

# Kapitel 1

## Einleitung

Seit R. W. Bunsen und G. R. Kirchhoff in den Jahren 1859/60 die Spektralanalyse entwickelten, ist diese Methode aus den Naturwissenschaften nicht mehr wegzudenken. So fand der Chemiker Bunsen mit dieser Methode die neuen Elemente Cäsium und Rubidium und dem Physiker Kirchhoff gelang es, damit die Fraunhoferschen Linien des Sonnenspektrums als Absorptionslinien verschiedener Elemente zu erklären.

Heute ist die Spektralanalyse oder Spektroskopie ein Standardverfahren in Physik, Chemie, Astronomie und Geowissenschaften, das es gestattet mit geringem Aufwand schnelle und präzise Messungen der Zusammensetzung von Flüssigkeiten, Gasen und Festkörpern zu erhalten. So ist es der modernen Astronomie möglich, genaue Angaben über Temperatur, Zusammensetzung und sogar — mit Hilfe des Dopplereffektes — Geschwindigkeit entfernter Objekte zu machen. Luftmeßstationen können auf spektroskopischem Wege Schadstoffkonzentrationen messen und deren Entwicklung über lange Zeit verfolgen. Mit Spektrometern ausgestattete Satelliten ermöglichen es, Aussagen über die globale Verteilung von Ozon und Treibhausgasen zu machen.

Die Anwendbarkeit spektroskopischer Methoden erstreckt sich über einen weiten Bereich von Wellenlängen. So finden für spektroskopische Untersuchungen Radiowellen mit Wellenlängen von mehreren Metern bis zu harten Röntgenstrahlen ihre Anwendung. Erstere eignen sich in der Astronomie zur Vermessung weit entfernter Galaxien, letztere werden zur Untersuchung von Kernanregungen verwendet.

In Jahrzehnten der Anwendung wurde die Empfindlichkeit spektroskopischer Verfahren ständig verbessert. Unter der Empfindlichkeit versteht man die geringste Konzentration eines Stoffes, die gerade noch mit dem Verfahren aufgespürt werden kann. Die unterste mögliche Grenze hierfür ist die geringste Einheit eines Stoffes, die überhaupt existieren kann — ein einzelnes Atom.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten einzelne Atome zur spektroskopischen Untersuchung zu präparieren. So können einzelne Atome oder Moleküle in einer hochverdünnten Lösung untersucht werden, in der mit einer gewissen Wahr-

scheinlichkeit genau eines der zu untersuchenden Atome im bestrahlten Volumen enthalten ist. Die Untersuchung kann an einem dünnen Atomstrahl senkrecht zur Flugbahn erfolgen, oder ein einzelnes Atom wird an einem Ort präpariert und während der Beobachtung festgehalten.

Eine Möglichkeit zum Festhalten eines einzelnen geladenen Teilchens ist der Paul-Käfig. Dieser basiert auf einem von W. Paul [Pau 58] vorgeschlagenen Verfahren, mit dem es möglich ist geladene Teilchen mit Hilfe eines elektrischen Feldes festzuhalten. In einem Käfig gespeicherte Teilchen können gekühlt werden, indem sie mit einem zu niedrigen Energien verstimmtten Lichtfeld bestrahlt werden [Hän 75, Neu 78, Win 78]. Mit dieser Methode, der optischen Kühlung, ist es möglich die Teilchen soweit abzukühlen, daß sie bewegungslos im Zentrum der Falle verharren. Die Speicherung eines einzelnen Barium-Ions in einem Paul-Käfig gelang erstmals 1980 [Neu 80].

Gegenüber der Untersuchung von Atomen in Lösung haben die beiden anderen Verfahren den Vorteil, daß die Teilchen im verdünnten Atomstrahl bzw. in dem Käfig keinen Stößen mit anderen Teilchen ausgesetzt sind. Außerdem tritt keine inhomogene Verbreiterung der untersuchten Spektrallinien durch Bewegung der Teilchen in Richtung der Propagation des Lichts auf. Diese Dopplerverbreiterung kann zwar in Lösung durch verschiedene Verfahren der dopplerfreien Spektroskopie unterdrückt werden, die Stoßverbreiterung ist jedoch nicht zu vermeiden.

Bei der Untersuchung eines Atoms im Atomstrahl sind keine beliebig langen Wechselwirkungszeiten erreichbar. Um das Atom dopplerfrei beobachten zu können ist die Einstrahlung der Lichtfelder senkrecht zum Atomstrahl notwendig. Die Wechselwirkungszeit wird so auf die Zeit begrenzt, die ein Atom benötigt um den Durchmesser des Lichtstrahls zurückzulegen. Bei einem im Käfig gespeicherten Teilchen kann die Wechselwirkungszeit dagegen nahezu beliebig eingestellt werden. Die Intensität des Lichtfeldes läßt sich hier steigern, indem der Fokus verkleinert wird. In einem Atomstrahl kann das Lichtfeld nur in einer Raumrichtung fokussiert werden. In Flugrichtung der Atome würde eine Fokussierung des Lichtbündels zur Verringerung der Wechselwirkungszeit führen.

Ziel dieser Arbeit soll es nun sein, die Möglichkeiten der Absorptionsspektroskopie am einzelnen, in einem Ionenkäfig gespeicherten Bariumion zu untersuchen. An einer Wolke weniger Bariumionen wurden die beiden in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren bereits 1986 von J. Bialas durchgeführt [Bia 86]. Mit einem ähnlichen Verfahren wurde 1987 von D. J. Wineland die Absorption eines einzelnen Quecksilberions nachgewiesen [Win 87].

In Kapitel 2 sollen zunächst die Verfahren der Absorptionsspektroskopie vorgestellt werden. Kapitel 3 stellt die wichtigsten Eigenschaften des Versuchsobjekts zusammen. Im vierten Kapitel werden theoretische Modelle für die Wechselwirkung von Licht mit dem Ion behandelt. Zunächst wird hier das Verfahren der optischen Kühlung erklärt, dann werden die optischen Blochgleichungen eingeführt und schrittweise an das zu lösende Problem angepaßt. Das Ziel dieses

Kapitels ist es die Signalformen, die mit den Verfahren zu erwarten sind zu berechnen. Im fünften Kapitel werden die verwendeten Apparaturen dargestellt, mit denen die in Kapitel 6 beschriebenen Experimente durchgeführt wurden. Im sechsten Kapitel wird ein Experiment zur Modulationstransferspektroskopie erläutert und die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.