

Wozu brauchen wir theoretische Physik?

Wolfgang Kinzel
Lehrstuhl für theoretische Physik III
Universität Würzburg

Ziele der Physik

Die Physik sucht nach allgemeinen Naturgesetzen. Sie möchte die Natur quantitativ beschreiben, indem sie nicht nur neue Phänomene entdeckt, sondern die im Experiment bestimmten verschiedenen Messgrößen durch mathematische Gleichungen miteinander in Beziehung setzt. Viele verschiedene Phänomene sollen aus einigen wenigen mathematischen Gleichungen abgeleitet werden. Der Traum einiger Physiker ist die Weltformel: Eine einzige Gleichung beschreibt im Prinzip alle messbaren Größen unserer Welt.

Tatsächlich gibt es einen Teil der unbelebten Natur, der sich präzise durch mathematische Gleichungen beschreiben lässt. Das Verhalten von Planeten, Geschossen, Elektronen in Atomen und gestreuten Elementarteilchen lässt sich sehr genau durch einige wenige Gleichungen vorhersagen: Die Newtonschen Bewegungsgleichungen und deren Erweiterungen durch die Relativitätstheorie, die Quantenmechanik und die Quantenfeldtheorie. Tausende von präzisen Experimenten, die alle störenden Einflüsse abschirmen und sich auf wenige grundlegende Mechanismen beschränken können, zeigen täglich, dass der physikalische Teil unserer Natur nur wenigen mathematischen Gleichungen gehorcht.

Sprache der Physik

Die Sprache der Physik ist deshalb die Mathematik, die nicht nur der Berechnung dient, sondern erst die benötigten Begriffe und Strukturen zur Verfügung stellt. Die Umgangssprache und die Vorstellungen des täglichen Lebens reichen nicht aus, um physikalische Vorgänge vollständig zu beschreiben und Vorhersagen für neue Experimente zu machen. Nur durch die Mathematik lässt sich verstehen, warum die Keplerschen Gesetze der Planetenbahnen gelten, sich elektromagnetische Wellen ausbreiten, die Energien von Elektronen in Molekülen und Metallen nicht alle Werte annehmen können und Licht in einigen Experimenten wie ein Strahl von Teilchen und in anderen wie eine Welle erscheint.

Eine Aufgabe der Physik ist es also, aus den grundlegenden Gleichungen die in den Experimenten gemessenen Größen herzuleiten. Das ist nicht einfach. Denn dazu muss geklärt werden, welche Teilchen und welche Mechanismen im Experiment eine Rolle spielen. Dann müssen die entsprechenden Bewegungsgleichungen für solche Teilchen und deren Wechselwirkungen aufgestellt werden. In den meisten Fällen können die so entwickelten Gleichungen weder analytisch, mit Papier und Bleistift, noch numerisch, mit Hilfe von Computern, gelöst werden. Deshalb muss die Theorie soweit vereinfacht werden, dass man erstens nicht die wesentliche Physik dabei verliert und zweitens die Gleichungen noch lösen kann. Falls man nicht alle Parameter des Modells aus anderen Experimenten bestimmen kann, so muss man zusätzlich die berechneten Größen an die entsprechenden experimentellen anpassen.

Theoretische Physik

Jeder Physiker muss in der Lage sein, diesen theoretischen Teil seiner Forschungen selbst durchzuführen, zumindest in einfachen Fällen. Es hat sich aber herausgestellt, dass diese Rechnungen sehr komplex werden können. Analytische Rechnungen, deren Formeln sich über Hunderte von Seiten erstrecken, und numerische Rechnungen, die wochenlang auf den größten Computern der Welt laufen, sind gar nicht so selten. Deshalb gibt es dazu seit mehr als hundert Jahren eine einzige Disziplin: die theoretische Physik. Etwa ein Drittel aller Physiker arbeiten heutzutage als Theoretiker.

Die theoretische Physik hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Phänomene der Natur mit Hilfe von mathematischen Modellen zu verstehen. Theoretische Physik will Experimente erklären. Entweder sie benutzt schon vorhandene Daten oder sie macht Vorhersagen für noch durchzuführende Experimente. Sie überlässt aber die experimentelle Arbeit - mit all den Schwierigkeiten, das theoretische Modell als reales System zu realisieren und die vorhergesagten Größen zu messen - ihren Kollegen aus der Experimentalphysik. Dafür untersucht die theoretische Physik das von ihr entwickelte Modell: Wie groß ist der Einfluss zusätzlicher Mechanismen, welche universellen Zusammenhänge gibt es zwischen den messbaren Größen, wie hängen diese Größen von den Modellparametern ab, wie kann man die notwendigen Näherungen verbessern, kann man deren Fehler abschätzen, etc.?

Das Gebiet der theoretischen Physik hat ein weites Spektrum: Es reicht von der mathematischen Physik über exakt lösbare Modelle, diagrammatische Störungstheorie, Entwicklung von Näherungsmethoden, Computational Physics bis hin zur Phänomenologie. Es gibt Arbeiten, die sehr eng am Experiment versuchen, die gemessenen Daten zu reproduzieren, und andere, die recht allgemeine Probleme an abstrakten Modellen untersuchen. Von philosophischen Fragen bis hin zur Auswertung von Daten, die theoretische Physik hat Aufgaben für vielerlei Talente.

Erfolgreiche Vorhersagen der theoretischen Physik

Die theoretische Physik war in der Vergangenheit sehr erfolgreich. Hierzu einige wenige von zahlreichen Beispielen:

·Maxwell hat 1865 die Gleichungen für elektrische und magnetische Felder aufgestellt, entwickelt aus experimentellen Beobachtungen. Dabei hat er aber einen zusätzlichen Ausdruck postuliert, der die Symmetrie zwischen den elektrischen und magnetischen Ausdrücken hergestellt hat. Das Prinzip der Schönheit der Gleichungen hat also zu einem erweiterten Modell geführt. Eine Konsequenz dieses neuen Ausdruckes, nämlich des dielektrischen Verschiebungsstromes war, dass sich nun elektromagnetische Wellen ausbreiten können. Diese Vorhersage wurde 25 Jahre später von Hertz gemessen und ist heute die Grundlage von Radio, Fernsehen und Mobilfunk.

·Aus der experimentell gefundenen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit machte Einstein 1905 ein mathematisches Modell von Raum und Zeit, nämlich die Relativitätstheorie. Zahlreiche Vorhersagen dieses Modells wurden bis heute alle experimentell bestätigt. Dazu gehört, dass die Masse, die Länge und die Zeit - auch die Gleichzeitigkeit - von Objekten und Ereignissen von der relativen Geschwindigkeit zwischen dem Beobachter und dem entsprechenden Objekt abhängen. Es gibt keinen absoluten Raum und keine absolute Zeit - daran besteht heute kein Zweifel mehr. Die

Relativitätstheorie macht daher nicht nur Vorhersagen, sondern sie hat ebenso den Raum- und Zeitbegriff in der Philosophie revolutioniert.

·Um das Spektrum von Licht zu berechnen, das aus einem heißen Hohlraum abgestrahlt wird, führte Planck 1900 die Energiequanten für Licht ein. 25 Jahre später hat Heisenberg eine neue Mathematik entwickelt - die Matrizenmechanik - um die gemessenen diskreten Energieniveaus der Atomelektronen zu beschreiben. Bisher haben sich alle Vorhersagen dieser neuartigen, nur mathematisch beschreibbaren Physik experimentell bestätigt, und zwar für eine Vielzahl von Experimenten in der Atom-, Molekül- und Festkörperphysik. Zusätzlich liefert die Quantenmechanik eine neuartige Philosophie: Es gibt nur statistische Aussagen zu den messbaren Eigenschaften von Elementarteilchen. Diese Vorhersage, die Einstein zeitlebens heftig bekämpft hat, ist mittlerweile in vielen Experimenten bestätigt worden. Sie ist außerdem die Grundlage von der kürzlich entwickelten Quantenverschlüsselung und zukünftigen Quantencomputern.

·Die Quantenmechanik wurde auch erfolgreich auf die Kern- und Elementarteilchenphysik erweitert, als sogenannte Quantenfeldtheorie. So wurden neue Elementarteilchen vorhergesagt, die dann später in den großen Beschleunigern erzeugt und gemessen wurden.

·Die mathematischen Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie haben vor mehr als 50 Jahren einen Urknall beschrieben: Unser gesamtes Universum soll vor 14 Milliarden Jahren aus einer Explosion entstanden sein, und als Folge daraus soll unser jetziger Raum noch immer von Mikrowellen-Strahlung durchsetzt sein. Kaum ein Wissenschaftler hat damals diesen mathematischen Lösungen geglaubt und keiner hat nach der Hintergrundstrahlung gesucht. Erst 1965 haben Ingenieure bei der Eichung ihrer Antennen zufällig diese Strahlung entdeckt und dafür den Nobelpreis erhalten.

·Bei hinreichend tiefen Temperaturen werden einige Metalle plötzlich magnetisch, andere verlieren ihren elektrischen Widerstand und Legierungen beginnen sich zu entmischen. Folgt das aus den Grundgleichungen der Physik? Tatsächlich wurde vor mehr als 100 Jahren eine Theorie entwickelt, die solche Phasenübergänge beschreibt. Besonders bei der kritischen Temperatur, bei der sich die geordnete Phase gerade bildet, gehorchen die messbaren physikalischen Größen universellen mathematischen Gesetzen, die durch eine sogenannte Renormierungstheorie vorhergesagt wurden. Für diese Theorie erhielt Wilson im Jahr 1982 den Nobelpreis.

·1924 haben Bose und Einstein in ihren Gleichungen zu Quantengasen gesehen, dass ein Gas von Atomen, auch ohne jede Wechselwirkung, bei sehr tiefen Temperaturen in einen einzelnen gemeinsamen Quantenzustand kondensieren kann. Erst kürzlich konnte diese Vorhersage experimentell bestätigt werden (Nobelpreis 2001).

·Erst die Computersimulation hat gezeigt, welche komplexen Eigenschaften aus einfachen Gleichungen entstehen können. Schon ein einfaches angetriebenes Pendel zeigt deterministisches Chaos: Je nach Stärke des Antriebes schwingt es in unregelmäßiger und unvorhersagbarer Weise. Der Übergang in das Chaos geschieht nach mathematischen Gesetzen, die auch bei vielen anderen Experimenten, beispielsweise beim Wärmefluss durch Flüssigkeiten, gemessen wurden. Wiederum hat die theoretische Physik weitreichende philosophische Konsequenzen: Selbst wenn die Natur durch mathematische Gleichungen beschrieben wird, sind für die meisten Systeme langfristige Vorhersagen prinzipiell unmöglich. Der Mensch wird sich niemals selbst berechnen können.

Unterschiede zur Mathematik

Ebenso wie die Mathematik beschäftigt sich die theoretische Physik mit mathematischen Strukturen; was unterscheidet sie denn von der Mathematik? Die theoretische Physik versucht, Experimente zu erklären oder Vorhersagen für zukünftige Experimente zu machen. Das bedeutet, jede Aussage ist eine Hypothese, die durch ein einziges Experiment widerlegt werden kann. Es gibt keine wahren Aussagen in der theoretischen Physik, sondern nur Aussagen, die eine Vielzahl von Experimenten beschreiben oder vorhersagen können. Die Mathematik dagegen hat eine andere Zielsetzung. Sie geht von Axiomen und präzisen Definitionen aus und leitet daraus Aussagen her, die streng logisch aus den Axiomen gefolgert werden sollen. Die bewiesenen Aussagen der Mathematik sind Wahrheiten, die - falls der Beweis richtig war - nie widerlegt werden können. Dafür sind solche Aussagen zunächst abstrakt, sie sind aus Axiomen durch logische Regeln abgeleitet worden. Die Axiome dagegen werden als wahr definiert, niemand kann sie in Frage stellen.

Die rätselhafte Wirksamkeit der Mathematik

Warum beschreibt die Mathematik einen Teil unserer Natur? Weshalb folgen die Messgrößen unserer Experimente quantitativ den Strukturen, die aus logischen Gesetzen abgeleitet wurden? Was hat unser logisches Denken mit den Naturgesetzen zu tun? Über diese erkenntnistheoretischen und philosophischen Fragen haben schon viele berühmte Wissenschaftler nachgedacht, ohne eine befriedigende Antwort zu finden. Es ist und bleibt ein Rätsel, dass sich eine Vielzahl von quantitativen Naturbeobachtungen durch einige wenige, relativ einfache mathematische Gleichungen beschreiben lässt. Sogar die aus mathematischen Gleichungen hergeleiteten Aussagen der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik, die unsere Vorstellungen von Raum, Zeit und Materie revolutioniert haben, sind bisher in allen Details experimentell bestätigt worden. Auch unanschauliche Mathematik beschreibt einen Teil der Natur.

Was bleibt zu tun?

Wer in der Bibliothek vor den zahlreichen Lehrbüchern zur theoretischen Physik steht - allein zehn Bände von der russischen Landau Schule - mag zu dem Schluss kommen, dass heute alles Grundlegende in der Physik geklärt ist und nur noch Details zu berechnen sind. Wer sich dagegen die stetig wachsenden Regale mit den Physikjournalen betrachtet, wird einsehen, dass es in der Physik wohl noch viel zu tun gibt.

In der Tat gibt es in der theoretischen Physik noch viele grundlegende, nur unzureichend verstandene Probleme. Ich möchte hier nur einige Beispiele aus der Theorie der Vielteilchenphysik nennen:

· Schon Heisenberg hat sich in seiner Doktorarbeit mit der Turbulenz von strömenden Flüssigkeiten und Gasen beschäftigt. Bis heute gibt es noch keine befriedigende Theorie zu turbulenten Strömungen.

· Gläser sind immer noch wenig verstanden. Handelt es sich bei dem Übergang von der Schmelze zum Glas um einen Phasenübergang im thermischen Gleichgewicht oder um ein allmählich Einfrieren fern vom Gleichgewicht?

·Phasenumwandlungen und Strukturbildungen fern vom Gleichgewicht sind noch wenig verstanden, sie sind ein aktuelles Forschungsgebiet. Erst kürzlich ist es gelungen, einfache Modelle dazu exakt zu berechnen.

·Zur Theorie der vor 15 Jahren entdeckten Hochtemperatur-Supraleitung gibt es zwar mittlerweile zahlreiche Modelle, aber die Vielzahl der Experimente dazu wird noch nicht durch eine einheitliche Theorie erklärt.