

# Stabilitätsprobleme in der Atomphysik

Rainer Müller, TU Braunschweig

Die Genese der modernen Atomtheorie ist oft erzählt worden (vgl. z. B. [1]), und diesen vielen Erzählungen soll hier nicht noch eine weitere hinzugefügt werden. Aber es ist bemerkenswert, dass ein Stabilitätsproblem am Anfang der heutigen Vorstellung vom Atom stand und dass sich die Spuren dieses Problems durch die Quantenmechanik bis zur modernen Quantenelektrodynamik verfolgen lassen.

## Das Atommodell von J. J. Thomson

Nach der Entdeckung des Elektrons durch J. J. Thomson im Jahr 1897 und seiner Erkenntnis, dass es dabei sich um einen Bestandteil der Atome handelte, stellte sich die Frage nach dem inneren Aufbau der Atome. Obwohl die Fruchtbarkeit und die Erfolgsaussichten für eine derartige Fragestellung von der damaligen Wissenschaftlergemeinschaft mit Skepsis betrachtet wurden, machte sich Thomson selbst ans Werk und konstruierte 1904 ein Modell für die innere Struktur der Atome.

In seinem (mehrfach revidierten) Modell befinden sich die negativ geladenen Elektronen innerhalb einer masselosen positiven Hintergrundladung. Thomson nahm an, dass sich die Elektronen in konzentrischen Ringen um den (leeren) Mittelpunkt der positiven Ladungskugel anordnen (vgl. z. B. [2]). Er konnte zeigen, dass diese konzentrischen Elektronenringe stabil sind, solange sie sich nicht bewegen (vgl. [3]).

Ein Ring kann nur eine begrenzte Zahl von Elektronen aufnehmen, ohne seine Stabilität zu verlieren. Atome mit vielen Elektronen besitzen deshalb mehrere Ringe. Die Verteilung der Elektronen über die Ringe wird folgendermaßen bestimmt: Mit wachsender Elektronenzahl (und Ladungszahl der Kugel) wird zuerst der äußerste Ring aufgefüllt, bis die Konfiguration instabil wird. In diesem Fall erhält der zweitäußerste Ring ein Elektron. Daraufhin ist es möglich, dem äußersten Ring weitere Elektronen hinzuzufügen. Auf solche Weise werden die Elektronen von außen nach innen verteilt.

In diesem Modell untersuchte Thomson die Schwingungen der Elektronen um ihre Gleichgewichtslage, wobei er sowohl Auslenkungen in der Ringebene als auch dazu senkrechte betrachtete. Er fand, dass harmonische Schwingungen mit bestimmten, wohldefinierten Eigenfrequenzen möglich sind, die von der Elektronenzahl abhängen. Wegen der damit verbundenen Emission von monochromatischer Strahlung mit diesen Frequenzen lieferte das Thomsonsche Atommodell eine qualitative Erklärung für den Ursprung der diskreten Struktur der Atomspektren. Eine quantitative Übereinstimmung ergab sich jedoch nicht. Bemerkenswert ist, dass es wie später bei Schrödingers Eigenschwingungen sind, die zu den diskreten Spektrallinien führen – wenn auch vor völlig anderem begrifflichen und theoretischen Hintergrund.

Thomson war mit seinem Modell nicht völlig zufrieden. Er hätte in sein Modell gerne eine Rotation der Elektronenringe im Atom integriert. Grund dafür war, dass er auf diese Weise eine Erklärung für die magnetischen Eigenschaften der Stoffe hätte geben können [4]. Es war bekannt, dass bewegte Ladungen ein Magnetfeld hervorrufen, und schon Ampère hatte spekuliert, dass der Magnetismus durch bewegte Ladungen erzeugt sein könnte. Diese vermutete Rotationsbewegung der Elektronen führt jedoch zu einem Instabilitätsproblem – dem gleichen, das später Rutherford's Modell zu schaffen machte: beschleunigte Ladungen senden elektromagnetische Strahlung ab.

## Die Instabilität des Rutherford-Modells

Thomsons Modell wurde hier so ausführlich besprochen, um herauszustellen, wie intensiv er sich mit Fragen der Stabilität beschäftigt hat. Trotz seiner theoretischen Eleganz musste es schon bald durch den Mangel an Übereinstimmung mit den experimentellen Daten verworfen werden. Rutherford hatte bei seinen Streuversuchen mit  $\alpha$ -Teilchen Hinweise auf ein nahezu punktförmiges Streuzentrum im Atom gefunden und in Folge dessen den Atomkern in die Physik eingeführt. Rutherfords Atommodell von 1911 erinnert an ein Sonnensystem im kleinen Maßstab: Elektronen umgeben den Atomkern wie die Planeten die Sonne.

Rutherford stellte sich die Elektronen statistisch um den Kern verteilt vor. Die Frage, ob ein solches Modell auch stabil sei, stand für ihn zunächst nicht im Vordergrund. Genau hier liegt aber die grundlegende Problematik des Rutherford-Modells: Es ist inhärent instabil. Der Grund liegt in den Gesetzen der klassischen Elektrodynamik begründet.

Ein statisches Rutherford-Atommodell ist ebenso wenig stabil wie es ein statisches Sonnensystem wäre. Daher müssen sich die Elektronen um den Kern bewegen, wobei sie notwendig eine beschleunigte Bewegung ausführen. Beschleunigte Ladungen strahlen aber elektromagnetische Wellen ab. Die Strahlungsleistung ist durch die Larmorsche Formel gegeben:

$$P = \frac{e^2 \cdot v^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}.$$

Nach dem Energiesatz muss mit der Abstrahlung ein Energieverlust des Elektrons verbunden sein. Es erfährt eine abbremsende Kraft, die sogenannte Strahlungsrückwirkungskraft. Sie führt dazu, dass im Rutherfordschen Atommodell das Elektron nach sehr kurzer Zeit auf Spiralbahnen in den Atomkern stürzt.

## Bohr und Schrödinger

Man kann nicht sagen, dass Bohr mit seinem Atommodell das Stabilitätsproblem löste. Eher beseitigte er es in einem Handstreich: Er postulierte, dass sich das Elektron im Rutherfordschen Modell nur auf bestimmten diskreten Bahnen bewegen kann, die stationär genannt werden. Auf diesen stationären Bahnen strahlt das Elektron keine Energie ab. Das Stabilitätsproblem wird auf diese Weise durch ein Postulat umgangen.

Die Rechtfertigung für Bohrs Vorgehensweise konnte natürlich nur aus dem Experiment kommen. Mit Bohrs Modell des Wasserstoffatoms konnte man die Lage der Linien in der Balmer-Serie beschreiben. Vor allem ließ sich die Rydberg-Konstante, die als empirisch gefundener Zahlenwert in der Balmer-Formel vorkam, auf fundamentale Konstanten zurückführen:  $R = 2 \pi m e^4 / h^3$ .

Der Triumph des Bohrschen Modells wurde dadurch erkauft, dass man die Grundlagen der klassischen Mechanik und Elektrodynamik außer Kraft setzte. Für Bohr war das ein bewusster Schritt. Er gibt keinen Versuch einer Begründung seines Modells auf der Grundlage der klassischen Physik, „weil dies hoffnungslos erscheint“.

Die endgültige Abkehr von der klassischen Physik kam dann mit der Formulierung der Quantenmechanik durch Heisenberg, Schrödinger und andere. In der Schrödinger-Formulierung der Quantenmechanik werden Elektronen durch eine komplexwertige Wellenfunktion beschrieben. Die stationäre Schrödingergleichung hat die Gestalt einer Eigenwertgleichung für die Wellenfunktion – ähnlich wie bei einer schwingenden Saite oder Membran. Die Lösung dieser Eigenwertgleichung liefert die stationären Zustände Bohrs – Zustände in denen die Elektronen nicht strahlen. Erst beim Übergang zwischen zwei Zuständen wird ein Photon emittiert.

## Vakuumfluktuationen und Strahlungsrückwirkung

So weit die offizielle Geschichte. Die Frage nach der Stabilität der Atome in der Quantenphysik birgt jedoch mehr Subtilitäten als man nach der üblichen Darstellung meinen möchte. Man könnte annehmen, dass das Problem erledigt ist, wenn die Lösungen der Schrödingergleichung gefunden sind. Die Existenz eines Grundzustands (des stationären Zustands mit der niedrigsten Energie) sollte die Stabilität des Atoms garantieren.

Beim Übergang von Rutherford zu Schrödinger haben wir allerdings die Spielregeln geändert. Die Instabilität des Rutherford-Atoms zeigte sich nämlich erst, wenn man berücksichtigt, dass das beschleunigte Elektron elektromagnetische Wellen abstrahlt und infolgedessen Energie verliert. Der entscheidende Punkt ist also die Kopplung an das elektromagnetische Feld.

Genau diese Wechselwirkung wird jedoch bei der üblichen Behandlung des Wasserstoff-Atoms, wie sie in jedem Lehrbuch der Quantenmechanik steht, vernachlässigt. Das so beschriebene Atom kann also gar nicht strahlen; das Problem ist unvollständig gelöst. Dieser Feststellung entspricht, dass sich bei dem Zugang ein Zuviel an Stabilität ergibt: Nicht nur der Grundzustand, sondern auch alle angeregten Zustände werden für stabil befunden.

Man muss also die erweiterte Problemstellung betrachten, dass das Atom zusätzlich zum Coulomb-Feld des Kerns mit dem elektromagnetischen Strahlungsfeld wechselwirkt. Mit dieser zusätzlichen Kopplung wird die Stabilität des Grundzustandes wieder zur offenen Frage. Es stellt sich heraus, dass die Kopplung eines quantenmechanisch beschriebenen Atoms an ein klassisches Strahlungsfeld zu Inkonsistenzen (und eben wieder Instabilitäten) führt [5].

Auf der Suche nach einem stabilen Grundzustand müssen wir also bis in die Quantenelektrodynamik vordringen (die hier beschriebene Interpretation findet man in [6]; s. auch [3]). Es stellt sich heraus, dass ein Atom in der Quantenelektrodynamik ähnlich der Strahlungsrückwirkung unterworfen ist wie in der klassischen Physik beim Rutherford-Modell. Sie ist generell mit einem Energieverlust für das Atom verbunden.

In der Quantenelektrodynamik ist das Vakuum (in dem sich das Atom befindet) allerdings nicht einfach eine eigenschaftslose Leere. Das elektromagnetische Feld ist im Vakuum ständigen Fluktuationen unterworfen. Diese Nullpunktsschwankungen nennt man Vakuumfluktuationen. Sie üben – und das ist anders als beim klassischen elektromagnetischen Feld – gleichfalls einen Einfluss auf das Atom aus.

Für ein Atom, das anfänglich in einem angeregten Zustand ist, wirken die Vakuumfluktuationen abregend. Das entspricht dem alten heuristischen Bild der spontanen Emission als durch Vakuumfluktuationen induzierte stimulierte Emission. Angeregte Atome sind also instabil und zerfallen (im Einklang mit der Erfahrung) durch spontane Emission.

Für ein Atom im Grundzustand tendieren die Vakuumfluktuationen indessen dazu, das Atom in höhere Zustände anzuregen. Die detaillierte Analyse zeigt, dass im Grundzustand die Einflüsse von Vakuumfluktuationen und Strahlungsrückwirkung gleich groß sind und entgegengesetztes Vorzeichen besitzen. Sie heben sich in ihrer Wirkung also auf – der Grundzustand ist stabil. Er hat diese Stabilität aber nur dieser subtilen Balance zwischen Vakuumfluktuationen und Strahlungsrückwirkung zu verdanken. Bildlich kann man sagen, dass die strahlungsbedingten Energieverluste des Atoms an das Vakuum durch die Energie ausgeglichen werden, die durch die Schwankungen des elektromagnetischen Feldes auf das Atom übertragen wird. Das Stabilitätsproblem des Atoms, das sich wie ein roter Faden durch die moderne Geschichte der Atommodelle zieht, hat auf diese Weise seine Lösung gefunden.

- [1] W. Kuhn, *Ideengeschichte der Physik*, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden (2001).
- [2] W. Kuhn (Hrsg.), *Physik 2*, Westermann Braunschweig (2000).
- [3] H. Wiesner, R. Müller, *Stabilität und Spektrum der Atome*, Physik in der Schule **34**, 48 (1996). H. Wiesner, R. Müller, *Stabilität und Spektrum der Atome*, Physik in der Schule **34**, 48 (1996).
- [4] L. M. Brown, A. Pais, B. Pippard (Hrsg.): *Twentieth Century Physics Vol. I*, IOP/AIP, Bristol u. a. (1995), S. 64.
- [5] P. W. Milonni, *The Quantum Vacuum*, Academic Press, Boston u. a. (1993).
- [6] J. Dalibard, J. Dupont-Roc, C. Cohen-Tannoudji, *Vacuum fluctuations and radiation reaction: identification of their respective contributions*, J. Physique **43**, 1617 (1982).