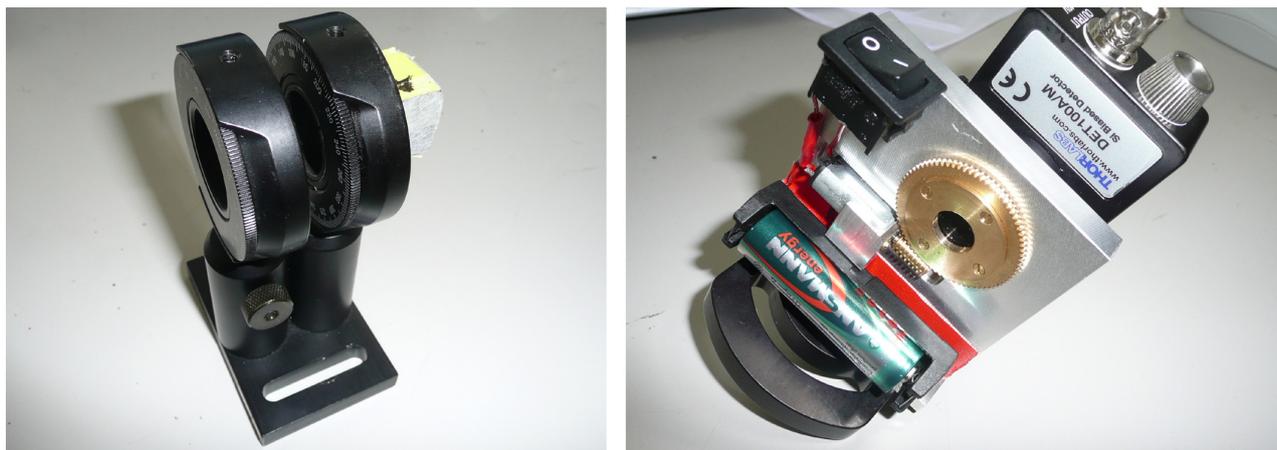


Abbildung 15: Links abgebildet ist das Polarisationsmeter zur Einstellung der σ^+ - bzw σ^- -Polarisation. Dieses besteht aus einem PBS, angebracht auf einem Verzögerungsplattenhalter, sowie einer $\lambda/4$ -Platte. Durch Ändern der Polarisations-einstellung des Lichts beim Drehen dieser Verzögerungsplatte erreicht man nahezu vollständige Reflexion bzw. Transmission durch den PBS und erhält somit σ^+ - bzw σ^- -polarisiertes Licht. Rechts abgebildet ist das Polarisationsmeter, mit welchem der lineare Anteil des elliptisch polarisierten Lichts nach dem ersten Polarisationsmeter auf ein Minimum reduziert wird, um möglichst hochwertiges zirkular polarisiertes Licht zu erhalten. Dieses besteht aus einem sich kontinuierlich drehenden Polfilter vor ein Fotodiode. Je niedriger der Anteil des nicht-zirkular-polarisierten Lichts, dass auf die Fotodiode trifft, ist, desto glatter wird das an einem Oszilloskop beobachtbare Signal der Diode.

Der Anteil an Licht mit linearer Polarisation konnte so bei allen Strahlen nach den $\lambda/4$ -Platten auf ca. 25% und weniger reduziert werden. Messungen des linearen Anteils nach der Zelle ergaben allerdings, dass dieser bis auf ca. 83% ansteigt. Dies bestätigt die unkontrollierte Polarisationsdrehung durch die Spannungen in den optischen Zugängen der Dampfzelle.

Um Intensitätsschwankungen des Kühllasers nach dem ersten PBS der MOT-Optik in Folge willkürlicher Polarisationsdrehungen in der zuleitenden Glasfaser zu reduzieren, ist, wie bei polarisationserhaltenden Fasern üblich, im Laserlabor vor der Einkopplung des Kühllaserlichts in die MOT-Faser eine zusätzliche Verzögerungsplatte ($\lambda/2$) eingebracht und justiert, um die Polarisation vor der Faser zu kontrollieren. Dadurch ist die Polarisation des Lichts unempfindlicher gegen äußere Einflüsse auf die Faserleitung und ermöglichte so die Einstellung der Lichtintensitäten der Strahlen, die in die Dampfzelle treffen. Die Intensitätsschwankung beträgt so noch höchstens ca. 1,6% der maximalen Intensität. Erst mit dieser stabilen Intensität ist es möglich, symmetrische Lichtkräfte in der Dampfzelle zu erreichen.



Abbildung 16: Die zusätzliche Verzögerungsplatte ($\lambda/2$) vor dem Einkoppeln des MOT-Lasers in die Glasfaser sorgt für eine bessere Kontrolle der Polarisation in der Faser und macht sie unempfindlicher gegen äußere Einflüsse wie Temperaturschwankungen, Stöße, etc.

Ein letzter Punkt, der in diesem Bereich ins Gewicht fällt, ist die Tatsache, dass die verwendeten $\lambda/4$ -Platten keine vollständige zirkulare Polarisation zulassen. Deshalb wurde mit den besprochenen Polarisationsmetern der Anteil des nicht-zirkular-polarisierten Lichtes so weit wie möglich reduziert.

3.3 Anti-Helmholtz-Spulen

Das Spulenpaar liefert für einen Spulenabstand $d = \sqrt{3}R$ einen im Zentrum besonders linearen Feldverlauf. Da diese Justage aber aus Gründen des Platzes ggf. nicht möglich ist, wurden die Spulen zumindest symmetrisch um die Dampfzelle mit einem Spulenabstand $d = 8,5\text{cm}$

angeordnet, um einen nahezu linearen Feldverlauf zu garantieren. Die Spule selbst hat einen Radius $r = 5\text{cm}$ sowie eine Windungszahl von $n = 50$. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Feldverlauf in z -Richtung für einen Spulenstrom von 10A .

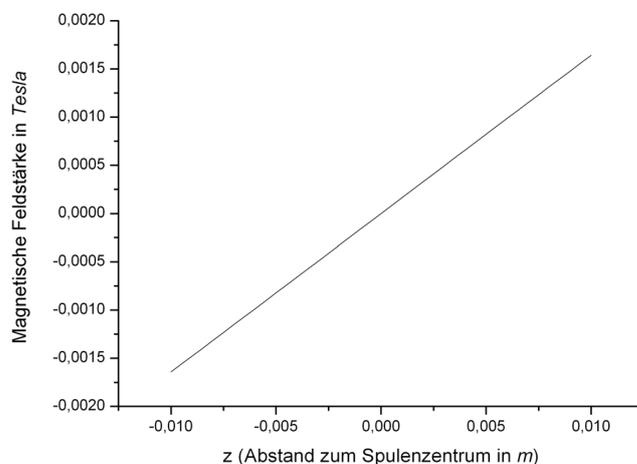


Abbildung 17: Die Abbildung zeigt den nahezu linearen Feldverlauf der Anti-Helmholtz-Spulen in z -Richtung. Dem Graph liegt zur Berechnung Gleichung 12 zugrunde.

Den Magnetfeldverlauf für andere Spulenströme entnimmt man Anhang D.

3.4 Lasersystem

Die MOT wird mit Laserlicht zweier unabhängiger durchstimmbarer Diodenlasersysteme für Kühlung und Rückpumpen versorgt, welche im Rahmen einer Diplomarbeit zur elektromagnetisch induzierten Transparenz in einer magneto-optischen Falle realisiert wurden [17]. Dieses Lasersystem liefert das Licht mit der geforderten Wellenlänge von $780,249\text{nm}$ (Kühlung) und $780,233\text{nm}$ (Rückpumpen). Zur notwendigen Frequenzstabilisierung der benötigten Master-Laser wird eine Absorptionsspektroskopie verwendet. Die genauen Details zum Aufbau und zur Funktion der Lasersysteme entnimmt man [17].

4 Messprogramm und experimentelle Resultate

Die Aufbauphase im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeit diente der Inbetriebnahme der MOT sowie dem Entwerfen eines für das physikalische Fortgeschrittenenpraktikum geeigneten Messprogrammes. Aufgrund verschiedener Faktoren, wie sie im Kapitel zum experimentellen Aufbau diskutiert wurden, konnte leider bis jetzt noch keine Wolke gefangener Atome erzielt werden und somit auch kein explizites Messprogramm ausgearbeitet werden. Der MOT-Aufbau an sich ist aber, bis auf die Dampfzelle, die ja wie weiter oben bereits erwähnt noch getauscht wird, voll funktionsfähig und einem Betrieb der MOT mit der neuen Zelle steht dann nichts mehr entgegen.

Mit der in Eigenarbeit hergestellten Zelle konnten die in diesem Kapitel beschriebenen Ergebnisse erzielt werden.

4.1 Fluoreszenz und Absorptionsspektrum von Rubidium

Zum Nachweis, dass die Dampfzelle mit Rubidium geflutet ist, dienen zwei Möglichkeiten: Die Beobachtung einer Fluoreszenz in der Dampfzelle oder die Aufnahme eines Absorptionsspektrums mit einem durchstimmbaren Laser. Nach dem Fluten der Dampfzelle im Dispenserbetrieb (Dispenserstrom ca. $4,5A - 5,5A$) konnte mit der Kamera die folgende Fluoreszenzaufnahme gemacht werden:

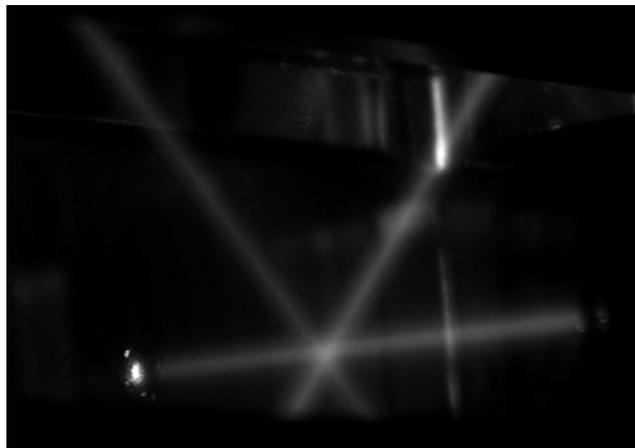


Abbildung 18: Aufnahme der Fluoreszenz im Dispenserbetrieb beim Durchstrahlen der Dampfzelle mit einem auf Resonanzfrequenz ($^{87}Rb, F = 2 \rightarrow F'$) gelockten Laser. Deutlich zu sehen ist das Licht in den drei Raumrichtungen, in denen jeweils ein gegenläufiges Paar Laserstrahlen überlappt wurde. Im Kreuzungsbereich der drei Strahlenpaare erwartet man das Auftreten der MOT, allerdings erst wenn die Strahlen nicht wie in diesem Fall durch die Blende verkleinert wurden.

Die Aufnahme zeigt eine deutliche Fluoreszenz beim Durchstrahlen der Dampfzelle mit Licht des Kühllasers. Die starke Fluoreszenz in dieser Aufnahme wurde durch einen hohen Dispenser-

strom erreicht. Im Regelbetrieb ist dieser deutlich niedriger einzustellen, um zu verhindern, dass die Absorptionsrate in der Zelle zu groß ist. Ebenso zu sehen sind verschiedene Laserreflexe an den Fenstern der Zelle, welche aber für den Betrieb der MOT nicht störend sind. Die starke Fluoreszenz ermöglicht es dem Experimentator, die Justage der Strahlen in einen gemeinsamen Kreuzungspunkt relativ einfach vorzunehmen und erleichtert diese erste zentrale Aufgabe auch den Praktikanten.

Neben der Fluoreszenzaufnahme wurde noch ein Absorptionsspektrum mit dem durchstimmbaren Kühllaser aufgezeichnet. Da sich die künftigen Praktikanten bereits im Laserspektroskopieversuch mit diesen Inhalten ausführlich auseinandergesetzt haben, wird hier nur darauf eingegangen, dass die Aufzeichnung des Spektrums als Bestätigung für das Vorhandensein von Rubidiumgas in der Dampfzelle dient⁷. Deswegen wird auch hier auf eine detaillierte quantitative Auswertung verzichtet. Die folgende Abbildung zeigt das aufgenommene Spektrum:

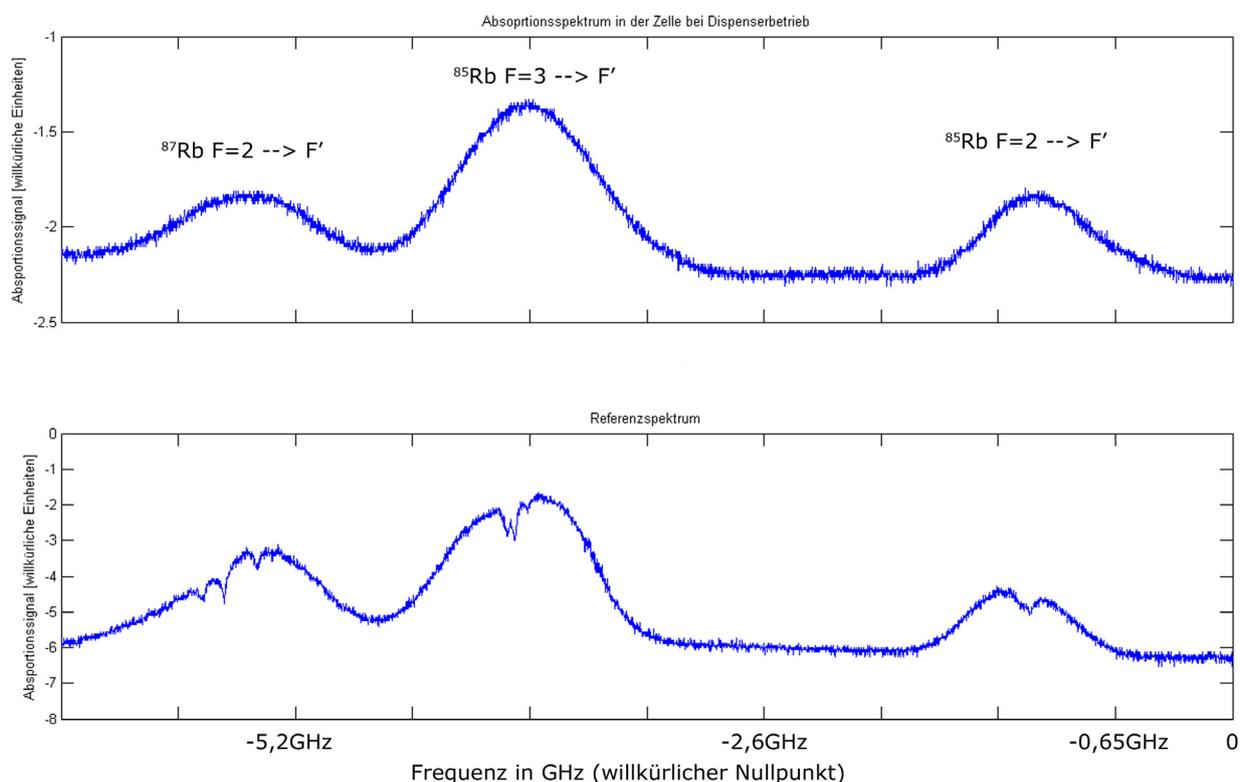


Abbildung 19: Absorptionsspektrum in der Dampfzelle bei Dispenserbetrieb sowie das Referenzspektrum der Sättigungsspektroskopie am Lasersystem.

Das Spektrum zeigt im Vergleich mit dem Referenzspektrum aus der Sättigungsspektroskopie des Lasersystems von links nach rechts deutlich die Spektrallinien von ^{87}Rb ($F = 2 \rightarrow F'$),

⁷Das Absorptionsspektrum kann etwa dazu genutzt werden, den Dampfdruck in der Zelle zu bestimmen, welcher eine entscheidende Größe für die Laderate und den Zerfall der Atomwolke in der MOT darstellt.

^{85}Rb ($F = 3 \rightarrow F'$) und ^{85}Rb ($F = 2 \rightarrow F'$). Die für das Rückpumpen entscheidende Spektrallinie ^{87}Rb ($F = 1 \rightarrow F'$) wurde hier nicht mit aufgezeichnet. Aufgrund der einfachen Methode der Absorptionsspektroskopie zeigt das an der Zelle aufgezeichnete Spektrum keine Lamb-Dips und Crossovers.

5 Didaktische und methodische Umsetzung

In der Ausbildung zum Physiker (Diplom, Staatsexamen, Master, Bachelor, etc.) an den Universitäten tritt mit Laborpraktika eine Ausbildungsform auf, welche den Studierenden von naturwissenschaftlichen und technischen Fächern vorbehalten ist. Die Versuche im Rahmen der Praktika sind bestrebt, einen ersten Einblick in die Alltagswelt der experimentellen Physik, „samt der [dort] notwendigen Umwelt an Geräten und Einrichtungen“ [11], zu geben.

Die im Rahmen dieser Wissenschaftlichen Arbeit in Betrieb genommene magneto-optische Falle ist ein Laborversuch im physikalischen Fortgeschrittenenpraktikum der Universität Stuttgart.

In diesem Kapitel wird nun die didaktische und methodische Umsetzung des Praktikumsversuchs erläutert⁸. Dazu findet zunächst eine Einbettung des Fortgeschrittenenpraktikums in den Studienplan für das Fach Physik sowie eine Diskussion der grundsätzlichen Inhalte dieser Studienform statt. Anschließend wird die Thematik des Studierens im Labor allgemein beleuchtet. Eine Bewertung des MOT-Versuchs hinsichtlich seiner Relevanz für das Studium, seinem Bezug zur aktuellen Forschung etc. sowie bezüglich seiner konkreten Zielsetzungen schließt sich an. Das Kapitel endet mit einer Beschreibung der Methodik des Versuchs sowie einem Vorschlag für den konkreten Versuchsablauf für die Praktikanten.

5.1 Das Physikalische Fortgeschrittenenpraktikum

5.1.1 Einbettung in den Studienplan

Zur Zeit bietet die Universität in Stuttgart die folgenden Studiengänge im Fachbereich Physik an:

- Bachelor-Studiengang Physik
- Master-Studiengang Physik (ab dem Wintersemester 2010/2011)
- Diplom-Studiengang Physik (läuft aus)
- Lehramts-Studiengang Physik
- Magister-Studiengang Physik
- Master of Science Studiengang (internationaler englischsprachiger Studiengang)
- Studiengang European Master in Nuclear Fusion Science and Engineering Physics

⁸Nach Wolfgang Klafki, einem der bekanntesten deutschen Erziehungswissenschaftler der Gegenwart, befasst sich die Didaktik von Lehrstoffen mit den inhaltlichen Fragen, die Methodik hingegen mit deren konkreten Umsetzung im Unterricht, in der Vorlesung, im Praktikum, etc.

Sämtliche der oben genannten Studiengänge schreiben in ihren Studiencurricula das Absolvieren eines physikalischen Fortgeschrittenenpraktikums (advanced lab course) unterschiedlichen Umfangs vor. Im nun auslaufenden Diplom- sowie im Lehramtsstudiengang ist das Praktikum in das Hauptstudium nach erfolgreich abgeschlossener Vordiploms- bzw. Zwischenprüfung eingebettet. Zeitlich ist der Besuch des Praktikums vom Studenten selbst in den Zeitraum vom fünften bis zum achten Studiensemester einzuordnen.

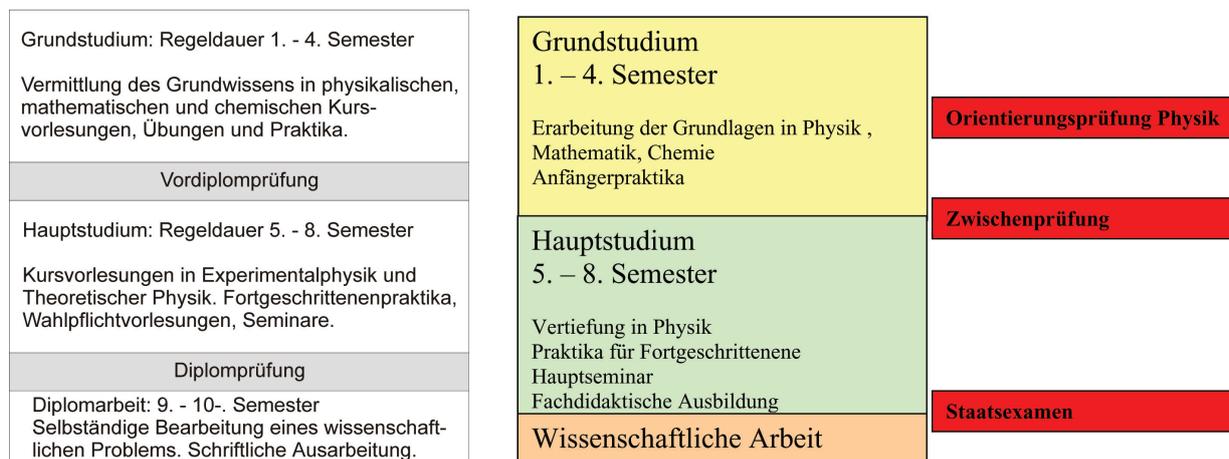


Abbildung 20: Links abgebildet ist der Studienplan des auslaufenden Diplom-Studiengangs, rechts der des Lehramts-Studiengangs. Das physikalische Fortgeschrittenenpraktikum vertieft in beiden Studiengängen die (Anfänger-)Praktika des Grundstudiums und setzen eine erfolgreich abgeschlossene Vordiploms- bzw. Zwischenprüfung voraus. Aus [12, 13].

Der im Zuge des Bologna-Prozesses eingeführte sechssemestrige berufsqualifizierende Bachelor-Studiengang sieht das Fortgeschrittenenpraktikum (Physikalisches Praktikum 2) im letzten Semester vor (siehe hierzu Abb. 21).

Im Magister-Studiengang wird das Fortgeschrittenenpraktikum im siebten Semester (wie beim Lehramts-Studiengang nach der Zwischenprüfung), im internationalen *Master of Science* Studiengang und im Studiengang *European Master in Nuclear Fusion Science and Engineering Physics* jeweils in den ersten beiden Semestern des Aufbaustudiums absolviert.

5.2 Das Fortgeschrittenenpraktikum allgemein

An der Universität in Stuttgart ist das Fortgeschrittenenpraktikum z.Z. eine zentral organisierte Ausbildungsform mit ca. 40 ein- und mehrtägigen Versuchen aus vielfältigen Bereichen der experimentellen Physik wie Festkörper-, Atom-, Molekül- und Kernphysik sowie Optik und Laser- und Plasmaphysik. Zusätzlich zu den zentral organisierten Versuchen bietet einige Institute dezentral organisierte Blockpraktika an, welche im Rahmen des Fortgeschrittenenpraktikums absolviert werden können. Neben Blockpraktika zur Festkörperspektroskopie

1. Sem. WS	Experimental- physik I (Mechanik und Wärmelehre) 6	Mathematische Methoden der Physik 6	Computer- grundlagen 6	Mathematik I 9	Chemie (Vorlesung) 6
2. Sem. SS	(Elektro- dynamik) 9	Theoretische Physik I (Mechanik) 9	Mathematik II 9	(Praktikum) 3	
Orientierungsprüfung					
3. Sem. WS	Experimental- physik II (Optik) 6	Theoretische Physik II (Quanten- mechanik) 9	Mathematik III 9	Physik- praktikum I 6	
4. Sem. SS	(Physik der Atome und Kerne) 9	Theoretische Physik III (Elektro- dynamik) 9	Methodische Vertiefung (Schlüssel- qualifikation, fachaffin) 6		
5. Sem. WS	Molekül- und Festkörper- physik 9	Theoretische Physik IV (Thermostatistik) 9	Wahlmodul (physikalisch) 4,5	Elektronik- praktikum (Schlüssel- qualifikation, fachaffin) 6	
6. Sem. SS	BSc-Arbeit 12	Wahlmodul (Schlüssel- qualifikation, fachüber- greifend) 6		Physik- praktikum II 6	

Die Zahlen bedeuten die Leistungspunkte eines Moduls pro Semester

Abbildung 21: Der Studienplan des Bachelor-Studienganges. Die Studenten absolvieren ihr Physikalisches Praktikum 2 im sechsten und letzten Semester. Aus [14].

(1.Physikalisches Institut) und Halbleiteroptik (Institut für Halbleiteroptik und funktionelle Grenzflächen IHFG) bietet das 5. Physikalisches Institut einen Blockversuch zur elektromagnetisch induzierten Transparenz (EIT) an, der nun mit der MOT um ein weiteres Versuchsangebot ergänzt wird.

Während für den Diplom- und den Lehramtsstudiengang alle der z.Z. etwa 40 zentral angebotenen Versuche und Blockpraktika zur Auswahl für die Studenten stehen, wird für die künftigen Bachelor- und Masterabsolventen dieses Angebot bzgl. des Anforderungsgrades differenziert werden in Bachelor- und Masterversuche. Die Versuche zum Bachelor-Studiengang werden weiterhin zentral organisiert sein, während hingegen die Master-Versuche in die Organisation der Institute übergeben werden.

Stark konzentriert lassen sich die Ziele des Fortgeschrittenenpraktikums wie folgt formulieren: Es dient dazu, „an anspruchsvollen Experimenten physikalische Meßmethoden und den Umgang mit modernen Meßgeräten [zu] erlernen“ [15]. Die Praktikanten erhalten die Möglichkeit, in begrenzter Zeit (i.d.R. für die Dauer des Versuches zzgl. zwei Wochen zur Ausarbeitung des Abschlussprotokolls) „eine kleine, aber vollständige wissenschaftliche Arbeit“ [15] durchzuführen.

Eine weitreichendere Diskussion der allgemeinen Ziele von Arbeiten im Labor im Rahmen eines Hochschulstudiums sowie im speziellen der Ziele des beschriebenen Versuchs folgt in den

sich anschließenden Abschnitten.

5.3 Studieren im Labor

Studierenden der Physik eine Arbeit im Labor im Rahmen von Praktika (an der Universität Stuttgart werden das physikalische Anfängerpraktikum I und II (Elektronikpraktikum), ein vorlesungsintegriertes Optikpraktikum sowie das Fortgeschrittenenpraktikum angeboten) zu ermöglichen, lässt sich an erster Stelle damit begründen, dass eine praxisorientierte Arbeit im Labor die in einer Vorlesung übliche visuelle und akustische Informationsaufnahme um einen wichtigen Punkt ergänzt: die selbst getätigte Erfahrung (womit das Experiment an sich in seiner Realisierung gemeint ist).

Untersuchungen zeigen, dass sich die Quoten des sicheren Behaltens eines vermittelten Stoffes wie folgt zusammensetzen: 20% dessen, was rein akustisch (z.B. in einem Vortrag ohne mediale Unterstützung) inhaltlich vermittelt wird, auch im Langzeitspeicher erhalten bleibt. Bei einer visuellen Vermittlung können bis zu 30% der Lerninhalte gefestigt werden. Eigene Erfahrungen lassen sich bis zu 50% behalten. Und diese Zahlen wiederum lassen den Schluss zu, dass Informationen die mit Augen, Ohren und eigenen Erfahrungswerten aufgenommen werden, bis zu einer Quote von 100%, als nahezu fast sicher, gefestigt werden können [11].

Sicher sind diese Zahlen keine gesetzten und unumstößlichen Werte, jedoch zeigen sie in der Tendenz deutlich auf, dass Vorlesungen und Laborarbeit im Rahmen der Ausbildung zum Physiker sich ergänzen. Beim Praktikanten werden so prinzipiell alle Sinnesorgane gefordert, Assoziationsmöglichkeiten zu bekannten Inhalten und die Möglichkeit der Überprüfung der Richtigkeit von Informationen werden gegeben.

5.3.1 Begründungsebenen für Laborarbeit

Wenngleich die Behaltensmenge von Lerninhalten bereits einen substantiellen Grund für ein Laborangebot in Rahmen des Studiums darstellt, so lässt sich die Frage nach der Begründung für diese Ausbildungsart im naturwissenschaftlichen und technischen Bereich noch weiter vertiefen. Bruchmüller und Haug sprechen von sogenannten Begründungsebenen für die Arbeit im Labor, von denen diejenigen größter Relevanz im Folgenden angesprochen werden [11]. Hier wird nach wie vor das Labor als Ausbildungsart allgemein betrachtet, eine konkrete Anwendung auf die Praktikums-MOT findet sich dann im nachfolgenden Abschnitt 5.4.

Zunächst sei hier die lernpsychologische Ebene genannt. Diese versteht die psychologischen Auswirkungen auf den Praktikanten im Rahmen der Laborarbeit. Essentielle Auswirkungen sind eine gesteigerte Motivation der Studenten sowie ein hoher Grad an Individualisierung. Überdies findet ein Praktikum in einer Atmosphäre gesenkten Leistungsdrucks statt, was einen wichtigen Kanal für die Erlangung von Erfolgserlebnissen darstellt. Ebenfalls als psychologisch wertvollen Aspekt sieht man die Tatsache der eigenen Erfahrung, welche bereits in ihrer Be-

deutung für das Behalten von Lernstoffen diskutiert wurde. Auf den Punkt gebracht lässt sich die psychologische Ebene mit dem Eingangszitat dieser wissenschaftlichen Arbeit, „*I hear - I forget, I see - I remember, I do - I understand*“ beschreiben.

Weiters lässt sich studentische Arbeit im Labor hinsichtlich einer wissenschaftstheoretischen Ebene begründen. Technik und Naturwissenschaften arbeiten in großen Teilen experimentell, wobei das Experiment meist eine Theorie begründet. Nicht zuletzt folgt der Experimentator einer wissenschaftlichen Tradition.

Die „übliche und didaktisch zentrale“ [11] Ebene zur Begründung ist die bildungstheoretische. Laborarbeit bildet einen Studenten hinsichtlich seiner Persönlichkeit, seinem Problemlösungsverhalten, seiner Sachkompetenz, seiner Handlungs-, Entscheidungs- und Kommunikationsfähigkeit und, dies ergänzend zu den Gedanken von Bruchmüller und Haug, auch hinsichtlich seiner Toleranz gegenüber Misserfolg im eigenen Handeln.

Eine praxis- bzw. nützlichkeitsorientierte Begründung stützt sich auf eine Vermittlung notwendiger und nützlicher Fähigkeiten. Diese sind motorischer Art, die Routine im Umgang mit Geräten und Anlagen betreffend sowie hinsichtlich der Kompetenz, Fehler zu finden und zu suchen und Messungen selbstständig in Durchführung und Protokollierung zu tätigen.

5.3.2 Verschiedene Stufen in der Laborarbeit

Um das Ausbildungsangebot der Laborarbeit zu gliedern und in einem allgemeingültigen Bild zu veranschaulichen, beschreiben Bruchmüller und Haug die sogenannten drei Stufen der Laborpraktika. Dabei gilt grundsätzlich, dass jede Hinführung an eine effektive Arbeitsweise für Experimentatoren zunächst in fixierten, exakt strukturierten Versuchen und am Ende in einer freien und selbstständigen Abschlussarbeit verläuft.

Jedoch diesen Zwischenraum zwischen ersten Gehversuchen am Experiment und anspruchsvollem selbstständigen wissenschaftlichen Arbeiten zu füllen, ist besonders wichtig, da der Weg durch diese Lücke vom Studenten nicht selbstständig gegangen werden kann, was ggf. zu einer Hemmung der eigenen Motivation führt. Deswegen sind Labore dieser sogenannten Stufe II, wie die hier vorgestellte Praktikums-MOT, in ihrer Bedeutung besonders hervorzuheben. Diese Stufe rückt folgende „Grobziele“ in den Vordergrund:

- Die Studenten sollen ein gewisses Maß an problemlösendem Verhalten erwerben.
- Die Studenten erleben und üben Führungsstile, Selbstständigkeit und eigenverantwortliches Handeln.
- Der Erarbeitungsphase schließt sich eine Phase der Ausarbeitung an, in welchem die erzielten experimentellen Ergebnisse in einen Gesamtzusammenhang eingebettet werden und z.B. in einem Vortrag einem weiteren Personenkreis zugänglich gemacht werden.

Letzteres schließt unweigerlich erste Erfahrungen in der Vermittlung von Erkenntnissen (also der Lehre) ein.

Die Unterscheidung zur Stufe III, der Abschlussarbeit (Diplom- und Examensarbeit, etc.), welche als „voll erreichte Stufe [...] der Laborarbeit“ [11] gilt, findet dann lediglich noch in der Komplexität und dem Umfang des eigenverantwortlichen Arbeitens statt⁹.

Deutlich ist der Unterschied der Stufe II Labore zu jenen der ersten Stufe (z.B. das physikalische Anfängerpraktikum und das Elektronikpraktikum im Rahmen des Grundstudiums). Die dortigen Versuche werden nach strikter Anleitung durchgeführt, die im Stufe-II-Labor so wichtigen Punkte wie die Möglichkeit zur eigenen Innovation, zum freien experimentieren und planen sind hier meist nie oder nur sehr selten gegeben. Eine Legitimation haben die Stufe-I-Labore dennoch: Sie stellen den allerersten Kontakt zwischen Student und experimenteller Umwelt dar, ermöglichen Prüfung, Erlebnis, Absicherung und Vertiefung von zuvor Gelerntem. Erste Erfolgserfahrungen sowie erste Ausarbeitungen im Protokoll zielen zunächst auf den Aspekt des Lernens als Selbstzweck, also des „Lernen lernens“ ab.

5.4 Bewertung der MOT als Praktikumsversuch

5.4.1 Inhaltliche Hauptgegenstände

Die physikalischen Forschungen an ultrakalten Atome wurden in den letzten Jahren zunehmend wissenschaftlich bedeutender und in der Zwischenzeit beschäftigt sich eine Vielzahl an Gruppen weltweit in diesem Bereich der Wissenschaft. Magneto-optische Fallen stellen heute eine weit verbreitete Basis in der Kühlung und im Fangen neutraler Atomen dar. Dem Studenten die Arbeit an solch einer Falle zu ermöglichen bedeutet also zugleich, ihm die Möglichkeit zum Experimentieren im Bereich aktueller Forschung zu geben. Diese Begebenheit wird noch unterstützt durch die Tatsache, dass durch die Einbindung des Versuchs als Blockpraktikum im 5. Physikalischen Institut, der Student die Option erhält, den dortigen Großexperimenten im Bereich der Atom- und Quantenoptik ansichtig zu werden. Durch die externe Laserversorgung des MOT-Versuchs (siehe hierzu das Kapitel zur methodischen Umsetzung) wird von den Praktikanten der partielle Umgang mit den Anlagen eines solchen Großexperiments sogar gefordert.

Die MOT hebt sich somit von einer Vielzahl anderer Praktikumsversuche im Anfänger- und Fortgeschrittenenbereich ab, welche oftmals weniger die aktuelle physikalische Forschung als vielmehr historisch bedeutsame Inhalte thematisieren.

⁹Diese Feststellung gilt allerdings lediglich dann, wenn die Abschlussarbeit teil der Ausbildung an der Hochschule ist und nicht in der freien Wirtschaft abgewickelt wird. Dann unterliegt sie deren Kriterien und alltäglicher Berufspraxis und kann im Rahmen einer didaktischen Diskussion für Labore an Hochschulen nicht mehr erfasst werden.

Dass die Arbeit an ultrakalten Atomen eine enorme Relevanz entwickelt hat, zeigt die Vergabe zweier Physik-Nobelpreise an Gruppen um Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji sowie William Phillips (1997) und um Eric A. Cornell, Carl E. Wiemann sowie Wolfgang Ketterle (2001), welche sich mit Methoden der Kühlung von Atomen mittels Laserlicht im allgemeinen sowie einer ersten erfolgreichen Realisierung eines Bose-Einstein-Kondensats beschäftigt haben.

Es bleibt anzunehmen, dass mit dem FP-Versuch zur MOT für viele kommende Studienjahrgänge ein Versuch geschaffen wurde, der nach wie vor durch seine starke Verwachsung zu momentanen Forschungsgegenständen stets eine große Anziehung auf die Studenten ausüben wird.

5.4.2 Konkrete Inhalte und Zielsetzungen

Neben den bereits diskutierten Hauptgegenständen lassen sich für den Praktikumsversuch zur MOT ganz konkrete Inhalte und Zielsetzungen abstecken. Dies soll im folgenden mittels neun Fragen der Didaktik geschehen, wie sie Hilbert Meyer und Werner Jank vorgeschlagen haben [23]. Einige der Fragen wurde jedoch bereits in den vorhergehenden Abschnitten behandelt und können so sehr komprimiert gefasst werden.

Die erste Frage nach dem „warum“ der Durchführung dieses Versuches lässt sich auf zweierlei Arten beantworten¹⁰: Die schlichte Antwort wäre jene, auf den Studienplan und den Pflichtbesuch des Praktikums der künftigen Absolventen zu verweisen. Diese Begründung wäre jedoch deutlich zu oberflächlich. Deshalb ist es zweckdienlich, das „warum“ mit den verschiedenen Ebenen der Begründung für Laborarbeit sowie dem Drei-Stufen-Modell zu legitimieren. Diese Legitimation ist im Gegensatz zur reinen Begründung durch die Tatsache der „Pflichtveranstaltung“ nicht in besonderem Maße motivationshemmend auf Seiten der Praktikanten.

Es bleibt weiters festzuhalten, dass alle Studenten jeglicher physikalischen Abschlüsse, wie sie oben genannt wurden, grundsätzlich zur Durchführung des MOT-Versuches in Frage kommen, da jeder Studiengang in seinem Curriculum das Absolvieren von Fortgeschrittenenversuchen fordert. Eine genauere Differenzierung der Kandidaten für den Versuch geben dann die Zugangsvoraussetzungen des Instituts vor, wie sie im letzten Abschnitt zur didaktischen Umsetzung des Versuchs vorgestellt werden.

Die Antwort auf die Frage nach dem Zeitpunkt des Versuches liefert ebenfalls das Kapitel zur Einbettung in den Studienplan sowie das Fortgeschrittenenpraktikum im Allgemeinen.

Ort der Versuchsdurchführung sind die Labore des 5. Physikalischen Instituts an der Universität in Stuttgart, wo der Versuch dauerhaft installiert wurde. Diese Ortsauswahl schafft den bereits im Abschnitt zu den inhaltlichen Hauptgegenständen diskutierten Bezug zur „echten“ experimentellen Physik im Bereich der Atom- und Quantenoptik.

¹⁰Eine weitere Frage nach dem „wozu“ des Versuches deckt sich in der Beantwortung dieser Frage sehr stark, so dass auf eine separate Beantwortung verzichtet wurde und dieser weiteren Frage keine gesonderten Worte eingeräumt wurden.

Die Praktika im Rahmen der physikalischen Ausbildung werden immer in Gruppen zu zwei Studenten durchgeführt. Dies gilt selbstverständlich auch für die Praktikums-MOT. Als Betreuer dienen Doktoranden und Post-Docs des 5. Physikalischen Instituts, die direkt oder indirekt bereits in die Konzeption und den Aufbau des Versuches eingebunden waren und auch durch ihr eigenes Forschungsgebiet ein höchstmaß an Fachkompetenz zur Begleitung dieses anspruchsvollen Praktikums-Experiments besitzen. Dieser Punkt scheint auch von dem Standpunkt her interessant, dass der Kontakt mit Postgraduierten während des Studiums eher die Ausnahme als die Regel darstellt.

Die Fragen nach dem „womit“ und „wie“ bei diesem Versuch etwas gelernt werden soll, bleibt dem Abschnitt zur methodischen Umsetzung überlassen.

Die abschließende Frage bedarf nun einer genaueren Erörterung, da sich diese mit den Lerninhalten für den Studenten beschäftigt. Es sind im Bereich des fachspezifischen Wissens, das erlernt werden soll, die theoretischen von den experimentellen Grundlagen zu unterscheiden.

- **Theoretische Lerninhalte** Die Praktikanten sollen nach abgeschlossenem Versuch ein breites Wissen bzgl. der Physik kalter und ultrakalter Atome erworben haben und die hier eingesetzten Kühl- und Fangmechanismen verstehen. Mit anderen Worten, sie sollen die vollständige Funktionsweise einer MOT verstanden haben. Dazu gehört neben Wissen um die Korrespondenz von thermischer Geschwindigkeit und Temperatur vor allem das Verständnis für das Prinzip der Dopplerkühlung über frequenzverstimmtes Laserlicht und die anisotrope spontane Emission (Spontankraft). Neben der Zwei-Niveau-System-Theorie ist es aber für ein tiefgreifendes Verständnis der Abläufe im Experiment vor allem wichtig, dass die Praktikanten das reale Element Rubidium und sein Niveauschema mit den relevanten Übergängen verstanden haben. Hierbei muss auch deutlich gemacht worden sein, welche atomaren Übergänge im verwendeten Rb-Isotop dem Kühlen und welche dem Rückpumpen aus den dark-states entsprechen. Im weiteren muss der Übetrag vom Kühlen in einer Raumdimension auf die optische Melasse ebenso verstanden worden sein wie die Erweiterung dieser um das inhomogene Anti-Helmholtz-Feld, um die Atome auch im Ortstrom zu fangen. Hierbei muss am Ende vor allem ein Verständnis für die Resonanzverschiebung durch den Zeeman-Effekt sowie dessen erweiternde Auswirkungen auf die Theorie der Spontankraft bestehen.
- **Experimentelle Lerninhalte.** Die verwendeten experimentellen Komponenten unterscheiden sich nicht von denen, welche in im täglichen Forschungsbetrieb der experimentellen Physik verwendet werden. Grundsätzlich lässt sich also feststellen, dass die Praktikanten sukzessive mit einem einfacheren Aufbau identischer Komponenten an die Umwelt des Experimentators herangeführt werden sollen. Lernt der Student dies bereits im Praktikum, steht ihm dieses wichtige Wissen um die Funktion der Komponenten später bereits in der Einarbeitungsphase für eine Diplom- oder Examensarbeit zur Verfügung.

Neben dem physikalischen Effekt der MOT, der im Gegensatz zu anderen Praktikumsversuchen hier ebenfalls deutlich im Vordergrund steht, sollen sich die Praktikanten nach dem Versuch ebenfalls über die Funktion und die Einsatzweise der MOT-Komponenten im Klaren sein. Hierzu zählen die optischen Einzelbauteile wie Spiegel, Verzögerungsplatten, Linsen, Blenden und Glasfasern ebenso wie zusammengesetzte Bestandteile wie die Teleskope zur Strahlaufweitung. Die Justage aller dieser Komponenten kann vom Praktikanten ohne Gefahr selbst vorgenommen werden. Ein zentraler Punkt ist auch das Festigen des Könnens im Umgang mit verschiedenen wissenschaftlichen Analysemethoden für Parameter wie Anzahl, Dichte, Temperatur und Zerfall der gefangenen Atome sowie der Laderate der MOT. Neben dem Verständnis für die optischen Komponenten soll der Praktikant auch Funktion und Aufbau der Vakuumapparatur mit Rb-Reservoir und Rb-Dispenser sowie der Helmholtz-Spulen unterrichtet sein. Der Umgang mit Bauteilen zur Stromversorgung, einer Kamera zur Beobachtung der Vorgänge in der Dampfzelle sowie modernen Messgeräten wie einem hochwertigen *LeCroy*-Oszilloskop wird ebenfalls während des Versuches eingeübt. Neben all diesen für die Funktion der MOT wichtigen Lerninhalten gehört auch die Labor- und Lasersicherheit im Allgemeinen zum Repertoire des Blockpraktikums. Hierzu und auch zu den vorher angesprochenen experimentellen Inhalten entsteht parallel zu dieser wissenschaftlichen Arbeit von einem weiteren Lehramtskandidaten am 5. Physikalischen Institut eine Handreichung grundlegenden Inhalts für Praktikanten, welche sich mit eben diesen Themen beschäftigt.

5.5 Methodik des Versuchs

Der Aufbau zum MOT-Versuch an sich wurde im Gesamten sehr übersichtlich gehalten. Die beiden benötigten Laserstrahlen zur Kühlung und zum Rückpumpen werden nicht direkt beim Experiment selbst erzeugt, sondern von bereits vorhandenen Großexperimenten entliehen und mittels Glasfasern zum Versuch geführt. Dort werden sie ausgekoppelt und stehen direkt zur Verfügung. Diese Tatsache hat den großen Vorteil, dass sich die Praktikanten in erster Linie auf die Optik der MOT selbst konzentrieren können und nicht durch die zusätzlichen Komponenten, die für die Erzeugung des Laserlichts notwendig sind, in gewissem Maße abgelenkt werden. Das ausgekoppelte Licht erfüllt alle Eigenschaften, die zur Erzeugung einer MOT notwendig sind. Eine Heranführung an das Laserlabor im Verlauf des Blockpraktikums und eine Einweisung in die Bedienung der Lasersysteme soll natürlich nicht umgangen werden, aber schon die räumliche Distanz zwischen Laserquelle und MOT-Aufbau lässt erkennen, dass das experimentelle Prinzip des eigentlichen Versuches (also abgesehen von der Lichtquelle) trotz faszinierender Ergebnisse erstaunlich mühelos nachzuvollziehen ist.

Andere Universitäten wie z.B. Heidelberg und Hannover [16, 24] stellen die benötigten Laser direkt beim MOT-Versuch zur Verfügung, was den bereits benannten Nachteil einer zusätzli-

chen Ablenkung hat, aber auch den Vorteil, dass so das Prinzip der Laserspektroskopie direkt mit dem Versuch zur MOT nachvollzogen werden kann. Da die Kandidaten in Stuttgart jedoch als Zugangsvoraussetzung zum MOT-Praktikum den FP-Versuch zur Laserspektroskopie, der an der Universität gesondert angeboten wird, bereits im Vorfeld absolviert haben müssen (siehe Abschnitt 5.6), fällt dieser Punkt weniger ins Gewicht und spricht so für die Realisation wie hier beschrieben.

Ein weiteres besonderes Merkmal der Stuttgarter Praktikums-MOT ist die erste Dampfzellenkonstruktion an sich. Diese in Eigenleistung und speziell für den Versuch hergestellte Zelle wurde geklebt, was einen sehr kompakten Aufbau ermöglicht. Die großflächige Verglasung erlaubt einen sehr guten Einblick in die Dampfzelle und es gibt keine Stellen in der Zelle die nicht einsichtig sind. Diese Tatsachen sind für eine MOT im Praktikumseinsatz besonders wichtig, da die Praktikanten somit die gesamte Zelle sehr gut beobachten können. Durch den kompakten Aufbau und die kurzen Wege in der Zelle für das Laserlicht ergibt sich zusätzlich noch der positive Effekt, dass keine allzu großen Laserintensitäten zum Durchleuchten der Zelle benötigt werden. Da die Zelle leider aufgrund von Verspannungen im Glas die Polarisation des Lichts beim Durchgang durch das Glas willkürlich verändert, wurde auf den weiteren Einsatz dieser Zelle verzichtet und die Anschaffung einer industriell gefertigten Zelle mit den gleichen für die Methodik wichtigen Eigenschaften beschlossen (siehe hierzu auch den Abschnitt zum experimentellen Aufbau).

Zur Beobachtung der Vorgänge in der MOT steht eine infrarotempfindliche Kamera, angeschlossen an einen PC, zur Verfügung, so dass nicht immer mit Infrarot-Sichtgeräten gearbeitet werden muss, die zwar oft ein besseres Bild liefern als die Kamera, aber stets nur eine Hand zum Arbeiten frei lassen.

Der Aufbau der Falle wurde so gewählt, dass prinzipiell überall Raum zur Verfügung steht, den Aufbau leicht zu modifizieren oder zu erweitern. Den Studenten wird hier also die Möglichkeit gegeben, bewusst mit optischen Bauelementen und Optomechanik zu experimentieren um die MOT in gewünschter Form zu betreiben.

Neben der experimentellen Methodik bleibt noch zu erwähnen, dass die Praktikanten stets von Doktoranden und Post-Docs begleitet werden. Diese stehen jederzeit bei Fragen zur Verfügung, halten sich jedoch bewusst primär im Hintergrund. Die Praktikumstage an der MOT sollen, wie bereits diskutiert, keine geführten Versuche mit fixem Ergebnis sein, sondern bewusst die Kreativität der angehenden Absolventen ansprechen. Sie sollen, auch ohne die Hilfe von Betreuern, eigene Ideen zum Versuch entwickeln und diese, mit Erfolg oder nicht, auch experimentell umsetzen und überprüfen.

5.6 Versuchablauf und Zugangsvoraussetzungen

Als Zugangsvoraussetzung nennt das 5. Physikalische Institut das erfolgreiche Absolvieren des Laborversuches zur Laserspektroskopie sowie eine Vorlesung, die sich mit Atomphysik und Atomoptik (z.B. Fortgeschrittene Atomphysik I und II oder Quantenoptik) beschäftigt. Oder anders ausgedrückt: Die Studenten müssen über ein ausreichendes Wissen in den Bereichen laserspektroskopische Methoden, Methoden zur Kühlung von Atomen sowie Atom-Licht-Wechselwirkung verfügen.

Der Versuchsablauf an sich folgt dann keinem strengen, vorgefertigten Ablauf. Nach einer entsprechenden Einarbeitung stehen vor allem der ungezwungene Umgang mit den vorhandenen experimentellen Komponenten sowie eine genaue Justage derer im Vordergrund. Erstes Ziel wird es natürlich stets sein, eine Wolke gefangener Atome tatsächlich zu sehen. Weitere Messungen zur Optimierung der MOT-Parameter (z.B. Detuningfrequenz, Laserintensität) oder zur Laderate oder Tempertaur der MOT sollen sich anschließen. Das Messprogramm und auch die Aufbauten zur Messung können und sollen jederzeit vom Studenten frei bestimmbar sein. Als letzte Aufgabe für die Praktikanten folgt die Protokollierung der theoretischen Grundlagen, der Versuchsabläufe und der experimentellen Ergebnisse in gewohnter Weise.

5.7 Evaluationbogen für Laborpraktika

Zur Evaluierung der Blockversuche im Fortgeschrittenenpraktikum (EIT, MOT) sowie dem integrierten Optikpraktikum am 5. Physikalischen Institut entstand im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit ein Fragebogen, mit welchem die Praktikanten die Möglichkeit haben, die Versuche anschließend einem bestimmten Raster folgend zu bewerten. Neben grundlegenden Angaben wie etwa dem Zeitraum der Durchführung des Laborversuches wird der jeweilige Studiengang der Praktikanten abgefragt. Anschließend werden Bewertungen in den Bereichen Praktikumsbetreuer, Versuch, Versuchsvor- und nachbereitung und allgemeinen Inhalten gefordert. Die meisten zu bewertenden Aussagen finden ihre Bewertung in einem fünfstufigen Raster zwischen „Aussage sehr zutreffend“ und „Aussage nicht zutreffend“. Um das Verständnis der Kernaussagen und eine Auswertung zu erleichtern, wurden stets positive Formulierungen der zu bewertenden Aussagen niedergeschrieben. Den Fragebogen, wie er heute verwendet wird, findet man im Anhang E.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit aufgebaute magneto-optische Falle für das Fortgeschrittenenpraktikum an der Universität Stuttgart, liegt in den letzten Zügen der Fertigstellung. Zwar ist es im Rahmen dieser Arbeit nicht gelungen, eine Wolke gefangener Rubidium-Atome zu erzeugen, jedoch wurde eine Vielzahl anderer Dinge geschafft: Die Laserversorgung wurde gewährleistet, die optischen Komponenten alle justiert und auf ihre Funktion hin überprüft. Die Intensitäten und die Polarisation des Laserlichts wurde eingestellt, die Funktion des Dispensers sichergestellt. Einzig die Dampfzelle selbst mit ihren polarisationsverändernden Fenstern wird in naher Zukunft gegen ein industrielles Produkt getauscht. Dann kann die MOT sehr wahrscheinlich erstmals vollständig in Betrieb gehen. Zwar zeigt auch das erneuerte Rubidium im Reservoir keine Diffusion in den Rezipienten, jedoch wurde festgestellt, dass man mit dem Dispenser in diesem Fall eine sehr gute Möglichkeit hat, die Falle zu laden. Das Vorhandensein von ausreichend viel Rubidium im Dispenserbetrieb wurde deutlich sowohl durch die Fluoreszenzaufnahme als auch die Aufzeichnung des Absorptionsspektrums gezeigt. Was die Berechtigung dieses Versuchs als Ausbildungsinhalt betrifft, so wurde diese im Kapitel zur didaktischen und methodischen Umsetzung ausführlich diskutiert. Besonders der Aktualitätsbezug und die Einbindung in den alltäglichen experimentellen Betrieb der Physik schafft eine hohe Motivation für Studenten, sich für diesen Versuch zu begeistern. Dieser Versuch zeigt die Physik, wie sie ist und wie sie arbeitet.

Auch wenn die MOT wie erwähnt noch nicht vollständig funktioniert, sie wird es in naher Zukunft sicher tun und viele Praktikanten (und auch „alte Hasen“) begeistern. Nicht zuletzt die Tatsache, dass Stuttgart eine der wenigen Universitäten in Deutschland ist, die eine solche Falle im Praktikum bereitstellt, macht die MOT zu etwas ganz besonderem.

Für die Zukunft hoffe ich auf eine reibungslose Funktion des Versuchs und wünsche allen Praktikanten, die einen Teil ihrer Ausbildung an dieser Appartur verbringen werden, mindestens genauso viel Spaß wie es mir gemacht hat, die MOT bis zu diesem Punkt hin aufzubauen.

A Daten zum Rubidium

In der Natur findet man zwei stabile Rubidiumisotope: ^{87}Rb (mit welchem die MOT in diesem Versuch erzeugt wird) und ^{85}Rb . Rubidium allgemein ist ein Standardelement für die Forschungen im Bereich ultrakalter Physik. Das nachfolgend dargestellte Termschema von ^{87}Rb ist sehr einfach im Aufbau und repräsentiert in sehr guter Näherung ein Zweiniveausystem wie in der Theorie beschrieben.

A.1 ^{87}Rb -D2-Linie

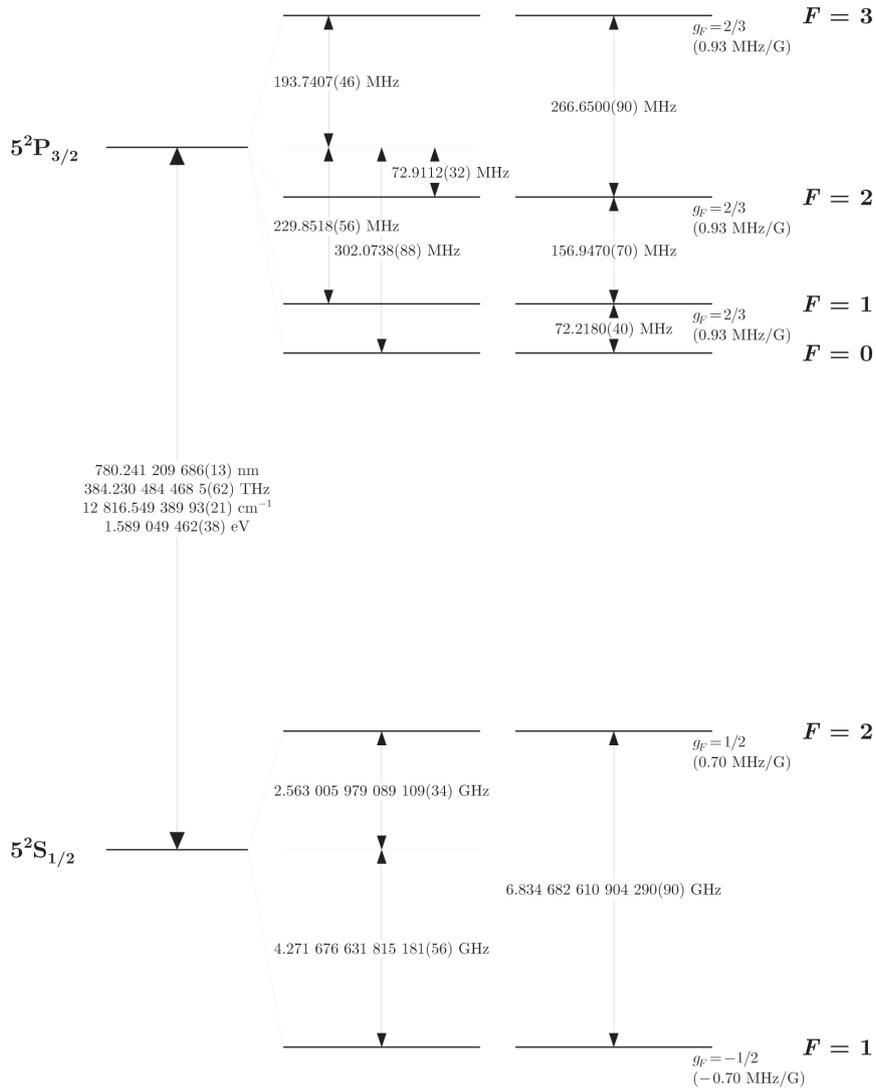


Abbildung 22: Termschema der D2-Linie von ^{87}Rb . Aus [9].

A.2 Dampfdruckkurve

^{87}Rb hat bei einer Temperatur von 25°C (Raumtemperatur) einen Dampfdruck von $\approx 5,27 \cdot 10^{-7}\text{mbar}$ [9]. Die Dampfdruckkurve von Rubidium zeigt nachfolgende Abbildung:

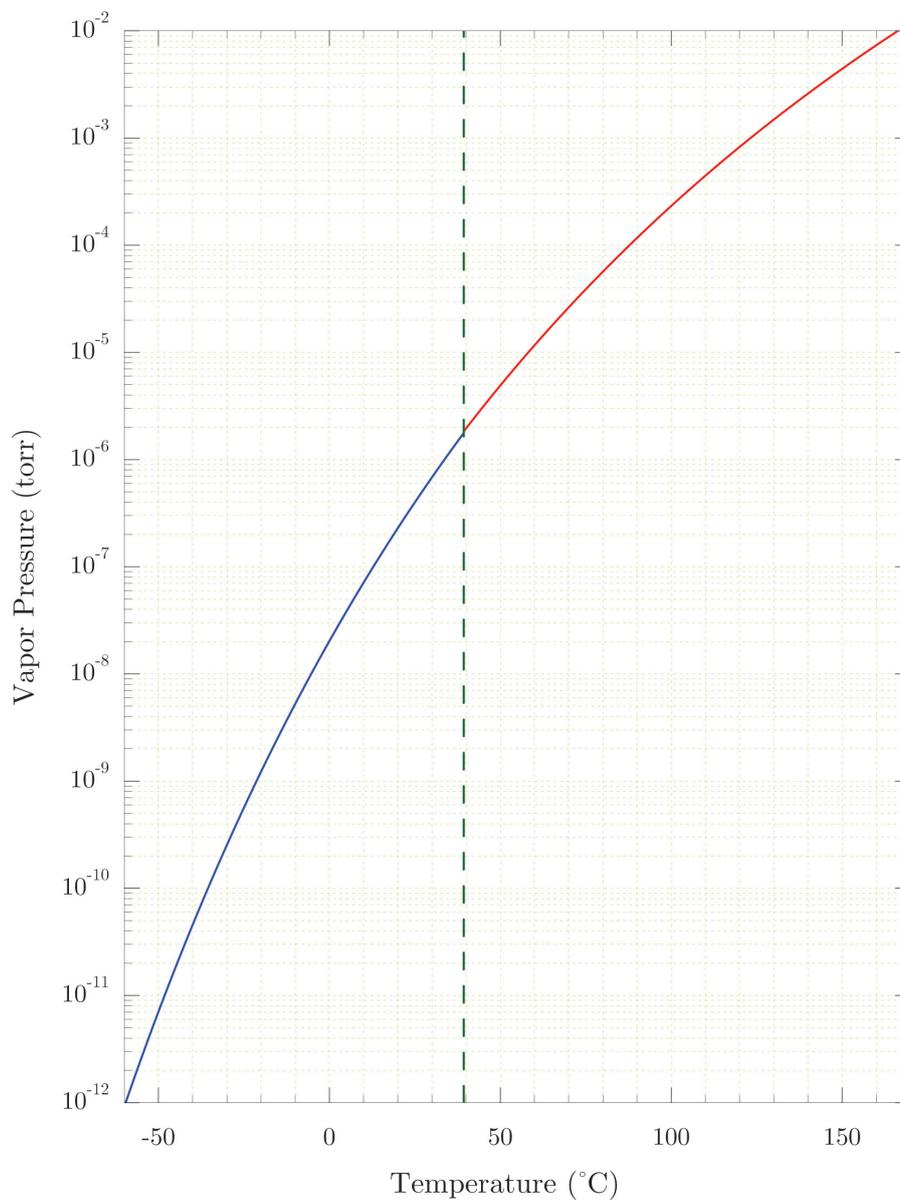
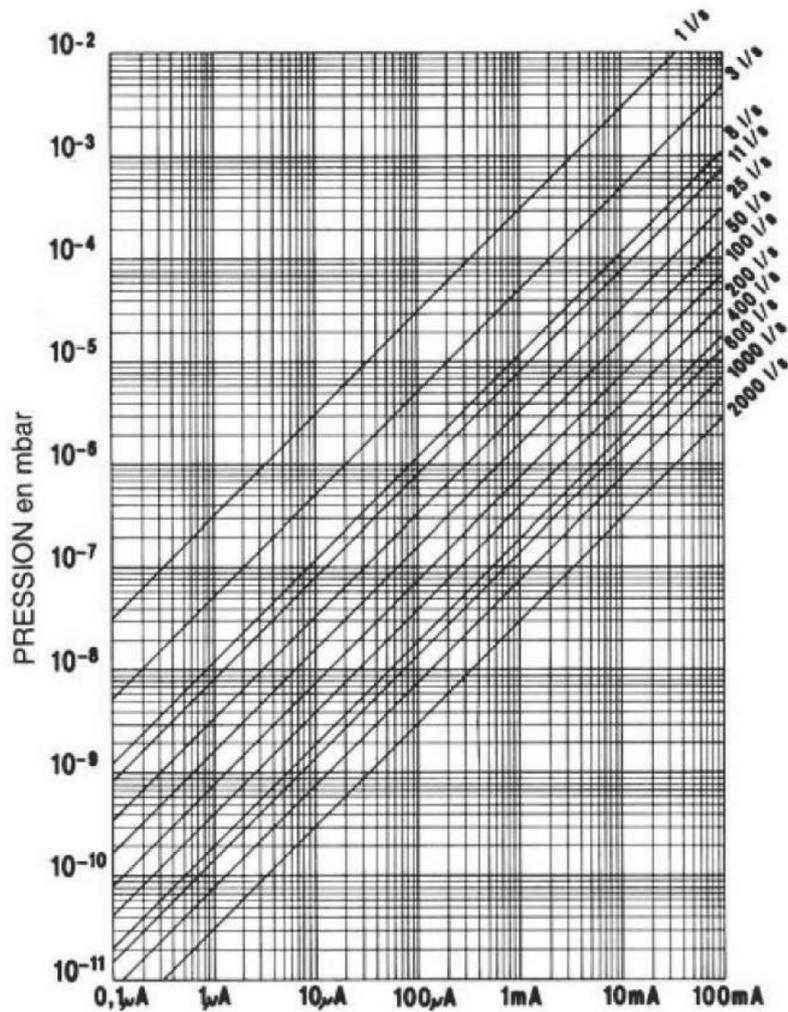


Abbildung 23: Dampfdruckkurve von ^{87}Rb . Aus [9].

B Ionisationsstromkurve der Ionenpumpe

Zur Umrechnung des Ionisationsstromes der Ionenpumpe in einen Druckwert (der Druck, der innerhalb der Vakuumpartur herrscht) dient folgendes Datenblatt:



Courbes courant – pression

Abbildung 24: Graphen zur Extrapolation des Drucks im Rezipienten in Abhängigkeit vom Ionisationsstrom des eingesetzten Pumpentyps. Die in der FP-MOT eingesetzte Pumpe ist jene mit einer Pumpleistung von 25l/s . Aus [10].

C Das optische Setup

C.1 Strahlengang der Versuchsanordnung

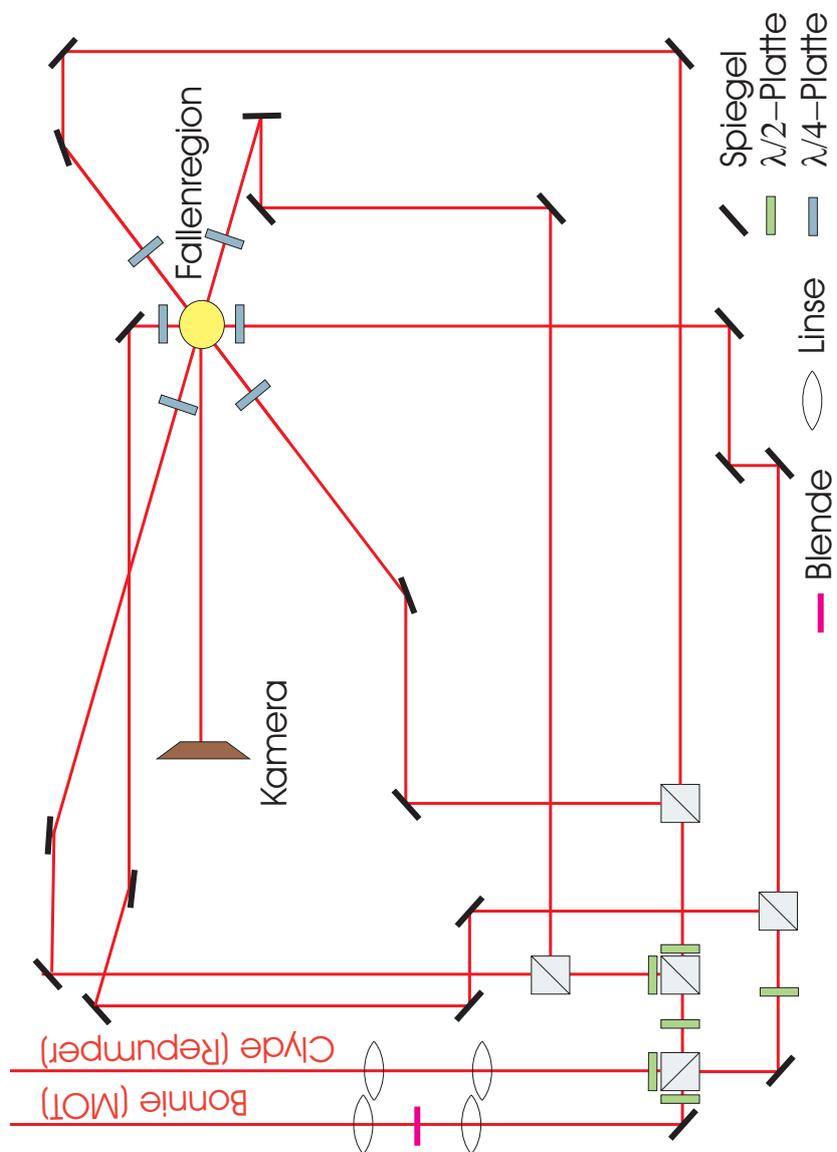


Abbildung 25: Der komplette Strahlengang des Versuchsaufbaus. Die beiden benötigten Laser werden über Glasfasern dem Versuch zugeführt.

C.2 Übersicht über die verwendeten optischen Komponenten

Die nachfolgenden Tabellen liefert eine Übersicht über die vorhandenen Verzögerungsplatten und Strahlteiler, deren jeweilige Aufgabe und die Winkelwerte der Verzögerungsplatten.

Komponente	Funktion	Wert
PBS 1	Strahl radial und axial aufteilen	—
PBS 2	Strahl radial in <i>Radial 1</i> und <i>Radial 2</i> aufteilen	—
PBS 3	Strahl <i>Radial 1</i> in <i>Radial 1 oben</i> und <i>Radial 1 unten</i> aufteilen	—
PBS 4	Strahl <i>Radial 2</i> in <i>Radial 2 oben</i> und <i>Radial 2 unten</i> aufteilen	—
PBS 5	Strahl axial in <i>Axial vorne</i> und <i>Axial hinten</i> aufteilen	—

Die Funktion jeder $\lambda/2$ -Platte ist in Kombination mit dem jeweiligen PBS die Einstellung der Intensitätsverhältnisse der entsprechenden Laserstrahlen.

Komponente	Wert
$\lambda/2 - 1$	297°
$\lambda/2 - 2$	141°
$\lambda/2 - 3$	200°
$\lambda/2 - 4$	48°
$\lambda/2 - 5$	*
$\lambda/2 - 6$	*

* siehe Markierung an der jeweiligen Verzögerungsplatte

Die Funktion jeder $\lambda/4$ -Platte ist die Einstellung des durchgehenden Lichts auf zirkulare Polarisation.

Komponente	Wert
$\lambda/4 - 1$	99°
$\lambda/4 - 2$	84°
$\lambda/4 - 3$	210°
$\lambda/4 - 4$	169°
$\lambda/4 - 5$	33°
$\lambda/4 - 6$	27°

D Stromstärkeabhängigkeit des B -Feldes

Die Abbildung zeigt den Magnetfeldverlauf der Anti-Helmholtz-Spulen für verschiedene Spulenströme. Zur Berechnung lagen stets die Werte $n = 50$, $d = 0,085m$ und $r = 0,05m$ zugrunde (siehe Abschnitt 2.4).

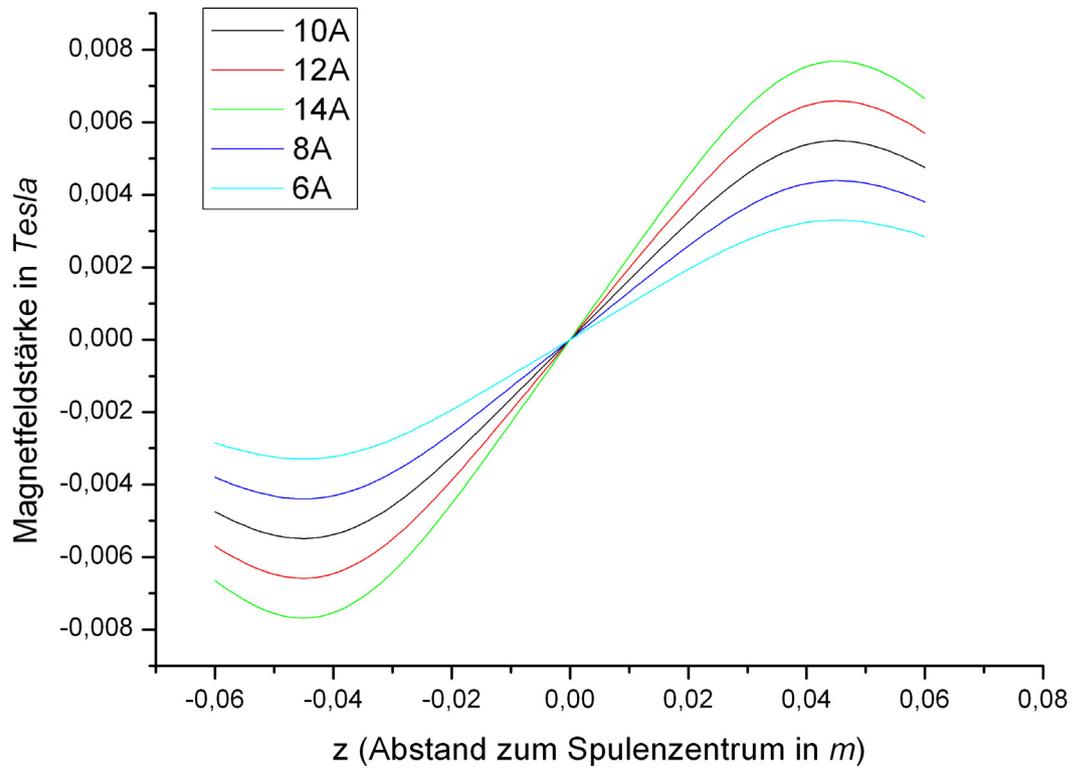


Abbildung 26: Verlauf der Magnetfeldstärke bei verschiedenen Spulenströmen.

E Evaluationsbogen für Praktika

1 **Universität Stuttgart – 5.Physikalisches Institut – Umfrage des physikalischen Fortgeschrittenen-Praktikums und des integrierten Optikpraktikums**

0. Grundlegendes

Wann fand der bewertete Versuch statt: Winter, Jahr: _____
 Sommer, Jahr: _____

Zu welchem Praktikum bearbeitest du diesen Umfragebogen: FP
 FP-Block (EIT/MOT)
 Optikpraktikum

Wenn du diesen Bogen für das *Optikpraktikum* ausfüllst, im Rahmen welcher Vorlesung hast du den Versuch absolviert?

Vorlesung/Veranstaltung: _____

Wer war dein Betreuer im Labor: _____

1. Zu dir selbst

Du studierst: Physik Staatsexamen
 Physik Bachelor
 Physik Master
 MSc Physics
 BSc Computational Physics
 Irgendwas anderes, nämlich _____

Deine Semesterzahl (im aktuellen Semester): _____

2. Zum Praktikumsbetreuer

Der Betreuer machte einen qualifizierten Eindruck.	Sehr zutreffend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Nicht zutreffend
Der Betreuer konnte Fragen zum Versuch verständlich erläutern.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Der Betreuer war am Lernerfolg des Praktikanten interessiert, d.h. er arbeitete engagiert.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Das Interesse am Stoff, der dem Versuch zu Grunde liegt, wurde durch den Betreuer geweckt.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Der Betreuer konnte klar verdeutlichen, was die Inhalte und die Vorgehensweise beim Versuch sind.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Es wurden Zusammenhänge mit anderen Gebieten aufgezeigt.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Abbildung 27: Fragebogen zur Evaluation von Praktikumsversuchen durch die Praktikanten. Seite 1.

3. Zum Versuch selbst

Die Atmosphäre bei der Versuchsdurchführung wurde als angenehm empfunden.	Sehr zutreffend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Nicht zutreffend
Beim Studierenden wurden nicht zu viele Vorkenntnisse vorausgesetzt.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Der Versuch trägt zu einem besseren Verständnis des zu Grunde liegenden Stoffes bei.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Der Versuchsaufbau war in der zur Verfügung stehenden Versuchszeit vollständig überschaubar, d.h. das experimentelle Setup des Versuches konnte nachvollzogen werden.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Zu jedem Zeitpunkt war klar, zu welchem Ergebnis die jeweilige Aufgabenstellung führen sollte.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Die experimentellen Resultate konnten nachvollzogen werden?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

4. Einige Worte zur Versuchsvorbereitung bzw. -auswertung

Wie hast du dich nach der ersten Besprechung mit dem Betreuer zusätzlich mit dem Stoff beschäftigt?	<input type="checkbox"/> Das Gespräch hat mir völlig genügt. <input type="checkbox"/> Mit Vorlesungsaufschriften. <input type="checkbox"/> Mit Büchern und Fachtexten. <input type="checkbox"/> Infos aus dem Internet.
Wie viel Zeit wurde für die Vorbereitung des Versuches (inkl. den prelab-exercises) aufgewendet?	_____ h
Wie wurde die zur Verfügung gestellte Versuchszeit empfunden?	<input type="checkbox"/> So lange dass einem langweilig wurde. <input type="checkbox"/> Genau richtig. So soll es sein! <input type="checkbox"/> So knapp dass einem schwindelig wurde.
Es wurde klar (gemacht), welche Punkte die Protokollierung des Versuches beinhalten sollte?	Sehr zutreffend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Nicht zutreffend
Wie viel Zeit wurde für die Protokollierung des Versuches insgesamt aufgewendet?	_____ h

Abbildung 28: Fragebogen zur Evaluation von Praktikumsversuchen durch die Praktikanten. Seite 2.

5. Auf ein Wort

Du hast dich ins Praktikum einbezogen gefühlt.	Sehr zutreffend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Nicht zutreffend
Die erschienen die Inhalte des Versuchs als relevant (wichtig).	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Du hast sehr viel bei diesem Versuch gelernt (inhaltlich, bzgl. Physikalischer Vorgehensweisen, etc.)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Diesen Versuch kann ich wärmstens weiterempfehlen!	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Dieser Versuch hat mich dahingehend motiviert, mich noch weiter mit dem Thema zu beschäftigen, z.B. in der Diplomarbeit oder speziellen Vorlesungen.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

6. Auf mehrere Worte

Wir würden uns freuen, wenn du nachfolgend im Freitext noch konstruktive Kritik an dem Versuch übst, d.h. was hat dir besonders gut gefallen? Was gefiel dir nicht? Was sollen wir beibehalten und was nicht? Welche weiteren Dinge könntest du dir vorstellen, im Rahmen dieses Versuches noch zu lernen? Welche Dinge die du gelernt hast, empfindest du als irrelevant? Et cetera.

Vielen Dank für deine Zeit, in der du diesen Bogen ausgefüllt hast!

Abbildung 29: Fragebogen zur Evaluation von Praktikumsversuchen durch die Praktikanten. Seite 3.

Literatur

- [1] W. D. Phillips, *Nobel lecture: Laser cooling and trapping of neutral atoms*, Rev. Mod. Phys. **70**, 721 - 741 (1998).
- [2] Der Nobelpreis in Physik auf <http://www.nobelprize.org>.
- [3] W. Ketterle, *Nobel lecture: When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser*, Rev. Mod. Phys. **74**, 1131 - 1151 (2002).
- [4] E.L. Raab, S. Chu et. al., *Trapping of Neutral Sodium Atoms with Radiation Pressure*, Phys. Rev. Lett. **59**, 2631 - 2634 (1987).
- [5] S.Chu et. al., *Three-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonance radiation pressure*, Phys. Rev. Lett. **55**, 48 - 51 (1985).
- [6] Wikipedia-Online-Enzyklopädie
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/8/8e/Absorption_photon.png
Stand: 30.09.2009
- [7] H. J. Metcalf und P. van der Straten, *Laser Cooling and Trapping* (Springer Verlag New York, 1999), 1. Auflage
- [8] K. Winkler, *Aufbau einer magnetischen Transportapparatur für ultrakalte Atome*, Diplomarbeit, Universität Innsbruck (2002)
http://pc150-c704.uibk.ac.at/ultracold/doc/diplom_kaus_winkler/diplom_klaus_winkler.pdf
Stand: 30.09.2009
- [9] D. A. Steck, *Rubidium 87 D Line Data*
<http://steck.us/alkalidata/rubidium87numbers.pdf>
Stand: 30.09.2009
- [10] Datenblätter zu Ionenpumpen von *VINCI TECHNOLOGIES*
http://perso.numericable.fr/meca2000/pdf/fiches_catalogue/pompage/pompes_ioniques.pdf
Stand: 30.09.2009
- [11] H.-G. Bruchmüller und Albert Haug, *Labordidaktik für Hochschulen* (Leuchtturm-Verlag, Alsbach, 2001)

- [12] Studienplan für den Diplomstudiengang Physik an der Universität Stuttgart
<http://www.physik.uni-stuttgart.de/media/downloads/diplom/studienplan-diplom.pdf>
Stand: 03.09.2009
- [13] Studienplan für den Lehramtsstudiengang Physik an der Universität Stuttgart
http://www.physik.uni-stuttgart.de/media/downloads/lehr_magister/sp-lehramt.pdf
Stand: 03.09.2009
- [14] Handreichung zum Bachelor-Studiengang Physik an der Universität Stuttgart
<http://www.physik.uni-stuttgart.de/media/downloads/bsc/flyer-bsc.pdf>
Stand: 03.09.2009
- [15] Internetpräsenz des Fortgeschrittenpraktikums der Universität Stuttgart
<http://www.physik.uni-stuttgart.de/studium/praktika/fp/frameset.php?id=1&fac=1&lang=de&gang=d>
Stand: 30.09.2009
- [16] P. Krüger et. al., *Experiment F20 Magneto-optical Trap*, Versuchsanleitung zum Praktikumsversuch, Universität Heidelberg (2004)
<http://www.physi.uni-heidelberg.de/Einrichtungen/FP/info/anleitungen.php>
Stand: August 2009
- [17] H. Kübler, *Elektromagnetisch induzierte Transparenz in einer Rubidiumzelle*, Diplomarbeit, Universität Stuttgart (2005)
- [18] *Laser cooling and trapping*, Versuchsanleitung zum Praktikumsversuch, Universität von Colorado
<http://optics.colorado.edu/~kelvin/classes/opticslab/LaserCooling3.doc.pdf>
Stand: 30.09.2009
- [19] Physikalisch Technische Bundesanstalt
<http://www.ptb.de/de/org/4/44/443/kuehl.htm>
Stand: 30.09.2009
- [20] Paul A. Tipler und Gene Mosca, *Physik* (Spektrum Akademischer Verlag, 2004), 1. Auflage
- [21] B. Kaltenhäuser, *Creation of ultra cold rubidium atoms for sympathetic cooling of ytterbium*, Diplomarbeit, Universität Stuttgart (2003)

- [22] R. Marklein, Vorlesungsmaterial zur Vorlesung *Elektromagnetische Feldtheorie I (EFT I)* an der Universität Kassel (2003)
<http://www.uni-kassel.de/fb16/tet/marklein/lecturenotes/efti/lectures/Lecture11.ppt>
Stand: 30.09.2009
- [23] W. Jank und H. Meyer, *Didaktische Modelle* (Cornelsen Scriptor, Frankfurt/Main, 1994), 3.Auflage
- [24] *Versuch: Magneto-optische Falle*, Versuchsanleitung zum Praktikumsversuch, Universität Hannover,
http://www.iqo.uni-hannover.de/fp/fileadmin/fp_documents/IQ21.pdf
Stand: 30.09.2009

Danksagung

Das vergangene halbe Jahr war schnell vorbei, und viele Leute haben mich in dieser Zeit begleitet und zum Gelingen der hier vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit beigetragen. Vieles (ja, sehr vieles sogar) im alltäglichen Laborbetrieb war neu für mich und ich bin froh, für die Dauer der Arbeit so tolle Kollegen gehabt zu haben. Ich habe unglaublich viel gelernt, dafür möchte ich besonders bei folgenden Personen bedanken ...

- Prof. Dr. Tilman Pfau für die Aufnahme am 5. Physikalisches Institut und dafür, mir die Möglichkeit zu geben, in diesem physikalisch faszinierenden Bereich, der zusätzlich durch seine große didaktische Komponente besonders für Lehramtskandidaten interessant ist, zu arbeiten.
- Dr. Robert Löw, für die unzähligen Stunden, in denen ich ihn in Anspruch nehmen durfte, wenn einmal mehr etwas nicht klappte. Durch ihn hat bis zuletzt niemand den Glauben an die Funktion der MOT verloren, und ich wünsche ihm ganz besonders, dass diese Falle es sich bald anders überlegt und zu arbeiten beginnt. Zudem danke ich ihm für die erste Korrektur der Arbeit in sehr knapper Zeit (Sorry, ich wusste nichts von deinem Urlaub!).
- Harald Kübler für die Unterstützung bei allen Problemen und vor allem im Laserlabor. Er hat es geschafft, mir den Schrecken vor diesem Laser-Monstrum zu nehmen. Durch seine Erklärungen auf meine Probleme hin bin ich glaube ich ein bisschen ein besseres Physiker geworden.
- Thomas Baluktsian danke ich für die aufopfernde und eher ätzende Arbeit in der Flow-Box. Er verdient irgendwie den Namen „3rd-floor-hero-of-the-lovebox“. Oder so.
- Andreas Kölle, meinem Nebensitzer im Büro, danke ich für die vielen kurzweiligen Gespräche über Sport, Kaiserschmarrn und, ähm, ach ja, Physik.
- Allen anderen aus dem dritten und vierten Stock, die für Fragen immer ein offenes hatten.
- Den Spezialisten aus der Mechanik- und Glaswerkstatt, die wirklich immer schnell und zuverlässig mit meinen Wünschen zurechtkamen.
- Meiner Freundin Nadine, die mir auch bei dieser Aufgabe immer zu Seite stand und sich mit mir gefreut hat, wenn mal zufällig irgendwas geklappt hat.
- Ganz besonders danke ich meiner ganzen Familie, für die stetige Unterstützung während der Dauer meines bisherigen Studiums. Ohne euch wäre alles nicht so verlaufen. Danke!