

# Einleitung

Die Quantenmechanik ist nicht nur die erfolgreichste, sondern auch die grundlegendste Teildisziplin der modernen Physik, sofern man diejenigen Versuche der vereinfachten Beschreibung der Realität betrachten will, die gewissermaßen bereits zur Serienreife entwickelt sind. Zum einen bewährt sie sich von Beginn ausnahmslos; es gibt Schätzungen, wonach inzwischen circa eine Milliarde physikalische Phänomene bekannt sind, die von der Quantenmechanik korrekt beschrieben werden, Ausnahmen sind bis jetzt keine aufgetreten. Andererseits liegen fundamentalere Theorien zur Zeit nur in Form von Spekulationen und teilweise auch mathematisch längst noch nicht verstandenen Modellen vor. Und selbst wenn man solche mitberücksichtigt, gibt es starke Indizien dafür, daß auch sie in wenn auch weitgehend noch nicht voll verstandener Form in die Quantenmechanik eingegliedert werden müssen. In diesem Sinn ist letztere in ihrer allgemeinsten Form nicht einfach eine Theorie, sondern ein Theorienrahmen, man könnte auch sagen, eine Sprache, in der physikalische Theorien – auch solche, die noch ihrer Entdeckung harren – zu formulieren sind.

Entsprechend groß ist die Verbreitung der Quantenmechanik in Forschung wie Lehre. Ihre physikalische Bedeutung reicht vom mikroskopischen Bereich der Elementarteilchen und Atome über mesoskopische Skalen insbesondere bei der Festkörperphysik bis zu makroskopischen und sogar kosmologischen Sachverhalten, wenn auch letztere ebenfalls noch spekulativen Charakter haben. Dabei hat die Theorie schon vor Jahrzehnten ihren rein akademischen Charakter abgelegt. Spätestens die nach dem zweiten Weltkrieg aufkommende und sich seither geradezu exponentiell entwickelnde Halbleitertechnologie mit der durch sie ausgelösten dritten industriellen Revolution machte aus der Quantenmechanik eine physikalische Grundlagendisziplin mit absoluter Alltagsbedeutung. Ein weiterer Entwicklungsschub in Richtung angewandte Physik ist in Gestalt der experimentellen und inzwischen auch technischen Anwendung verschränkter Systeme seit knapp drei Jahrzehnten zu verzeichnen, wobei inzwischen in einzelnen Bereichen sogar kommerzielle Fortschritte gemacht werden. Die Grundlagenphysik kommt dabei auch nicht zu kurz, da hier von Anfang an vormals reine Gedankenexperimente nach und nach real durchführbar wurden, und auch hier bestätigen sich die Aussagen der Quantenmechanik ausnahmslos. Die Lehre zog mit etwas Verspätung nach; in der physikalischen Hochschulbildung ist die Quantenmechanik inzwischen seit mehreren Jahrzehnten ein zentraler Bestandteil, und in der Schulphysik läßt sie sich zumindest in der gymnasialen Oberstufe nicht mehr umgehen.

Dabei darf der ganze Erfolg und die Anwendbarkeit der Quantenmechanik nicht darüber hinwegtäuschen, daß die Zeit, in der dieselbe ebenfalls noch auf sehr wackligen, spekulativen Beinen stand, noch nicht sehr lange zurückliegt. Diese Phase zeichnete sich durch eine erhebliche Diskrepanz zwischen der Solidität der physikalischen und derjenigen der mathematischen Argumentation aus. Während erstere aus einer tiefen Orientierungslosigkeit nur langsam herausfand und diese zumindest in der hier beschriebenen Epoche oder vielleicht sogar bis heute nicht völlig überwunden hat, wies letztere schon davor ein überaus hohes Niveau auf, was natürlich an der vorausgehenden Blütezeit der klassischen mathematischen Physik wie auch an den spektakulären Erfolgen der Mathematik des neunzehnten und frühen zwanzigsten Jahrhunderts selbst lag. Es ist unter anderem auch dieser Gegensatz, der den besonderen Reiz und auch das wissenschaftliche Interesse der Beschäftigung mit der Frühphase der Quantenmechanik ausmacht.

Läßt man sich auf die Argumentationslinien der Altvorderen ein, unabhängig davon, ob die Resultate auch heute noch Bestand haben oder wieder verworfen werden mußten, lernt man nicht nur faszinierende Schaustücke der angewandten Mathematik und mathematischen Physik kennen, ein historisch-kritisches Nachvollziehen der inhaltlichen Entwicklung der Quantenmechanik ist auch ein wichtiges Hilfsmittel, wenn nicht gar eine Voraussetzung, um zu einem vertieften Verständnis derselben in ihrer modernen Form zu gelangen. Die Quantenmechanik ist bei all ihrer technisch-formal-anwendungsorientierten Ausgereiftheit aus philosophischer Sicht wie kaum eine andere Disziplin der Physik nach wie vor Gegenstand intensivster Diskussionen, und eine Beteiligung an diesem Diskurs steht auf einem viel solideren Fundament, wenn man die Beschäftigung mit dem mathematischen Apparat der Theorie und dessen Interpretation durch eine Betrachtung ihres geschichtlichen Werdegangs ergänzt.

Ein zusätzlicher Aspekt sei eigens erwähnt. Die einschlägigen Begriffe, Argumente und Überlegungen der anfänglichen Entwicklung der neuen Theorie werden teilweise nach wie vor fleißig erwähnt, man beruft sich darauf und verwendet sie häufig dem Namen nach unverändert. Gleichzeitig werden die Originalarbeiten außerhalb der ausgewiesenen wissenschaftsgeschichtlichen Forschung verbreitet wenig bis gar nicht gelesen. Das führt sehr oft zu falsch dargestellten Aspekten der frühen Quantenmechanik, die zudem auch in den meisten Fällen weiter tradiert werden. Beispiele sind die Herleitung der Planckschen Strahlungsformel, Einsteins Lichtquantenhypothese oder die Heisenbergsche Unschärferelation; in diesen und anderen Fällen stehen selbst in Lehrbüchern verbreitet merkwürdige Dinge, und eine klärende Beschreibung der historischen Abläufe samt der zugehörigen physikalischen Sachverhalte ist hier unbedingt erforderlich, zumal letztere vielfach auch heute von großer Wichtigkeit sind. Die Leserin oder der Leser wird möglicherweise gelegentlich feststellen, daß sich manche geschichtlichen Details in ihrer Originalfassung von heute weit verbreiteten Darstellungen beträchtlich unterscheiden.

Das vorliegende Buch gliedert sich wie folgt: Nach einer kurzen Wiederholung einiger zentraler Begriffe der klassischen Mechanik im ersten Kapitel erfolgt zunächst, den mengenmäßigen Hauptteil darstellend, im zweiten und dritten Kapitel eine Diskussion der sogenannten älteren und neueren Quantenmechanik. Diese Unterteilung, die in der wissenschaftshistori-

schen Rezeption der Quantenmechanik von Beginn an üblich war, berücksichtigt den tiefen Einschnitt, der 1925 stattfand. Zuvor versuchte man teilweise mathematisch elegant, aber physikalisch mehr schlecht als recht den Schwierigkeiten, mit denen sich die klassische Physik am Ende des neunzehnten Jahrhunderts in zunehmender Weise konfrontiert sah, durch Reparaturmaßnahmen zu begegnen. Das heißt, man nahm im wesentlichen ad hoc Änderungen an der klassischen Mechanik vor, ohne diese grundlegend zu revidieren und ohne wirkliche physikalische Begründungen liefern zu können, wodurch zwar zum Teil, aber nie auf Dauer Erfolge erzielt werden konnten und ein globales Gefühl des Unverständnisses zurückblieb. Dieses wurde erst durch die fundamentalen Neuerungen ein wenig überwunden, die danach eingeführt wurden und die klassische Mechanik zunächst zumindest im mikroskopischen Bereich zugunsten einer neuen Mechanik komplett außer Kraft setzten. Der Erfolg im Hinblick auf die Voraussagbarkeit experimenteller Ergebnisse stellte sich umgehend ein und war überwältigend; die philosophische Durchdringung der Theorie konnte damit jedoch nicht schritthalten, was sich von Anfang an durch umfangreiche Diskussionen über die richtige Interpretation der neuen Theorie bemerkbar machte. Das dritte Kapitel berücksichtigt auch dies durch eine zusätzliche kritische Darstellung der frühen Deutungen der neueren Quantenmechanik, die sich teilweise auch heute noch, wenngleich vielfach unhinterfragt, einer großen Anhängerschaft erfreuen. Abschließend und ergänzend liefert das vierte Kapitel eine philosophische Einschätzung der aktuellen Interpretationen der Quantenmechanik einschließlich der Darstellung der Auffassung des Autors hierzu. Das ist unter anderem auch als Diskussionsanstoß zu verstehen.

Das ausführliche Literaturverzeichnis ist natürlich in erster Linie ein Nachweis über die verwendeten Quellen. Gleichzeitig bildet es auch eine Zitatsammlung, welche die für die Entwicklung der Quantenmechanik entscheidenden Originalarbeiten sicherlich nicht vollständig, aber doch in großem Umfang enthält. Die begleitende Lektüre solcher Arbeiten ist sehr zu empfehlen.

# Kapitel 1

## Der Untergang der klassischen Physik

Es dürfte allgemein bekannt sein, daß die Physik bereits bei den griechischen Philosophen der Antike eine frühe Hochkonjunktur erlebte; mit Namen wie Aristoteles, Archimedes und anderen lassen sich wissenschaftliche Errungenschaften in Verbindung bringen, die zumindest teilweise auch heute noch in Lehrbüchern zu finden sind. Allerdings blieben die damaligen Erkenntnisse im Wesentlichen auf die rein deskriptive Ebene beschränkt, wie etwa im Fall des Archimedes, oder aber sie gingen von Grundannahmen, also Axiomen aus, die aus heutiger Sicht als völlig unhaltbar betrachtet werden müssen, wie beispielsweise bei Aristoteles. Insbesondere war den griechischen Philosophen und lange Zeit auch deren Nachfolgern die Idee einer experimentellen Untersuchung der Natur fremd.

Entsprechend müssen wir bei der Suche nach den Anfängen von dem, was wir heutzutage als *klassische Physik* betrachten, später einsteigen. So gesehen beginnt die Physik im heutigen Sinne im siebzehnten Jahrhundert. Sie nahm ihren Anfang bei Galileo Galilei, der als erster den experimentellen Charakter dieser Wissenschaft erkannte, wenn er auch einen erheblichen Teil seiner Experimente, von denen er berichtete, vermutlich gar nicht wirklich durchgeführt hat, und, vor allem wenn man die mathematischen Aspekte in den Vordergrund stellt, bei Isaac Newton, der gewissermaßen die theoretische Physik begründete. Hier findet sich der Ausgangspunkt der klassischen Physik. In der Folgezeit entwickelte sie sich und entwickelt sich genaugenommen auch weiterhin zu einem gigantischen Theoriegebäude von zum Teil erheblicher mathematischer Komplexität<sup>1</sup>. Die klassische Physik stellte jahrhundertlang die Grundlage der physikalischen Weltbeschreibung dar, hatte triumphale Höhenflüge beispielsweise in der Beschreibung der Bewegung von Himmelskörpern, in der Mechanik deformierbarer Medien, der Maxwellschen Elektrodynamik, der Thermodynamik und statistischen Mechanik und insbesondere und abschließend in der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie. Dennoch sollte sie mit Ausnahme der Relativitätstheorien zu Beginn des 20. Jahrhunderts komplett zu Fall kommen, was bekanntlich mit der Entstehung und Entwicklung der Quantenmechanik das Aufkommen eines vollkommen neuen und im Vergleich zu früher extrem anderen, fremdartigen Weltbildes einleitete. Das heißt natürlich nicht, daß klassische physi-

---

<sup>1</sup>Wesentliche Bereiche der Analysis und auch anderer Teilgebiete der Mathematik entstanden durch Antriebe aus der Physik und wären ohne diese überhaupt nicht denkbar.

klassische Theorien heutzutage keine Bedeutung mehr hätten; im Gegenteil haben sie das sehr wohl, und es wird weiterhin ausgiebig auf solchen Gebieten geforscht und gearbeitet. Es ist jedoch seit dieser Zeit klar, daß es grundlegendere physikalische Prinzipien gibt und die klassische Physik nur eine teilweise hervorragende, teilweise völlig unbrauchbare Näherung dieser fundamentaleren Physik darstellt.

## 1.1 Einige Grundideen der klassischen Physik

In der Geschichte der Physik gab es immer wieder tiefgreifende Neuansätze und Änderungen von bis dahin wohletablierten Vorstellungen. So gesehen ist die Entwicklung der Quantenmechanik seit Beginn des 20. Jahrhunderts eigentlich nur ein weiteres Beispiel in einer langen Reihe von Neuentwicklungen im Laufe der Entstehung der Physik, wie wir sie heute kennen. Dennoch spielt die Quantenmechanik hier eine Sonderrolle. Denn sie bedeutete eine weitaus radikalere Umwälzung des physikalischen Weltbildes als jede andere neue Theorie bis jetzt, die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie eingenommen. Es ist nicht Gegenstand des vorliegenden Buches, die Tragweite dieser Umwälzung in ihrem vollem Umfang darzustellen; um sie aber ein wenig einschätzen zu können, ist es hilfreich, sich mit ihren Voraussetzungen zu beschäftigen. Daher beginnen wir mit einem kurzen Rückblick auf die Schwierigkeiten, mit denen die klassische Physik am Ende des 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu kämpfen hatte und die unmittelbar zur Entstehung der Quantenmechanik führten.

Im späten 19. Jahrhundert waren sich die meisten Physiker darüber einig, daß man die wesentlichen Gesetzmäßigkeiten der Natur wohl verstanden habe, daß also mit anderen Worten die grundlegende naturwissenschaftliche Arbeit wenigstens aus physikalischer Sicht im wesentlichen erledigt sei und es fortan nur noch darum gehen könne, die Details weiter auszuarbeiten. Diese Situation läßt sich besonders schön durch die bekannte und vielzitierte Anekdote über den Schüler Max Planck illustrieren, der 1874 als Sechzehnjähriger nach dem Abitur den Physiker Johann Gustav Philipp von Jolly fragte, ob er ihm denn empfehlen könne, Physik zu studieren, und der daraufhin von diesem den Rat erhielt, letzteres lieber bleiben zu lassen. Denn in der Physik, so von Jolly, sei wohl mit spektakulären Neuentdeckungen nicht mehr zu rechnen, sodaß dort nicht mehr viel zu tun bleibe. Auch James Jeans äußerte im Jahre 1900 bei einer passenden Gelegenheit die Meinung, bis auf zwei Wölkchen am Himmel, nämlich der Natur des Äthers und der Ultraviolett-Katastrophe bei der Lichtemission, sei in der Physik inzwischen eigentlich alles völlig klar [463]<sup>2</sup>. Diese Haltung war in der physikalischen Szene im wesentlichen repräsentativ.

Wie gründlich man mit dieser Auffassung daneben lag, sollte sich alsbald zeigen, und zwar tatsächlich gleich in zwei verschiedenen Bereichen. Der eine betraf die Beschreibung der Raum-Zeit und mündete im Laufe der nächsten Jahrzehnte in der Entwicklung der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie. Der andere betraf das Verhalten von Licht und

---

<sup>2</sup>Diese beiden Wölkchen erwiesen sich wenig später als aufkommende schreckliche Stürme, denn es handelte sich dabei natürlich um nichts anderes als um Vorboten der Relativitätstheorie und der Quantentheorie [794].

Materie im mikroskopischen Bereich. Dort schienen die aus der makroskopischen Welt wohl-bekanntesten und in unzähligen Fällen mit überwältigendem Erfolg angewandten physikalischen Gesetze nicht mehr zu funktionieren. Dieser Bereich ist der uns interessierende, denn er führte bekanntermaßen zur Entwicklung der Quantenmechanik.

Gerade weil die Entwicklung der Quantentheorie in wissenschaftshistorisch typischer Weise durch das Versagen eines Vorgängertheorien-Gebäudes, dem der klassischen Physik, zustande kam und noch immer kommt, ist es jedoch für die Beschäftigung mit den Anfängen dieser Entwicklung von großer Bedeutung, zuvor die Vorgängertheorien in ihren wesentlichen Aspekten kennenzulernen. Wir beginnen daher unseren Ausflug in die Kinderstube der Quantenmechanik mit einem Überblick über die wichtigsten Grundideen der klassischen Physik, um vor allen Dingen auch zu klären, was unter diesem Begriff überhaupt zu verstehen ist.

### 1.1.1 Klassische Teilchen und klassische Felder

Wird in einer klassischen Theorie ein physikalischer Vorgang beschrieben, so geschieht dies üblicherweise mit Hilfe von Bewegungsgleichungen. Hierunter hat man Differentialgleichungen zu verstehen, deren Lösungsfunktionen das zeitliche beziehungsweise raumzeitliche Verhalten der relevanten dynamischen Variablen, also der zur Beschreibung des betrachteten Systems verwendeten Größen repräsentieren. Je nach betrachtetem System können solche Bewegungsgleichungen sehr unterschiedlich aussehen, von gewöhnlichen Differentialgleichungen in der Punktmechanik bis zu komplizierten gekoppelten Systemen partieller Differentialgleichungen in klassischen Feldtheorien. Gemeinsam ist ihnen allen jedoch, daß die physikalisch interessierenden Lösungen nach Vorgabe geeigneter Rand- und Anfangsbedingungen für alle Zeiten eindeutig bestimmt sind; das ist ein unmittelbar aus allgemeinen mathematischen Eigenschaften von Differentialgleichungen folgender Sachverhalt. Beispielsweise erhält man in der klassischen Mechanik gewöhnliche Differentialgleichungen zweiter Ordnung in der Zeit, deren Lösungen durch Angabe ihrer Anfangswerte sowie derjenigen ihrer ersten Ableitungen eindeutig festliegen. Entsprechend lassen sich bei Feldtheorien die Lösungen der nun partiellen Differentialgleichungen beispielsweise durch Wahl der Werte auf dem Rand des räumlichen Gebietes, auf dem sie definiert sein sollen, festlegen. Etwas von mathematischer Ausdrucksweise befreit besagt dieser Sachverhalt nichts anderes, als daß das Verhalten eines physikalischen Systems aus klassischer Sicht durch die es beschreibenden Gesetze sowie durch Festlegung des Anfangszustandes dieses Systems in alle Ewigkeit festgelegt ist. Natürlich darf man dabei nicht davon ausgehen, sämtliche klassischen Bewegungsgleichungen auch tatsächlich lösen zu können; das Gegenteil ist der Fall, nicht nur in der Vergangenheit, sondern auch heutzutage können nur die wenigsten konkreten Systeme exakt beschrieben werden, und man ist bei den weitaus meisten klassischen physikalischen Problemen auf Näherungsverfahren angewiesen. Dabei steht jedoch stets die Vorstellung im Hintergrund, daß die exakten Lösungen von Bewegungsgleichungen existieren, wenn sie auch nicht stets konkret angegeben werden können.

Man hat es folglich in der klassischen Physik zumindest prinzipiell mit einem absoluten Determinismus zu tun. Die Überzeugung, alles sei durch die Gesetze der Physik vorausbestimmt,