

Polarisationsgradientenkühlen eines langsamen Atomstrahls

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

genehmigte Dissertation
von
Dipl.-Phys. Max Rauner
geboren am 1.7.1970 in Berlin

1998

Referent: Prof. Dr. W. Ertmer

Koreferent: Prof. Dr. K. Danzmann

Tag der Promotion: 12. November 1998

Zusammenfassung

Die Kühlung neutraler Atome mit Hilfe von Laserlicht hat sich als wichtige experimentelle Technik in der Atom- und Quantenoptik etabliert. Mit dem Verfahren der Polarisationsgradientenkühlung werden Atome auf Temperaturen von wenigen Mikrokkelvin, weit unterhalb des Dopplerlimits, gekühlt. Die vorliegende Arbeit befaßt sich systematisch mit zentralen Fragen zur Polarisationsgradientenkühlung in zwei Dimensionen und in Anwesenheit magnetischer und optischer Potentiale. Vor allem für neue Anwendungen der Laserkühlung neutraler Atome in Magnet- und Dipolfallen ist die hier untersuchte Thematik von grundlegender Bedeutung.

Die Erweiterung der Polarisationsgradientenkühlung auf zwei Dimensionen ist nicht trivial. Das im allgemeinen aus drei oder vier Laserstrahlen erzeugte Polarisationsgradientenfeld besitzt keine Rotationssymmetrie. Dadurch kommt es zu einer Richtungsabhängigkeit der Laserkühlung. Im Rahmen dieser Arbeit konnten theoretisch vorhergesagte, charakteristische Impulsverteilungen der höherdimensionalen Laserkühlung mit einer Auflösung unterhalb der Photonenrückstoßgeschwindigkeit experimentell nachgewiesen werden. Dazu wurde die Dynamik der transversalen Kühlung eines langsamen Atomstrahls untersucht. Die theoretisch berechnete Zeitevolution der atomaren Geschwindigkeitsverteilung konnte qualitativ bestätigt werden.

Das Polarisationsgradientenkühlen in Anwesenheit eines zusätzlichen Dipolpotentials ist im Hinblick auf die Erzeugung von Bose-Einstein Kondensaten mit rein optischen Verfahren wichtig. Hier wurde detailliert die zweidimensionale Kühlung eines atomaren Ensembles untersucht, das im starken Dipolpotential eines blau frequenzverstimmten Laguerre-Gauß Modes erster Ordnung (TEM_{01}^*) eingeschlossen ist. Je nach Potentialstärke wurden bis zu achtzig Prozent der Atome auf sub-Dopplertemperatur gekühlt. Es zeigte sich, daß die Kühlung an Effizienz verliert, sobald der *light shift* des Fallenpotentials mit der Niveaushift durch die optische Melasse vergleichbar ist. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit Vorhersagen einer Quanten-Monte-Carlo Simulation, die in Zusammenarbeit mit einer niederländischen Forschungsgruppe entwickelt wurde.

Ein homogenes statisches Magnetfeld kann die Dynamik der atomaren Bewegung in einem Polarisationsgradientenfeld entscheidend beeinflussen. Durch die Raman-Kopplung von Zeeman-Niveaus im bewegten Bezugssystem werden Teile des Ensembles auf verschiedene diskrete Geschwindigkeiten sub-Dopplergekühlt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden erstmals Geschwindigkeitsselektive Resonanzen in zweidimensionalen Polarisationsgradientenfeldern untersucht. Durch die Kombination von optischer Melasse und statischen Magnetfeldern konnten atomare Gitterstrukturen im Impulsraum erzeugt werden. Die Verwendung dieses Kühlschemas

gestattet es, die Dichteverteilung von Atomstrahlen gezielt zu strukturieren. Die Interpretation der Ergebnisse in der semiklassischen Näherung ergibt exzellente Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment.

Abstract

Laser cooling of neutral atoms has become an important experimental technique in recent years. With polarization gradient cooling atoms are routinely cooled into the micro-Kelvin regime, far below the Doppler limit. This thesis addresses fundamental questions related to polarization gradient cooling in two dimensions with additional magnetic and optical potentials. These issues are of major importance for new applications of laser cooling in dipole traps and in magnetic traps.

The generalization of polarization gradient cooling from one to two dimensions is not trivial. In general, the polarization gradient field, generated from three or four intersecting laser beams, is not symmetric with respect to rotation. This gives rise to a directional dependence of the cooling process. In this work, momentum distributions with features characteristic for higher dimensional laser cooling were investigated by studying the transverse cooling of a slow atomic beam. The resulting momentum structures were detected with a resolution below the single photon recoil momentum. Theoretical calculations of the time evolution of the atomic momentum distribution show qualitative agreement with the experiments.

Polarization gradient cooling in the presence of an additional light shift is important for Bose-Einstein condensation by purely optical means. In the work presented here, the two dimensional cooling of an atomic ensemble trapped in a blue detuned first order Laguerre-Gaussian mode (TEM_{01}^*) was studied in detail. Depending on the depth of the dipole potential up to 80 % of the atoms were cooled to sub-Doppler temperatures. The cooling efficiency decreased, when the additional light shift became comparable to the atomic level shift due to the optical molasses. These results agree well with a quantum-Monte-Carlo simulation which was developed in cooperation with a dutch research group.

A static and homogeneous magnetic field can significantly alter the dynamics of atomic motion in a polarization gradient field. Due to Raman coupling of Zeeman levels in a moving reference frame, parts of the ensemble can be sub-Doppler cooled to non-zero velocities. In the context of this thesis, these velocity selective resonances were studied in two dimensions for the first time. By combining magnetic fields with optical molasses, atomic lattice structures were generated in two-dimensional momentum space. The interpretation of the results in terms of a general resonance condition shows excellent agreement between theory and experiment.

Key words:

Laser cooling/Laserkühlung, Atom optics/Atomoptik, Quantum optics/Quantenoptik

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ii
1 Einleitung	1

Kapitel 1

Einleitung

Als A. Ashkin und seine Mitarbeiter von den AT&T Bell Laboratorien im Jahr 1985 die erste optische Melasse für neutrale Atome demonstrierten, machten sie einen alten Traum der Physiker wahr. Zum ersten Mal war es möglich, eine frei schwebende Wolke von etwa einer Million Atomen in Ruhe zu untersuchen. Während Atome bei Zimmertemperatur mit Geschwindigkeiten von einigen hundert Kilometern pro Stunde durch den Raum fliegen, lassen sie sich mit Verfahren der Laserkühlung auf wenige Zentimeter pro Sekunde abkühlen und minutenlang beobachten. Im vergangenen Jahrzehnt entwickelten Wissenschaftler immer raffiniertere Verfahren der Laserkühlung, die sich drei Kategorien zuordnen lassen, Dopplerkühlung, sub-Dopplerkühlung und sub-Rückstoßkühlung. Mit der sub-Rückstoßkühlung ist es inzwischen möglich, atomare Ensembles mit Laserlicht auf wenige Nanokelvin abzukühlen [1].

Das Faszinierende an den kalten Gasen ist einerseits ihr Modellcharakter. Viele fundamentale Fragen der Physik sind nun experimentell zugänglich, etwa das quantenphysikalische Zusammenspiel extrem langsamer Partikel eines Elements, die Bose-Einstein Kondensation [2–4], oder die Wechselwirkung der kalten Materie mit Licht. Auf der anderen Seite hat sich für die Atomfallen in den vergangenen Jahren ein breites Spektrum an Anwendungen ergeben. Sie reichen von ultragenauen Atomuhren [5,6] bis zur präzisen Vermessung der Gravitation [7] und deren Gradienten [8].

Das fundamentale Prinzip der Laserkühlung erkannte schon Albert Einstein in einem anderen Zusammenhang. In seiner Arbeit zur Strahlung schwarzer Körper zeigte er, daß bei der Emission und Absorption von Lichtquanten durch Atome ein Impulsübertrag stattfinden muß. Einstein stellte fest [9]: “Diese [Impuls-Übertragung]

führt dazu, daß sich durch die bloße Wechselwirkung von Strahlung und Molekülen eine bestimmte Geschwindigkeitsverteilung der letzteren einstellt". R. Frisch gelang es später, diese These experimentell zu bestätigen. Er lenkte einen Strahl thermischer Natriumatome mit einer Natrium-Dampfampe um 0.01 Millimeter auf einer Flugstrecke von 54 Zentimetern ab [10]. Doch erst mit der Entwicklung des Lasers und den Fortschritten in der Atomspektroskopie waren die Voraussetzungen für eine effiziente Kühlung von Atomen mit Lichtdruckkräften geschaffen.

Die ursprüngliche Idee, Atome mit Laserlicht abzubremesen, beruht darauf, durch wiederholte Absorption von Photonen aus einer Richtung einen Impuls auf die Atome zu übertragen [11, 12]. Das Atom erfährt bei jedem Absorptionsprozeß einen gerichteten Impulsrückstoß $\hbar\mathbf{k}/m$, wobei \mathbf{k} den Wellenvektor des Lichts und m die Masse des Atoms bezeichnet. Die räumliche Verteilung der spontan re-emittierten Photonen ist dagegen derart, daß ihr Anteil an der dissipativen Kraft im Mittel Null ergibt. Zwar ist der Impuls eines Photons vergleichsweise gering – die Änderung der kinetischen Energie eines Atoms durch den Photonenrückstoß beträgt nur etwa ein Milliardstel seiner thermischen Energie bei Zimmertemperatur. Doch bei einer kurzen Lebensdauer des angeregten Niveaus finden pro Sekunde mehr als zehn Millionen Absorptions-Emissionszyklen statt. Die Kräfte, die dabei auftreten können, sind immens. Sie entsprechen dem hunderttausendfachen der Erdanziehungskraft.

Für das Abbremsen von thermischen Atomstrahlen nutzt man den Dopplereffekt aus. Die Frequenz des Lasers wird gegenüber der atomaren Resonanz rot verstimmt. Im Bezugssystem der entgegenkommenden Atome ist der Laser in Resonanz, sofern die Dopplerverschiebung gleich der Frequenzverstimmung ist. Um die Laserfrequenz mit den langsamer werdenden Atomen auf Resonanz zu halten, wurden zwei verschiedene Verfahren entwickelt. William Phillips und H. Metcalf verwendeten ein inhomogenes Magnetfeld, um die Dopplerverschiebung durch die Zeemanverstimmung auszugleichen [13]. Wolfgang Ertmer und Mitarbeiter bremsten einen Atomstrahl mit Laserlicht schnell veränderlicher Frequenz [14]. Die niedrigste Temperatur T_D , die mit Hilfe der Dopplerkühlung erzielt werden kann, ist das sogenannte Dopplerlimit [15]. Es hängt von der Linienbreite Γ des angeregten Niveaus ab:

$$k_B T_D = \frac{\hbar\Gamma}{2} \quad (1.1)$$

Für Überraschung sorgte vor zehn Jahren ein Experiment aus der Arbeitsgruppe von W. Phillips am National Institute of Standards and Technology (NIST) in Gaithersburg/Maryland. Phillips und Mitarbeiter stellten fest, daß die Tempera-

tur von Natriumatomen in einer optischen Melasse um ein Vielfaches unter dem theoretisch vorhergesagten Wert lag. Es stellte sich heraus, daß die Dopplertheorie der Laserkühlung zu starke Vereinfachungen beinhaltete, indem man das Atom als Zwei-Niveau System beschrieben hatte.

Erst ein modifizierter theoretischer Ansatz von J. Dalibard und C. Cohen-Tannoudji von der Ecole Normale Supérieure (Paris) [16] konnte die Diskrepanz durch Berücksichtigung der atomaren Substruktur auflösen. In diesem Modell rollen die Atome – klassisch gesprochen – im Interferenzmuster der Laserstrahlen Potentialberge hinauf. Das Potential wird dabei durch die induzierte Dipolwechselwirkung des Atoms mit dem Lichtfeld verursacht (AC-Stark Effekt). Von jedem Potentialberg werden die Atome optisch in ein energetisches Tal gepumpt, von wo sie erneut einen Anstieg beginnen. Dabei wird fortwährend kinetische in potentielle Energie umgewandelt und durch das Lichtfeld dissipiert – die Bewegung wird gedämpft. Bezeichnenderweise nannten die Wissenschaftler den Mechanismus “Sisyphuskühlen”.

Das Sisyphuskühlen gehört zu einer Klasse von Kühlmechanismen, die auf der Bewegung eines Atoms mit nahezu entarteter Substruktur (Zeeman-Niveaus, Hyperfeinstruktur) in einem Polarisationsgradientenfeld, einem Lichtfeld mit räumlich veränderlicher Polarisation, beruhen. Die physikalische Grenze der Polarisationsgradientenkühlung ist das sogenannte Rückstoßlimit:

$$k_B T_{\text{rec}} = \frac{(\hbar k)^2}{2m}. \quad (1.2)$$

Wenn man die Zahl der Veröffentlichungen als Maßstab nimmt, ist das Polarisationsgradientenkühlen das am intensivsten untersuchte Verfahren der Laserkühlung. Einer Vielzahl experimenteller Arbeiten [17] steht eine Reihe theoretischer Untersuchungen gegenüber, angefangen bei semiklassischen Theorien in einer Dimension [16] bis hin zu voll quantenmechanischen Berechnungen in zwei [18, 19] und drei Dimensionen [20].

Das Rückstoßlimit scheint auf den ersten Blick die fundamentale Grenze der Laserkühlung von Atomen darzustellen. Denn ein Atom muß immer ein letztes Fluoreszenzphoton emittieren, um nach der Anregung mit dem Kühllaser wieder in den Grundzustand zu gelangen. Doch mit zwei eleganten Verfahren konnten Forschungsgruppen an der ENS Paris und an der Stanford Universität das Rückstoßlimit unterbieten. Wissenschaftler um C. Cohen-Tannoudji entwickelten eine Kühlmethode namens *velocity selective coherent population trapping* (VSCPT), bei der die kältesten Atome von der weiteren Anregung durch das Kühllicht ausgeschlossen sind.

Sie befinden sich in einem Dunkelzustand der nicht an das Lichtfeld ankoppelt [21]. Mark Kasevich und S. Chu demonstrierten ein Verfahren, das auf einer Folge von Geschwindigkeitsselektiven Ramanpulsen beruht [22]. Wie beim VSCPT kommt es zur Diffusion der Atome im Impulsraum. Die Frequenz des Kühllichts wird so gewählt, daß eine schmale Geschwindigkeitsklasse um $v = 0$ von einer weiteren Anregung ausgeschlossen bleibt.

Für ihre Pionierarbeit auf dem Gebiet der Laserkühlung von Atomen wurden S. Chu, W. Phillips und C. Cohen-Tannoudji im vergangenen Jahr mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Wolfgang Ertmer erhielt 1997 den Leibnizpreis für Physik der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Darin spiegelt sich auch das zunehmende Interesse an der Atom- und Quantenoptik als wichtigem Teilgebiet der Physik. Die experimentelle Realisierung der Bose-Einstein Kondensation und die Demonstration eines rudimentären Atomlasers [23] wären ohne die Laserkühlung nicht möglich gewesen. Sie versprechen auch für die Zukunft interessante und spannende Physik.

Zielsetzung und Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit behandelt drei zentrale Fragestellungen zur sub – Doppelerkühlung neutraler Atome in zwei Dimensionen. Motiviert durch offene Fragen und aktuelle theoretische Arbeiten auf diesem Gebiet werden drei wichtige Aspekte der Polarisationsgradientenkühlung systematisch untersucht. Im einzelnen geht es um das Polarisationsgradientenkühlen in zwei Dimensionen

- im freien Raum (ohne zusätzliche Potentiale),
- in optischen Dipolpotentialen,
- in homogenen, statischen Magnetfeldern.

Ein Schwerpunkt der hier durchgeführten Experimente liegt auf der Untersuchung der Laserkühlung in zweidimensionalen Lichtfeldgeometrien. Der Begriff des “Zweidimensionalen” bezieht sich dabei auf die Anordnung der Laserstrahlen in einer Ebene. Zwei Freiheitsgrade der atomaren Bewegung werden gekühlt, die dritte Impulskomponente bleibt unbeeinflusst. Während über die Polarisationsgradientenkühlung in einer Dimension, mit zwei gegenläufigen Laserstrahlen, eine Vielzahl von Studien vorliegen, existieren nur wenige Arbeiten zur Kühlung in zwei Dimensionen. Es handelt sich dabei um einen nicht-trivialen Übergang – die Interferenz der Kühllaser

in 2D verursacht qualitativ neue Effekte, die hier teilweise zum ersten Mal dokumentiert werden. Die Themenschwerpunkte dieser Arbeit ordnen sich wie folgt in aktuelle Forschungsinhalte der Atomoptik ein.

Polarisationsgradientenfelder in zwei Dimensionen ohne zusätzliche Potentiale wurden von G. Grynberg und Koautoren sowie von A. Hemmerich und T. Hänsch vor allem im Hinblick auf atomare Kristalle in optischen Gittern untersucht [24, 25]. In unseren Experimenten liegt der Schwerpunkt auf dem Kühlprozeß an sich. Die Messungen stehen im Zusammenhang mit theoretischen Arbeiten, die eine anisotrope Impulsverteilung des atomaren Ensembles in einer zweidimensionalen Melasse mit quanten-theoretischen Verfahren berechnen [18, 19].

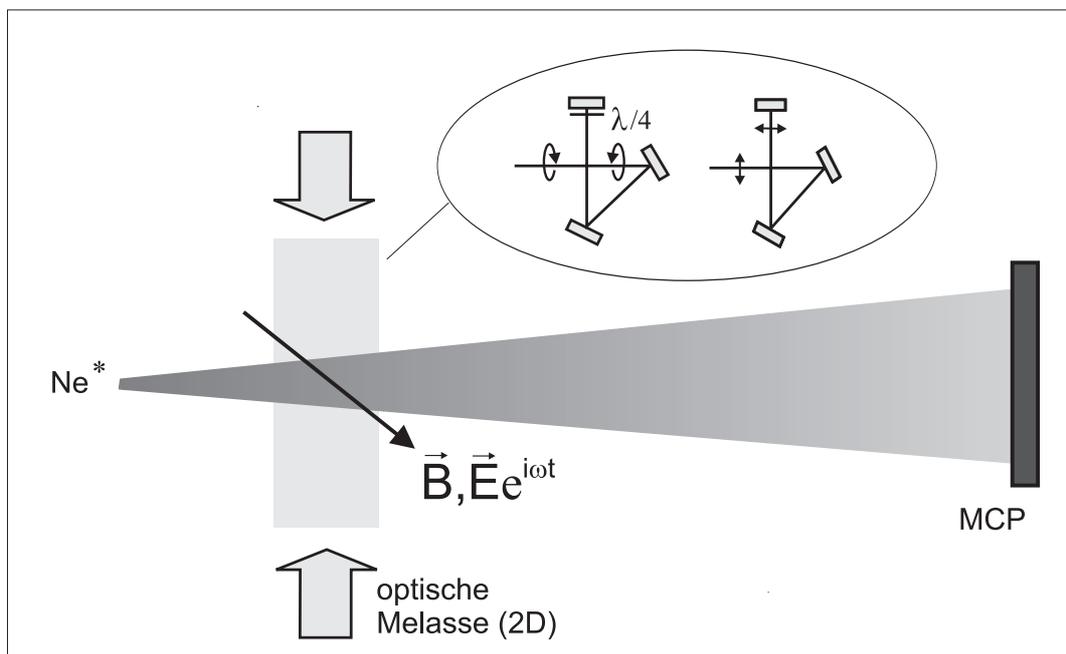


Abb. 1.1: Experimentelles Gesamtkonzept. Ausgangspunkt ist ein langsamer Strahl metastabiler Neonatome. Der Atomstrahl durchquert eine zweidimensionale optische Melasse mit variabler Polarisation und wird nach einer Flugstrecke von etwa 30 cm von einer Mikrokanalplatte (MCP) auf einen Phosphorschirm abgebildet und mit einer CCD-Kamera photographiert. Die räumliche Verteilung der Atome läßt sich direkt in eine zweidimensionale Impulsverteilung umrechnen. Auf diese Weise kann der Einfluß zusätzlicher magnetischer und elektrischer Potentiale auf die Polarisationsgradientenkühlung untersucht werden.

Als Ausgangspunkt der Experimente dient ein lasergekühlter und komprimierter Strahl metastabiler Neonatome [26, 27], der eine aus vier Laserstrahlen bestehenden optische Melasse mit verschiedenen Randbedingungen durchquert. Die atomare Impulsverteilung wird im Fernfeld mit hoher Effizienz und einer Auflösung unterhalb des Rückstoßlimits detektiert. Abbildung 1.1 zeigt eine Prinzipskizze des Ex-

periments. Wir beobachten die für diese Lichtfeldgeometrie vorhergesagten Strukturen (*escape channels*) für das Kühlen im freien Raum und charakterisieren ihre Eigenschaften als Funktion der Kühlleistung und der Wechselwirkungszeit mit der Melasse. Kapitel ?? behandelt die theoretischen Grundlagen der Polarisationsgradientenkühlung. Die experimentellen Ergebnisse zum Kühlen im freien Raum werden in Kapitel ?? diskutiert und mit verschiedenen theoretischen Arbeiten und den Ergebnissen einer Quanten-Monte-Carlo Simulation verglichen.

Die Polarisationsgradientenkühlung in Dipolpotentialen ist im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von G. Nienhuis (Universität Leiden) erstmals theoretisch untersucht worden. Dabei stellte sich heraus, daß die sub-Dopplerkühlung beeinträchtigt wird, wenn das zusätzliche Dipolpotential eine mit dem Dipolpotential der optischen Melasse vergleichbarer Stärke erreicht [28, 29]. Die Grundzüge der Theorie und die wichtigsten Ergebnisse der numerischen Simulationen sind in Kapitel ??, Abschnitt ?? dokumentiert. Zur Polarisationsgradientenkühlung in Dipolpotentialen gibt es neben unseren Arbeiten nur wenige experimentelle Studien. In ersten Experimenten mit rot-verstimmten Dipolfallen an der *University of Texas* in Austin konnten mit einer optischen Melasse keine sub-Dopplertemperaturen erzielt werden [30]. Ramankühlung in Dipolfallen führte in blau-verstimmten Dipolfallen zum Erfolg [31].

Unsere Experimente zur Polarisationsgradientenkühlung im Dipolpotential eines blau-verstimmten Doughnut-Modes werden unter anderem in der Dissertation von M. Schiffer behandelt [32, 33]. In jüngster Zeit läßt sich im Zusammenhang mit der Bose-Einstein Kondensation ein zunehmendes Interesse an dem Thema ausmachen [34]. Es ist durch Bestrebungen motiviert, ein Bose-Einstein Kondensat auf rein optischem Wege zu erzeugen und eine kontinuierliche, laserartige Quelle für Materiewellen zu entwickeln. In Kapitel ?? geht es um neue Erkenntnisse, die sich aus dem Vergleich der Daten mit Messungen im freien Raum und mit aktuellen Ergebnissen der Quanten-Monte-Carlo Simulationen ergeben haben.

Die Frage nach dem Einfluß zusätzlicher Magnetfelder hat das Studium der Polarisationsgradientenkühlung [35–37] von Beginn an begleitet. Schon in der ersten Theoriearbeit zum Polarisationsgradientenkühlen stellten J. Dalibard und C. Cohen - Tanoudji fest, daß bestimmte Anordnungen der Polarisationsgradientenkühlung formal äquivalent seien mit einer Kombination aus einem homogenen Magnetfeld und einer stehenden Lichtwelle *ohne* Polarisationsgradienten. Später zeigten P. van der Straten und Koautoren, daß ein atomares Ensemble durch Überlagerung eines zusätz-

lichen Magnetfeldes mit einer eindimensionalen optischen Melasse auf bis zu fünf diskrete Geschwindigkeiten gekühlt werden kann [35]. Dieser Effekt der sogenannten Geschwindigkeitsselektiven Resonanzen wurde in einer Dimension experimentell nachgewiesen [38, 39]. Allerdings konnte bislang nur ein Teil der vorhergesagten Resonanzen beobachtet werden.

Die vorliegende Arbeit dokumentiert die Beobachtung aller möglichen Geschwindigkeitsselektiven Resonanzen in zwei Dimensionen. Im allgemeinsten Fall kühlt die Melasse das Ensemble auf fünfundzwanzig diskrete Geschwindigkeiten. Außerdem kommt es zu einer Aufspaltung der in Kapitel ?? diskutierten *escape channels*, charakteristisches Merkmal der Laserkühlung in zwei und drei Dimensionen. Auf diese Weise entstehen atomare Gitterstrukturen im zweidimensionalen Impulsraum. Die Konkretisierung der Theorie [35] auf zweidimensionale Lichtfelder in Kapitel ??, Abschnitt ?? liefert die Grundlage für die Interpretation der Ergebnisse in Kapitel ?. Zeitgleich zu unseren Arbeiten [40] wurden ähnliche Experimente in drei Dimensionen durchgeführt und veröffentlicht [41].

In Kapitel ?? wird ein Experiment zur Bragg-Beugung des langsamen Atomstrahls vorgestellt. Im Gegensatz zu der Aufspaltung des Atomstrahls durch Geschwindigkeitsselektive Resonanzen handelt es sich bei der Bragg-Beugung um eine kohärente Aufspaltung der atomaren Materiewellen. Die Geschwindigkeitsbreite muß dazu mit mechanischen Blenden auf Temperaturen unterhalb des Rückstoßlimits reduziert werden. Eine stehende Lichtwelle bewirkt eine Aufspaltung des Atomstrahls, sofern die Bragg-Bedingung erfüllt ist. Die erste, zweite und dritte Beugungsordnung konnten beobachtet werden. Das Kapitel hat den Charakter eines Ausblicks. Es soll aufzeigen, welches Potential der lasergekühlte Atomstrahl gegenüber Experimenten zur Bragg-Beugung mit thermischen Atomstrahlen [42, 43] und gespeicherten Ensembles [44] birgt. Die Arbeit schließt mit einer Bewertung der noch offenen Fragen der Polarisationsgradientenkühlung und einer Einschätzung der zukünftigen Perspektiven auf diesem Gebiet.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Reichel, F. Bardou, M. B. Dahan, E. Peik, S. Rand, C. Salomon, and C. Cohen-Tannoudji, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 4575 (1995).
- [2] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Science* **269**, 198 (1995).
- [3] K. B. Davies, M.-O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3969 (1995).
- [4] C. Bradley, C. Sackett, J. Tollet, and R. Hulet, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 1687 (1995).
- [5] H. Schnatz, B. Lipphardt, J. Helmcke, F. Riehle, and G. Zinner, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 18 (1996).
- [6] F. Ruschewitz, J. Peng, H. Hinderthür, N. Schaffrath, K. Sengstock, and W. Ertmer, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 3173 (1998).
- [7] M. Kasevich and S. Chu, *Appl. Phys. B* **54**, 321 (1992).
- [8] M. Snadden, J. McGuirk, P. Boyer, K. Haritos, and M. Kasevich, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 971 (1998).
- [9] A. Einstein, *Physik. Zeitschr.* **18**, 121 (1917).
- [10] R. Frisch, *Zeitschr. f. Phys.* **86**, 42 (1933).
- [11] D. Wineland and H. Dehmelt, *Bull. Am. Phys. Soc.* **20**, 637 (1975).
- [12] T. Hänsch and A. Schawlow, *Opt. Commun.* **13**, 68 (1975).
- [13] W. Phillips and H. Metcalf, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 596 (1982).
- [14] W. Ertmer, R. Blatt, J. Hall, and M. Zhu, *Phys. Rev. Lett.* **54**, 996 (1985).

- [15] D. Wineland and W. Itano, Phys. Rev. A **20**, 1521 (1979).
- [16] J. Dalibard and C. Cohen-Tannoudji, J. Opt. Soc. Am **6**, 2023 (1989).
- [17] H. Metcalf and P. van der Straten, Phys. Rep. **244**, 203 (1994).
- [18] Y. Castin, K. Berg-Sorensen, J. Dalibard, and K. Molmer, Phys. Rev. A **50**, 5092 (1994).
- [19] S. Marksteiner, K. Ellinger, and P. Zoller, Phys. Rev. A **53**, 3409 (1996).
- [20] Y. Castin and K. Molmer, Phys. Rev. Lett. **74**, 3772 (1995).
- [21] A. Aspect, E. Arimondo, R. Kaiser, N. Vansteenkiste, and C. Cohen-Tannoudji, Phys. Rev. Lett. **61**, 826 (1988).
- [22] M. Kasevich and S. Chu, Phys. Rev. Lett. **69**, 1741 (1992).
- [23] M.-O. Mewes, M. Andrews, D. Kurn, D. Durfee, C. Townsend, and W. Ketterle, Phys. Rev. Lett. **78**, 582 (1997).
- [24] G. Grynberg, B. Lounis, P. Verkerk, J.-Y. Courtois, and C. Salomon, Phys. Rev. Lett. **70**, 2249 (1993).
- [25] A. Hemmerich and T. Hänsch, Phys. Rev. Lett. **70**, 410 (1993).
- [26] A. Scholz, M. Christ, D. Doll, J. Ludwig, and W. Ertmer, Opt. Commun. **111**, 155 (1994).
- [27] M. Schiffer, M. Christ, G. Wokurka, and W. Ertmer, Opt. Commun. **134**, 423 (1997).
- [28] S. Kuppens, M. Rauner, M. Schiffer, K. Sengstock, W. Ertmer, F. E. van Dorselaer, and G. Nienhuis, akzeptiert zur Veröffentlichung in Phys. Rev. A.
- [29] F. van Dorselaer and G. Nienhuis, Eur. Phys. J. D **2**, 175 (1998).
- [30] J. D. Miller, R. A. Cline, and D. J. Heinzen, Phys. Rev. A **47**, R4567 (1993).
- [31] H. J. Lee, C. S. Adams, M. Kasevich, and S. Chu, Phys. Rev. Lett. **76**, 2658 (1996).
- [32] M. Schiffer, *Fokussieren und Kühlen neutraler Atome in starken Dipolpotentialen*, Dissertation, Universität Hannover, 1997.

- [33] M. Schiffer, M. Rauner, S. Kuppens, M. Zinner, S. Kuppens, and W. Ertmer, akzeptiert zur Veröffentlichung in Appl. Phys. B, 1998.
- [34] D. Boiron, A. Michaud, J. Fournier, L. Simard, M. Sprenger, G. Grynberg, and C. Salomon, Phys. Rev. A **57**, R4106 (1998).
- [35] P. van der Straten, S.-Q. Shang, B. Sheehy, H. Metcalf, and G. Nienhuis, Phys. Rev. A **47**, 4160 (1993).
- [36] J. Werner, H. Wallis, and W. Ertmer, Opt. Commun. **94**, 525 (1992).
- [37] M. Walhout, J. Dalibard, S. Rolston, and W. Phillips, J.Opt.Soc.Am. B **9**, 1997 (1992).
- [38] S.-Q. Shang, B. Sheehy, H. Metcalf, P. v.d. Straten, and G. Nienhuis, Phys. Rev. Lett. **67**, 1094 (1991).
- [39] C. Valentin, M.-C. Gagné, J. Yu, and P. Pillet, EuroPhys. Lett. **17**, 133 (1992).
- [40] M. Rauner, S. Kuppens, M. Schiffer, G. Birkl, K. Sengstock, and W. Ertmer, Phys. Rev. A **58**, R42 (1998).
- [41] C. Triché, F. Chevy, and G. Grynberg, Phys. Rev. A **58**, R38 (1998).
- [42] E. Rasel, M. Oberthaler, H. Batelaan, J. Schmiedmayer, and A. Zeilinger, Phys. Rev. Lett. **75**, 2633 (1995).
- [43] D. Giltner, R. McGowan, and S. A. Lee, Phys. Rev. Lett. **75**, 2638 (1995).
- [44] S. Kunze, S. Dürr, and G. Rempe, EuroPhys. Lett. **34**, 343 (1996).