

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Der Quantencomputer	7
1.1 Grundprinzipien der Quantenrechnung	8
1.2 Quantengatter	11
1.3 Systeme für die Realisierung eines Quantencomputers	12
1.4 Das kalte Gatter	16
1.5 Das vereinfachte Gatter	20
2 Die lineare elektrische Quadrupolfalle	23
2.1 Dynamische Speicherung geladener Teilchen	24
2.2 Axialer Einschluß	30
3 Die lineare Endkappenfalle	33
3.1 Anforderungen an eine lineare Ionenfalle	34
3.2 Die neue Fallengeometrie	35
3.2.1 Der radiale Einschluß in der linearen Endkappenfalle	38
3.2.2 Der axiale Einschluß in der linearen Endkappenfalle	47
3.2.3 Das Laden der Falle im Außensegment	51

4	Laserkühlung gespeicherter Ionen	53
4.1	Dopplerkühlung	53
4.2	Seitenbandkühlung	54
4.3	Raman-Seitenband-Kühlung	56
4.4	Kühlung in den Grundzustand für $\eta \geq 1$	60
5	Ionenkandidaten für den Quantencomputer	63
6	Der experimentelle Aufbau	69
6.1	Das Laser- und Vakuumsystem	69
6.2	Die Nachweisoptik	72
6.3	Der Aufbau der linearen Ionenfalle	74
6.4	Die Fallenelektronik	77
6.5	Die Ionenerzeugung	80
7	Experimente mit der linearen Endkappenfalle	83
7.1	Charakterisierung der Ionenfalle	86
7.1.1	Der Stabilitätsbereich	86
7.1.2	Die Schwingungsfrequenzen der Ionen in der Falle	88
7.1.3	Der Einfluß der Fallenelektroden auf die Speicherung	93
7.2	Erzeugung von stabilen Ionenkristallen	96
7.3	Kompensation der Mikrobewegung	102
Anhang		119
A.1	Finite Differenzen Methode	120
A.2	Physikalische Eigenschaften der verwendeten Materialien	126
A.3	Ionenkandidaten für den Quantencomputer	127
A.4	Magnesium	128
Literaturverzeichnis		130

Einleitung

Mit der Entwicklung der Quantenmechanik in den zwanziger Jahren ergab sich erstmals die Möglichkeit, Phänomene der mikroskopischen Welt sehr genau zu beschreiben. Die Energiezustände von Atomen, das Verhalten der Atome als Welle oder Teilchen sind nur einige Punkte, über die uns die Quantenphysik Auskunft gibt. Die Quantenelektrodynamik (QED), die die Maxwell-Theorie der elektromagnetischen Felder und die Quantenmechanik vereint, erlaubt die Beschreibung der Wechselwirkung von Licht und Materie, die seit einigen Jahren einen der Schwerpunkte der Grundlagenforschung darstellt.

Die Entwicklung der ersten Ionenkäfge durch W. Paul [1] in den fünfziger Jahren schuf die Voraussetzung, einzelne Atome für längere Zeit zu speichern und nahezu störungsfrei zu untersuchen. Der Bereich der optischen Spektroskopie wurde in der Folgezeit durch den Einsatz durchstimmbarer Farbstofflaser zur Anregung der gespeicherten Ionen erschlossen. Mitte der siebziger Jahre wurde von Wine-land und Dehmelt die Laserkühlung von Ionen vorgeschlagen. 1978 wurde diese Laserkühlung erstmals an einem Ensemble gespeicherter Ionen [2, 3], kurz darauf an einem einzelnen Ion realisiert [4]. Typische Temperaturen, die mit der Laserkühlung erzielt werden, liegen im Millikelvin-Bereich. Noch tiefere Temperaturen können mit Hilfe der Seitenbandkühlung erreicht werden. Die Ionen können damit in den Grundzustand der Bewegung im Fallenpotential gekühlt werden [5–7]. Ein einzelnes, so nahezu ruhendes Ion, das frei von äußeren Störungen ist, stellt ein ideales System dar, um die Wechselwirkung von Licht und Materie zu studieren. Die Beobachtung der Resonanzfluoreszenz eines einzelnen Ions

zeigt beispielsweise den nichtklassischen Charakter des emittierten Lichts (Anti-bunching) [8], das Mollow-Triplett bei starker Anregungsintensität [9], sowie die Kohärenz der elastischen Komponente zum anregenden Lichtfeld [10]. In anderen Experimenten konnten erstmals Quantensprünge nachgewiesen werden [11].

Ein weiterer Schwerpunkt wissenschaftlicher Aktivität ist die Entwicklung eines optischen Frequenzstandards, der um drei Größenordnungen genauer (Unsicherheit 10^{-18}) ist als der aktuelle Cäsium-Standard. Grundlage der höheren Genauigkeit ist die gegenüber dem Mikrowellenstandard um fünf Größenordnungen höhere Frequenz des optischen Übergangs. Dies bringt bei einer vorgegebenen Meßzeit eine entsprechend höhere Liniengüte $\nu/\delta\nu$.

Ein einzelnes Ion im Grundzustand des harmonischen Fallenpotentials ermöglicht das Studium von Quanteneffekten bezüglich des externen Freiheitsgrades des Ions. In einem solchen System können nichtklassische Bewegungszustände, wie Fockzustände oder gequetschte ("squeezed") Zustände erzeugt werden [12]. Durch den Einsatz von Resonatoren mit hohen Kopplungsstärken können Resonator-QED-Effekte untersucht werden, wie z.B. die Veränderung der spontanen Zerfallsrate eines optischen Übergangs oder die Veränderung der Lamb-Verschiebung von atomaren Energieniveaus.

Neue Phänomene von grundlegendem Interesse werden in Systemen erwartet, die aus zwei oder mehreren, kalten Ionen bestehen. In einer Paulfalle können zwar mehrere Ionen gespeichert und durch Laserkühlung in einen kristallinen Zustand übergeführt werden, dennoch kann die kinetische Energie der Ionen in dem Kristall sehr groß sein. Die Ursache liegt in der Geometrie des oszillierenden Speicherfeldes. Es existiert lediglich ein einziger Punkt, das Fallenzentrum, an dem das Rf-Feld verschwindet. Befinden sich mehrere Ionen in der Paulfalle, dann drängen sie sich durch die Coulomb-Abstoßung aus dem Fallenzentrum heraus. Unter dem Einfluß des Wechselfeldes führen die Ionen eine Oszillationsbewegung aus, die sogenannte Mikrobewegung, die zu einer unerwünschten Frequenzmodulation und einer Linienverbreiterung bzw. Verschiebung führen kann. Einen Ausweg bieten die linearen oder ringförmigen Ionenfallen. Sie sind aus

dem Quadrupol-Massenfilter hervorgegangen, bei dem das Ion in radialer Richtung durch ein Rf-Feld eingeschlossen ist, sich aber in Richtung der Achse feldfrei bewegen kann. In einer linearen Ionenfalle können entlang dieser Achse mehrere Ionen mit verschwindender Mikrobewegung in Form einer linearen Kette gespeichert werden.

Die Meßunsicherheit bei spektroskopischen Untersuchungen schmaler Linien kann sowohl durch eine längere Beobachtungszeit, als auch durch die unabhängige Beobachtung von N unkorrelierten Ionen verkleinert werden. Wird die Untersuchung mit Hilfe der Ramsey-Methode getrennter Felder durchgeführt, dann ist die Frequenzunsicherheit des Übergangs proportional zu $1/\sqrt{N \cdot T_R}$, mit der Ramsey-Abfragezeit T_R . Dies ist speziell für den Frequenzstandard von Vorteil.

Eine lineare Ionenfalle kann auch für niederenergetische Stoßexperimente verwendet werden. Durch Unterteilung der Ionenfalle in verschiedene Segmente, die durch zusätzliches Anlegen von Spannungen auf bestimmte Potentiale gesetzt werden können, ist es möglich, die Stoßenergien zu kontrollieren [13].

Im Jahre 1985 wurde von Deutsch [14] der Begriff des Quantenparallelrechners eingeführt. Deutsch zeigte, daß ein Computer, dessen Logik die Gesetze der Quantenmechanik ausnutzt, einige Probleme viel effizienter behandeln kann als ein klassischer Computer. Der Shor-Algorithmus (1994) [15, 16] für die Primfaktorzerlegung von großen Zahlen ist das erste Problem von praktischer Relevanz, das die Überlegenheit eines Quantenrechners zeigt. Im Gegensatz zum klassischen Computer kann der Zustand des Registers eines Quantenrechners aus einer Überlagerung von vielen Zahlen bestehen, die dann in einem einzigen Rechengang in eine Überlagerung der entsprechenden Endzustände übergeführt wird. Voraussetzung für die Realisierung eines Quantenrechners ist ein Ensemble von N quantenmechanischen Zwei-Niveausystemen (Qubits), die in eine kohärente Superposition der beiden Zustände gebracht werden können und deren Kohärenz während der Quantenrechnung aufrecht erhalten werden kann. Einer der vielversprechendsten Kandidaten für den Quantencomputer ist nach Cirac und Zoller (1995) ein System aus mehreren Ionen (Quantenregister) in einer linearen Ionenfalle, das

durch die geringe Wechselwirkung mit der Umgebung sehr lange Dekohärenzzeiten aufweist. Alle Operationen des Quantenrechners basieren auf zwei Typen von logischen Gattern, dem kontrollierten-NOT-Gatter (2 bit, CNOT-Gatter) und einem Gatter zur Rotation eines einzelnen Bits, mit denen jede Quantenoperation durchgeführt werden kann. In der Gruppe von D. Wineland wurde erst kürzlich ein CNOT-Gatter zwischen dem internen Zustand eines einzelnen Ions (Qubit 1) und einer Schwingungsmode ($n = 0, n = 1$) der Falle (Qubit 2) realisiert. In einer linearen Ionenfalle kann ein CNOT-Gatter zwischen zwei beliebigen Ionen unter Ausnutzung der Coulomb-Wechselwirkung erzeugt werden. Da in einer linearen Ionenfalle die Größe des Quantenregisters nur durch die Anzahl der Ionen in der Falle begrenzt ist, sind in diesem System auch komplexe Rechenoperationen möglich. Allerdings scheint es beim jetzigen Stand der Technik extrem schwierig, Probleme zu behandeln, die groß genug sind, um die Vorteile des Quantencomputers gegenüber dem klassischen Computer zur Geltung zu bringen. Speziell die Dekohärenz limitiert die Größe des Systems, selbst wenn man versucht durch Fehler-Korrektur-Verfahren dieser Dekohärenz entgegenzuwirken.

Eine Besonderheit des CNOT-Gatters besteht darin, daß man mit ihm verschränkte quantenmechanische Zustände erzeugen kann. Zwei zusammengesetzte Systeme nennt man verschränkt, wenn man den Gesamtzustand des Systems nicht als direktes Produkt der Einzelzustände schreiben kann. Solch ein verschränktes System hat kein klassisches Analogon und zeigt daher reinen quantenmechanischen Charakter. Von speziellem Interesse sind maximal verschränkte Zustände zwischen zwei oder mehreren Teilchen, bei denen die Zustandsmessung eines Teilchens die Zustände aller anderen Teilchen bestimmt. Als Beispiel für den Fall zweier Teilchen sind die EPR- oder Bell-Zustände [17, 18] zu erwähnen. Greenberger, Horne, Zeilinger (GHZ) [19] und später Mermin [20, 21] konnten zeigen, daß es mit Hilfe von drei oder mehreren maximal verschränkten Zuständen möglich ist, einen direkten Beweis gegen die lokale Realismusannahme von Einstein, Podolsky und Rosen zu führen, im Gegensatz zum Zweiteilchen EPR-Experiment. Die Verletzung des lokalen Realismus kann mit den GHZ-Zuständen nämlich in

einer einzelnen Messung gezeigt werden, während die Verletzung der Bell'schen Ungleichungen beim EPR-Experiment sich erst in einer statistischen Mittelung über mehrere Experimente zeigt. In den bisherigen EPR-Experimenten wurden verschränkte Photonen verwendet, die durch spontane Prozesse oder durch parametrische "down-conversion" in einem nichtlinearen Medium erzeugt wurden. In einer linearen Ionenfalle ist es dagegen erstmals möglich, massive Teilchen miteinander in definierter Weise zu verschränken und als EPR-Paare oder als GHZ-Systeme zu verwenden. Nach einem Vorschlag von Briegel et al. [22] können zwei Ionen an weit entfernten Positionen, die jeweils von einem Resonator hoher Güte umgeben sind, über den Austausch von Photonen verschränkt werden. Die Verschränkung von Teilchen erlaubt das detaillierte Studium des Meßprozesses und der Dekohärenz von Quantensystemen [23].

Verschränkte Zustände sind weiterhin von großer Bedeutung für die Teleportation von Quantenzuständen [24, 25] sowie für die Quantenkryptographie [26, 27]. Auch in der Spektroskopie finden verschränkte Zustände Anwendung. In theoretischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß die Frequenzunsicherheit eines optischen Übergangs bei einem maximal verschränkten Zustand zwischen N Ionen mit $1/\sqrt{N^2 \cdot T_R}$ skaliert, was gegenüber dem unkorrelierten Fall einen Gewinn an Genauigkeit um den Faktor \sqrt{N} bedeutet [28, 29].

Im Rahmen dieser Promotion wurde eine neuartige miniaturisierte lineare Ionenfalle entwickelt, die es ermöglichen soll, mehrere Ionen in den Bewegungsgrundzustand zu kühlen, um Quantengatteroperationen zwischen zwei oder mehreren Ionen durchführen und verschränkte Zustände erzeugen zu können. Die Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Im ersten Kapitel werden die wichtigsten Begriffe zum Quantencomputer eingeführt und die verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten beschrieben. Während im zweiten Kapitel die allgemeine Theorie der Speicherung von Teilchen in einer linearen Ionenfalle vorgestellt wird, stellt das dritte Kapitel die numerischen Potentialberechnungen zur neuen linearen Endkappenfalle vor. Die neue Falle erlaubt eine starke Bindung der Ionen in allen drei Dimensionen und bietet einen großen Raumwinkel zur Beobachtung der Ionen. Im

nächsten Kapitel werden die verschiedenen Kühlmethoden erläutert. Das fünfte Kapitel behandelt die Vor- und Nachteile einiger Ionenkandidaten für die Realisierung eines Quantencomputers. Eine detaillierte Beschreibung des experimentellen Aufbaus ist Hauptbestandteil des sechsten Kapitels. Im siebten Kapitel werden die Experimente mit der Endkappenfalle vorgestellt. Schwerpunkte sind dabei die Erzeugung von stabilen Ionenkristallen und die Kompensation der Mikrobewegung in allen drei Dimensionen.