Laserstabilisierung für ein Quantengasexperiment

Laser stabilisation for a quantum gas experiment

Bachelorarbeit von Yannick Schellander

Prüfer: Prof. Dr. Tilman Pfau

6. September 2018



Universität Stuttgart

5. Physikalisches Institut Universität Stuttgart Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Yannick Schellander (Matrikelnummer 3170487), diese Bachelorarbeit mit dem Titel "Laserstabilisierung für ein Quantengasexperiment" eigenständig verfasst zu haben. Es wurden nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet. Alle Angaben, die wörtlich oder sinngemäß anderen Werken entnommen wurden, sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht und im Literaturverzeichnis aufgelistet. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in jeglicher anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden. Außerdem versichere ich, dass der Inhalt des elektronischen Exemplars mit dem des Druckexemplars übereinstimmt.

Yannick Schellander

 $\frac{\text{Stuttgart}, 6. \text{ September 2018}}{\text{Ort}, \text{ Datum}}$

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1										
2.	Theoretische Grundlagen 2.1. Schrittmotoren: Grundlagen und Funktionsweisen											
3.	Aufbau der Schrittmotorsteuerung 3.1. Funktion der einzelnen Bestandteile der Schrittmotorsteuerung 3.2. Pinbelegung 3.3. Arten der Schrittmotoransteuerung 3.4. Theoretischer Vergleich der Schrittmotoren	13 13 15 17 18										
4.	Charakterisierung der Schrittmotoren und ihrer Funktionen 4.1. Testaufbau 4.2. Nullpositionsbestimmung 4.3. Kalibrierung 4.4. Ermittlung der Schrittposition mit maximaler Laserintensität 4.5. Untersuchung der Schrittmotoren auf Schrittverluste 4.6. Verfahren zur Erzeugung beliebiger Intensitätsverläufe 4.6.1. Linearer Intensitätsverlauf 4.7. Intensitätsstabilisierung 4.7.1. Erläuterung der verschiedenen Intensitätsstabilisierungsprogramme	21 22 23 24 26 28 29 33 37 37 38										
5.	Test der Schrittmotorsteuerung unter experimentellen Bedingungen5.1. Grüner Laser: Dipolfalle5.2. Blauer Laser: Laserkühlung	45 45 47										
6.	Zusammenfassung und Ausblick	53										
A. Ab	Anhang A.1. Liste der Bestandteile der Schrittmotorsteuerung A.2. Befehlsaufrufe der in der Programmierung implementierten Funktionen	55 55 56 59										

Tabellenverzeichnis	61
Literaturverzeichnis	63
Danksagung	65

1. Einleitung

Experimente mit kalten Atomen setzen Laser zur Kühlung von Atomen ein. Ein Beispiel für ein solches Experiment ist das zurzeit in der Arbeitsgruppe von Prof. Pfau laufende Experiment zur Erforschung dipolarer Quantengase mittels Dysprosium. Für die Funktionsfähigkeit und Reproduzierbarkeit solcher Experimente müssen die eingesetzten Laser kontrolliert und in Frequenz und Intensität aktiv gegen den Einfluss von äußeren Störungen stabilisiert werden. Zurzeit werden akustooptische Modulatoren (AOMs) eingesetzt, um die Intensität der Laser im Experiment zu stabilisieren. Die Stabilisierung durch einen AOM führt zu einem Verlust von typischerweise 30 % der Laserintensität, was im Fall leistungskritischer Anwendungen ein Problem darstellen kann. Ein alternatives Stabilisierungsverfahren ist somit erstrebenswert.

In dieser Bachelorarbeit wird deshalb untersucht, ob die Kombination aus einem rotierenden $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen, das durch einen Schrittmotor angetrieben wird, und einem Strahlteilerwürfel eine äquivalente Stabilität ohne einen Intensitätsverlust liefern kann. Schrittmotoren werden aufgrund ihrer großen Genauigkeit beispielsweise in 3D-Druckern und Blu-Ray-Laufwerken zur Positionierung des Druckkopfes bzw. des Lasers eingesetzt. Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet sind computergesteuerte Werkzeugmaschinen. Diese Einsatzgebiete weisen auf eine hohe Genauigkeit für eine gewünschte Manipulation von Laserstrahlen hin.

Für viele Anwendungen im Experiment, wie z.B. Laserkühlung oder Dipolfallen, ist eine stabile Laserintensität entscheidend für die Funktionsfähigkeit und die Reproduzierbarkeit des Experiments. In Verbindung mit einem Mikrocontroller ergibt sich eine flexible Programmierbarkeit, die genutzt werden kann, um unterschiedliche Funktionen zu realisieren. Diese Funktionen sind die Kalibrierung, das Ein- und Ausschalten eines Laserstrahls und die Erzeugung verschiedener Intensitätsverläufe. Die genannten Funktionen und deren Einsatzmöglichkeiten werden in dieser Arbeit ausgeführt. Zusätzlich findet ein Vergleich des schrittmotorgesteuerten $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen mit der jetzigen im Experiment verwendeten Laserstabilisierung durch AOMs statt. Daraus kann direkt abgeleitet werden, ob der Schrittmotor mit seinen programmierten Funktionen die Qualität für die Anwendung im Experiment besitzt. Ein weiterer Aspekt dieser Bachelorarbeit ist der Vergleich zweier unterschiedlicher Schrittmotoren. Aus diesem Vergleich wird die Qualität der Schrittmotoren für die experimentellen Anwendungen ermittelt und gezeigt, welcher Schrittmotor für welche Funktion oder gar generell zu bevorzugen ist.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die Grundlagen und die Funktionsweisen unterschiedlicher Schrittmotoren eingegangen. Außerdem wird ein Einblick in optische Bauteile wie den akustooptischen Modulator und optische Verzögerungsplatten gegeben. Dabei wird explizit auf das in der Intensitätsstabilisierung eingesetzte $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen eingegangen. Darüber hinaus sind die Grundlagen von Dipolfallen, der Laserkühlung und der Regelungstechnik erklärt. Die Informationen über die Dipolfallen und die Laserkühlung dienen als Motivation für mögliche Einsatzgebiete der Schrittmotorsteuerung.

2.1. Schrittmotoren: Grundlagen und Funktionsweisen

Ein Schrittmotor besteht aus einem drehbaren (Rotor) und einem statischen Teil (Stator). Der Rotor dreht sich durch das schrittweise rotierende elektromagnetische Feld der Statorspulen. Bei Schrittmotoren befinden sich nur Spulen im Stator. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, einen Schrittmotor zu realisieren und somit verschiedene Schrittmotortypen [1]. Der Reluktanz-Schrittmotor besitzt einen Rotor aus einem gezahnten Weicheisenkern. Dadurch ist diese Bauform sehr preiswert, jedoch bilden sich keine magnetischen Pole im Rotor aus. Das führt zu einem geringerem Drehmoment und dazu, dass Reluktanz-Schrittmotoren kein Rastmoment besitzen. Das Vorhandensein eines Rastmoments bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Rotor in Ruhelage ein Haltemoment besitzt. Besteht der Rotor aus einem zylinderförmigen Permanentmagneten mit radialer Magnetisierung, ist von einem Permanentmagnet-Schrittmotor die Rede. In dieser Bauform können sich magnetische Pole im Rotor ausbilden. Dadurch besitzt diese Bauform ein höheres Drehmoment und ein Haltemoment. Der Nachteil des Permanentmagnet-Schrittmotors ist, dass nur eine begrenzte Zahl von magnetischen Polen nebeneinander angeordnet werden kann. Somit kommt es zu einem großem Schrittwinkel. Der Hybrid-Schrittmotor vereint die Vorzüge beider Bauformen. Hybrid-Schrittmotoren besitzen einen Rotor aus einem axialen Permanentmagneten mit an den Enden angebrachten gezahnten Kappen. Nordund Südpole sind, wie in Abbildung 2.1 gezeigt, abwechselnd angebracht und um eine halbe Zahnbreite gegeneinander versetzt. Aufgrund der Vereinigung der Vorteile von Reluktanz- und Permanentmagnet-Schrittmotoren sind Hybrid-Schrittmotoren der heutige Standard.



Abbildung 2.1.: Aufbau eines Hybrid-Schrittmotors [2]. Links ist die Verbindung aus Stator und Rotor zu sehen. Rechts ist der Rotor mit angebrachten gezahnten Kappen abgebildet. Nord- und Südpole sind eine halbe Zahnbreite gegeneinander versetzt.

Bei solchen Schrittmotoren entstehen durch das gezielte Ein- und Ausschalten einzelner Wicklungen unterschiedlich ausgerichtete Magnetfelder im Stator und Rotor. Daraus resultiert ein Drehmoment, das den Rotor so ausrichtet, dass sich der größtmögliche magnetische Fluss ausbildet. Hierbei ist die Drehung um einen motorabhängigien Winkel und jedem ganzzahligen Vielfachen dieses Winkels möglich. Der Schrittwinkel, also der Winkel, der bei einem Vollschritt und Umschaltung des Stroms von einer Wicklung auf die nächste auftritt, ist eine wichtige Eigenschaft eines jeden Schrittmotors. Der Schrittwinkel eines Motors wird durch die Anzahl der Phasen und hauptsächlich von der Anzahl der Polpaare im Rotor bestimmt. Eine Erhöhung der Phasenzahl ist mit einer Erhöhung des Schalt- und Verdrahtungsaufwands verbunden. Je kleiner der Schrittwinkel eines Schrittmotors ist, desto besser ist seine Auflösung. Die Auflösung ist als die Anzahl der Vollschritte für eine Drehung um 360° definiert. Sie kann leicht aus dem Schrittwinkel berechnet werden. Eine weitere Eigenschaft eines Schrittmotors ist die Anzahl der Phasen. Sie gibt Aufschluss auf die Anzahl der verbauten Spulen im Stator. Zweiphasige Schrittmotoren sind am gängigsten, jedoch sind auch drei-, vier- und fünfphasige Motoren üblich. Zweiphasige Motoren werden in Uni- und Bipolarmotoren unterschieden. Wobei beim Unipolarbetrieb die Versorgungsspannung fest am Mittelabgriff der Spule anliegt und die Enden abwechselnd auf Masse gelegt werden. Somit steht immer nur die halbe Spule unter Strom. Bei bipolaren Motoren erfolgt eine ständige Umpolung der Spulen. Dadurch weisen Bipolarmotoren einen höheren Schaltaufwand auf. Als Vorteil besitzen sie aufgrund größerer Spulenströme höhere Drehmomente und somit höhere Drehzahlen als Unipolarmotoren. Bipolarmotoren können theoretisch auch als Unipolarmotoren betrieben werden, wobei die Leistung jedoch geringer ist. Darüber hinaus können Schrittmotoren in verschiedenen Betriebsarten betrieben werden. Die einfachste Variante ist der Vollschrittbetrieb. In dieser Betriebsart sind beide Spulen unter Strom, dadurch ergeben sich vier Positionen pro Umlauf. Halbschritte, also Schritte mit dem halben Schrittwinkel eines Vollschrittes, können dadurch erreicht werden, dass immer nur eine Spule unter Strom gesetzt wird. Dadurch ergeben sich vier weitere Positionen die zwischen den Schrittpositionen im Vollschrittbetrieb liegen. Wird der Betrag der Ströme in den Spulen weiter abgestuft sind weitere Zwischenschritte und somit kleinere Winkelschritte möglich. Dieser Modus wird als Mikroschritt-Modus bezeichnet. In unserem Fall sind durch den Motortreiber Big Easy Driver [3] im Mikroschritt-Modus Schritte der sechzehntel Größe eines Vollschrittes möglich. Bei den

in dieser Arbeit verwendeten Motoren LK-Instruments M101A [4] und Standa S28 [5] handelt es sich um zweiphasige Bipolarmotoren. Ein genauerer Vergleich der beiden Motoren erfolgt im Kapitel 3.4.

2.2. Akustooptischer Modulator

Ein akustooptischer Modulator (AOM) ist ein optisches Bauelement, das aktiv die Frequenz und die Intensität von Laserstrahlen kontrolliert. AOMs basieren auf der Wechselwirkung von Licht mit Schallwellen. Mit Hilfe von Schallwellen in einem optischen Kristall wird ein optisches Gitter erzeugt, an dem ein Laserstrahl gebeugt wird. Die Schallwellen im Kristall werden durch einen piezoelektrischen Wandler erzeugt. Auf der gegenüberliegenden Seite des Wandlers befindet sich ein absorbierendes Material, welches die Reflexion der Schallwellen und somit die Bildung von stehenden Wellen verhindert. Der zuvor beschriebene Aufbau eines AOMs ist in Abbildung 2.2 grafisch dargestellt.



Abbildung 2.2.: Aufbau akustooptischer Modulator [6]. Ein piezoelektrischer Wandler erzeugt eine Druckwelle, die zu einer periodischen Änderung des Brechungsindizes des optischen Kristalls und dadurch zu einer Beugung des Laserstrahls führt.

Im optischen Kristall bilden sich laufende Wellen aus, die zu einer periodischen Änderung des Brechungsindexes n führen. Es entsteht ein laufendes Phasengitter mit der Kreisfrequenz der Schallwellen ω_{Schall} . Der Brechungsindex n(x,t) hängt von der Position x im Kristall und von der Zeit t ab und kann durch

$$n(x,t) = n_0 - \Delta n_0 \cos\left(\omega_{\text{Schall}} t - \frac{2\pi}{\lambda_{\text{Schall}}} x\right)$$
(2.1)

ausgedrückt werden [7]. Hierbei ist n_0 der anfängliche Brechungsindex, λ_{Schall} die Wellenlänge der Schallwelle und Δn_0 die Modulationsamplitude. Trifft ein Laserstrahl auf dieses optische Gitter, wird er gebeugt. Als Näherung kann für die geometrische Interferenzbedingung das Gitter als statisch angenommen werden, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lasers c_{Laser} (Lichtgeschwindigkeit) viel größer als die Schallgeschwindigkeit c_{Schall} ist. Als optischer Kristall wird typischerweise Tellurdioxid (TeO₂) verwendet. In Tellurdioxid breiten sich Schallwellen mit einer Geschwindigkeit von 4200 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ aus [8]. Die Beugung erfolgt nach den Bragg-Bedingungen, da das monochromatische Licht des Laserstrahls senkrecht auf das durch die Schallwelle erzeugte Gitter trifft. Die Bragg-Bedingung für konstruktive Interferenz lautet somit

$$m \cdot \lambda_{\text{Laser}} = 2 \cdot d \cdot \sin(\theta) = 2 \cdot \lambda_{\text{Schall}} \cdot \sin(\theta),$$
 (2.2)

wobei m für die Beugungsordnung, λ_{Laser} für die Wellenlänge des Lasers, d für den Abstand der Wellenfronten und θ für den Winkel zwischen einfallendem Laserstrahl und Wellenfronten der Schallwellen steht [8]. Eine quantenmechanische Betrachtungsweise behandelt die Schallwelle im Festkörper als Phononen. Diese Phononen wechselwirken mit den Photonen. Die Ablenkung des Lichts kann dadurch erklärt werden, dass der Impuls der Phononen vektoriell zum Impuls der Photonen hinzuaddiert wird. Als Gleichung dargestellt gilt

$$\hbar \vec{k}_{\text{aus}} = \hbar \vec{k}_{\text{ein}} \pm \hbar \vec{k}_{\text{Schall}}.$$
(2.3)

 \hbar ist das reduzierte Plancksche Wirkungsquantum und k_{ein} , k_{aus} , k_{Schall} die Wellenvektoren vom eingehendem und ausgehendem Laserstrahl sowie der Schallwelle. Die Energieerhaltung liefert zudem den Zusammenhang

$$\hbar\omega_{\rm aus} = \hbar\omega_{\rm ein} \pm \hbar\omega_{\rm Schall}.\tag{2.4}$$

In Analogie zur Bragg-Bedingung für konstruktive Interferenz (Gleichung (2.2)) in der ersten Beugungsordnung (m = 1) zeigt sich, dass die Phasenverschiebung gerade der Kreisfrequenz ω_{Schall} der Schallwelle entspricht. Es sind auch negative Frequenzänderungen möglich, falls der AOM so ausgerichtet ist, dass der Winkel zwischen einfallendem Laserstrahl und Wellenfronten θ negativ ist. In dieser Ausrichtung wird der Strahl in die negative erste Ordnung gebeugt, da sich das Gitter von der Einfallsrichtung des Strahls wegbewegt.

Die Kontrolle der Laserintensität basiert auf der Abhängigkeit der Beugungseffizenz von der Radiofrequenz-Leistung (RF-Leistung). Die RF-Leistung bestimmt die Amplitude, der sich im Kristall ausbildeten Schallwelle und dementsprechend die Beugungseffizenz. Daher werden AOMs zur Frequenz- und Amplitudenmodulation (Anstiegszeit typischerweise kleiner als 100 ns) eingesetzt. Auch im Dysprosiumlabor werden AOMs zur Laserintensitätsstabilisierung und zum schnellen Schalten eingesetzt. Als Beispiel ist die Stabilisierung eines blauen Kühllasers mit einer Wellenlänge von $\lambda = 421$ nm zu nennen.

2.3. Optische Verzögerungsplatten

Optische Verzögerungsplatten sind Bauteile, die die Phase und die Polarisation von elektromagnetischen Wellen ändern können. Es handelt sich meist um dünne Scheiben aus anisotropen Materialien. Die Besonderheit ist, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in diesem Material polarisationsabhängig ist. Die verwendeten Materialien (optisch einachsig) besitzen Achsen, entlang deren sich die Brechungsindizes des Materials unterscheiden. Dadurch gibt es eine schnelle und eine langsame Achse, da für die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium $c_{\text{Med}} = \frac{c_0}{n}$ gilt. Für die Phasenverschiebung $\Delta \phi$ zwischen der langsamen und der schnellen Achse ergibt sich

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \cdot d}{\lambda} \cdot (n_{\text{langsam}} - n_{\text{schnell}}).$$
(2.5)

In der vorangestellten Gleichung sind d die Dicke der Verzögerungsplatte, λ die Wellenlänge des Lichts und $n_{\text{langsam, schnell}}$ die Brechungsindizes der beiden Achsen [9]. Anhand der vorausgegangenen Gleichung erkennt man, dass die Phasenverschiebung $\Delta \phi$ proportional zur Dicke der Verzögerungsplatte d ist. Aufgrund dieser Proportionalität ist jede Verzögerungsplatte nur für eine bestimmte Wellenlänge λ ausgelegt. In der Kristalloptik gibt es mehrere Arten von Verzögerungsplatten. Die zwei am häufigsten verwendeten Verzögerungsplatten sind zum einen das $\frac{\lambda}{4}$ - und zum anderen das $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen. Ein $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen verzögert Licht, das parallel zu einer bauteilspezifischen Achse polarisiert ist, um eine halbe Wellenlänge gegenüber dem senkrecht zur bauteilspezifischen Achse polarisiertem Licht. Hieraus ergibt sich eine Drehung der Polarisationsebene von linear polarisiertem Licht. Der Drehwinkel der Polarisationsebene hängt vom Winkelunterschied zwischen Polarisationsebene des linear polarisiertem Licht und der bauteilspezifischen Achse des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen ab. Linear polarisiertes Licht, das mit einem Winkel α auf ein $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen eingestrahlt wird, verlässt das Plättchen unter dem Winkel $-\alpha$. Die Polarisationsebene wird also um den Winkel 2α gedreht. Somit entspricht eine Drehung des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen um 45° einer Drehung der Polarisationsebene um 90°. Die Funktionsweise eines $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen ist in der Abbildung 2.3 verdeutlicht. Die Polarisationsebene der elektromagnetischen Welle ist durch die rote Achse gekennzeichnet. Das Licht trifft unter einem Winkel von 45° auf das $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen und verlässt dieses unter einem Winkel von -45°. Somit hat eine Drehung der Polarisationsebene um 90° stattgefunden. In Kombination mit einem Polarisationsfilter bzw. Polarisationsstrahlteiler kann eine Drehung eines $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen somit direkt Einfluss auf die Intensität eines Laserstrahls haben. Polarisationsstrahlteiler sind optische Bauteile die einen einzelnen Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen aufspalten. Das Teilungsverhältnis hängt von der Polarisation des auf den Polarisationsstrahlteiler treffenden Lichts ab. Deshalb ist die Kombination aus $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen und Strahlteilerwürfel häufig anzutreffen, um die Intensität eines Lasers einzustellen bzw. einen Strahl in einem beliebigem Intensitätsverhältnis aufzuspalten. $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen finden in dieser Arbeit keine Anwendung. Sie können dazu verwendet werden, um aus linear polarisiertem Licht zirkular polarisiertes und umgekehrt zu erzeugen.



Abbildung 2.3.: Funktionsweise eines $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchens [10]. Aufgrund der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten parallel und senkrecht zur optischen Achse kommt es zur Drehung der Polarisationsebene des einfallenden linear polarisiertem Lichts um den zweifachen Winkel zischen Polarisationsebene und optischer Achse.

2.4. Regelungstechnik

Wie im vorherigen Kapitel ausgeführt, kann die Kombination aus $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen und Strahlteilerwürfel genutzt werden um einen Strahl in einem gewünschten Intensitätsverhältnis aufzuteilen. Um trotz äußerer Strörungen das Intensitätsverhältnis konstant zu halten, wird eine aktive Regelung benötigt. In der Abbildung 2.4 ist die allgemeine Wirkungsweise eines Regelkreises dargestellt.



Abbildung 2.4.: Regelkreis [11]. Zuerst wird die Fehlergröße f(t) aus der Differenz von Sollgröße w(t) und Regelgröße y(t) gebildet. Die Fehlergröße f(t) wird durch den Regler in die Antwortgröße a(t) umgewandelt. Die Antwortgröße a(t) und die Störgröße wirken auf der Regelstrecke auf die Regelgröße ein. Im Idealfall kann so eine Störung kompensiert werden.

Mit Hilfe der Regelungstechnik soll eine physikalische Größe trotz äußeren Störeinflüssen konstant auf einem Sollwert gehalten werden. Dazu muss zunächst ein Fehlersignal definiert werden. Das Fehlersignal f(t)

$$f(t) = w(t) - y(t)$$
 (2.6)

gibt die Abweichung der Regelgröße y(t) von der Sollgröße w(t) an. Ein Regler wandelt das Fehlersignal nun in ein Antwortsignal a(t) um. Häufig werden PID-Regler verwendet, die im Folgenden näher erläutert werden. PID-Regler bestehen aus einem Proportional-, einem Integralund einem Differentialteil [12]. Der Proportionalteil des Antwortsignals ist proportional zum Fehlersignal und wird aus der Multiplikation des Fehlersignals f(t) mit einem konstanten Proportionalitätsfaktor k_p gebildet.

$$a_{\rm P}(t) = k_{\rm p} \cdot f(t) \tag{2.7}$$

Der P-Regler antwortet zeitunabhänig auf ein Fehlersignal, jedoch kann es zu starkem Übersteuern kommen. Außerdem sind stabile Zustände möglich, bei dem der P-Regler trotz Abweichung der Regelgröße vom Sollwert die Regelgröße nicht mehr beeinflussen kann [12]. Der Integralteil wirkt durch zeitliche Integration des Fehlersignals auf die Regelgröße ein und kompensiert somit langfristige Drifts. Des Weiteren kann er ein Übersteuern des P-Reglers verhindern. Wie beim P-Regler findet eine Gewichtung mit einer Konstanten k_i statt. Die Antwortfunktion a(t) des Integralteils auf das Fehlersignal ist

$$a_{\rm I}(t) = k_{\rm i} \cdot \int_0^t f(t') dt'.$$
 (2.8)

Der Differentialteil kann nur in der Kombination mit dem P- oder I-Regler bzw. einer Kombination aus beiden als Regler eingesetzt werden. Die Antwortfunktion

$$a_{\rm D}(t) = k_{\rm d} \cdot \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}.$$
(2.9)

ist durch die zeitliche Ableitung gegeben. Hierbei ist k_d erneut eine Gewichtungskonstante. Die Kombination dieser drei Regelungstechniken ergibt den PID-Regler. Die Antwortfunktion des PID-Reglers ist die Addition der Antwortfunktionen aufgezeigt in den Gleichungen (2.7), (2.8) und (2.9).

$$a_{\rm PID}(t) = k_{\rm p} \cdot f(t) + k_{\rm i} \cdot \int_0^t f(t') \mathrm{d}t' + k_{\rm d} \cdot \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}$$
(2.10)

Mit den Konstanten $k_{\rm p}$, $k_{\rm i}$ und $k_{\rm d}$ erfolgt die Gewichtung der einzelnen Regler, um die Stabilisierung auf unterschiedliche Störeinflüsse einzustellen. Die Wahl der Konstanten $k_{\rm p}$, $k_{\rm i}$ und $k_{\rm d}$ ist elementar für die erfolgreiche Funktionsweise des PID-Reglers und muss an jedes Problem angepasst werden. Wie im späteren Kapitel 4.7.1 erläutert, führt der D-Teil für die Anwendung in der Schrittmotorsteuerung zu einem Aufschwingen.

Die in den folgenden Kapiteln 2.5 und 2.6 getätigten Ausführungen über die Grundlagen optischer Dipolfallen und die Grundlagen der Laserkühlung dienen der Motivation für mögliche Einsatzgebiete der Schrittmotorsteuerung.

2.5. Optische Dipolfalle

Dipolkräfte wurden bereits 1962 beobachtet [13] und erste Überlegungen für die Anwendung als Neutralfalle angestellt. 1970 wurde von A. Ashkin in seiner Arbeit [14] gezeigt, dass sich dielektrische Partikel mit Hilfe von Laserlicht einfangen lassen. Hierbei spielt die Kombination von Strahlungsdruck und Dipolkräften die entscheidende Rolle. Diese Erkenntnis bildete die Grundlage für die sogenannte optische Pinzette [15], die heutzutage breite Anwendung in der Mikrobiologie findet. Teilchen bzw. Atome können nur durch eine gerichtete und ortsabhängige Kraft an einem Ort gefangen gehalten werden. Durch Fokussieren eines Lasers wirkt eine attraktive Kraft zum Laserfokus hin. Um dies für Atome zu veranschaulichen werden Atome im Folgenden als harmonische Oszillatoren in einem klassischen Lichtfeld betrachtet [16]. Ist das elektrische Feld des Lichts in die Richtung des Einheitsvektors \vec{e} polarisiert, ergibt sich für das elektrische Feld folgende Formel

$$\vec{E}(\vec{r},t) = E(\vec{r}) \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t) \cdot \vec{e} + E^*(\vec{r}) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t) \cdot \vec{e}.$$
(2.11)

Hierbei beschreibt ω die Oszillationsfrequenz, t die Zeit und $E(\vec{r})$ die Amplitude des komplexen elektrischen Feldes. Ein elektrisches Feld induziert im Atom ein Dipolmoment der Form

$$\vec{p} = \alpha \cdot \vec{E}.\tag{2.12}$$

Der komplexe Polarisierbarkeitstensor α vereinfacht sich zu einer komplexen Zahl für den Fall von Atomen mit isotroper Elektronenhülle, z.B. in einem s-Zustand. Für das induzierte Dipolmoment ergibt sich, wenn das elektrische Feld in die Gleichung (2.12) eingesetzt wird, die Formel

$$\vec{p}(\vec{r},t) = p(\vec{r}) \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t) \cdot \vec{e} + p^*(\vec{r}) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t) \cdot \vec{e}.$$
(2.13)

Das im Atom erzeugte elektrische Dipolmoment $\vec{p}(\vec{r},t)$ wechselwirkt mit dem erzeugten elektrischen Feld E und es bildet sich ein Wechselwirkungspotential. Dieses Wechselwirkungspotential führt zu einer Kraft. Das Wechselwirkungspotential ist proportional zur Intensität, da

$$U_{\text{Dipol}} = \frac{1}{2} < \vec{p} \cdot \vec{E} > = -\frac{1}{2\varepsilon_0 c} \cdot \text{Re}(\alpha) \cdot I(\vec{r})$$
(2.14)

gilt. Hierbei stellt $\langle \rangle$ den zeitlichen Mittelwert über eine Periode, $\operatorname{Re}(\alpha)$ den Realteil der komplexen Polarisierbarkeit, c die Lichtgeschwindigkeit und ε_0 die elektrische Feldkonstante dar. Die Intensität ist definiert als $I = 2 \cdot \epsilon_0 c |E|^2$ und ist somit proportional zum Betragsquadrat der elektrischen Feldstärke. Der Faktor $\frac{1}{2}$ bezieht ein, dass es sich um ein induziertes und nicht um ein permanentes Dipolmoment handelt. Die Dipolkraft ergibt sich aus dem Gradienten des Wechselwirkungspotentials

$$\vec{F}_{\text{Dipol}}(\vec{r}) = -\nabla U_{\text{Dipol}}(\vec{r}) = \frac{1}{2\varepsilon_0 c} \text{Re}(\alpha) \cdot \nabla I(\vec{r}).$$
(2.15)

Für die mittlere Leistung, die der Dipol vom elektrischen Feld absorbiert und wieder abstrahlt, kann

$$P_{\text{Dipol}} = \langle \dot{\vec{p}} \cdot E \rangle = \frac{\omega}{\varepsilon_0 c} \text{Im}(\alpha) \cdot I(\vec{r})$$
(2.16)

angegeben werden, wobei ω der Oszillationsfrequenz des elektrischen Felds entspricht. Somit hängt die Absorption vom Imaginärteil der Polarisierbarkeit α ab. Betrachtet man das Licht als Strom von Photonen mit der Energie eines Photons $E_{\text{Photon}} = \hbar \omega$, kann die Absorption als Photonenstreuung betrachtet werden. Für diese Streuung kann eine Streurate Γ_{Streu} angegeben werden.

$$\Gamma_{\text{Streu}}(\vec{r}) = \frac{P_{\text{Dipol}}}{\hbar\omega} = \frac{1}{\hbar\epsilon_0 c} \text{Im}(\alpha) \cdot I(\vec{r})$$
(2.17)

Die hergeleitete Formel für das Wechselwirkungspotential und die Streurate gelten für alle neutralen Teilchen in einem oszillierenden elektrischen Feld. Die einzige unbekannte Größe in den Formeln (2.14) und (2.17) ist die Polarisierbarkeit α . Die Polarisierbarkeit α bestimmt durch ihren Realteil das Wechselwirkungspotential, somit die Tiefe der Falle und durch ihren Imaginärteil die Streurate. Die Polarisierbarkeit kann berechnet werden, wenn man die Atome als klassische getriebene Oszillatoren mit Dämpfung betrachtet. In dieser Betrachtungsweise erhält man für die Polarisierbarkeit

$$\alpha(\omega) = 6\pi\epsilon_0 c^3 \cdot \frac{\Gamma/\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i(\omega/\omega_0^3) \cdot \Gamma}$$
(2.18)

mit Eigenfrequenz ω_0 und Dämpfungsrate Γ . Setzt man die bestimmte Polarisierbarkeit α in die Gleichungen (2.14) und (2.17) ein und verwendet die sogenannte Drehwellennäherung $(\frac{\omega}{\omega_0} \approx 1)^1$, ergeben sich recht einfache Formeln für die Streurate und das Wechselwirkungspotential.

$$U_{\text{Dipol}}(\vec{r}) = \frac{3\pi c^2}{2 \cdot \omega_0^3} \cdot \left(\frac{\Gamma}{\Delta}\right) \cdot I(\vec{r})$$
(2.19)

$$\Gamma_{\rm streu}(\vec{r}) = \frac{3\pi c^2}{2 \cdot \hbar \omega_0^3} \cdot \left(\frac{\Gamma}{\Delta}\right)^2 \cdot I(\vec{r})$$
(2.20)

 Δ beschreibt die Verstimmung des Lichts. Für die Verstimmung gilt $\Delta = \omega - \omega_0$. Durch Wahl von Δ kann bestimmt werden, ob die Dipolfalle repulsiv oder attraktiv ist. Die Verstimmung ist somit ein Parameter, der variiert werden kann um die Eigenschaften einer Dipolfalle zu verändern. In der Abbildung 2.5 ist eine im Laserfokus gefangene Atomwolke dargestellt. Der fokussierte Laserstrahl breitet sich wie ein Gauß-Strahl aus.

¹Terme mit $\frac{1}{\omega + \omega_0}$ werden vernachlässigt



Abbildung 2.5.: Optische Dipolfalle für neutrale Atome: Gaußförmiger Laserstrahl mit einer im Laserfokus gefangenen Atomwolke.

2.6. Laserkühlung

Laserkühlung ist ein Verfahren zur Kühlung von Atomwolken. Somit bietet Laserkühlung eine Möglichkeit der Abbremsung sich schnell bewegender Atome. Ein Laserstrahl, der entgegen der Richtung der Atome gerichtet ist, sorgt für eine Abbremsung der Atome. Dabei muss der Laser eine Frequenz nahe der Resonanzfrequenz eines Atomübergangs besitzen, um die Atome abbremsen zu können. Hierbei ist jedoch der Dopplereffekt zu beachten. Aufgrund der Bewegung der Atome muss der Laser gegenüber der Resonanzfrequenz des verwendeten Atomsübergangs rot verstimmt sein², um den Dopplereffekt auszugleichen und somit eine Abbremsung zu realisieren. Da der Dopplereffekt bei der Laserkühlung genutzt wird, ist auch von Dopplerkühlung die Rede. Atome absorbieren beim Abbremsen den Photonenimpuls $\Delta p = \hbar \cdot k$ und gehen in einen angeregten Zustand über. Die Atome erfahren dadurch eine Geschwindigkeitsänderung entgegen ihrer Ausbreitungsrichtung von

$$\Delta v = \frac{\Delta p}{m} = \frac{\hbar k}{m},\tag{2.21}$$

wobei Δp dem Photonenimpuls und *m* der Masse eines zu kühlenden Atoms entspricht. Dieser Vorgang kann auch als Stoßprozess zwischen Atom und Photon angesehen werden, bei dem Impulserhaltung gilt. Durch Fluoreszenz geben die angeregten Atome ihre Energie wieder ab und erfahren dabei einen Rückstoßimpuls. Jedoch findet die Fluoreszenz in alle Raumrichtungen statt, weshalb der Impuls im Mittel über viele Absorptions-Emissionszyklen verschwindet. Im Gegensatz dazu kommt es bei der Absorption immer zu einem gerichteten Impulsübertrag in die Richtung des Laserstrahls. Die Teilprozesse eines Absorptions-Emissionszyklus eines Atoms sind in der Abbildung 2.6 veranschaulicht. Dabei stellt der Teilprozess a) die Photonenabsorption, der Teilprozess b) den angeregten Atomzustand und der Teilprozess c) die Emission eines Photons und den zugehörigen Übergang des Atoms in den Grundzustand dar. Der Teilprozess c) ist als zeitlich gemitteltes Bild dargestellt um zu verdeutlichen, dass die Fluoreszenz in eine beliebige Raumrichtung stattfindet. Beim Durchlauf vieler Absorptions-Emissionszyklen addiert sich der Impuls in die Richtung des Laserstrahls auf und es kommt zu einer starken Abbremsung in der gewünschte Richtung. Damit viele Absorptions-Emissionszyklen durchlaufen werden können müssen geeignete Atomübergänge gefunden werden, die eine hohe Streurate Γ_{Streu} und

²d.h. $\Delta = \omega_{\text{Laser}} - \omega_{\text{Atom}} < 0$

einen ausreichenden Energieniveauabstand besitzen. Darüber hinaus müssen die Atome nach der Fluoreszenz wieder in den Grundzustand übergehen, da ansonsten der Laser nicht mehr resonant zum verwendeten Übergang ist. Für die Funktionsfähigkeit der Laserkühlung ist also ein geschlossener Übergang nötig.



Abbildung 2.6.: Stoßprozess zwischen Atom und Photon. Atom absorbiert Photon und geht dadurch in einen angeregten Zustand über. Beim Übergang des Atoms zurück in den Grundzustand wird ein Photon in eine beliebige Raumrichtung ausgesendet (Fluoreszenz).

Laserkühlung (bzw. Dopplerkühlung) kann für verschiedene Atome durchgeführt werden, solange Laser existieren, die die benötigten Frequenzen besitzen.

Im Experiment der Arbeitsgruppe von Prof. Pfau zur Untersuchung dipolarer Quantengase wird Dysprosium verwendet, weshalb im Folgenden genauer auf die Laserkühlung dieses Elements eingegangen wird [17]. Dysprosium zählt zu den Metallen der seltenen Erden und besitzt die Ordnungszahl 66. Dysprosium hat, mit Holmium, das höchste magnetische Moment aller natürlich vorkommender chemischen Elemente [18]. Als Kühlungslaser wird ein blauer Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 421$ nm verwendet, da damit der stärkste Übergang in Dysprosium angeregt wird. Der angeregte Übergang besitzt eine Linienbreite von $\Gamma_{421} = 2\pi \cdot 32,2$ MHz. Aufgrund der hohen Linienbreite dieses Übergangs ist er besonders gut für die Laserkühlung geeignet. Anderseits sorgt die hohe Linienbreite des verwendeten Kühlungsübergang dafür, dass die niedrigste erreichbare Temperatur T_{Doppler} , auch als Dopplertemperatur bezeichnet, relativ hoch ist. Die Dopplertemperatur $T_{\text{Doppler}} = \hbar \Gamma / 2k_{\text{B}}$ ist proportional zur natürlichen Linienbreite Γ . Durch den blauen Laser kann die Atomwolke auf eine minimale Temperatur von $T_{\text{Doppler}} =$ 773 µK abgekühlt werden. Für Atomphysikexperimente ist dies noch eine recht hohe Temperatur. Um die Atomwolke weiter abzukühlen, werden die Atome in eine magnetooptische Falle (MOT) geladen. In der MOT wird ein Übergang der Wellenlänge $\lambda = 626$ nm verwendet, dessen Linienbreite mit $\Gamma_{626} = 2\pi \cdot 136$ kHz deutlich kleiner als beim blauen Kühlungsübergang ist. Dadurch ist die Dopplertemperatur $T_{\text{Doppler}} = 3,3 \,\mu\text{k}$ auch geringer und die Atomwolke wird im Experiment auf eine Temperatur von bis zu 12 µk abgekühlt [19]. Das Fangen der Atome wird durch einen im Kühlbereich konstanten Magnetfeldgradienten realisiert, wodurch die Atome im Kühlbereich eine ortsabhängige Kraft erfahren. Die ortsabhängige, zum Laser rückstellende, Kraft resultiert aus der Zeeman-Aufspaltung der Atomzustände. Von entscheidender Bedeutung ist die Verwendung von zirkular polarisiertem Licht, da ansonsten keine Wechselwirkung mit den, durch den Zeeman-Effekt, aufgespaltenen Energieniveaus möglich wäre.

3. Aufbau der Schrittmotorsteuerung

Die Steuerung der Schrittmotoren wurde selbst konzipiert, aufgebaut und programmiert, um somit eine Anpassung an die Gegebenheiten im Experiment vornehmen zu können. Die Programmierbarkeit der Schrittmotorsteuerung wird durch die Verwendung eines Mikrocontrollers erreicht. Da Mikrocontroller jedoch nicht direkt mit Schrittmotoren verbunden werden können, muss ein Motortreiber zwischengeschaltet werden. Um die Ansteuerung der Schrittmotoren über die Experimentsteuerung zu ermöglichen, wird ein Netzwerkmodul implementiert. Auf den genauen Aufbau der Schrittmotorsteuerung wird in diesem Kapitel eingegangen.

3.1. Funktion der einzelnen Bestandteile der Schrittmotorsteuerung

Das Herzstück der Schrittmotorsteuerung ist der Mikrocontroller Teensy 3.2 [20]. Dieser dient zur Ansteuerung des Motortreibers und der Messung der analogen Eingangssignale (BNC-Kabel). Zusätzlich liefert er die Spannungsversorgung des Netzwerkmoduls (3,3 V). Das Beschreiben des Mikrocontrollers erfolgt über einen USB-Anschluss. Als Programmiersprache wird die an C/C++ angelehnte Programmiersprache Arduino verwendet. Der zweite Hauptbestandteil der Schrittmotorsteuerung ist der Motortreiber Big Easy Driver [3]. Der Motortreiber steuert die Schrittmotoren und reagiert dabei auf die Eingaben des Mikrocontrollers. Er dient somit als Verbindung zwischen Mikrocontroller und Schrittmotor (siehe Abbildung 3.1). Außerdem gibt der Motortreiber am Pin VCC eine konstante Spannung von 5 V aus. Diese Spannung wird benutzt, um die Nullpositionsbestimmungsfunktion der Schrittmotoren mit Spannung zu versorgen. Der Motortreiber ist direkt mit der äußeren Spannungsversorgung verbunden. Beim Teensy 3.2 ist dies nicht möglich, da die vom Motortreiber benötigte Spannung deutlich über der vom Mikrocontroller akzeptierten Spannung liegt. Deshalb wird ein Spannungsregler LM7805 eingesetzt, der die externe anliegende Spannung auf 5 V abschwächt. Die Kondensatoren, die zwischen GND und Eingang bzw. zwischen GND und Ausgang des Spannungsreglers angebracht sind, dienen zum Glätten der 5 V Versorgungsspannung für den Mikrocontroller. Die Schrittmotorsteuerung besitzt vier BNC-Anschlüsse, die zur Messung bzw. zur Übergabe von Spannungswerten dienen. Jeder BNC-Anschluss besitzt einen Spannungsteiler, bestehend aus einem 4,7 k Ω -Widerstand und einem 2,2 k Ω -Widerstand (Abbildung 3.2). Die Spannungsteiler dienen der Abschwächung der Eingangsspannung und in Kombination mit den Zenerdioden dem Schutz des Teensy 3.2, da dessen Analogpins nur für eine maximale Eingangsspannung von 3,3 V ausgelegt sind. Beim BNC-Anschluss der Photodiode ist der $2,2 \, k\Omega$ -Widerstand durch ein $2,2 \, k\Omega$ -Potentiometer ausgetauscht. Durch den variablen Widerstand kann das Teilungsverhältnis des Spannungsteilers variiert und somit die Spannung am Analogpin des Teensy 3.2 verändert werden. Zum zusätzlichen Schutz der Analogpins werden Zenerdioden in Sperrrichtung zwischen den benutzen Analogpins und dem GND angeschlossen. Liegen an den Analogpins Spannungen über 3,6 V an, brechen die Dioden durch und der Strom fließt über den GND, anstatt über die Analogpins, ab. Nicht nur die BNC-Anschlüsse sind an die Analogpins des Teensy 3.2 angeschlossen, sondern auch die Nullpositionsbestimmungspins der Schrittmotoren. Die Analogpins, die hierfür verwendet werden, sind auch durch Spannungsteiler und Zenerdioden geschützt.

Die Befehlseingabe der Schrittmotorsteuerung ist auf verschiedene Arten möglich. Zum einem über die Befehlseingabe im seriellen Monitor und somit über den USB-Anschluss und zum anderen via Ethernet mit Hilfe eines LAN-Anschlusses. Diese Art der Befehlseingabe wird durch das Netzwerkmodul *WIZ850io* [21] ermöglicht. Das Netzwerkmodul ist, wie in Tabelle 3.1 dargestellt, mit dem *Teensy 3.2* verschaltet. Eine weitere Möglichkeit der Befehlseingabe ist die Übergabe von Variablen mit Hilfe von Spannungswerten, die an die BNC-Anschlüsse angelegt werden.

Zum korrekten Betrieb der Schrittmotoren muss die Stromstärke pro Phase angepasst werden. Bei fester Spannung der Spannungsversorgung kann die Stromstärke pro Phase durch das auf dem Motortreiber integriertem Potentiometer eingestellt werden. Dazu muss das Potentiometer solange gedreht werden bis am Spannungsgenerator der benötigte Stromstärkewert abzulesen ist. Der für die Schrittmotoren jeweils einzustellende Wert ist in der Tabelle 3.3 zu finden. Bei falscher Einstellung der Stromstärke pro Phase kann es zu Schrittverlusten oder bei einer deutlich zu hohen Stromstärke zum Defekt von Bauteilen durch Überhitzung kommen. Um eine Überhitzung der Bauteile zu verhindern, sind auf dem Motortreiber und dem Spannungsregler Kühlkörper angebracht. Zusätzlich ist ein DC-Axiallüfter in den Deckel integriert. Dieser benötigt eine externe Spannungsversorgung und dient einzig der Kühlung der elektrischen Bauteile.



Abbildung 3.1.: Symboldarstellung des vereinfachten Schaltplans.



Abbildung 3.2.: Verschaltung eines Analogeingangs mit dem Mikrocontroller.

3.2. Pinbelegung

Der Schaltplan, dargestellt in Abbildung 3.1, gibt einen Überblick über die Verdrahtung der in der Schrittmotorsteuerung verbauten Elektronik. Die genau Pinbelegung der Anschlüsse des Motortreibers, des Netzwerkmoduls und der BNC-Anschlüsse am Teensy ist für die Funktionalität der Schrittmotorsteuerung entscheidend. Außerdem ist die Ausführung der unterschiedlichen implementierten Funktionen nur bei korrekter Pinbelegung gegeben. Die genaue Pinbelegung wird in der Tabelle 3.1 dargestellt.

Teensy 3.2 Pinbezeichnung	Big Easy Driver	WIZ850io	anderweitige Anschlüsse
GND	GND	GND	GND
0	DIR	-	-
1	STEP	-	-
3	-	RESET	-
4	SLEEP	-	-
5	RST	-	-
6	MS3	-	-
7	MS2	-	-
8	MS1	-	-
9	ENABLE	-	-
10	-	SCNn	-
11	-	MOSI	-
12	-	MISO	-
13	-	SCLK	-
14			Analogeingang 1
15	-	-	Nullposition Standa
16	-	-	Nullposition LK-Instruments
17	-	-	Analogeingang 2
20	-	-	Trigger
22	-	-	Photodiode
3,3 V	-	3,3 V	-
Vin	-	-	5V
-	M+	-	+8 V - +35 V

Tabelle 3.1.: Pinbelegung am *Teensy 3.2*, vom *Big Easy Drivers*, vom *WIZ850io* Netzwerkmodul, von den BNC-Anschlüsse und von der Spannungsversorgung

Des Weiteren ist die Verdrahtung des Motortreibers mit den Schrittmotoranschlüssen von Bedeutung. Die korrekte Verschaltung des Motortreibers mit den Motoranschlüssen (D-Sub Anschlüsse) wird in der Tabelle 3.2 gezeigt.

Tabe	elle	3.2.:	Vei	rsch	ıaltu	ıng	des	Ba	ig	Easį	y l	Drivers	mit	den	Motora	ns	ch	lü	ssen	(D	-Sub	A	nsc	ehlü	(sse)
		_	_						-									-						-	

Big Easy Driver Sparkfun	Schrittmotor M101A LK-Instruments	Schrittmotor S28 Standa
Coil A+	4	4
Coil A-	3	3
Coil B+	2	2
Coil B-	1	1
VCC	6	5
GND	GND	GND

Zusätzlich besitzen die Anschlüsse beider Motoren einen Pin zur Nullpositionsbestimmung. Diese Pins sind direkt über Spannungsteiler mit dem *Teensy 3.2* verbunden. Deshalb tauchen diese Pins in der Tabelle 3.2 nicht auf. Sie sind aber in der Tabelle 3.1 vermerkt. Für den Schrittmotor M101A ist die Nullpositionsfunktion am Pin 7 des Motoranschlusses und für den Schrittmotor S28 am Pin 9. Die restlichen Pins der Motoranschlüsse, die nicht benannt wurden, sind nicht verbunden. Es ist zu erkennen, dass die Motoranschlüsse beider Motoren zwar eine unterschiedliche Anzahl an Pins besitzen, jedoch für die realisierten Funktionen ist die Verschaltung beider Motoranschlüsse, bis auf den Pin zur Bestimmung der Nullposition, gleich.

3.3. Arten der Schrittmotoransteuerung

Die Übergabe von Variablen bzw. Befehlen und die Auswahl der gewünschten implementierten Funktionen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Die Arten der Befehlsübergabe an die Schrittmotorsteuerung, genauer an den Mikrocontroller Teensy 3.2, werden im Folgenden ausgeführt. Die Befehlseingabe ist über den seriellen Monitor per USB-Verbindung, über einen Webserver im Ethernet per LAN-Anschluss und über extern vorgegebene analoge Spannungswerte möglich. Die für die experimentelle Anwendung gedachte Ansteuerung ist die Ansteuerung über den LAN-Anschluss. Diese Art der Ansteuerung besitzt den Vorteil, dass lange Kabel mit analogen Signalen, die anfällig für Störungen sind, vermieden werden. Die Ansteuerung über Spannungswerte hat die größte Ungenauigkeit, da die durch Spannungsquellen vorgegebenen Spannungen schwanken. Bei einer Intensitätstabilisierung, bei der der Wert auf den stabilisiert werden soll, per Spannung an den Teensy 3.2 übergeben wird, sollte als Stabilisierungsprogramm der P-Regler mit gleitendem Mittelwert benutzt werden, um die Schwankungen der Spannungsquelle auszugleichen. Die Ansteuerungen per USB- und LAN-Anschluss sind von diesem Problem nicht betroffen. Ein weiterer Vorteil dieser Ansteuertechniken gegenüber der Ansteuerung über Spannungswerte ist, dass die Befehle durch Worteingaben und nicht durch das Setzen einer Spannung aufgerufen werden. Der Befehlsaufruf über Wörter ist intuitiver als die Befehlseingabe über die Setzung von Spannungen. Die Eingabe von Befehlen über einen Webserver ermöglicht die Eingabe von verschiedenen Computern und von verschiedenen Standorten. Ein weiterer Vorteil der Steuerung über den Webserver ist, dass ein Befehl und bis zu zehn Variablen der Schrittmotorsteuerung gleichzeitig übergeben werden können. Somit kann man zum Beispiel mit dem Befehl die Fahrt einer linearen Rampe, mit der ersten Variable die Anzahl der Rampen und mit der zweiten Variablen die Rampenzeit übergeben. Da die Schrittmotorsteuerung vier BNC-Anschlüsse besitzt können der Schrittmotorsteuerung in der Ansteuerung über Spannungswerte nur drei Variablen gleichzeitig übergeben werden, da ein BNC-Anschluss für das Photodiodensignal benötigt wird. Steuert man die Schrittmotorsteuerung also über einen Webserver oder über den seriellen Monitor sind die BNC-Anschlüsse unbelegt und die Schrittmotorsteuerung kann bis zu vier Spannungen gleichzeitig messen. Eine Kombination der Arten der Schrittmotoransteuerung ist möglich, jedoch nur teilweise erstrebenswert, da die Kombination zu einer Belegung der Analogeingänge und zu einem erhöhten Verkabelungsaufwand führt. Außerdem macht die Kombination verschiedener Arten der Schrittmotoransteuerung die Ansteuerung sehr unübersichtlich und kompliziert.

3.4. Theoretischer Vergleich der Schrittmotoren



(a) Schrittmotor mit Rotationstisch *M101A* LK- (b) Schrittmotor *S28* auf dem Rotationstisch Instruments [4] *8MRU* Standa [5]

Abbildung 3.3.: Abbildungen des Schrittmotors mit Rotationstisch *M101A* von LK-Instruments (a) und der Kombination aus Schrittmotor *S28* und Rotationstisch *8MRU* der Firma Standa (b).

In diesem Teil findet der theoretische Vergleich beider Motoren anhand ihrer Datenblätter statt. Verglichen werden die Schrittmotoren M101A [4] der Firma LK-Instruments und der Schrittmotor 28S [5] auf dem Rotationstisch 8MRU der Firma Standa. Der Vergleich umfasst die wichtigsten Eigenschaften eines Schrittmotors wie z. B. den Schrittwinkel Θ oder die maximale Motorgeschwindigkeit v_{max} . Ist von der Motorgeschwindigkeit die Rede, ist physikalisch korrekt die Winkelgeschwindigkeit des Rotors gemeint. In der Tabelle 3.3 sind diese Eigenschaften beider Schrittmotoren aufgezählt und verglichen.

Tabelle 3.3.: Theoretischer Vergleich der Schrittmotoren M101A und 28S auf dem Rotationstisch 8MRU

Kenngröße	M101A LK-Instruments	S28 + 8MRU Standa
Schrittwinkel Θ [°]	0,3	0,6
maximale Motorgeschwindigkeit v_{max} [°/s]	300	216
Stromstärke [A/Phase]	0,1-1,33 (typischerweise $1,3$)	0,67
Übersetzung Schrittmotor:Rotationstisch	3:1	3:1
${\bf Drehbereich} [^\circ]$	360	360
Belastbarkeit axial/radial [kg]	5/2,5	5/1,5
Haltemoment [N/m]	0,66	0,26
Phasenzahl	2	2
Schaltungsart	Bipolar	Bipolar

Beide Systeme sind zweiphasige bipolare Schrittmotoren mit einem Drehbereich von 360° . Außerdem ist die Zahnradübersetzung zwischen Schrittmotor und Rotationstisch beider Systeme gleich. Eine weitere Kenngröße bei der beide Schrittmotoren denselben Wert aufweisen, ist die axiale Belastbarkeit. Zusätzlich besitzen beide Schrittmotoren eine Möglichkeit zur internen Bestimmung einer Ausgangsposition. Diese Position wird als Nullposition bezeichnet. Die Ermittlung der Nullposition erfolgt durch die Kombination aus Hallsensoren und einem Permanentmagneten. Anhand der Daten aus der Tabelle 3.3 kann die Aussage getroffen werden, dass der Schrittmotor M101A in den Kategorien Schrittwinkel, maximale Motorgeschwindigkeit, Belastbarkeit radial und Haltemoment leicht bessere Werte, wie die Verbindung aus Schrittmotor S28 und Rotationstisch 8RMU, aufweist. Anzumerken ist, dass im Fall des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchens kaum ein Haltemoment für die Drehung benötigt wird. Einzig bei der Kenngröße Stromstärke, also der benötigten Motorstromstärke pro Phase, ist das System von Standa besser, da es weniger Stromstärke pro Phase benötigt. Das führt zu weniger Hitzeentwicklung in der Schrittmotorsteuerung. Dadurch muss weniger Wert auf die Kühlung gelegt werden. Außerdem gibt es eine geringere Gefahr der Uberhitzung der elektrischen Elemente wie zum Beispiel des Motortreibers oder des Spannungsreglers. Extreme Aufheizung dieser Bauteile können zu einer Funktionsunfähigkeit der gesamten Schrittmotorsteuerung führen. Jedoch ist durch die Kühlung der Schrittmotorsteuerung mit dem, im Deckel integrierten DC-Axiallüfter, eine Überhitzung weitgehend ausgeschlossen. Aus dem theoretischen Vergleich der Schrittmotoren kann als Fazit gezogen werden, dass der Schrittmotor M101A der Kombination aus Schrittmotor S28 und Rotationstisch 8MRU überlegen ist. Dieser theoretische Befund soll durch die experimentelle Charakterisierung der Schrittmotoren und ihrer Funktionen nachgeprüft werden.

4. Charakterisierung der Schrittmotoren und ihrer Funktionen

Im Folgenden erfolgt eine Beschreibung und Auswertung der Schrittmotorsteuerung einprogrammierten Funktionen. Diese Funktionen sind die Nullpositionsbestimmung, die Kalibrierung, die Erzeugung beliebiger Intensitätskurven und die Intensitätstabilisierung. Die implementierten Funktionen der Schrittmotorsteuerung wurden an einem Testaufbau getestet und weiterentwickelt. Der Testaufbau beeinhaltet eine Faser, da diese die Positionierung des Laserstrahls ermöglicht. Trotz polarisationserhaltender Fasereinkopplung driftet die Polarisation des Lichts, weshalb ein Polarisationsstrahlteiler benötigt wird, um eine definierte Ausgangssituation zu erhalten. Um jetzt noch Intensitätsdrifts zu verhindern wird eine Intensitätsstabilisierung nach Faser und Strahlteilerwürfel eingesetzt. Die Stabilisierung der Laserintensität ist das Ziel, da eine stabile Laserintensität für viele typische Anwendungen im Experiment entscheidend ist.

4.1. Testaufbau

Eine schematische Skizze des Testaufbaus ist in der Abbildung 4.1 dargestellt. Ein Laserstrahl der Wellenlänge $\lambda = 1064$ nm wird mit Hilfe von zwei Spiegeln in eine Faser eingekoppelt. Nach der Faser ist ein drehbares $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen eingebaut, dessen Ausrichtung das Intensitätsverhältnis der Pfade nach dem ersten Strahlteilerwürfel bestimmt. Das erste $\frac{\lambda}{2}$ -Pättchen bleibt während der Messungen in einer konstanten Ausrichtung. Nach dem ersten Strahlteilerwürfel befindet sich das zweite, durch den Schrittmotor rotationsfähige, $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen. Die Drehung des zweiten Verzögerungplättchen wird durch die Schrittmotorsteuerung kontrolliert und somit die Realisierung der implementierten Funktionen ermöglicht. Nach der rotierenden Verzögerungsplatte befindet sich ein zweiter Strahlteilerwürfel, der den Laserstrahl in zwei Teilstrahle aufteilt. Einer dieser zwei Teilstrahlen wird mit einer Photodioden detektiert. Das Signal der Photodioden wird als Eingangssignal (Ruckführung) für die Schrittmotorsteuerung verwendet Die Messungen der in der Schrittmotorsteuerung implementierten Funktionen werden komplett an dem in der Abbildung 4.1 aufgezeigtem Testaufbaus durchgeführt.



Abbildung 4.1.: Schematische Skizze des Testaufbaus.

4.2. Nullpositionsbestimmung

Beide Schrittmotoren besitzen eine Möglichkeit zur internen Bestimmung einer Ausgangsposition. Diese Positionen werden als Nullpositionen bezeichnet. Die Nullpositionen werden mit Hilfe der Verbindung aus den in den Schrittmotoren verbauten Hallsensoren und Permanentmagneten ermittelt. Beim Schrittmotor M101A von LK-Instruments liegt für beliebige Positionen des Schrittmotors eine konstante Spannung an Pin 7 von $U \approx 4,1$ V an. Nur für die Stellung des Rotors in Nullposition liegt an Pin 7 keine Spannung (0 V) an. Beim Schrittmotor S28 von Standa ist dies in umgekehrter Logik an Pin 9 realisiert. In der Abbildung 4.2 zeigt sich dieses Verhalten, wenn die Spannung U an dem jeweiligen Pin (7 oder 9) für verschiedene Winkelpositionen Φ aufgenommen und grafisch dargestellt wird. Die endliche Größe des Sensors limitiert die Genauigkeit der Nullpositionsbestimmung.



Abbildung 4.2.: Nullpositionsbestimmung: Spannung U am jeweiligen Pin gegen den Winkel Φ aufgetragen.

Anzumerken ist, dass die Nullpositionsbestimmung nicht genau für eine Motorschrittposition, sondern nur für einen Winkelbereich erfolgt. Je kleiner dieser Winkelbereich ist, desto genauer ist die Nullpositionsbestimmung. Für den Schrittmotor M101A beträgt der Winkelbereich der Nullposition $\Delta \Phi = 9^{\circ}$ und für den S28 $\Delta \Phi = 1.8^{\circ}$. Somit ist die Nullpositionsbestimmung des Schrittmotors *S28* auf dem Rotationstisch *8MRU* deutlich genauer. Um die Genauigkeit der Nullpositionsbestimmung zu erhöhen, wird die Positionsbestimmung immer in gleiche Rotationsdrehrichtung durchgeführt und die Position der Flanke als Nullreferenz definiert. Alle im Folgenden gezeigten Schrittpositionen und Winkel sind ausgehend von dieser Position gemessen und werden als Abweichung von der Nullposition angegeben. Die Laserintensität an der Photodiode ist jedoch abhängig von der Ausrichtung des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchens, welches unter beliebigen Winkel zur Nullposition eingebaut ist.

4.3. Kalibrierung

Eine weitere wichtige Funktion der Schrittmotorsteuerung ist die Kalibrierung. Bei der Kalibrierung fahren die Motoren einen gewünschten Winkelbereich ab, messen nach jedem Schritt die Spannung an der Photodiode und speichern diese in einer Liste ab. Auf die aufgenommenen Werte kann programmintern zugegriffen werden, um zum Beispiel auf eine gewünschte Intensität zu fahren oder die minimale und maximale Spannung zu ermitteln. Die Kalibrierung ist somit die Grundlage vieler implementierter Funktionen. Bei der Kalibrierung rotiert das $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit. Misst man die Spannung an der Photodiode für jede Winkelposition des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen und trägt die normierte Intensität $\mathcal{I} = \frac{I}{I_{\text{max}}}$ gegen den Winkel Φ im Vergleich zur Nullposition auf, ergibt sich eine $\cos^2(\Phi)$ -Abhängigkeit. Im Falle konstanter Winkelgeschwindigkeit des Motors ergibt sich die gleiche Kurvenform auch für $\mathcal{I}(t)$, da in diesem speziellen Fall $\Phi(t)$ eine Gerade ist.



tragen.

Abbildung 4.3.: Normierte Intensität $\mathcal{I} = \frac{I}{I_{\text{max}}}$ an der Photodiode gegen den Winkel Φ und gegen die Zeit t bei konstanter Winkelgeschwindigkeit des Motors v aufgetragen.

Der dargestellte Bereich entspricht einer Drehung um 360°. Somit entspricht der Unterschied zwischen einem Maximum und einem Minimum einer Drehung des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen um 45°. Dieses Ergebnis stimmt mit der Theorie überein, dass bei einer Drehung des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen um 45° sich die Polarisationsebene des linear polarisiertem Lichtes um 90° dreht. An die Messwerte in der Abbildung 4.3 b) wurde eine Funktion der Form

$$a(t) = b \cdot \cos^2\left(2 \cdot \left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + c\right)\right) \tag{4.1}$$

angepasst. Matlab liefert für die Anpassungsvariable T = 3,973(1) s. Die Variable entspricht der vierfachen Periodendauer und somit der Umlaufzeit. Die Umlaufzeit ist die Zeit, die der Schrittmotor benötigt um eine Drehung um 360° auszuführen. Diese hängt einzig von der Winkelgeschwinigkeit des Motors ab. Die Winkelgeschwindigkeit in diesem Beispiel ist $v = 90,61(3)\frac{\circ}{s}$.

4.4. Ermittlung der Schrittposition mit maximaler Laserintensität

Häufig sollen aus den in der Kalibrierung aufgenommen Werten die Schrittposition mit maximaler und mit minimaler Laserintensität bestimmt werden. Die Ermittlung dieser Schrittpositionen kann durch unterschiedliche Methoden erfolgen. Als Messschrittposition dient die Schrittposition mit der maximalen Laserintensität an der Photodiode und somit mit maximaler Photodiodenspannung. Für zwei verschiedene Verfahren wurde die Genauigkeit dieser untersucht. Für die Messungen wurde für beide Schrittmotoren die gleichen Einstellungen für den Schrittwinkel und für die Winkelgeschwindigkeit des Motors gewählt. Der gewählte Schrittwinkel beträgt $\Theta = 0,3^{\circ}$. Bei beiden Verfahren fährt man zuerst auf die Nullposition. Danach findet die Kalibrierung statt. Die Methoden unterscheiden sich in der Auswertung der gespeicherten Daten.

Beim ersten Verfahren wird der maximale Spannungswert der Daten ermittelt und die zugehörige Schrittposition ausgegeben. Das zweite Verfahren ermittelt die Schrittpositionen der Spannungen mit 60% der maximalen Photodiodenspannung und berechnet die Hälfte der Summe beider

Schrittpostionen. Die so erhaltene Schrittposition liegt genau in der Mitte und sollte zu maximaler Laserintensität gehören. Anzumerken ist, dass sicher gegangen werden muss, dass es sich um ein Maximum und nicht um ein Minimum handelt. Die zweite Methode sollte genauer sein, da die Steigung an der Stelle mit 60 % der Maximalintensität fast maximal ist. Um beide Verfahren zu vergleichen, wiederholt man die Messung hundertmal und analysiert die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Schrittpositionen. Betrachtet man die in der Abbildung 4.4 dargestellten Histogramme, zeigt sich, dass die zweite Methode zur Bestimmung der Schrittposition des Maximums deutlich genauer ist als die erste Methode. Die Anzahl der gemessenen Schrittpositionen des Maximums für die zweite Methode beträgt 6 Schritte, was einem Winkel von 1,8° entspricht. Für die erste Methode ist die Streuung 18 Schritte und somit 5,4° groß. Dasselbe Ergebnis zeigt sich, wenn die berechneten Standardabweichungen verglichen werden. Die Standardabweichung für die erste Methode beträgt $\sigma = 3.81$ und für die zweite Methode $\sigma = 1.16$ Schritte. Das erste Verfahren ist ungenauer, da die Intensität des Laserstrahls aufgrund äußerer Störquellen variiert. Außere Störquellen sind z.B. andere Lichtquellen, die zu einem Rauschen auf dem Signal führen. Außerdem können mehrere Schrittpositionen mit maximaler Intensität vorkommen und es kann nur eine als Maximum ausgegeben werden. Zusätzlich weist die Spannungsmessung über die Analogpins des Teensy 3.2 eine begrenzte Auflösung auf. Ein weiterer Grund der Streuung kann der Verlust oder der Zugewinn von Schritten sein. Die Schrittmotoren führen zu wenig Schritte aus oder überspringen Schritte, dadurch kommt es zu einer veränderten Schrittposition des Maximums. Dieser Effekt wird im Folgenden durch Langzeitmessungen genauer untersucht. Die Messungen mit den unterschiedlichen Schrittmotoren zeigen für gleiche Einstellungen dasselbe Verhalten. Die Kombination aus Schrittmotor S28 und Rotationstisch 8MRUverliert minimal mehr Schritte als der Schrittmotor M101A, was sich in einer minimal größeren Streuung der Schrittpositionen mit maximaler Intensität und einer daraus resultierten größeren Standardabweichung zeigt.



Abbildung 4.4.: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Schrittposition mit maximaler Intensität (maximaler Spannung an der Photodioden) mit Nullpositionsverfahren über Hallsensoren nach Methode 1 und Methode 2.

Die Messungen inAbbildung 4.4 c) und d) dienen als Referenzmessung, da vor jeder Kalibrierung zuerst durch den Hallsensor auf die Nullposition gefahren wurde. Lässt man die Fahrt auf die Nullposition weg und lässt den Motor zwischen den Messungen der Schrittposition des Maximums einige Programme ausführen, kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie viele Schritte der Motor auslässt bzw. überspringt. Im folgenden Kapitel 4.5 wird dieser Schrittverlust beider Schrittmotoren untersucht.

4.5. Untersuchung der Schrittmotoren auf Schrittverluste

Natürlich besitzen Schrittmotoren endliche Massen und können daher nicht bei beliebigen Winkelgeschwindigkeiten v betrieben werden. Bei Winkelgeschwindigkeiten über der maximalen Motorgeschwindigkeit treten Schrittverluste auf und die Reproduzierbarkeit geht verloren. Jedoch treten auch beim Langzeitbetrieb mit Winkelgeschwindigkeiten unter der maximalen Motorgeschwindigkeit Schrittverluste auf. Es soll untersucht werden, wie stark die Schrittverluste beider Schrittmotoren sind, um eine Aussage darüber zu treffen, wie oft eine Kalibrierung durchgeführt werden muss.

In der Abbildung 4.5 sind für beide Schrittmotoren die Ergebnisse der Langzeitmessung jeweils nach der zweiten Methode mit Nullpositionskalibrierung über Hallsensoren und mit dem Ausführen von Programmen ohne Nullpositionskalibrierung zwischen den Ermittlungen der Schrittposition des Maximums dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Schrittmotoren auch während langer Betriebszeiten (ca. 15 h was $N_{\text{Total}} \approx 1000$ entspricht) nur minimal Schritte zu viel oder wenig machen. Die Standardabweichung der Langzeitmessung ist nur minimal größer als die Standardabweichung der Langzeitmessung mit Nullpositionsverfahren. Die Annahme, dass der Schrittmotor S28 auf dem Rotationstisch 8MRU minimal mehr Schritte verliert, bestätigt sich durch die Langzeitmessungen. Alle Messungen wurden mit einer Auflösung von 1200 Schritten pro 360 ° durchgeführt, was einem Schrittwinkel von $\Theta = 0.3$ ° entspricht. Wiederholt man die Messungen im Mikroschrittmodus z.B. für den Schrittmotor M101A mit einer Auflösung von 19200 Schritten pro 360°, bleibt der Winkelbereich der Streuung gleich. Die Streuung ist also vermutlich durch die Referenzmessung begrenzt. Die Tests zeigten jedoch, dass die korrekte Einstellung der Motorstromstärke pro Phase entscheidend ist. Bei falscher Einstellung der Stromstärke pro Phase kam es nach einiger Betriebszeit (ca. 10 min) zu einem erheblichen Verlust von Schritten kommen, welche von den Motoren nicht ausgeführt wurden. Besonders anfällig hierfür zeigte sich der Schrittmotor M101A. Als Fazit kann gesagt werden, dass die Schrittmotoren bei korrekter Einstellung der Motorstromstärke pro Phase nach einmaliger Fahrt auf die Nullposition mit Hilfe der in den Schrittmotoren verbauten Hallsensoren, lange Betriebszeiten und verschiedene Programme ohne einen entscheidenden Verlust von Schritten durchführen können. Die korrekten Werte für die Stromstärke pro Phase stehen in der Tabelle 3.3.



(a) LK-Instruments Langzeitmessung Methode 2 (b) Standa Langzeitmessung Methode 2 mit Nullmit Nullpositionsbestimmung positionsbestimmung



(c) LK-Instruments Langzeitmessung ohne Null- (d) Standa Langzeitmessung ohne Nullpositionspositionsbestimmung bestimmung

Abbildung 4.5.: Langzeitmessungen: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Schrittposition mit maximaler Intensität (maximaler Spannung an der Photodioden) nach Methode 2 mit und ohne Nullpositionsverfahren über Hallsensoren über 15 h aufgenommen. Die Anzahl, der insgesamt aufgenommen Messwerte ist $N_{\text{Total}} \approx 1000$.

4.6. Verfahren zur Erzeugung beliebiger Intensitätsverläufe

Die Motivation für die Erzeugung beliebiger Intensitätsverlaufe ist, dass für einige Anwendungen wie z.B. evaporatives Kühlen bestimmte Intensitätskurven benötigt werden. Im Falle des evaporativen Kühlen ist dies in erster Näherung ein exponentiell abfallender Intensitätsverlauf [22]. Zuerst muss sich klargemacht werden, dass bei gleichbleibender Laserintensität und ohne äußere Störquellen, die Intensität I an der Photodiode für die jeweiligen Positionen des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen einen festen Wert besitzt, wie in der Abbildung 4.3 dargestellt. Jede Winkelausrichtung des Rotors bzw. des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen führt zu einem festen Aufteilungsverhältnis am Strahlteilerwürfel und somit zu einer festen Intensität I an der Photodiode. Die Transferfunktion zwischen eingestelltem Winkel des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen und dem Aufteilungsverhältnis am Strahlteilerwürfel entspricht, wie zuvor bereits erwähnt, einer \cos^2 -Abhängigkeit. Um andere zeitabhängige Funktionen als $\cos^2(\Phi(t))$, wie zum Beispiel lineare oder exponentielle Rampen, zu fahren, muss sich das $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen und somit der Rotor des Schrittmotors mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten v drehen. Mathematisch ergibt sich der zeitabhängige Winkel $\Phi(t)$ aus der Invertierung der $\cos^2(\Phi(t))$ -Abhängigkeit.

$$\frac{I(t)}{I_0} = \cos^2(\Phi(t)) \quad \to \quad \Phi(t) = \arccos\left(\sqrt{\frac{I(t)}{I_0}}\right) \tag{4.2}$$

Die Geschwindigkeit, mit der sich der Rotor dreht, wird über den Zeitabstand zwischen den Motorschritten festgelegt und kann in der Programmierung verändert werden. Der zeitliche Abstand zwischen den Schritten muss entsprechend gewählt werden, um die gewünschte Rampenform zu erhalten. Eine exakte Invertierung wie in Gleichung (4.2) ist somit nicht erforderlich.

4.6.1. Linearer Intensitätsverlauf

Theoretisch ist eine Vielzahl von Intensitätskurven möglich. Beliebige Intensitätsverläufe können durch lineare Stücke angenährt werden. Eine naheliegende Möglichkeit ist die Realisierung von linearen Intensitätsverläufen. Um eine lineare Intensitätskurve zu erhalten, müssen die Zeitintervalle zwischen den Schritten des Motors entsprechend gewählt werden. Die Berechnung dieser Zeitintervalle erfolgt durch ein Iterationsverfahren, das im Folgenden allgemein kurz erklärt wird. Das Iterationsverfahren beruht auf der von der Schrittposition s_i abhängigen Intensitätsfunktion des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen

$$\eta(s(t)) = \cos^2\left(\pi \cdot \frac{s(t)}{s_0}\right) = f(t).$$
(4.3)

Hierbei ist s_0 die Schrittanzahl für eine Drehung um 45° und f(t) der gewünschte zeitabhängige Intensitätsverlauf. Bildet man von Gleichung (4.3) den Differenzenquotienten, ergibt sich

$$\frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}\Big|_{t=t_{\mathrm{i}}} \approx \frac{\Delta f(t_{\mathrm{i}})}{\Delta t_{\mathrm{i}}} = \frac{\eta(s_{\mathrm{i}+1}) - \eta(s_{\mathrm{i}})}{t_{\mathrm{i}+1} - t_{\mathrm{i}}} = \frac{\cos^2\left(\pi \cdot \frac{s_{\mathrm{i}+1}}{s_0}\right) - \cos^2\left(\pi \cdot \frac{s_{\mathrm{i}}}{s_0}\right)}{t_{\mathrm{i}+1} - t_{\mathrm{i}}}.$$
(4.4)

Formt man die Gleichung (4.4) nach t_{i+1} um, ergibt sich eine iterative Gleichung, mit der aus einem gegebenen Zeitpunkt t_i eines Schrittes s_i der Zeitpunkt t_{i+1} des nächsten Schrittes s_{i+1} berechnet werden kann, um die gewünschte Funktion f(t) zu erhalten.

$$t_{i+1} = \frac{\cos^2\left(\pi \cdot \frac{s_{i+1}}{s_0}\right) - \cos^2\left(\pi \cdot \frac{s_i}{s_0}\right)}{\left.\frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}\right|_{t=t_i}} + t_i$$
(4.5)

Im Fall der linearen Rampen wird als Funktion $f_{\text{linear}}(t) = \frac{t}{\Delta t}$ angenommen. Die Ableitung dieser Funktion lautet $\frac{\mathrm{d}f_{\text{linear}}(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\Delta t}$. Setzt man die Ableitung nun in die Gleichung (4.5) ein, kann der Zeitpunkt jedes Schrittes des Schrittmotors iterativ berechnet werden. Dies ermöglicht die Kenntnis der Zeitabstände zwischen den Schritten und somit das Fahren von linearen Rampen.

$$t_{i+1} = \Delta t \cdot \left(\cos^2 \left(\pi \cdot \frac{s_{i+1}}{s_0} \right) - \cos^2 \left(\pi \cdot \frac{s_i}{s_0} \right) \right) + t_i$$
(4.6)

Anzumerken ist, dass die Zeitkonstante Δt die Rampenzeit t_{Rampe} festlegt. Die Rampenzeit ist die Zeit, die der Motor für das Ausführen der Intensitätskurve (\triangleq Rampe) benötigt. Wichtig für die Funktionsweise dieser Methode ist, dass lineare Rampen immer an derselben Schrittposition z.B. in der Schrittposition mit minimaler Intensität, gestartet werden, damit die Zeitabstände zwischen den Schritten mit der Position des Motors übereinstimmen. In der Abbildung 4.6 ist die Fahrt des Schrittmotors von der minimalen zur maximalen Intensität und zurück dargestellt. Als Zeitkonstante und somit als Rampenzeit wurden $t_{\text{Rampe}} = 12 \text{ s eingestellt}$. Dies entspricht der kleinstmöglichen Rampenzeit, die bei einer Fahrt von $\mathcal{I} = 0$ zu $\mathcal{I} = 1$ mit dem Schrittmotor M101A möglich ist. Zusätzlich ist die, durch die vorgegebene Zeitkonstante, zu erwartende theoretische Kurve dargestellt. Außerdem wurden die Messwerte mit einem gleitenden Durchschnitt gefiltert um das Rauschen, ausgelöst durch äußere Störquellen, herauszufiltern. Auffällig ist, dass es um die Extremstellen mehr Messwerte als bei einer Intensität $\mathcal{I} = 0.5$ gibt. Die Erklärung hierfür ist, dass nach Gleichung (4.6) die Zeitabstände zischen den Schritten an den Extremstellen deutlich geringer sind als die Zeitabstände um eine Intensität $\mathcal{I} = 0.5$. Die minimale mögliche Zeitdauer zwischen zwei Motorschritten des Schrittmotors M101A beträgt 1 ms. Das bedeutet, dass mit dem Schrittmotor M101A jegliche Rampenzeiten größer als 12s möglich sind. Die minimale Rampenzeit des Schrittmotors S28 auf dem Rotationstisch 8MRUist etwas größer als die des Schrittmotors M101A, da der minimale Zeitabstand zwischen zwei Schritten ca. 2,78 ms beträgt. Außerdem muss beim Fahren von Rampen beachtet werden, dass in der Vollschritteinstellung die Schrittanzahl für eine Drehung um 45° für den Schrittmotor $M101A s_0 = 300$ ist und für den Schrittmotor S28 auf dem Rotationstisch $8MRU s_0 = 150$ beträgt. Dies liegt daran, dass der Schrittmotor S28 auf dem Rotationstisch 8MRU einen doppelt so großen Schrittwinkel wie der Schrittmotor M101A besitzt. Für Rampenzeiten über den minimalen Rampenzeiten funktioniert das Fahren linearer Rampen mit beiden Schrittmotoren gleich gut. Will man die Rampenzeit deutlich verringern, muss man entweder einen schnelleren Schrittmotor verwenden oder die verwendeten Schrittmotoren lineare Rampen in einem Bereich zwischen minimaler und maximaler Intensität fahren lassen. Je nach der Größe des gewählten Bereichs sind deutlich kürzere Rampenzeiten möglich.



Abbildung 4.6.: Lineare Rampe mit $\Delta t = 12$ s: Normierte Intensität $\mathcal{I} = \frac{I}{I_{\text{max}}}$ gegen die Zeit t aufgetragen.

In der Abbildung 4.7 werden nun lineare Rampen mit verschiedener Rampenzeit dargestellt. Es wurden lineare Rampen zwischen der minimalen zur maximalen Intensität gefahren. Auffällig ist, dass je höher die Rampenzeit gewählt wurde, desto stärker verrauscht ist die Kurve. Dieser Effekt kann damit erklärt werden, dass mit steigender Zeit sich die Polarisationsebene des Laserstrahls und damit die Intensität nach dem Strahlteiler während der Rampenfahrt stärker fluktuiert. Bei großen Rampenzeiten kommt es zu größerem Rauschen, da die Zeitskala der Polarisationsdrehung in der Faser konstant ist. Bei Rampenzeiten kleiner als 100s spielt dieser Effekt kaum eine Rolle. Eine Möglichkeit zur Unterdrückung des Rauschens ist eine zum Rampenverfahren gleichzeitig ablaufende Stabilisierung der Laserintensität. Die Wahl der Zeitkonstanten Δt bestimmt die Rampenzeit t_{Rampe} , jedoch sind nicht beliebig kleine Rampenzeiten möglich. Bei Rampenzeiten kleiner als 12s ist der kürzeste Zeitabstand zwischen zwei Motorschritten so gering, dass der Motor diesen Schritt nicht ausführen kann. Durch das Auslassen von Schritten stimmen die Zeitabstände zwischen den Schritten nicht mehr mit der Schrittposition des Motors überein, was zu signifikanten Abweichungen vom theoretischen Verlauf führt. Die theoretischen zu erwartenden Kurven sind ebenfalls in der Abbildung 4.7 dargestellt. Die typische Evaporationszeit im Experiment beträgt 8s, während die Lebensdauer des im Experiment erzeugten Bose-Einstein-Kondensats bei ca. 10s liegt. Daher ist die Streuung der Werte für lange Rampenzeiten für unser Experiment nicht von Belang.



Abbildung 4.7.: Lineare Rampe mit verschiedenen Zeitkonstanten bzw. Rampenzeiten t_{Rampe} .

Um die Qualität der erzeugten Rampen beurteilen zu können, wurden die Abweichungen der realen Rampenzeiten Δt_{Rampe} , der in der Abbildung 4.7 dargestellten linearen Rampen, von der vorgegebenen Rampenzeit t_{Rampe} ermittelt. Trägt man die Abweichung Δt_{Rampe} gegen die vorgegebene Rampenzeit t_{Rampe} auf, zeigt sich ein linearer Zusammenhang. Die realen Rampenzeiten sind immer größer als die vorgegebenen Rampenzeiten, da der *Teensy 3.2* Zeit für das Ausführen der einzelnen Befehle während der Fahrt der Rampe benötigt. Außerdem ist von Rundungsfehlern bei der Berechnung der Zeitdifferenzen zwischen den Schritten auszugehen. An die Messwerte in Abbildung 4.8 wurde eine lineare Funktion der Form $b(t_{\text{Rampe}}) = a \cdot t_{\text{Rampe}} + c$ angepasst. *Matlab* liefert folgenden Zusammenhang:

$$b(t_{\text{Rampe}}) = 0.00223 \cdot t_{\text{Rampe}} + 24.3 \text{ ms.}$$
 (4.7)

Die lineare Zunahme der Abweichung der realen Rampenzeit von der eingestellten Rampenzeit mit steigender Rampenzeit kann dadurch erklärt werden, dass die Rundungsfehler, bei der Berechnung der Zeitabständen zwischen den Motorschritten, mit der Zeitkonstanten multipliziert werden. Somit ergeben sich für größere übergebene Zeitkonstanten bzw. Rampenzeiten auch größere Abweichungen Δt_{Rampe} .



Abbildung 4.8.: Lineare Rampen: Abweichung der realen Rampenzeit von der eingestellten Rampenzeit Δt_{Rampe} in Abhängigkeit der eingestellten Rampenzeit t_{Rampe}

Anzumerken ist, dass für die Messungen der Schrittmotor *M101A* verwendet wurde. Da die Ursachen der Abweichung Δt_{Rampe} an der Programmierung des *Teensy 3.2* liegen, sind die Ergebnisse mit dem Schrittmotor *S28* auf dem Rotationstisch *8MRU* vergleichbar. Die Abweichung Δt_{Rampe} kann durch die Verwendung von Zeitvariablen in der Programmierung kompensiert werden. Dazu müsste die vom *Teensy 3.2* benötigte Rechenzeit bestimmt und diese von der eingestellten Rampenzeit abgezogen werden. Die Rundungsfehler bei der Berechnung der Zeitabständen zwischen den Motorschritten könnten durch die Verwendung genauerer Datentypen verringert werden. Durch diese Maßnahmen sollte eine Verringerung der Abweichung der realen Rampenzeit von der eingestellten Rampenzeit erreicht werden können. Im allgemeinen ist die relative Abweichung $\frac{\Delta t_{\text{Rampe}}}{t_{\text{Rampe}}} \approx 0,22\%$ und daher vernachlässigbar.

4.6.2. Exponentieller Intensitätsverlauf

Eine weitere mögliche Intensitätskurvenform sind exponentielle Rampen, die vor allem beim evaporativen Kühlen zum Einsatz kommen. Die Berechnung der Zeitabstände zwischen den Schritten der Schrittmotoren erfolgt über die Gleichung 4.5. Im Falle exponentieller Intensitätsverläufe wird für die Funktion $f_{\text{exponentiell}}(t) = A \cdot \exp\left(\frac{-t}{\Delta t}\right) + B$ angenommen. Als Ableitung ergibt sich somit

$$\frac{\mathrm{d}f_{\mathrm{exponentiell}}(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{-A}{\Delta t} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\Delta t}\right). \tag{4.8}$$

A bestimmt den Wert der Intensität für t = 0 und B den Grenzwert der Intensität für $t \to \infty$. Setzt man die Ableitung in die Gleichung (4.5) ein ergibt sich eine iterative Funktion mit der die Zeitabstände zwischen den Schritten bestimmt werden können. Für exponentielle Rampen ist die iterative Funktion etwas komplexer als für lineare Rampen, da die Ableitung im Gegensatz zum linearen Fall auch von t abhängt. Als Iterationsvorschrift erhält man

$$t_{i+1} = -\frac{\Delta t}{A} \cdot \exp\left(\frac{t_i}{\Delta t}\right) \cdot \left(\cos^2\left(\pi \cdot \frac{s_{i+1}}{s_0}\right) - \cos^2\left(\pi \cdot \frac{s_i}{s_0}\right)\right) + t_i.$$
(4.9)

Durch die Zeitkonstante Δt kann, analog zu den linearen Rampen, die Rampenzeit t_{Rampe} vorgegeben werden. Es gilt jedoch nicht $\Delta t = t_{\text{Rampe}}$, da Δt in diesem Fall die Zeitkonstante des exponentiellen Abfalls und nicht die Gesamtzeit der Rampe ist. Anzumerken ist, da die Unterschiede in den Zeitabständen bei den exponentiellen Rampen kleiner sind als bei den linearen Rampen, können kürzere Rampenzeiten vorgegeben werden. Lässt man die exponentiellen Rampen zusätzlich nicht bei maximaler normierter Intensität (A = 1), sondern bei z.B. halber Intensität starten ist eine deutliche Verkürzung der Rampenzeit möglich. In der Abbildung 4.9 wird die normierte Intensität \mathcal{I} gegen die Zeit t aufgetragen. Der exponentielle Abfall der normierten Intensität \mathcal{I} mit der Zeit t zeigt sich deutlich, wenn man die der Schrittmotorsteuerung vorgegebenen theoretischen Kurve zusätzlich zu den Messwerten in der Abbildung 4.9 darstellt. Die vorgegebene exponentielle Kurve lautet

$$\mathcal{I}(t) = \exp\left(\frac{-t}{4\,\mathrm{s}}\right).\tag{4.10}$$



Abbildung 4.9.: Exponentielle Rampe mit $\Delta t = 4$ s: Normierte Intensität $\mathcal{I} = \frac{I}{I_{\text{max}}}$ gegen die Zeit t aufgetragen.

Analog zur Fahrt linearer Rampen wurden exponentielle Rampen für verschiedene vorgegebenen Rampenzeiten aufgenommen. Die Messwerte werden in der Abbildung 4.10 dargestellt. Es wurden exponentielle Rampen von der halben Maximalintensität $\mathcal{I} = 0.5$ bis zur minimalen Intensität $\mathcal{I} = 0$ gefahren. Dadurch werden besonders kurze Rampenzeiten ermöglicht. Wie bei den linearen Rampen kommt es während der Rampenfahrt zu einem Rauschen auf den Messwerten. Dieser Effekt fällt jedoch aufgrund der niedrigeren Rampenzeiten für exponentielle Rampen geringer aus. Aufgrund der limitierten Motorgeschwindigkeit gibt es ebenfalls eine minimale Rampenzeit. Diese minimale Rampenzeit für die Fahrt einer exponentiellen Rampe von $\mathcal{I} = 0.5$ auf $\mathcal{I} = 0$ beträgt 0,4 s.



Abbildung 4.10.: Exponentielle Rampen mit verschiedenen Rampenzeiten t_{Rampe} .

Eine Untersuchung der Abweichung der realen Rampenzeit Δt_{Rampe} von der eingestellten Rampenzeit t_{Rampe} zeigt analog zum Fahren linearer Rampen eine lineare Zunahme der Abweichung Δt_{Rampe} mit steigender Rampenzeit t_{Rampe} . Die Ursachen für dieses Verhalten liegen wie bereits erwähnt in der Befehlsausführungsdauer des *Teensy 3.2* und in Rundungsfehlern bei der Berechnung der Zeitabstände zwischen den Schritten des Motors. Erneut wurde an die Messdaten eine lineare Funktion angepasst. *Matlab* liefert als Funktion

$$d(t_{\text{Rampe}}) = 0.04141 \cdot t_{\text{Rampe}} + 15.1 \,\text{ms.}$$
 (4.11)

Die Steigung ist deutlich größer als in Gleichung (4.7). Dies verdeutlicht, dass die Abweichung der realen Rampenzeit von der eingestellten Rampenzeit Δt_{Rampe} für exponentielle Rampen größer als für lineare Rampen ist. Aufgrund des iterativen Verfahrens, das verwendet wird, um die Zeitabstände zwischen den Motorschritten zu berechnen, tritt für exponentielle Rampen eine Abweichung von der vorgegebenen exponentiellen Kurve auf. Die Ursache hierfür ist, dass für $t \to \infty$ gilt

$$A \cdot \exp\left(-\frac{t}{\Delta t}\right) + B \xrightarrow{t \to \infty} B.$$
 (4.12)

In Realität wird B in endlicher Zeit erreicht. Dieser Effekt ist auch deutlich in der Abbildung

4.10 zu sehen. Die Messwerte weichen am Ende stärker von den theoretischen Kurven ab als zu Beginn. Außerdem summieren sich die Fehler des Iterationsverfahren, die bei den geringen Steigungen am Ende der exponentiellen Rampen auftreten auf. Das iterative Verfahren bestimmt den Zeitpunkt t_{i+1} des nächsten Motorschritts s_{i+1} mit Hilfe der Ableitung der Funktion f(t)an der Schrittposition s_i . Jedoch ändert sich für exponentielle Intensitätskurven die Steigung der Funktion zwischen s_i und s_{i+1} , was durch das iterative Verfahren nicht berücksichtigt wird. Dies führt vor allem bei großen Zeitabständen zwischen Motorschritten zu Fehlern und somit insgesamt zu einer Abweichung von der eingestellten Rampenzeit.



Abbildung 4.11.: Exponentielle Rampen: Abweichung der realen Rampenzeit von der eingestellten Rampenzeit Δt_{Rampe} in Abhängigkeit der eingestellten Rampenzeit t_{Rampe} .

Die dargestellten Messdaten wurden erneut mit dem Schrittmotor *M101A* aufgenommen. Wie im vorherigen Abschnitt diskutiert, liegen die Ursachen der Abweichung von der eingestellten Rampenzeit Δt an der Programmierung des *Teensy 3.2*, weshalb beim Fahren exponentieller Rampen mit dem Schrittmotor *S28* auf dem Rotationstisch *8MRU* von keinem unterschiedlichen Verhalten auszugehen ist. Die Abweichung von der eingestellten Rampenzeit Δt_{Rampe} kann durch die Verwendung von Zeitvariablen und genaueren Datentypen verringert werden. Für exponentielle Rampen ist die relative Abweichung $\frac{\Delta t_{\text{Rampe}}}{t_{\text{Rampe}}} \approx 4,3\%$ und somit nicht vernachlässigbar.

4.7. Intensitätsstabilisierung

Die Hauptfunktion der Kombination aus Strahlteilerwürfel und mit Hilfe eines Schrittmotors rotierendem $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen ist die Stabilisierung der Intensität eines Lasers. Durch die Drehung des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen soll die Drehung der Polarisationsebene des Laserstrahls ausgeglichen und Störsignale kompensiert werden. Bei der Intensitätsstabilisierung erzeugt eine Photodiode das Eingangssignal (Referenzsignal bzw. Regelgröße) für die Schrittmotorsteuerung und die Regelungsprogramme. Die Realisierung der Intensitätsstabilisierung efolgt durch unterschiedliche Programme, die im folgenden Kapitel 4.7.1 erläutert und verglichen werden. Die Stabilisierungsprogramme basieren teilweise auf den in den theoretischen Grundlagen erklärten Regelungstechniken. Zunächst wurde mit Hilfe einer globalen Variablen ein Winkelbereich von 45° definiert, den der Schrittmotor bei der Intensitätsstabilisierung nicht verlassen kann. Der Winkelbereich ist so gewählt, dass der Schrittmotor zwischen der minimalen $\mathcal{I} = 0$ und der maximalen Intensität $\mathcal{I} = 1$ fahren kann. Dadurch wird verhindert, dass der Schrittmotor sich fortlaufend in eine Richtung dreht, wenn der Laserstrahl während der Stabilisierung ausgeschaltet wird. Der Schrittmotor stoppt in diesem Fall bei einer Winkelposition von 45° und somit bei einer normierten Intensität von $\mathcal{I} = 1$. Die Begrenzung des Fahrtbereichs des Schrittmotors gewährleistet die Reproduzierbarkeit der Intensitätsstabilisierung. Außerdem ermöglicht die Begrenzung des Winkelbereichs, in dem sich der Schrittmotor bewegen kann, dass der Schrittmotor schneller nach erneutem Einschalten des Laserstrahls auf den gewünschten Intensitätswert stabilisieren kann. Die Messungen zur Intensitätsstabilisierung wurden an dem in Abbildung 4.1 dargestellten Testaufbau durchgeführt.

4.7.1. Erläuterung der verschiedenen Intensitätsstabilisierungsprogramme

Zwei-Punkt Regelung:

Die einfachste Möglichkeit der Intensitätsstabilisierung ist der Schrittmotorsteuerung einen Sollwert vorzugeben und der Schrittmotorsteuerung das Ausgangssignal der Photodioden als Eingangssignal (Regelgröße) zu übergeben. Die Schrittmotorsteuerung vergleicht nun das Eingangssignal mit dem Sollwert. Ist das Signal der Photodioden kleiner als der Sollwert soll der Schrittmotor das $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen um einen konstanten Winkel drehen, sodass mehr Licht in den Pfad der Photodiode gelangt. Ist das Eingangssignal größer als der Sollwert dreht die Schrittmotorsteuerung das $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen in die entgegengesetzte Richtung. Durch permanenten Vergleich des Referenzsignals mit dem eingestellten Sollwert tritt eine Stabilisierung der Laserintensität auf. Diese Art der Laserstabilisierung ist recht einfach zu programmieren, hat jedoch den Nachteil, dass je nach Wahl der Winkeldrehung dieses Stabilisierungsverfahren entweder sehr langsam ist oder ein starkes Übersteuern aufweist.

P-Regler:

Die Weiterentwicklung der Zwei-Punkt-Stabilisierung ist der P-Regler. Beim P-Regler wird analog zur einfachen Stabilisierung das Signal der Photodiode mit einem Sollwert verglichen. Je nachdem ob das Signal größer bzw, kleiner als der Sollwert ist wird eine Drehung des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen in die entsprechende Richtung (um weniger bzw. mehr Intensität an der Photodioden zu erhalten) vorgenommen. Der Drehwinkel ist beim P-Regler im Gegensatz zur einfachen Stabilisierung nicht konstant, sondern hängt von der Differenz zwischen Sollwert und Signal der Photodiode ab. Die Differenz zischen Sollwert und Signal der Photodioden wird als Fehlersignal definiert (siehe theoretische Grundlagen: Regelungstechniken). Um den Drehwinkel zu erhalten wird das Fehlersignal mit einem Proportionalitätsfaktor multipliziert. Im Vergleich zur einfachen Stabilisierung kann der P-Regler schneller auf Störungen reagieren und somit Störsignale besser herausfiltern. Beim P-Regler kommt es jedoch auch noch zu einem leichten Übersteuern, da sein Antwortsignal proportional zum Fehlersignal ist. In der Theorie besitzen P-Regler nach dem Einschwingen eine bleibende Regelabweichung [12]. Diese ist in den Messungen nicht sichtbar.

PI-Regler:

Ergänzt man den P-Regler noch um einen integrierenden Teil erhält man einen PI-Regler. Der integrierende Teil wirkt durch zeitliche Integration der Abweichungen des Eingangsignals vom Sollwert (Fehlersignals) auf die Drehwinkelberechnung ein. Die Gewichtung des I-Anteils erfolgt analog zum P-Anteil durch die Multiplikation mit einer Konstanten. Der PI-Regler ist im Vergleich zum P-Regler etwas langsamer, jedoch weist er in der Theorie kein Übersteuern auf und ist somit auch um einiges genauer. Der integrierende Teil gleicht vor allem langsame Drifts der Intensität aus und kann die genannte bleibende Abweichung des P-Reglers kompensieren.

PID-Regler:

Der PI-Regler kann noch um einen differenzierenden Teil erweitert werden. Der D-Anteil reagiert auf die Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße (in unserem Fall das Photodiodensignal). Die Ergänzung eines D-Teils führt im Fall der schrittmotorgesteuerten Stabilisierung zu einem Aufschwingen und somit zu keiner Laserintensitätsstabilisierung. Die Antwort des Differentialteiles ist proportional zur Frequenz und dadurch schnell gegenüber dem Schrittmotor. Dieses Verhalten macht einen Differentialteil auf den experimentellen Zeitskalen unwirksam. Deshalb ist in dem Programm der Schrittmotorsteuerung kein D-Anteil eingebaut.

P-Regler mit gleitendem Mittelwert:

Der P-Regler kann zusätzlich noch um einen gleitenden Mittelwert ergänzt werden. Bei diesem Verfahren wird der Mittelwert von den letzten hundert Eingangssignalen ($\stackrel{\circ}{=} 200 \text{ ms}$) einer Spannungsquelle gebildet und der so berechnete Mittelwert als Sollwert verwendet. Jedes neue Signal am Eingang überschreibt den ältesten der hundert Eingangssignale, aus denen der Mittelwert gebildet wird. Dieses Verfahren wird eingesetzt, wenn der Sollwert der Schrittmotorsteuerung mit einer Spannung von außen vorgegeben werden soll. Durch den gleitenden Mittelwert sollen Schwankungen der Spannungsquelle, die den Sollwert vorgibt, sowie Rauschen ausgeglichen werden. Der gleitende Mittelwert kann nur beim P-Regler ergänzt werden, da wenn der PI-Regler um einen gleitenden Durchschnitt ergänzt wird, der Regler zu langsam ist, um eine effektive Itensitätsstabilisierung zu schaffen.

4.7.2. Test verschiedener Intensitätsstabilisierungsprogramme

Um die Qualität der einzelnen Intensitätsstabilisierungsprogramme zu testen, werden sinusförmige Störsignale mit unterschiedlicher Frequenz auf den Laser gegeben. Die Amplitude der Störsignale wurde konstant gewählt. Zuerst wurde untersucht, bis zu welcher Frequenz des Störsignals die Schrittmotorsteuerung das Störsignal hinreichend gut herausfiltert. Der Frequenzbereich, in dem eine zuvor definierte Abschwächung gewährleistet ist, wird als Bandbreite bezeichnet. Die Bandbreite wird durch die Grenzfrequenz festgelegt. Als Grenzfrequenz wird, beispielsweise für den klassischen Tiefpass, die Frequenz definiert, bei der eine Abschwächung bzw. Verstärkung der Leistungdichte um 3 dB auftritt. Im Folgenden wird jedoch die Frequenz als Grenzfrequenz definiert, bei der eine Abschwächung der Störamplitude von 10 dB auftritt. Als Intensitätsstabilisierungsprogramm wurde der P-Regler eingesetzt. Die dazu aufgenommen Messwerte sind in der Abbildung 4.12 gezeigt. Die gemachten Beobachtungen beziehen sich auf diese Abbildung. Bei einem Störsignal (blau) mit einer Frequenz von f = 0.5 Hz kann der Schrittmotor das Störsignal durch entsprechendes Drehen des $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen vollständig herausfiltern. Die Spannung der Photodiode (proportional zur Laserintensität) kann auf einen gewünschten Wert stabilisiert werden. Besitzt das Störsignal eine Frequenz von $f = 2 \,\mathrm{Hz}$, kann die Schrittmotorsteuerung das Störsignal schon nicht mehr vollständig herausfiltern. Die Abschwächung des Störsignals ist jedoch so groß, dass von einer fast perfekten Stabilisierung zu sprechen ist. Anders ist das bei einer Störfrequenz von f = 5 Hz. Bei einem solchen Störsignal ist auch im stabilisierten Signal eine schwache Schwingung mit der Störfrequenz sichtbar. Der Schrittmotor ist zu langsam, um das Störsignal vollständig ausgleichen zu können. Jedoch ist die Abschwächung noch so stark, dass die Intensitätsstabilisierung zufriedenstellend ist. Bei höheren Störsignalenfrequenzen wird die Intensitätsstabilisierung immer schlechter. Bei einer Störsignalfrequenz von 10 Hz kann das rotierende $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen das Störsignal nicht mehr herausgefiltern, da der Schrittmotor zu langsam ist um solch hohe Frequenzen auszugleichen. Die aufgenommen Daten für hohe Störfrequenzen weisen einen kantigen Verlauf auf. Dies liegt an der begrenzten zeitlichen Auflösung des Teensy 3.2, mit dem die Daten aufgenommen wurden. Als Grenzwert nach obiger Definition bis zu welcher Störfrequenz, die Schrittmotorsteuerung eine qualitativ gute Intensitätsstabilisierung erreicht, kann ein Wert zwischen 5 und 10 Hz angenommen werden. Störsignale mit einer Frequenz kleiner als der Grenzwert können effektiv unterdrückt werden. Die Bandbreite der Stabilisierung wird also durch diesen Grenzwert bestimmt. Der Grenzwert wird aus den später aufgezeigte Messungen (Abbildung 4.14) ermittelt. Der gleitende Mittelwert der Messwerte wird gebildet, um das Rauschen äußerer Einflüsse mit Störfrequenzen im Kilohertzbereich durch andere Lichtquellen nicht zu berücksichtigen. Für den gleitenden Mittelwert wurde ein Wertebereich von 150 gewählt, was einer Zeitdauer von ungefähr 0,06 s entspricht.



Abbildung 4.12.: Spannung U gegen die Zeit t aufgetragen für sinusförmige Störsignale (blaue Kurven) mit unterschiedlichen Frequenzen f und das jeweilige stabilisierte Photodiodensignal (rote Kurven).

Um die verschiedenen Stabilisierungsprogramme zu vergleichen, wird die Fouriertransformation für Störsignale mit Frequenzen f zwischen 1 Hz und 10 Hz in 1 Hz Schritten bestimmt. Dasselbe wird für die stabilisierten Signale durchgeführt. Die Differenz der Amplituden bei der Störfrequenz im Fourierraum wird als Maß für die Abschwächung angenommen. Die Abschwächungen werden für die Intensitätsstabilisierungsprogramme P-Regler, PI-Regler und P-Regler mit gleitendem Mittelwert bestimmt. Die Fouriertransformationen des Störsignals und der durch die verschiedenen Programme stabilisierten Laserintensitäten bei einer Störfrequenz von f = 3 Hz sind in der Abbildung 4.13 dargestellt. Die Amplituden U sind in dB umgerechnet und relativ zur Amplitude U_0 des Störsignals angegeben. Die aufgenommen Amplituden können wie folgt in dB umgerechnet werden.

$$A = 10 \cdot \log\left(\frac{U^2}{U_0^2}\right) \, \mathrm{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{U}{U_0}\right) \, \mathrm{dB} \tag{4.13}$$

Es ist zu erkennen, dass die Amplitude bei einer Frequenz f = 3 Hz um circa 15 dB abgeschwächt wird. In der Abbildung 4.13 ist kaum ein Unterschied in der Stärke der Abschwächung zwischen

den verschiedenen Intensitätsstabilisierungsprogrammen erkennbar. Die genauen Abschwächungen der verschiedenen Intensitätsstabilisierungsprogramme für die unterschiedlichen Störsignalfrequenzen wurden bestimmt und sind in Abbildung 4.14 anschaulich gemacht. Anzumerken ist, dass die Messungen mit beiden Schrittmotoren durchgeführt wurden.



Abbildung 4.13.: Fouriertransformation des Störsignals mit einer Frequenz f = 3 Hz und die durch den P-, den PI- und den P-Regler mit gleitenden Mittelwert stabilisierten Photodiodensignale.

Anhand der Messwerte ist zu sehen, dass die Abschwächung B mit steigender Frequenz fdes sinusförmigen Störssignals abnimmt. Der Zusammenhang zwischen Abschwächung B = $A_{\text{Stör}} - A_{\text{Regler}}$ und Frequenz f scheint linear zu sein. Für Störsignale mit einer Frequenz in der Nähe von 10 Hz tritt fast keine Abschwächung mehr auf. Der Motor ist zu langsam, um die Störsignale mit solchen Frequenzen herauszufiltern. Als Grenzfrequenz f_{Grenz} , bei der die Abschwächung noch 10 dB beträgt, kann 7 Hz ermittelt werden. Alle Stabilisierungsprogramme zeigen dieses Verhalten. Es ist jedoch auffällig, dass der P-Regler die stärkste Abschwächung B insbesondere für hohe Frequenzen aufweist. Als Erklärung hierfür gilt, dass der P-Regler am schnellsten auf Veränderungen reagieren kann. Die niedrigste Abschwächung B weist der P-Regler mit gleitendem Mittelwert auf. Dieses Ergebnis war auch zu erwarten, da er am langsamsten reagieren kann. Der PI-Regler liegt zwischen dem P-Regler und dem P-Regler mit gleitendem Mittelwert. Nur für sehr geringe Störsignalfrequenzen f kleiner als 2 Hz ist der PI-Regler am schlechtesten. Aus den Messwerten zeigt sich also, dass die Erweiterung des P-Reglers um einen integrierenden Teil zu einer Verringerung der Abschwächung und somit zu einer Verschlechterung der Stabilisierung führt. Für die Stabilisierung im Experiment sollte also der P-Regler als Intensitätsstabilisierungsprogramm verwendet werden, da er die größte Abschwächung erreicht. Als Besonderheit ist anzumerken, dass für Störfrequenzen von 9 und 10 Hz negative Abschwächungen auftreten. Die Ursache hierfür ist, dass der Schrittmotor so langsam ist, dass

es zu einer Verstärkung des Störsignals kommt. Die Messwerte, die mit dem Schrittmotor *S28* auf dem Rotationstisch *8MRU* aufgenommen wurden, zeigen denselben Verlauf wie die Messdaten des Schrittmotors *M101A*. Für beide Motoren wurden die Einstellungen so gewählt, dass der Schrittwinkel Θ und die Motorgeschwindigkeit v gleich sind. Trotzdem scheint es so, als ob die Abschwächungen *B* beim Schrittmotor *M101A* minimaler größer als bei der Kombination aus Schrittmotor *S28* und Rotationstisch *8MRU* sind. Es ist davon auszugehen, dass obwohl die Motorgeschwindigkeiten v der Schrittmotoren gleichgesetzt wurden, andere Einflüsse wie bewegte Masse oder Reibung dazu führen, dass der Schrittmotor *M101A* sich schneller drehen kann und somit die Störsignale besser herausfiltert. Die bei den Stabilisierungen eingestellte Winkelgeschwindigkeit des Motors beträgt $v = 93.75 \frac{\circ}{s}$.



Abbildung 4.14.: Abschwächungen B von sinusförmigen Störsignale mit unterschiedlichen Frequenzen f durch die verschiedenen Intensitätsstabilisierungsprogramme.

Deshalb wird im Folgenden noch die Abhängigkeit der Abschwächung B unterschiedlicher Störsignalfrequenzen f von der vorgegebenen Motorgeschwindigkeit v untersucht. Es zeigt sich, dass es für jede Störsignalfrequenz f eine optimale Motorgeschwindigkeit v gibt, bei der eine maximale Abschwächung B_{max} auftritt. Ist die Motorgeschwindigkeit zu niedrig kann der Schrittmotor nicht schnell genug reagieren, um das Störsignal auszugleichen. Ist die Motorgeschwindigkeit v zu hoch gewählt, kommt es zum Übersteuern und somit zu einer Verschlechterung der Abschwächung. Entnimmt man der Abbildung 4.14 a) die maximalen Abschwächungen B_{max} und die zugehörigen Störfrequenzen zeigt sich, dass die Abschwächung durch Anpassen der Motorgeschwindigkeit maximiert werden kann. Dies kann eine Verbesserung der Abschwächung um bis 20 dB zur Folge haben. Diese Möglichkeit besteht bei beiden Schrittmotoren, da hierfür nur Einstellungen in der Programmierung verändert werden müssen. Die im Experiment auftretenden Störsignale besitzen jedoch meist ein breites Spektrum an Frequenzen. Im Experiment wird deshalb eine Motorgeschwindigkeit v gewählt, die eine hohe Abschwächung für einen möglichst breiten Frequenzbereich aufweist.



(a) Abschwächung *B* für verschiedene Störfre- (b) Maximale Abschwächung B_{\max} durch Anpasquenzen *f* in Abhängigkeit der Winkelgeschwin- sung der Motorgeschwindigkeit *v* in Abhängigkeit digkeit des Motors *v*. der Frequenz *f*.

Abbildung 4.15.: Abschwächung B von Störsignale mit unterschiedlichen Frequenzen f durch den P-Regler in Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit des Motors v und die maximale Abschwächung B_{\max} in Abhängigkeit der Frequenz f.

5. Test der Schrittmotorsteuerung unter experimentellen Bedingungen

Die Schrittmotorsteuerung soll unter Laborbedingungen getestet werden. Hierzu wird die implementierte Funktion Intensitätsstabilisierung verwendet, um die Intensität verschiedener Laser zu stabilisieren. Für die Messungen unter experimentellen Bedingungen wurde der Schrittmotor M101A verwendet, da er einige Vorzüge gegenüber der Kombination aus Schrittmotor S28 und Rotationstisch 8MRU besitzt. Die relevanten Eigenschaften sind die maximale Winkelgeschwindigkeit des Motors v, der Schrittwinkel Θ und die Anzahl der Schrittverluste während des Betriebs. In diesen Kategorien ist der Schrittmotor M101A der Kombination aus Schrittmotor S28 und Rotationstisch 8MRU überlegen. Diese Überlegenheit wurde in den Kapiteln 3.4 und 4.5 gezeigt. Die verwendeten Laser sind ein blauer ($\lambda = 421 \text{ nm}$) und ein grüner ($\lambda = 532 \text{ nm}$) Laser, die im Experiment zur Laserkühlung bzw. als optische Dipolfalle verwendet werden. Um eine Aussage über die Funktionsfähigkeit und Einsetzbarkeit der Schrittmotorsteuerung treffen zu können, wird zum Vergleich die Stabilisierung mit einem akustooptischen Modulator untersucht. Die AOM-Technik wird aktuell zur Stabilisierung der Laser im Experiment eingesetzt. Zusätzlich wurde die Laserintensität ohne Stabilisierung aufgenommen. Die Messung der Laserintensität erfolgt mit Hilfe einer Photodiode. Die Spannung der Photodiode wurden für eine Zeit von $t = 400 \,\mathrm{s}$ gemessen.

5.1. Grüner Laser: Dipolfalle

Der grüner Laser fungiert im Experiment als Dipolfalle. Die Laserintensität wurde mit dem durch die Schrittmotorsteuerung rotierenden $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen oder mit dem AOM stabilisiert. Als Intensitätsstabilisierungsprogramm wurde der P-Regler verwendet. Zum Vergleich wurde zusätzlich die nicht stabilisierte Laserintensität aufgenommen. In der Abbildung 5.1 b) sieht man, dass das nicht stabilisierte Signal (blau) mit der Zeit t driftet und die Laserintensität abnimmt. Die stabilisierten Laserintensitäten zeigen dieses Verhalten nicht. Die Laserintensität wird durch die Stabilisierungsmethoden auf einem vorgegebenen konstanten Wert gehalten. Als Wertebereich für den gleitenden Mittelwert wurden 100 Messpunkte gewählt. Dies entspricht einer Zeitdauer von 1 s. Störsignale mit hohen Frequenzen werden dadurch weniger stark berücksichtigt. Diese Frequenzen kann nur der AOM herausfiltern, da er im Gegensatz zur Schrittmotorsteuerung die hierfür benötigte Bandbreite besitzt. Werden jedoch, wie durch den gleitenden Mittelwert, nur geringe Störfrequenzen betrachtet, weist die durch die Schrittmotorsteuerung stabilisierte Intensität (rot) dieselbe Stabilität wie die durch den AOM stabilisierte Intensität (grün) auf. Desshalb kann im Prinzip gesagt werden, dass der AOM zwar eine hundertfach höhere Bandbreite als die Schrittmotorsteuerung besitzt, dennoch ist die Breite der stabilisierten Intensität für beide Stabilisierungsmethoden in diesem Fall ähnlich. Stellt man die Messwerte als Histogramm dar, ist die Breite der Intensität erkennbar. Als Maß für die Breite der Intensität definieren wir

eine modifizierte Standardabweichung $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=0}^{n} (\mathcal{I}_i - 1)^2}$ vom Sollwert $\mathcal{I} = 1$:.

- Ohne Stabilisierung: Standardabweichung $\sigma_{\text{Ohne}} = 0,0681$
- Schrittmotorsteuerung: Standardabweichung $\sigma_{\text{Schritt}} = 0.0262$
- **AOM:** Standardabweichung $\sigma_{AOM} = 0.0173$

Betrachtet man alle Störsignale weist die durch den AOM stabilisierte Laserintensität die kleinste Standardabweichung σ und somit die geringste Streuung von Intensitätswerten auf. Jedoch kann die Breite auch durch die Schrittmotorsteuerung erheblich gesenkt werden. Für Störsignale mit Frequenzen f kleiner als 7 Hz weist die Schrittmotorsteuerung fast dieselbe Stabilität wie die AOM-Stabilisierungstechnik auf. Außerdem hat die Intensitätsstabilisierung mit dem $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen den Vorteil, dass deutlich weniger Intensität als beim AOM durch die Stabilisierung verloren geht. Dadurch kann bei gleichbleibender Laserintensität mit dem schrittmotorgesteuerten $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen auf höhere Intensitäten stabilisiert werden und somit mehr Atome in der Dipolfalle gefangen werden. Als Nachteil der schrittmotorgesteuerten Intensität genannt werden. Durch die Schwankungen der Laserintensität kann es zum Verlust von Atomen aus der Dipolfalle kommen. Höhere Frequenzen können zu einem Aufheizen der Atome in der Dipolfalle führen. Im Experiment werden allerdings sehr rauscharme Laser¹ verwendet, sodass nur langsame mechanische oder thermische Drifts kompensiert werden müssen. Dementsprechend besitzt der Schrittmotor kaum Nachteile, kann aber im Vergleich zum AOM auf höhere Intensitätswerte stabilisieren.

 $^{^{1}}$ Coherent Verdi V10



tragen.

(a) Skalierte Intensität \mathcal{I} gegen die Zeit t aufge- (b) Skalierte Intensität \mathcal{I} gegen die Zeit t aufgetragen mit einem gleitenden Durchschnitt von 100 Werten (=1s).



(c) Histogramm: Messanzahl skalierte Intensität gegen skalierte Itensität \mathcal{I} aufgetragen.

Abbildung 5.1.: Grüner Laser: Skalierte Intensität $\mathcal{I} = \frac{I}{I_0}$ gegen die Zeit t aufgetragen für ein durch die Schrittmotorsteuerung, ein durch einen AOM stabilisiertes Signal und für ein nicht stabilisiertes Signal.

5.2. Blauer Laser: Laserkühlung

Dieselben Messungen, die mit dem grünen Laser durchgeführt worden sind, werden an einem blauen Laser, der zur Laserkühlung im Zeeman-Abbremser verwendet wird, durchgeführt [23]. Die Messwerte für den blauen Laser sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Betrachtet man alle Messwerte zeigt sich, dass das durch den AOM stabilisierte Signal eine geringere Streuung, als das durch das rotierende $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen stabilisierte Signal aufweist. Die Ursache hierfür ist, dass auf dem blauem Laser Störsignale mit Frequenzen im Kilohertzbereich liegen. Diese Störsignale kann der AOM im Gegensatz zur Schrittmotorsteuerung herausfiltern. Die Störsignale kommen durch das Aufschwingen eines geregelten Piezo-Spiegels in den selbstgebauten Frequenzverdopplungskavitäten zustande. Die Frequenzverdopplungskavitäten sind extrem anfällig für Vibrationen des Experimentiertisches, weshalb die Verwendung sich mechanisch bewegender Objekte zu

Problemen führt. Leider ist das rotierende Verzögerungsplättchen ein solches Objekt und führt zu zusätzlichen Vibrationen während der Laserstabilisierung. Es muss darauf geachtet werden, dass die Stabilisierung nicht in der Nähe der Frequenzverdopplungskavitäten stattfindet. Im Vergleich schwankt das nicht stabilisierte Signal stärker als die stabilisierten Signale und driftet mit der Zeit zu einer geringeren Intensität. Besonders deutlich wird dies, wenn man den gleitenden Mittelwert der Messwerte bildet, siehe Abbildung 5.2 b). Für den gleitenden Mittelwert wurde, analog zu den Messungen mit dem grünen Laser, ein Bereich von 100 Messpunkten verwendet, dadurch werden Störsignale mit hohen Frequenz herausgefiltert. Für langsame Störsignale stabilisiert das $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen die Laserintensität gleich gut wie der AOM und verhindert einen Drift der Laserintensität. Wie schon in der Untersuchung der Abschwächung gezeigt, ist die Schrittmotorsteuerung nicht in der Lage Störsignalfrequenzen über f = 7 Hz herauszufiltern. Analog zum grünen Laser kann die Standardabweichung als Maß für die Breite der Intensität und somit als Maß für die Stabilisierung angenommen werden. Erneut wurde die Standardabweichung vom Wert $\mathcal{I} = 1$ berechnet.

- Ohne Stabilisierung: Standardabweichung $\sigma_{\text{Ohne}} = 0,0327$
- Schrittmotorsteuerung: Standardabweichung $\sigma_{\text{Schritt}} = 0,0251$
- **AOM:** Standardabweichung $\sigma_{AOM} = 0,0059$

Wie zu erwartet besitzt der AOM mit Abstand die geringste Streuung. Außerdem ist für den blauen Laser der Unterschied zwischen AOM und Schrittmotorsteuerung größer als für den grünen Laser. Der Grund hierfür sind erneut die Störsignale mit Frequenzen im Kilohertzbereich, die auf dem blauen Laser liegen. Die Intensitätsstabiliserung verringert zwar die Streuung der Messwerte, jedoch ist die Verringerung der Standardabweichung nur gering im Vergleich zum grünen Laser.



tragen.

(a) Skalierte Intensität \mathcal{I} gegen die Zeit t aufge- (b) Skalierte Intensität \mathcal{I} gegen die Zeit t aufgetragen mit einem gleitenden Durchschnitt von 100 Werten (=1 s).



(c) Histogramm: Messanzahl skalierte Intensität gegen skalierte Itensität \mathcal{I} aufgetragen.

Abbildung 5.2.: Blauer Laser: Skalierte Intensität $\mathcal{I} = \frac{I}{I_0}$ gegen die Zeit t aufgetragen für ein durch die Schrittmotorsteuerung, ein durch einen AOM stabilisiertes Signal und für ein nicht stabilisiertes Signal.

Die Aufgabe des blauen Lasers im Experiment ist die Laserkühlung. Die Zahl der in der MOT gefangenen Atome hängt von der Laserintensität ab. Um den Zusammenhang zwischen Laserintensität und Atomzahl zu untersuchen, wurde mit Hilfe des rotierenden $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen die Laserintensität auf verschiedene Werte stabilisiert und die Atomzahl in der MOT bestimmt. Für jede Laserintensität wurden vier Messungen aufgenommen. Aus den vier Messwerten der Atomzahlen für jede Laserintensität wurde der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt. Die Mittelwerte mit zugehöriger Standardabweichung sind in der Abbildung 5.3 gezeigt. Die Atomzahl nimmt monoton mit steigender Laserintensität zu. Es gibt jedoch eine untere Grenze. Erst ab einer bestimmten Laserintensität werden die Atome im Zeeman-Abbremser durch den blauen Laser stark genug abgebremst, damit sie durch die MOT gefangen werden können. Im Experiment ist die Atomanzahl nach oben durch die maximale Laserintensität begrenzt. Daher ist es wichtig keinen Intensitätsverlust durch die Intensitätstabilisierung zu haben, wie sie bei der Stabilisierung mit dem AOM auftritt. Um vergleichbare Resultate zu erzielen wurden die Werte (Abbildung 5.4) bei gleicher Intensität aufgenommen.



Abbildung 5.3.: Atomzahlen N in der MOT gegen die normierte Laserintensität \mathcal{I} aufgetragen.

Im Experiment soll nicht nur eine hohe Zahl an Atomen in der magnetooptischen Falle gefangen werden, sondern die Zahl der Atome soll auch konstant bleiben um eine hohe Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Die Laserintensität wurde nun einmal mit dem rotierenden $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen, einmal durch den AOM stabilisiert und einmal nicht stabilisiert und die Atomzahl über einen längeren Zeitraum (150 experimentelle Zyklen) gemessen. Die Messwerte sind in der Abbildung 5.4 veranschaulicht. Aus der Auftragung der Atomzahlen gegen die Zeit sind nur schwer Aussagen abzuleiten. Deshalb wurde für alle drei Messungen der Mittelwert \overline{N} , die Standardabweichung σ und die relative Abweichung $\frac{\sigma}{\overline{N}}$ berechnet. Die berechneten Werte sind in der Tabelle 5.1 aufgelistet.

Tabelle 5.1.: Mittelwert \overline{N} , Standardabweichung σ und relative Abweichung $\frac{\sigma}{N}$ der aufgenommen Atomzahlen in der MOT für unterschiedliche Laserintensitätsstabilisierungen.

Stabilisierungstechnik	Mittelwert \overline{N} [10 ⁷]	Standardabweichung σ [10 ⁶]	relative Abweichung $\frac{\sigma}{N}$ [%]
Ohne Stabilisierung	7,03	4,20	5,97
Schrittmotorsteuerung	6,72	4,10	6,10
AOM	6,75	3,30	4,89

Ohne Stabilisierung tritt die größte Standardabweichung und somit die größte Streuung auf. Außerdem driftete die Laserintensität mit der Zeit zu höheren Laserintensitäten, was zu einer höheren Atomzahl in der MOT führte. Dadurch ist der Mittelwert der Atomzahl ohne Stabilisierung deutlich größer als bei den stabilisierten Signalen. Die stabilisierten Messungen besitzen zwei sehr nahe beieinander liegende Mittelwerte. Jedoch ist es auffällig, dass die Standardabweichung bei der Messung mit dem AOM deutlich kleiner ist als die Standardabweichung bei der Messung mit der Schrittmotorsteuerung. Die Standardabweichung kann in diesem Fall als ein Maß für die Streuung bzw. die Breite der Intensität und somit für die Qualität der Laserintensitätstabilisierung verstanden werden. Wie schon erwähnt können die Störsignale mit Frequenzen im Kilohertzbereich nur durch den AOM herausgefiltert werden. Dadurch weist für den blauen Laser der AOM die beste Stabilisierung der Laserintensität auf. Für den Einfang von Atomen spielt nicht die Stabilität der Laserintensität, sondern der Betrag der Laserintensität die entscheidende Rolle. Da mit dem schrittmotorgesteuerten $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen auf höhere Laserintensitäten stabilisierten werden kann, können somit mehr Atome gefangen werden als bei einer Stabilisierung mit dem AOM. Jedoch muss man dann eine geringfügig größere Streuung als bei der Stabilisierung mit dem AOM in Kauf nehmen.



Abbildung 5.4.: Atomzahl N in der magnetooptischen Falle gegen den experimentellen Zyklus aufgetragen für die durch die Schrittmotorsteuerung, durch den AOM stabilisierte und die nicht stabilisierte Laserintensität.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde untersucht, inwiefern sich die Kombination aus schrittmotorgesteuertem $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen und Strahlteiler zur Intensitätsstabilisierung eines Lasers eignet. Dies ist nötig, da in Quantengasexperimenten optische Glasfasern zur präzisen Positionierung von Lichtstrahlen eingesetzt werden. In diesen Fasern kommt es zu Polaristationsschwankungen, die durch zusätzliche Polarisationsoptik verhindert werden. Diese wiederum führen zu einer Intensitätsänderung, die kompensiert werden soll. Hierzu wurde eine Schrittmotorsteuerung konzipiert, aufgebaut und programmiert. Die wichtigste mit der Schrittmotorsteuerung realisierte Funktion ist die Laserintensitätsstabilisierung. Es konnte gezeigt werden, dass die vorgestellte Technik eine Laserintensitätsstabilisierung ohne einen großen Intensitätsverlust erreicht. Zusätzlich konnte die Programmierbarkeit des in der Schrittmotorsteuerung verbauten Mikrocontrollers genutzt werden, um verschiedene Funktionen wie z.B. die Erzeugung verschiedener Intensitätskurven zu realisieren. Der Vergleich der Schrittmotoren erlaubt den optimalen Schrittmotor für die jeweilige Anwendung im Labor auszuwählen.

Aus dem experimentellen Vergleich der beiden Schrittmotoren bestätigten sich die im theoretischen Vergleich vorhergesagten Eigenschaften. Der Schrittmotor M101A der Firma LK-Instruments besitzt einen geringeren Schrittwinkel Θ , eine höhere maximale Winkelgeschwindigkeit des Motors v_{\max} und einen minimal geringeren Schrittverlust bei langen Betriebszeiten gegenüber der Kombination aus Schrittmotor S28 und Rotationstisch 8MRU der Firma Standa. Der Schrittverlust beider Systeme wurde experimentell untersucht und beträgt im Dauerbetrieb über ca. 15 h weniger als 10 Schritte ($\hat{=} 3^{\circ}$). Der Schrittwinkel Θ und die maximale Winkelgeschwindigkeit $v_{\rm max}$ sind theoretisch bekannt und wurden experimentell erreicht. Allein in der Nullpositionsbestimmung besitzt der Schrittmotor M101A eine geringere Genauigkeit von 9° im Vergleich zur Kombination aus Schrittmotor S28 und Rotationstisch 8MRU, deren Genauigkeit 1,8° ist. Wird die Nullpositionsbestimmung immer in die gleiche Drehrichtung durchgeführt erhöht sich die Genauigkeit der Nullpositionsbestimmung für beide Schrittmotoren erheblich und beträgt für beide Schrittmotoren weniger als 0,5°. Als Fazit kann gesagt werden, dass der Schrittmotor M101A dem Schrittmotor S28 auf dem Rotationstisch 8MRU vorzuziehen ist. Als zweiter Punkt wurde geklärt, welche Aussage sich durch die durchgeführten Messungen und Tests über die Schrittmotorsteuerung und deren Einsatzmöglichkeiten ergeben. Die aufgenommenen Daten zeigen die Qualität der implementierten Funktionen aber auch deren Grenzen auf. Die Programmierbarkeit des Mikrocontrollers erlaubt die Anderung der Laserintensität in einem beliebigen Verlauf. Die Funktionsfähigkeit dieses Verfahrens wurde für lineare und exponentielle Rampen gezeigt. Die kleinstmögliche Rampenzeit für eine lineare Rampe zwischen maximaler und minimaler Intensität beträgt $t_{\text{Rampe}} \approx 12 \text{ s.}$ Exponentielle Rampen können deutlich schneller gefahren werden. Außerdem ermöglicht das schrittmotorgesteuerte $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen das Ein- und Ausschalten von Lichtstrahlen. Der Schrittmotor M101A ermöglicht den Wechsel von minimaler zu maximaler Intensität und umgekehrt in 150 ms und ist deshalb vorzugsweise mit einem schnellerem mechanischen Verschluss zu kombinieren.

Der Test der Schrittmotorsteuerung unter experimentellen Bedingungen hat gezeigt, dass die Schrittmotorsteuerung zur Intensitätsstabilisierung von Laserstrahlen eingesetzt werden kann. Für Störsignale mit einer Frequenz kleiner als der Grenzfrequenz $f_{\text{Grenz}} = 7 \text{ Hz}$ weist das schrittmotorgesteuerte $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen eine Abschwächung von mehr als 10 dB auf. Im Vergleich zur bisher im Experiment realisierten Intensitätsstabilisierung mit Hilfe eines akustooptischen Modulators (AOM typischerweise $f_{\text{Grenz}} \approx 10 \text{ kHz}$) ist die präsentierte Methode mit dem Schrittmotor deutlich langsamer. Durch die Stabiliserung mit einem AOM kann zwar eine bessere Stabilität der Laserintensität erreicht werden, jedoch sind die im Experiment eingesetzten Laser besonders rauscharm, weshalb nur langsame Temperatur- und Polarisationsdrifts bei wenigen Hz ausgeglichen werden müssen. Des Weiteren hat die Methode mit dem AOM einen entscheidenden Nachteil. Da der AOM typischerweise eine Beugungseffizenz von etwa 70 % in die erste Ordnung aufweist, geht bei der Intensitätsstabilisierung mit dem AOM 30 % der Laserleistung verloren. Im Gegensatz dazu tritt bei der Stabilisierung mit der Kombination aus schrittmotorgesteuertem $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen und Strahlteilerwürfel kein Intensitätsverlust auf.

Somit eignet sich diese Methode als Stabilisierungstechnik, die einen geringen Intensitätsverlust als der AOM aufweist. Die gleiche Stabilität der Laserintensität, die der AOM bereitstellt, konnte allerdings durch die Schrittmotorsteuerung, auch wenn nur Störsignalfrequenzen in der Bandbreite der Schrittmotorsteuerung berücksichtigt werden, nicht erreicht werden. Trotzdem ist die Schrittmotorsteuerung für leistungskritische Anwendungen zu bevorzugen. Die vorangegangen Aussagen können durch die Messwerte, die an einem grünen Dipolfallenlaser und einem blauen Laserkühlungslaser aufgenommen wurden, begründet werden. Die Messungen zeigen außerdem ganz allgemein, dass eine Intensitätsstabilisierung für die Reproduzierbarkeit des Experiments notwendig ist. Abschließend kann gesagt werden, dass das Ziel, eine alternative Intensitätsstabilisierungstechnik zu realisieren, die in kleinen Frequenzbereichen funktioniert und einen geringeren Intensitätsverlust als die AOM-Technik aufweist, mit der Kombination aus Strahlteilerwürfel und schrittmotorgesteuertem $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen erreicht wurde. Außerdem konnte die Funktionsfähigkeit dieser Laserstabilisierungsmethode für Quantengasexperimente gezeigt werden.

A. Anhang

A.1. Liste der Bestandteile der Schrittmotorsteuerung

In der folgenden Liste werden alle in der Schrittmotorsteuerung verwendeten Bauteile aufgezählt.

- 1×Mikrocontroller: PJRC Teensy USB Development Board 3.2 [20]
- 1×Motortreiber: Sparkfun Big Easy Driver [3]
- 1×Potentiometer 2,2 k Ω
- 1×Netzwerkmodul: WIZnet WIZ850io [21]
- Widerstände: $6\times 4,7\,\mathrm{k}\Omega$ und $5\times 2,2\,\,\mathrm{k}\Omega$
- $6 \times \text{Zenerdioden } 3,6 \text{ V}$
- $1 \times \text{Kondensator } 0,1 \ \mu\text{F}$
- $1 \times \text{Kondensator } 0,33 \ \mu\text{F}$
- 1×Spannungsregler: Texas-Instruments TL780-05 [24]
- $2 \times K$ ühlkörper
- $4 \times BNC$ -Anschlüsse
- 1×Spannungsanschluss
- $1 \times female$ D-sub Anschluss für den Schrittmotor M101A
- $1 \times female$ D-sub Anschluss für den Schrittmotor S28
- 1×DC-Axiallüfter 8412 NGLE PAPST [25]

A.2. Befehlsaufrufe der in der Programmierung implementierten Funktionen

Die Ausführung der in der endgültigen Programmierung implementierten Funktionen und derer Befehlsaufrufe erfolgt im Folgenden. Die Befehlseingaben beziehen sich auf die Ansteuerung über einen Webserver und somit mit Hilfe des LAN-Anschlussen des Netzwerkmoduls.

zero: Mit dem Befehl *zero* wird das Nullpositionsverfahren ausgeführt. In diesem Verfahren fährt der Schrittmotor auf die Ausgangsposition, die mit Hilfe eines integrierten Permanentmagneten und eines Hallsensors ermittelt wird. Da, wie im Kapitel 4.2 beschrieben, sich die Nullpositionsverfahren für die beiden Schrittmotoren unterscheiden, sind für diese Funktion zwei Programme erstellt worden. Je nachdem welcher Schrittmotor verwendet wird, muss das richtige Programm ausgewählt werden.

calibrate: Der Befehl calibrate startet die Kalibrierung. Bei der Kalibrierung dreht sich der Rotor um 180°. Außerdem misst der Mikrocontroller nach jedem die Schritt die Spannung an der Photodiode und speichert die Schrittposition und die Spannungswerte in zwei Arrays. Danach fährt der Motor 180° in die entgegengesetzte Drehrichtung und begibt sich somit zur Ausgangsposition der Kalibrierung.

calibration2: Die Befehlseingabe *calibration2* führt ebenfalls eine Kalibrierung aus, jedoch beträgt der Winkelbereich dieser Kalibrierung nur 45°. Zusätzlich wird der maximale Spannungswert aus den aufgenommen Daten ermittelt. Diese Kalibrierung wird für den Befehl linearRamp2 benötigt.

extrem Values: Der Befehl *extrem Values* ermittelt den minimalen und den maximalen Spannungswert aus den in der Kalibrierung aufgenommen Daten.

positionMaximum: Mit der Befehlseingabe *positionMaximum* werden die Schrittpositionen mit minimaler und maximaler Photodiodenspannung nach Methode 2 ermittelt. Die Methode 2 ist im Kapitel 4.4 erklärt. Die Ermittlung erfolgt aus den in der Kalibrierung aufgenommenen Daten.

positionExtrem Values: Dieser Befehl ermittelt ebenfalls die Schrittpositionen mit minimaler und maximaler Photodiodenspannung, jedoch wird hierbei die Methode 1 verwendet. Die Ausführung der Methode 1 erfolgt in Kapitel 4.4.

minimum: Der Befehl minimum lässt den Motor zur Schrittposition mit minimaler Photodiodenspannung ($\hat{=} \mathcal{I} = 0$) fahren. Wichtig ist hierbei, dass der Motor in der Ausgangsposition der Kalibrierung startet.

maximum: Mit dem Befehl *maximum* kann zur Schrittposition mit maximaler Intensität $\mathcal{I} = 1$ gefahren werden. Erneut muss das Verfahren in der Ausgangsposition der Kalibrierung gestartet werden.

linearRamp: Durch die Befehlseingabe *linearRamp* wird eine lineare Rampe gestartet. Mit der ersten Variable wird die Anzahl der linearen Rampen und mit der zweiten Variable die Zeitkonstante festgelegt. Die Einheit, der eingegeben Zeitkonstante ist Sekunde. Die durch

diesen Befehl ausgelösten linearen Rampen gehen von $\mathcal{I} = 0$ nach $\mathcal{I} = 1$ und umgekehrt, weshalb die linearen Rampen auch in der Schrittposition mit minimaler oder maximaler Intensität gestartet werden müssen.

linearRamp2: Der Befehl *linearRamp2* lässt den Schrittmotor eine lineare Rampe von einer beliebigen Ausgangsposition zu einer durch die erste Variable vorgegebenen Intensität fahren. Die erste Variable ist hierbei in Prozent der Maximalintensität einzugeben. Mit der zweiten Variablen wird erneut die Zeitkonstante festgelegt.

exponentialRamp: Durch den Befehl *exponentialRamp* wird eine exponentielle Rampe von der maximalen zur minimalen Intensität oder umgekehrt ausgelöst. Somit muss der Startpunkt die Schrittposition mit maximaler oder mit minimaler Photodiodenspannung sein. Mit der ersten Variable kann eine Zeitkonstante übergeben werden. Die gewählte Zeitkonstante bestimmt die Rampenzeit.

stabilisation: Durch die Eingabe stabilisation wählt man eine Intensitätsstabilisierung nach der Zwei-Punkt Regelung aus. Der Sollwert wird über die erste Variable vorgegeben. Erneut ist die erste Variable in Prozent der Maximalintensität einzugeben. Der Bereich, den der Motor während der Stabilisierung nicht verlassen kann, beträgt 45°. Wird die Stabilisierung in der Schrittposition mit minimaler Intensität gestartet, kann der Motor sich nur auf einer Flanke der $\cos^2(\Phi)$ -Funktion bewegen.

Pregulator: Der Befehl *Pregulator* ist analog zum Befehl *stabilisation*, außer das als Intensitätsstabilisierungsprogramm der P-Regler anstatt der Zwei-Punkt Regelung eingesetzt wird.

PIregulator: Das Intensitätsstabilisierungsprogramm PI-Regler wird durch den Befehl *PIregulator* aufgerufen. Die Vorgabe des Sollwerts erfolgt durch die erste Variable.

anglec: Dieser Befehl ermöglicht die Drehung um einen gewissen Winkel im Uhrzeigersinn. Der Winkel wird durch die erste Variable festgelegt. Die Einheit der ersten Variablen ist in diesem Fall $^{\circ}$.

angleac: Der Befehl *angleac* ist analog zum Befehl *anglec* nur das die Drehung entgegen dem Uhrzeigersinn erfolgt.

break: Der Befehl break ermöglicht einen Abbruch der Stabilisierungsprogramme.

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Aufbau eines Hybrid-Schrittmotors [2]. Links ist die Verbindung aus Stator und	
	Rotor zu sehen. Rechts ist der Rotor mit angebrachten gezahnten Kappen abge- bildet Nord- und Südpole sind eine halbe Zahnbreite gegeneinander versetzt	1
22	Aufbau akustooptischer Modulator [6] Ein piezoelektrischer Wandler erzeugt eine	т
2.2.	Druckwelle, die zu einer periodischen Änderung des Brechungsindizes des opti-	
	schen Kristalls und dadurch zu einer Beugung des Laserstrahls führt	5
2.3.	Funktionsweise eines $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchens [10]. Aufgrund der unterschiedlichen Ausbrei-	
	tungsgeschwindigkeiten parallel und senkrecht zur optischen Achse kommt es zur	
	Drehung der Polarisationsebene des einfallenden linear polarisiertem Lichts um	_
0.4	den zweifachen Winkel zischen Polarisationsebene und optischer Achse.	7
2.4.	Regelkreis [11]. Zuerst wird die Fehlergröße $f(t)$ aus der Differenz von Sollgröße $u(t)$ und Pogelgröße $u(t)$ gehildet. Die Fehlergröße $f(t)$ wird durch den Pogler	
	in die Antwortgröße $a(t)$ umgewandelt. Die Peinergröße $a(t)$ und die Störgröße	
	wirken auf der Regelstrecke auf die Regelgröße ein. Im Idealfall kann so eine	
	Störung kompensiert werden.	8
2.5.	Optische Dipolfalle für neutrale Atome: Gaußförmiger Laserstrahl mit einer im	
	Laserfokus gefangenen Atomwolke	11
2.6.	Stoßprozess zwischen Atom und Photon. Atom absorbiert Photon und geht da-	
	durch in einen angeregten Zustand über. Beim Übergang des Atoms zuruck in den Grundzustand wird ein Photon in eine beliebige Baumrichtung ausgesendet.	
	(Fluoreszenz)	12
~ .		
3.1.	Symboldarstellung des vereinfachten Schaltplans.	14
3.2.	Verschaltung eines Analogeingangs mit dem Mikrocontroller.	15
3.3.	Abbildungen des Schrittmotors mit Rotationstisch $M101A$ von LK-Instruments (a) und der Kombination aus Schrittmotor S^{22} und Rotationstisch $SMPU$ der	
	Firma Standa (b).	18
		10
4.1.	Schematische Skizze des Testaufbaus.	22
4.2.	Nullpositionsbestimmung: Spannung U am jeweiligen Pin gegen den Winkel Φ	
	aufgetragen.	23
4.3.	Normierte Intensität $\mathcal{I} = \frac{1}{I_{\text{max}}}$ an der Photodiode gegen den Winkel Φ und gegen die Zeit t hei konstanter Winkelgeschwindigkeit des Motors ausufgetragen	24
11	Häufigkeitsverteilung der gemessenen Schrittposition mit maximaler Intensität	24
4.4.	(maximaler Spannung an der Photodioden) mit Nullpositionsverfahren über Hall-	
	sensoren nach Methode 1 und Methode 2	26

4.5.	Langzeitmessungen: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Schrittposition mit ma-	
	ximaler Intensität (maximaler Spannung an der Photodioden) nach Methode 2	
	mit und ohne Nullpositionsverfahren über Hallsensoren über 15 h aufgenommen.	
	Die Anzahl, der insgesamt aufgenommen Messwerte ist $N_{\text{Total}} \approx 1000.$	28
4.6.	Lineare Rampe mit $\Delta t = 12$ s: Normierte Intensität $\mathcal{I} = \frac{1}{I_{\text{max}}}$ gegen die Zeit t	
	aufgetragen	31
4.7. 4.8.	Lineare Rampe mit verschiedenen Zeitkonstanten bzw. Rampenzeiten t_{Rampe} Lineare Rampen: Abweichung der realen Rampenzeit von der eingestellten Ram-	32
	penzeit Δt_{Rampe} in Abhängigkeit der eingestellten Rampenzeit t_{Rampe}	33
4.9.	Exponentielle Rampe mit $\Delta t = 4$ s: Normierte Intensität $\mathcal{I} = \frac{I}{I_{\text{max}}}$ gegen die Zeit	34
4 10	t augebragen t_{-}	25
4.10.	Exponentielle Rampen: Abweichung der realen Rampenzeit von der eingestellten	55
4.11.	Pampanzeit Δt_{-} in Abbängigkeit der eingestellten Pampanzeit t_{-}	26
1 19	Kampenzent Δt_{Rampe} in Abhanggkeit der eingestenten Kampenzent t_{Rampe}	30
4.12.	von) mit unterschiedlichen Frequenzen, f und des jeweilige stabiligierte Photodi	
	odensignal (rote Kurven)	40
1 1 2	Fouriertransformation des Störsignals mit einer Frequenz $f = 3$ Hz und die durch	40
4.10.	don P don PL und don P Bogler mit gleitenden Mittelwort stabilisierten Photo	
	diodonsignalo	/1
111	Abschwächungen B von sinusförmigen Störsignale mit unterschiedlichen Frequen	41
4.14.	zon f durch die verschiedenen Intensitätsstabilisierungsprogramme	19
1 15	Abschwächung <i>B</i> von Störsignale mit unterschiedlichen Frequenzen <i>f</i> durch den	44
4.10.	P-Regler in Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit des Motors <i>u</i> und die maxi-	
	f -regier in Abhängigkeit der Winkeigeschwindigkeit des Motors v und die maxi- male Abschwächung B in Abhängigkeit der Frequenz f	/13
	male Abschwachung D_{max} in Abhangigkeit der Frequenz f	40
5.1.	Grüner Laser: Skalierte Intensität $\mathcal{I} = \frac{I}{L}$ gegen die Zeit t aufgetragen für ein	
	durch die Schrittmotorsteuerung, ein durch einen AOM stabilisiertes Signal und	
	für ein nicht stabilisiertes Signal.	47
5.2.	Blauer Laser: Skalierte Intensität $\mathcal{I} = \frac{I}{L}$ gegen die Zeit t aufgetragen für ein	
	durch die Schrittmotorsteuerung, ein durch einen AOM stabilisiertes Signal und	
	für ein nicht stabilisiertes Signal.	49
5.3.	Atomzahlen N in der MOT gegen die normierte Laserintensität \mathcal{I} aufgetragen.	50
5.4.	Atomzahl N in der magnetooptischen Falle gegen den experimentellen Zyklus	
	aufgetragen für die durch die Schrittmotorsteuerung, durch den AOM stabilisierte	
	und die nicht stabilisierte Laserintensität.	51

Tabellenverzeichnis

3.1.	Pinbelegung am Teensy 3.2, vom Big Easy Drivers, vom WIZ850io Netzwerkmo-	
	dul, von den BNC-Anschlüsse und von der Spannungsversorgung	16
3.2.	Verschaltung des <i>Big Easy Drivers</i> mit den Motoranschlüssen (D-Sub Anschlüsse)	16
3.3.	Theoretischer Vergleich der Schrittmotoren $M101A$ und $28S$ auf dem Rotationstisch $8MRU$	18
5.1.	Mittelwert \overline{N} , Standardabweichung σ und relative Abweichung $\frac{\sigma}{\overline{N}}$ der aufgenommen Atomzahlen in der MOT für unterschiedliche Laserintensitätsstabilisierungen.	50

Literaturverzeichnis

- DELTRON, Grundlagen von Schrittmotoren, (Stand 6.9.2018) https://wiki.ntb.ch/ infoportal/_media/hardware/sysp/bauteile/schrittmotor_kurz_erklaert_d.pdf (siehe S. 3).
- [2] Newmotorspot, Abbildung zum Aufbau eines Hybridschrittmotors, (Stand 6.9.2018) http: //314sbp4ao2771ln0f54chhvm.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/ 2015/06/FAQ3-stepper-motor-basics-rotor-stator-01.jpg (siehe S. 4).
- [3] Sparkfun, Motortreiber Big Easy Driver, (Stand 6.9.2018) https://learn.sparkfun.com/tutorials/big-easy-driver-hookup-guide (siehe S. 4, 13, 55).
- [4] LK-Instruments, Datenblatt Schrittmotor M101A, (Stand 6.9.2018) http://www.lkinstruments.com/products/optomechanics/rotation-stage-m101.html (siehe S. 5, 18).
- [5] Standa, Datenblatt Schrittmotor S28, (Stand 6.9.2018) http://www.standa.lt/products/ catalog/motorised_positioners?item=336&prod=Universal_Motorized_Rotation_ Stages (siehe S. 5, 18).
- [6] ITWissen.info, Abbilung eines Akustooptischer Modulator, (Stand 6.9.2018) https://www. itwissen.info/Akusto-optischer-Modulator-acoustic-optical-modulator-AOM. html (siehe S. 5).
- [7] B.E.A. Saleh und M.C.Teich, Fundamentals of Photonics (Wiley, Feb. 2001) (siehe S. 5).
- [8] Dr. R. Löw und Dr. S. Ulrich, Praktikum zur linearen Optik Versuch: Akustooptischer Modulator, (Stand 6.9.2018) http://www.pi5.uni-stuttgart.de/lectures/88/Versuch_ AOM_Anleitung.pdf (siehe S. 5, 6).
- [9] D. A. Steck, Classical and Modern Optics, (Stand 6.9.2018) http://atomoptics-nas. uoregon.edu/~dsteck/teaching/optics/optics-notes.pdf (siehe S. 6).
- [10] Abbildung der Funktionweise eines $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchens, (Stand 6.9.2018) https://commons. wikimedia.org/wiki/File:Waveplate.png (siehe S. 7).
- [11] Wikipedia, Regelkreis, (Stand 6.9.2018) https://de.wikipedia.org/wiki/Regler# /media/File:Einfacher_Regelkreis_n.svg (siehe S. 8).
- [12] Wikipedia, Regler, (Stand 6.9.2018) https://de.wikipedia.org/wiki/Regler (siehe S. 8, 38).
- [13] A. Askar'yan, Effects of the Gradient of a Strong Electromagnetic Beam on Electrons and Atoms (Reprinted from Sov. Phys. JETP, vol 15, pg 1088-1090, 1962), 267 (2009) (siehe S. 9).
- [14] A. Ashkin, Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure, Phys. Rev. Lett. 24, 156 (1970) (siehe S. 9).

- [15] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm und S. Chu, Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles, Opt. Lett. **11**, 288 (1986) (siehe S. 9).
- [16] R. Grimm, M. Weidenmüller und Y. Ovchinnikov, Optical Dipole Traps for Neutral Atoms, Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics Vol. 42, 95-170 (1999) (siehe S. 9).
- [17] H. Kadau, Rosensweig Instability and droplets in a Quantum Ferrofluid of Dysprosium Atoms, Diss. (Universität Stuttgart, 2016) (siehe S. 12).
- [18] Chemie.de, Eigenschaften Dysprosium, (Stand 6.9.2018) http://www.chemie.de/lexikon/ Dysprosium.html (siehe S. 12).
- [19] M. Wenzel, A dysprosium quantum gas in highly controllable traps, Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2015 (siehe S. 12).
- [20] PJRC, Mikrocontroller Teensy 3.2, (Stand 6.9.2018) https://www.pjrc.com/store/ teensy32.html (siehe S. 13, 55).
- [21] WIZnet, Netzwerkmodul WIZ850io, (Stand 6.9.2018) http://wizwiki.net/wiki/doku. php?id=products:wiz850io:start (siehe S. 14, 55).
- [22] C. S. Adams, H. J. Lee, N. Davidson, M. Kasevich und S. Chu, Evaporative Cooling in a Crossed Dipole Trap, Phys. Rev. Lett. 74, 3577 (1995) (siehe S. 28).
- [23] T. Maier, Interactions in a Quantum Gas of Dysprosium Atoms, Diss. (Universität Stuttgart, 2015) (siehe S. 47).
- [24] Texas Instruments, Spannungsregler, (Stand 6.9.2018) http://www.ti.com/lit/ds/ symlink/t1780.pdf (siehe S. 55).
- [25] ebm-papst, DC-Axiallüfter, (Stand 6.9.2018) http://img.ebmpapst.com/products/ datasheets/DC-Axialventilator-8412NGLE-GER.pdf (siehe S. 55).

Danksagung

Im Folgenden möchte ich einigen Personen danken, ohne die diese Bachelorarbeit nicht möglich gewesen wäre.

Prof. Dr. Tilman Pfau für die Möglichkeit ein solches Projekt im Rahmen meiner Bachelorarbeit am 5. Physkalischen Institut durchzuführen.

Matthias Wenzel für die Hilfe bei jeglichen Frage- und Problemstellungen. Die Zugabe wichtiger Anregungen und Ideen, die den Fortschritt des Projekts ermöglichten.

Fabian Böttcher für die kompetente Betreuung und die Hilfe im Labor, in der Elektronkund in der Mechanikwerkstatt.

Jan-Niklas Schmidt für die Hilfe bei jeglicher Fragestellungen und die Zugabe vieler Anregungen, z.B. bei der mathematischen Lösung des Verfahren zur Erzeugung unterschiedlicher Intensitätskurven.

Und natürlich meinen Eltern für die grundsätzliche Unterstützung während meines Studiums.