

Hochauflösende optische Spektroskopie an lasergekühlten Atomen
basierend auf der Atominterferometrie im Zeitraum

Vom Fachbereich Physik der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor der Naturwissenschaften
Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation
von
Dipl.-Phys. Frank Ruschewitz
geboren am 22. August 1966 in Radevormwald

Referent: Prof. Dr. W. Ertmer
Korreferent: Prof. Dr. E. Tiemann
Tag der Promotion: 4.2.1998

Zusammenfassung

Die Atominterferometrie besitzt aufgrund der kurzen de Broglie-Wellenlänge der atomaren Wellen ein immenses Potential für hochgenaue Messungen. Durch die Verknüpfung der Atominterferometrie mit den Methoden der Laserkühlung kann eine lange Verweildauer der Atome im Interferometer und eine damit einhergehende weitergehende Steigerung der Präzision erreicht werden. Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung von Verfahren zur Steigerung des Auflösungsvermögens bei der Atominterferometrie im Zeitraum und der Demonstration der erreichten Auflösung anhand der hochauflösenden Spektroskopie der Magnesium-Interkombinationslinie.

Hierzu wurde eine magnetooptische Falle für Magnesiumatome im Hinblick auf atominterferometrische Messungen optimiert. Die dominierenden Fallenverlustprozesse und der Wiedereinfang des atomaren Ensembles nach einer endlichen Fallenauszeit wurden systematisch untersucht.

Die Sensitivität des Interferenzsignals auf die Laserphase der Strahlteilerpulse konnte zur hochauflösenden Spektroskopie der Magnesium-Interkombinationslinie bei 457 nm ausgenutzt werden. Die schmalsten beobachteten Strukturen besitzen eine Linienbreite von 491 Hz. Bei einer Übergangsfrequenz von 655 THz entspricht dies einer Liniengüte von $1,3 \cdot 10^{12}$, welches die höchste bisher für die Spektroskopie an neutralen Atomen publizierte Liniengüte übertrifft. Der Einsatz des Interferometers als optischer Frequenzstandard wird diskutiert. Die detektierten Interferenzsignale lassen eine Stabilität von $3,2 \cdot 10^{-13} (\tau/s)^{-1/2}$ erwarten.

In der Atominterferometrie läßt sich wie in der optischen Interferometrie eine Steigerung der Sensitivität durch Vielstrahlinterferenzen erwarten. Anhand theoretischer Berechnungen wird ein Aufbau diskutiert, mit dem sich das bestehende Atominterferometer im Zeitraum zu einem Vielstrahlinterferometer mit beliebig vielen interferierenden Teilwellen erweitern läßt. In ersten Experimenten mit drei bzw. vier interferierenden Teilwellen konnten die für Vielstrahlinterferenzen charakteristischen Signalverläufe detektiert werden.

Für die hochauflösende Spektroskopie sowie die Interferometrie mit kohärenten atomaren Ensembles ist die Verwendung atomarer Ensembles möglichst geringer Temperatur bzw. hoher Phasenraumdichte wünschenswert. Es wird ein Verfahren vorgestellt, welches die Kühlung von gespeicherten Magnesiumatomen bis auf wenige μK erlaubt. Die Möglichkeit der Speicherung von Magnesiumatomen im $^1\text{S}_0$ - und $^3\text{P}_1$ -Zustand im Intensitätsmaximum eines fokussierten Nd:YAG-Laserstrahls wird aufgezeigt. Numerische Berechnungen zeigen, daß sich durch Einstrahlung eines zum Interkombinationsübergang rotverstimmen Lichtfeldes eine Kühlung der gespeicherten Atome mit einer Zeitkonstante in der Größenordnung 1 s erreichen läßt.

Der im Rahmen der Arbeit durchgeführte Einsatz der Atominterferometrie im Zeitraum für die Hochpräzisionsspektroskopie und die aufgezeigten Methoden zur Steigerung des Auflösungsvermögens ebnet den Weg für weitere Hochpräzisionsmessungen.

Abstract

Atom interferometry possesses a high potential for high precision measurements due to the short wavelength of atomic de Broglie waves. By applying the methods of laser cooling in atom interferometry the atoms can stay within the interferometer for a long time leading to an additional increase in precision. The aim of this work was the development of methods to increase the resolving power of an atom interferometer in the time domain and the demonstration of the reached resolution by high precision spectroscopy of the Magnesium intercombination transition.

Therefore a magneto optical trap for magnesium atoms has been optimized with regard to the atom interferometrical measurements. The dominant trap loss processes and the recapture of the atomic ensemble after a finite trap dark time has been studied systematically.

The sensitivity of the interference signal regarding the phase of the beam splitting laser pulses has been used for high resolution spectroscopy of the Magnesium intercombination transition at 457 nm. The smallest structures observed show a line width of 491 Hz. Compared with the transition frequency of 655 THz this indicates a line Q-factor of $1,3 \cdot 10^{12}$, which represents the highest line Q-factor for spectroscopy on neutral atoms published so far. The perspectives of this kind of interferometer for an optical frequency standard will be discussed. The detected interference signals show a stability of $3,2 \cdot 10^{-13} (\tau/s)^{-1/2}$.

Like in optical interferometry the measurement sensitivity in atom interferometry can be increased by the use of multiple beam interferences. A theoretical discussion of the extension of the realized atom interferometer in the time domain to a multiple beam interferometer with a variable number of interfering partial waves will be given. In first experiments a signal characteristic of multiple beam interferences has been observed for three and four interfering partial waves.

For high resolution spectroscopy as well as for interferometry with coherent atomic ensembles the use of atomic ensembles of a temperature as low as possible or a phase space density as high as possible, respectively, is desirable. A method of cooling trapped Magnesium atoms to the μK regime will be presented. The possibility of trapping Magnesium atoms in the $^1\text{S}_0$ - and $^3\text{P}_1$ -state in the center of a focused Nd:YAG laser beam will be shown. Irradiating the trapped atoms by laser light red detuned to the intercombination transition leads to cooling with a time constant of about 1 s, which has been studied by numerical calculations.

The realization of high resolution spectroscopy using atom interferometry in the time domain and the discussed methods for increasing the resolution power allow further high precision measurements in the future.

Danksagung

Diese Arbeit ist auch das Ergebnis einer jahrelangen Zusammenarbeit mit vielen Personen, die mich in Wort und Tat unterstützt haben.

Herrn Prof. Dr. W. Ertmer danke ich für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit und deren Betreuung. Das Schaffen der personellen und materiellen Voraussetzungen, sowie individueller Gestaltungsspielräume war fundamental für das Gelingen dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. E. Tiemann danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Für seine hilfreichen Ratschläge danke ich Herrn Dr. Klaus Sengstock, der die in dieser Arbeit durchgeführten Experimente begleitet hat.

Einen wesentlichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatten Dipl.-Phys. Rainer Strichirsch, Dipl.-Phys. Dirk Scheller, Dipl.-Phys. Ralf Degner und Niklas Schaffrath. Ihnen gilt mein Dank vor allem für ihre hohe Einsatzbereitschaft.

Allen Kollegen im Magnesium-Projekt gilt mein besonderer Dank. Durch das gute Klima, die große Hilfsbereitschaft und die wissenschaftliche Zusammenarbeit werden auch die langen Meßnächte bei mir in guter Erinnerung bleiben. Von Herrn Dr. Jörg Helge Müller und Herrn Dr. Dirk Bettermann habe ich gelernt, daß sich erfolgreiches Arbeiten und Spaß im Labor einander nicht ausschließen. Aus den Diskussionen mit Herrn Dr. Volker Rieger habe ich viel für mein eigenes wissenschaftliches Arbeiten gelernt. Für die erfolgreiche Zusammenarbeit und das hohe Engagement bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Phys. Henning Hinderthür, Herrn Jin Long Peng, M. S. und Herrn Niklas Schaffrath.

Mein Dank an zwei Freunde und Kollegen ist mir eine besondere Freude. Herr Dr. Ralf Deutschmann und Herr Dipl.-Phys. Guido Wokurka waren mir nicht nur in den weniger erfreulichen Stunden der letzten Jahre eine große Hilfe.

Auch allen anderen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe gilt mein Dank für Ihre Unterstützung und Ratschläge, sowie anregende Gespräche bei einer Tasse Kaffee.

Diese Arbeit wurde an zwei Instituten durchgeführt, an denen viel Mitarbeiter für die Schaffung der nötigen Infrastruktur gesorgt haben. Stellvertretend für alle möchte ich hier Herrn Dr. Haberstroh, Herrn Langen, Frau Baeßler, Herrn Dr. Gaul, Herrn Heidekrüger und Frau Krämer danken.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der WE-Heraeus-Stiftung der DPG, der Europäischen Union und der NATO danke ich für die finanzielle Förderung des Projektes bzw. die Möglichkeit des wissenschaftlichen Gedankenaustauschs auf internationalen Tagungen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Beschreibung der atomaren Bewegung in Laserlicht	7
2.1. Die kohärente Wechselwirkung zwischen Atom und Lichtfeld	7
2.2. Die Wechselwirkung mit den Vakuummoden des Lichtfeldes	8
3. Magnetooptische Speicherung von Magnesiumatomen	11
3.1. Prinzip der Lasermanipulation von Atomen	11
3.1.1. Laserkühlung für $J=0 \rightarrow J=1$ -Systeme	12
3.1.2. Die magnetooptische Falle	14
3.2. Apparative Grundlagen	16
3.2.1. Das Lasersystem	16
3.2.2. Aufbau der magnetooptischen Falle	19
3.2.3. Das Detektionssystem	21
3.2.4. Charakterisierung des gespeicherten atomaren Ensembles	22
3.3. Photoionisation gespeicherter Magnesiumatome	23
3.3.1. Verlustprozesse in einer MOT	23
3.3.2. Photoionisation von angeregten Atomen	24
3.3.3. Der Einfluß der Photoionisation auf die Fallenverluste	25
3.3.4. Messung des Photoionisationsquerschnitts	26
3.4. Statistische Untersuchungen an einzelnen gespeicherten Atomen	28
3.4.1. Speicherung einzelner Atome	28
3.4.2. Statistik der Einfang- und Verlustprozesse	31
4. Atominterferometrie im Zeitraum	33
4.1. Die Ramsey-Bordé-Atominterferometrie im Ortsraum	35
4.2. Theoretische Beschreibung der Ramsey-Bordé-Interferometrie	38
4.3. Ramsey-Bordé-Interferometrie im Zeitraum	44
4.4. Verschiedene Interferometergeometrien	47

4.4.1. Interferometrie ohne Frequenzabhängigkeit	47
4.4.2. Interferometer mit großer räumlicher Aufspaltung	51
4.5. Vielstrahlatominterferometrie im Zeitraum	53
4.5.1. Prinzip des Vielstrahlinterferometers im Zeitraum	54
4.5.2. Ein Atominterferometer mit beliebig vielen interferierenden Teilwellen	61
4.5.3. Realisation eines Vielstrahlatominterferometers im Zeitraum	66

5. Höchstaflösende Spektroskopie an kalten Atomen 69

5.1. Der experimentelle Aufbau	71
5.1.1. Prinzip des experimentellen Aufbaus	72
5.1.2. Die magnetooptische Falle	73
5.1.3. Das Laserspektrometer	73
5.1.4. Die Langzeitstabilisierung des Laserspektrometers	74
5.1.5. Die Strahlführung des Strahlteilerlichtfeldes	76
5.1.6. Die Experimentsteuerung und Meßwerterfassung	77
5.2. Verlustdetektion an einem gespeicherten atomaren Ensemble	79
5.2.1. Gepulste Verluste in einer MOT	79
5.2.2. Gepulste Verlustprozesse bei der Atominterferometrie im Zeitraum	80
5.2.3. Einfluß des Wiedereinfangs auf das Spektroskopiesignal	83
5.2.4. Der Wiedereingangsprozeß	84
5.2.5. Abnahme der Amplitude bei der Spektroskopie möglichst schmaler Resonanzen	85
5.2.6. Der Einfluß des Zerfalls der angeregten Atome	87
5.3. Höchstaflösende nichtlineare Spektroskopie an kalten Atomen	90
5.3.1. Sättigungsspektroskopie an einem kalten Ensemble	90
5.3.2. Sub-kHz optische Spektroskopie mit einem Atominterferometer im Zeitraum	94
5.4. Das Interferometriesignal beeinflussende physikalische Effekte	97
5.4.1. Die Überlagerung der Interferenzringe der beiden Rückstoßkomponenten	97
5.4.2. Das Intensitätsprofil der Laserstrahlen für die Strahlteilerpulse	99
5.4.3. Die Linienbreite des Frequenzspektrums der anregenden Pulse	99
5.4.4. Optische Weglängenänderung	100
5.4.5. Spontane Zerfallsprozesse zwischen den Strahlteilerpulsen	100

5.4.6. Der 1. Ordnung Dopplereffekt	101
5.4.7. Der 2. Ordnung Dopplereffekt	102
5.4.8. Der Einfluß statischer magnetischer Felder	103
5.4.9. Der Einfluß statischer elektrischer Felder	104
5.4.10. Der Einfluß dynamischer elektromagnetischer Felder	105
5.4.11. Der Einfluß der Gravitation	106
5.4.12. Der Einfluß der Rotation	106
5.4.13. Sonstige Effekte	107
5.5. Die Kontrastabnahme aufgrund von Frequenzfluktuationen	107
5.6. Der optische Magnesium-Frequenzstandard	110
5.6.1. Erzielte Stabilität	110
5.6.2. Vergleich mit anderen Frequenzstandards	113
5.6.3. Limitierung der Stabilität und erzielbare Verbesserungen	113
5.6.4. Genauigkeit	115
6. Präparation von Magnesiumatomen durch Laserlicht	117
6.1. Die Speicherung von Magnesiumatomen in weitverstimten Lichtfeldern	120
6.1.1. Die Dipolfalle	120
6.1.2. Eine Dipolfalle für Atome in zwei verschiedenen inneren Zuständen ...	122
6.1.3. Mögliche Realisierung einer Dipolfalle für Mg-Atome im 1S_0 - und 3P_1 -Zustand	123
6.2. Quantisierte Bewegung der Atome in der Dopple-FORT	128
6.2.1. Die quantisierte Bewegung im harmonischen Potential	128
6.2.2. Die Spektroskopie der Resonatormoden	129
6.3. Kühlung gespeicherter Atome auf dem Interkombinationsübergang	133
6.3.1. Prinzip des Kühlschemas	135
6.3.2. Numerische Modellierung des Kühlschemas mittels optischer Blochgleichung	136
6.3.3. Kühlung in den μK -Bereich	139
7. Ausblick	149

Anhang

1. Meßwerterfassung und Experimentsteuerung	153
2. Literaturwerte der Oszillatorstärken	160
3. Berechnung der Franck-Condon-Faktoren	162

Literaturverzeichnis	165
-----------------------------------	-----