

Überblick

Inhalt

Zentraler Inhalt dieser Vorlesungen zur Quantenmechanik (QM) II ist die zeitabhängige Störungstheorie und ihre Anwendungen. Nachdem in der QMI als wesentliches neues Konzept die Quantisierung behandelt wurde, kommt nun eine systematische Behandlung der Störungstheorie hinzu. Nachdem in der klassischen Mechanik, der Elektrodynamik und der QMI die meisten Probleme exakt gelöst wurden (wobei „exakt“ sich auf die Lösung von z.T. idealisierten Gleichungen bezieht) kommt dies vielleicht als eine Einschränkung oder als ein weniger grundlegendes Thema daher.

Neben den wichtigen rechnerischen Methoden die hier entwickelt und erlernt werden sollen, soll die Vorlesung Störungstheorie als ein wichtiger Konzept vermitteln, welches vielen, wenn nicht sogar den meisten in der theoretischen Physik behandelten Problemen zugrundeliegt: Die exakten Lösungen für ein vereinfachtes System — typischerweise ein System mit „abgeschalteten“ Kopplungen — werden durch kleine, aber oft qualitativ wesentliche, Korrekturen verbessert.

Wir konkretisieren dies am Beispiel der beiden wichtigsten Anwendungen der nichtrelativistischen Störungstheorie, die in diesen Vorlesungen vorkommen werden:

- Wechselwirkung des Wasserstoffatoms mit dem Strahlungsfeld

- Streuung von freien Teilchen an einem Störpotential

Problem	exakte, "ungestörte" Lösung	Störterm/ Störoperator	physikalisches Resultat
Wasserstoff & Strahlungsfeld	Lösungen der Schrödingergleichung & quantisiertes Strahlungsfeld	Kopplung des Elektrons ans elektromagnetische Feld	Lebensdauer angeregter Zustände, Emission von Photonen
Streuung am Potential V	ebene Wellen für freie Teilchen	Störpotential V	Ablenkung der Teilchen, Streuquerschnitt

Die obige Tabelle erklärt die vorgenommene Kategorisierung für die genannten Beispiele.

Obwohl wir von kleinen Störungen ausgehen, führen diese zu wesentlichen physikalischen Effekten, die die ungestörten Systeme nicht zeigen. Z.B. können wir mit den Lösungen der ungestörten Schrödingergleichung zwar die Lage der Energieniveaus im Wasserstoffatom vorhersagen, nicht aber die Lebensdauer des angeregten Niveaus und die Tatsache, daß diese unter Emission von Lichtquanten zerfallen. Diese wichtigen Aspekte können erst mit störungstheoretischen Methoden behandelt werden.

Tatsächlich benötigen wir für dieses Problem neben den Lösungen der Schrödingergleichung für das Elektron auch die quantisierte Behandlung des freien elektromagnetischen Feldes (Strahlungsfeld). Indem wir die Feldquantisierung (als Verallgemeinerung der Quantisierung von Punktteilchen) in diesen Vorlesungen vornehmen, greifen wir vielleicht auf die Quantenfeldtheorie vor. Würden wir dagegen den

Feldoperator für das Strahlungsfeld als „Tatsache“ einführen und nicht herleiten, bliebe unbefriedigenderweise ein zentraler Aspekt der Theorie der Strahlungsübergänge unverstanden. Aufgrund der Bedeutung der Störungstheorie – und innerhalb dieser der Wichtigkeit der exakten Lösungen – beginnen wir diese Vorlesungen mit einer Wiederholung der Lösungen der Schrödingergleichung für das Wasserstoffatom sowie mit einer kurzen Wiederholung der zeitabhängigen Störungstheorie. Die Methoden der zeitabhängigen Störungstheorie lassen sich auch in der Streutheorie verwenden, welche wir hier nicht-relativistisch behandeln. Diese hat viele Anwendungen in Experimenten bei niedrigen Energien. Die relativistische Verallgemeinerung ist Inhalt der Quantenfeldtheorie. Der wohl spektakulärste Erfolg der letzten Jahre dieses Ansatz zur Beschreibung der Natur ist die Entdeckung des Higgs-Bosons am Large Hadron Collider (LHC).

Desweiteren behandeln wir auch Aspekte der Quantenmechanik die nicht störungstheoretisch sind. Bisher ist hier der Aharonov-Bohm-Effekt vorgesehen, sowie weitere Themen, die gegen Ende des Semesters ausgewählt werden. Wichtiges Thema aus der nicht-störungstheoretischen Kategorie ist aber die relativistische Dirac-Gleichung für das Elektron sowie deren Lösung im Zentralpotential. Damit läßt sich die Spin-Bahn-Kopplung, welche zur Feinstrukturaufspaltung der Energieniveaus führt, erklären, wodurch eine wichtige offene Frage aus der QM beantwortet wird. Dieser inhaltliche Überblick soll dazu dienen, Fragen nach

dem warum und wofür, die während gewisser technischer Entwicklungen auftreten werden, zu beantworten. Seien Sie außerdem ausdrücklich ermutigt, während und neben der Vorlesung Ihre Fragen zu stellen.

Literatur und Notizen

Hauptzweck dieser Notizen ist, daß sie als Vorlage für den Tafelanschrieb dienen. Nach Abschluß jedes Kapitels werde ich während der Vorlesungszeit dieses Manuskript verbessern. Über dann noch notwendige Hinweise über fehlerhafte Gleichungen oder sachliche Unstimmigkeiten wäre ich dankbar.

Bis zum jetzigen Zeitpunkt habe ich folgende Quellen verwendet:

Sakurai, Modern Quantum Mechanics

Schwabl, Quantenmechanik

Notizen von Herrn Bencke zu Kapitel 3 - Optische Übergänge

Die Notizen sollen kein Lehrbuch ersetzen. Es wird Ihnen empfohlen, parallel zur Vorlesung entweder o.g. Bücher, oder andere Quellen, die Ihrem persönlichen Geschmack entsprechen, durchzuarbeiten. Auch sei Ihnen die Bearbeitung der Übungsaufgaben und die aktive Teilnahme an den Tutorien nahegelegt.