

# 7 Zusammenfassung

Den Schwerpunkt der Arbeit bilden phasenempfindliche mikrowellen- und optisch-spektroskopische Messungen an einem lokalisierten Ytterbium-Ion.

Die bestmögliche spektrale Auflösung erfordert eine sorgfältige Präparation des Ions: Das Ion wurde im Hochvakuum in einer miniaturisierten Paul-Falle gespeichert. Durch optische Kühlung auf der Resonanzlinie  $^2S_{1/2} \leftrightarrow ^2P_{1/2}$  wurde die Bewegungsenergie des Ions bis zur Doppler-Grenze reduziert. Dies entspricht einer Temperatur von etwa 1mK. Anregungsspektren der Resonanz  $^2D_{3/2} \leftrightarrow [1/2]_{1/2}$  bei 609nm erlauben den empfindlichen Nachweis der durch das Fallenfeld angetriebenen Mikrobewegung. So wird es möglich, das Ion mit Hilfe eines Gleichspannungsfeldes mit einer Unsicherheit von wenigen nm in das elektrische Fallenzentrum zu schieben. Das so präparierte einzelne Ion ist nahezu bewegungslos und steht für praktisch unbegrenzte Dauer für Messungen zur Verfügung.

An der Hyperfeinstruktur des Grundzustandes eines einzelnen  $^{171}\text{Yb}^+$ -Ions wurde mikrowellen-optische Doppelresonanzspektroskopie durchgeführt: In Analogie zu Ramseys Methode der räumlich getrennten Felder wurde der Übergang  $|^2S_{1/2}, F=0, m_F=0\rangle \leftrightarrow |^2S_{1/2}, F=1, m_F=0\rangle$  durch zeitlich getrennte Paare von Mikrowellenpulsen angeregt. Erfolgreiche Anregungen wurden durch Beobachtung der auf der Resonanzlinie  $|^2S_{1/2}, F=1\rangle \leftrightarrow |^2P_{1/2}, F=0\rangle$  angeregten Fluoreszenz nachgewiesen. Bei Summation über viele Anregungs- und Nachweiszyklen zeigt die Resonanzfluoreszenz in Abhängigkeit von der Mikrowellenfrequenz Ramsey-Streifen. Der schmalste an einem einzelnen Ion aufgezeichnete Streifen hat die volle Halbwertsbreite 5Hz bei dem Signal-zu-Rauschen-Verhältnis 8,7. Dies ist die schmalste Resonanz, die bisher an einem einzelnen atomaren Teilchen vermessen wurde.

Übergänge zwischen den Hyperfeinniveaus des Grundzustandes werden mit gleicher Wahrscheinlichkeit durch den ersten oder zweiten Mikrowellenimpuls induziert. Die entsprechenden Wahrscheinlichkeitsamplituden interferieren. Das realisierte Wechselwirkungsschema wird als Mach-Zehnder-Interferometer im Konfigurationsraum interpretiert. Da der Mikrowellenübergang ein magnetischer Dipolübergang ist, entspricht der Konfigurationsraum gerade dem Ortsraum. Die Mikrowellenpulse

entsprechen den Strahlteilern und die verschiedenen Ausbreitungsrichtungen der Wellen entsprechen verschiedenen Neigungswinkeln des magnetischen Momentes des Ions gegen die Magnetfeldrichtung. Die „Arme“ des Interferometers sind gekennzeichnet durch die Quantenzahlen  $F=0$  und  $F=1$  der beiden Grundzustandskomponenten.

Durch kurzzeitige Änderung des angelegten Magnetfeldes zwischen den Mikrowellenpulsen wurde eine entgegengesetzt gleich große Phasenverschiebung der Larmor-Präzession für die obere und untere Hyperfeinstrukturkomponente der Grundzustandswellenfunktion induziert. Die resultierende Phasenverschiebung der Ramsey-Streifen zeigt eine enge Analogie zum skalaren Aharonov-Bohm-Effekt.

Im semiklassischen Grenzfall gehen die Matrixelemente gegen den mikrokanonischen Mittelwert. In diesem Sinne stellt die Übereinstimmung der gemessenen Phasenverschiebungen für ein einzelnes Ion und eine Gesamtheit von etwa 30 Ionen eine experimentelle Bestätigung der quantenmechanischen Variante der Ergodenhypothese dar.

Periodisch mit der Verstimmung des Mikrowellenfeldes ist das Ergebnis eines Anregungsversuches vorbestimmt oder mit maximaler Unsicherheit behaftet. Den am einzelnen Ion gemessenen Ramsey-Streifen ist dementsprechend Projektionsrauschen mit periodisch veränderter Amplitude überlagert: Maximales Projektionsrauschen auf den Flanken der Streifen, minimales bei den Extrema. Da die Streifen aufgrund des schwachen Fluoreszenzsignals eines einzelnen  $^{171}\text{Yb}^+$ -Ions durch Mittelung über viele Anregungs- und Nachweiszyklen entstehen, ist das Projektionsrauschen nur schwach.

Das im Termschema  $\Lambda$ -förmig angeordnete System  $|^2\text{S}_{1/2} \leftrightarrow|^2\text{P}_{1/2} \leftrightarrow|^2\text{D}_{3/2}$  eines  $^{174}\text{Yb}^+$ -Ions wurde durch Laserlichtfelder der Wellenlängen 369nm und 2,4 $\mu\text{m}$  angetrieben. In einem Anregungsspektrum bei 2,4 $\mu\text{m}$  wurden die Zeeman-Komponenten der Dunkelresonanz aufgelöst.

Auf das im Termschema V-förmig angeordnete System  $|^2\text{P}_{1/2} \leftrightarrow|^2\text{S}_{1/2} \leftrightarrow|^2\text{D}_{5/2}$  wurde die Methode der opto-optischen Doppelresonanz angewendet. Die Anregung des E2-Übergangs  $|^2\text{S}_{1/2} \leftrightarrow|^2\text{D}_{5/2}$  erfordert ein besonders schmalbandiges Laserlichtfeld bei 411nm.

Das Lichtfeld eines Diodenlasers bei 822nm wurde nach dem Holberg-Verfahren frequenzstabilisiert und in einem Überhöhungsresonator mit Ringkonfiguration frequenzverdoppelt. Bei der Eingangsleistung 56mW hat das frequenzverdoppelte Lichtfeld die maximale Ausgangsleistung 340 $\mu$ W. Die Bandbreite beträgt bei der Meßdauer 2ms maximal 500Hz.

Bei Anregung der E2-Resonanz erfolgt optisches Pumpen in das langlebige Niveau  $^2F_{7/2}$ . Die Entleerung des F-Zustandes erfolgte mit dem Lichtfeld eines durch optische Rückkopplung von einem Gitter frequenzstabilisierten Diodenlasers der Wellenlänge 638nm. Das Ion wird innerhalb weniger Millisekunden über das Niveau  $[5/2]_{5/2}$  in den Anregungszyklus zurück gepumpt.

Einzelne Absorptionsakte des Ions auf dem E2-Übergang wurden nach dem Prinzip der Quantenverstärkung nachgewiesen. Im Gegensatz zu Messungen an atomaren Gesamtheiten liefert dieses Verfahren vollständige Information über die Besetzung eines einzelnen quantenmechanischen Systems; die Messung ist selektiv.

Die Häufigkeit der Absorptionsakte für verschiedene Verstimmungen ergibt das Absorptionsspektrum. Die Zeeman-Aufspaltung der E2-Resonanz im angelegten Magnetfeld wurde im Spektrum aufgelöst.

Das Spektrum einer einzelnen Zeeman-Resonanz zeigt Seitenbänder, die durch die harmonische Schwingung des Ions im Fallenpotential verursacht werden. Das Ion befindet sich bezüglich des E2-Übergangs im Bereich der starken Speicherung. Die spektrale Auflösung der Säkularbewegungsseitenbänder ist die Voraussetzung für die gezielte Manipulation der Schwingungsquantenzahl der Schwerpunktsbewegung des Ions durch Anregung des E2-Übergangs auf einem Seitenband. So wird zukünftig Seitenbandkühlung möglich, mit der die quantisierte Schwingung des Ions in den nullten Oszillatorzustand gebracht werden kann.

Anregungsspektren bei 411nm zeigen eine durch Rabi-Oszillationen auf dem E2-Übergang verursachte Streifenstruktur. Dies zeigt, daß erstmals ein optischer Übergang in einem einzelnen Atom kohärent angeregt wurde. Bestätigt wird dies durch Absorptionswahrscheinlichkeiten größer als 1/2, die bei der Wechselwirkung des Lichtfeldes mit der E2-Resonanz auftreten.

Im Spektrum einer einzelnen Zeeman-Komponente des E2-Übergangs wurde erstmals für einen optischen Übergang Projektionsrauschen nachgewiesen. Da das Spektrum aus einzelnen, selektiven Messungen ermittelt wurde, hat das Projektionsrauschen im Vergleich zu den Mikrowellenspektren die maximal mögliche Amplitude.