Eine Wissenschaft zur Beschreibung der Welt: Die Physik

1

In diesem Kapitel ...

- Warum Physik?
- Physik beruht auf Beobachtung und Experiment
- Die Bedingungen vorgeben: Das Experiment
- System und Ordnung durch die Mathematik
- Physik und die übrigen Naturwissenschaften
- Physik und die Ingenieurswissenschaften
- Übersicht über den Aufbau des Buches

Das Thema dieses Buches ist die Experimentalphysik. Aus diesem Grund wird die Physik anhand von Experimenten beschrieben. Sie sitzen zwar nicht in meiner Vorlesung und sehen sich die entsprechenden Versuche an. Dennoch geht dieses Buch von Experimenten aus, versucht sie zu beschreiben, zu erklären und daraus Schlussfolgerungen zu ziehen, genauso, als wenn Sie eine Vorlesung über Experimentalphysik hören würden.

Was ist eigentlich Physik?

Die *Physik* (der Name bedeutet sowohl im griechischen als auch im lateinischen »Naturlehre«) ist die Wissenschaft von der uns umgebenden Welt. Dies klingt ziemlich hochtrabend, trifft aber genau zu. Wenn die Physik manchmal kompliziert ist, so liegt dies einfach daran, das die Welt um uns herum ziemlich kompliziert sein kann. Sie werden in diesem Buch erfahren, dass die Physik daran interessiert ist, die Beschreibung so einfach wie möglich zu halten.

Zur Beschreibung der Welt benutzt die Physik zwei Ansätze: Sie beobachtet zum einen die Welt und führt Experimente durch. Zum anderen versucht sie, die Ergebnisse dieser Beobachtungen und Experimente theoretisch zu erklären, sie zu systematisieren und zusammenzufassen. Dies führt zu einer Zweiteilung der Physik in die *Experimentalphysik* und die *theoretische Physik*. Keines der beiden Gebiete kann ohne das andere auskommen. Ohne die Experimentalphysik hätte die theoretische Physik absolut nichts, mit dem sie arbeiten könnte. Auf der anderen Seite ordnet die theoretische Physik die Ergebnisse der Experimentalphysik; bei diesem Ordnungsprozess treten oft neue Aspekte auf, die die Experimentalphysik zu neuen Experimenten und Entwicklungen anregen. James C. Maxwell hat im 19. Jahrhundert die ihm bekannten Ergebnisse zu elektrischen und magnetischen Feldern zusammengefasst und dabei die Existenz von elektromagnetischen Wellen vorhergesagt. Aufgrund dieser Vorhersage gelang es Heinrich Hertz, derartige elektromagnetische Wellen zu erzeugen (Kapitel 23).

Experimentalphysik und theoretische Physik bedingen sich also gegenseitig. Dies ist allerdings ein Buch über die Experimentalphysik. Die Physik wird anhand von Beobachtungen und Experimenten dargestellt. Die theoretische Physik spielt nur dann eine Rolle, wenn es nicht mehr anders geht und wenn eine ordnende Hand eingreifen muss.

Die Welt erkunden: Die Experimentalphysik

Der Mensch hat die Welt erkundet und darauf aufbauend physikalische Gesetze aufgestellt, indem er *Beobachtungen* machte und *Experimente* durchführte. Beobachtung und Experiment sind keineswegs das Gleiche:

- ✔ Bei der Beobachtung greift der Mensch nicht ein; er notiert nur, was unter bestimmten Bedingungen passiert.
- ✔ Bei einem Experiment definiert der Forscher, was er beobachten möchte, und gibt die Bedingungen vor, unter denen bestimmte Ereignisse ablaufen.

Der Unterschied zwischen Beobachtung und Experiment ist beträchtlich. Dies betrifft vor allem zwei Punkte:

- ✔ Man kann nur das beobachten, was in der Natur passiert. In einem Experiment kann man auch Situationen erzeugen, die in der Natur nicht vorkommen.
- ✔ Bei einem Experiment kann man die Bedingungen vorgeben. Wenn man die Bewegung von Körpern beobachten will, so ist es hilfreich, Reibungseffekte möglichst auszuschalten (es sei denn, man ist an der Reibung selbst interessiert). Wenn man elektrostatische Phänomene untersuchen will, sollte man dafür sorgen, dass die Luftfeuchtigkeit gering ist, da andernfalls die Leitfähigkeit der Luft die Messergebnisse beeinträchtigt.

Bei einer *Beobachtung* beschreibt ein Forscher die ihn umgebende Welt; in einem *Experiment* gibt er vor, *was* er unter *welchen* Bedingungen beobachten will.

Bedeutung der Physik für Biologie, Chemie und weitere Naturwissenschaften

Es gibt neben der Physik eine Vielzahl von Naturwissenschaften. Neben den Ingenieurswissenschaften gehören zu den wichtigsten und etabliertesten die Chemie, die Biologie, die Astronomie und die Geophysik. In Abbildung 1.1 habe ich versucht, die verschiedenen Naturwissenschaften in Beziehung zueinander zu setzen. Natürlich ist dieses Schema vereinfacht, und man könnte viel mehr Pfeile einzeichnen. Dennoch spiegelt dieses Bild die Verhältnisse richtig wider.

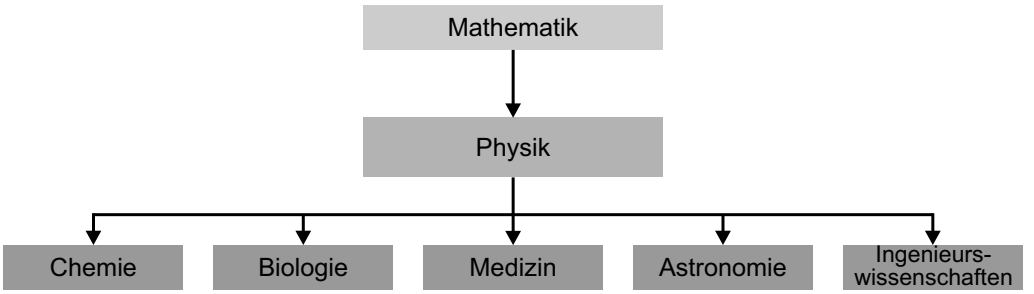

Abbildung 1.1: Mathematik, Physik und die übrigen Naturwissenschaften

Die Physik stellt die Grundlagen für die meisten anderen Naturwissenschaften bereit. Dies betrifft nicht nur die Theorie, sondern eine Vielzahl von Aspekten, die von theoretischen Grundlagen bis hin zur Durchführung von Experimenten reicht.

✔ Die Physik beschreibt die theoretischen Grundlagen aller Vorgänge in der uns umgebenden Natur. Davon profitieren alle anderen Naturwissenschaften. So beruht zum Beispiel das Periodensystem der Elemente fast ausschließlich auf physikalischen Grundlagen. Die Chemie kann dieses System vielleicht aufstellen, aber allein nicht erklären.

Die Physik ist aber nicht allein auf die Bereitstellung von theoretischen Grundlagen für die anderen Wissenschaften beschränkt. Sie stellt auch die entsprechenden Hilfsmittel bereit:

✔ Die Physik liefert eine Vielzahl von Messverfahren, die in den anderen Naturwissenschaften von großer Bedeutung sind. Dazu gehören unter anderem Mikroskope, Elektronenmikroskope, Massenspektrometer, aber auch einfache Instrumente wie Thermometer, Barometer oder Lupen. Ohne ein grundsätzliches Verständnis der Prinzipien dieser Messverfahren ist deren Anwendung in den Ingenieurs- oder Naturwissenschaften kaum möglich.

✔ Die Physik benutzt eine ganz besondere Vorgehensweise bei der Durchführung von Experimenten: Reduzierung auf das Notwendigste, Ausschaltung aller möglichen Störquellen. Auch in dieser Beziehung orientieren sich die übrigen Naturwissenschaften an der Physik (und haben von ihr gelernt).

Im späten Mittelalter und in der frühen Neuzeit gab es keine Unterscheidung zwischen der Physik und den anderen Naturwissenschaften (mit Ausnahme der Medizin). Die Aufspaltung erfolgte erst mit der gewaltigen Zunahme des Stoffes im 18. und 19. Jahrhundert; dies hat sich im 20. Jahrhundert fortgesetzt; heute gibt es in allen Naturwissenschaften unzählige Einzelgebiete, und es ist unmöglich, über alle den Überblick zu behalten.

In Kapitel 17 wird gezeigt, dass Galileo Galilei nicht nur Physiker, sondern auch Mathematiker, Astronom und sogar Philosoph war. In der damaligen Zeit wurde zwischen diesen Wissenschaften noch nicht unterschieden.

Insofern ist auch in historischer Hinsicht die Physik die Mutterwissenschaft der Naturlehre.

Keine Einbahnstraße: Physik und die anderen Naturwissenschaften

Natürlich ist die Wechselwirkung zwischen der Physik einerseits und den anderen Naturwissenschaften, insbesondere den Ingenieurswissenschaften keine Einbahnstraße. Die Physik profitiert natürlich auch von den Ergebnissen etwa der Biologie oder der Chemie (ohne die Arbeiten der Chemie hätten auch die Physiker das Periodensystem der Elemente nicht erklären können). Ein Beispiel für die Wechselwirkung zwischen Biologie und Physik ist in dem Kasten »Der Lotuseffekt oder die Bionik« dargestellt. Interessant ist allerdings die durchaus unterschiedliche Denk- und Herangehensweise in den verschiedenen Naturwissenschaften. Ich habe in den vergangenen beiden Jahrzehnten häufig mit Ingenieuren, Biologen und Chemikern zusammengearbeitet. Dabei ist mir aufgefallen, dass die Denkweisen in all diesen Wissenschaften völlig unterschiedlich sind; das bedeutet aber auch, dass es manchmal sinnvoll ist, ein physikalisches Problem aus der Sicht eines Ingenieurs, eines Biologen oder eines Chemikers zu betrachten und umgekehrt ein ingenieurswissenschaftliches Problem mit den Augen der Physik.

Der Lotuseffekt oder die Bionik

Die *Bionik* (auch *Biomimetik* oder *Biomimikry* genannt) versucht, technische Probleme zu lösen, indem sie auf Vorbilder in der Natur, insbesondere der Biologie zurückgreift. Das Wort *Bionik* setzt sich dabei aus *Bio*logie und Tech*nik* zusammen. Insofern kann man die Bionik als systematisches Lernen aus der Natur bezeichnen: Zur Lösung eines technischen Problems werden systematisch Vorbilder in der Natur gesucht.

Obwohl die Bionik in den letzten Jahren eine immer größere Bedeutung gewonnen hat, ist sie keine Erfindung des 20. oder 21. Jahrhunderts. Leonardo da Vinci versuchte bereits, Flugmaschinen anhand einer Analyse des Vogelflugs zu konstruieren. Auch Otto von Lilienthal und die Brüder Wright konstruierten die Flügel ihrer Flugmaschinen bzw. Flugzeuge anhand des Aufbaus von Vogelflügeln.

Die Bionik hat – wie gesagt – in den letzten beiden Jahrzehnten enorm an Bedeutung gewonnen. Zu den bedeutendsten Enwicklungen zählen:

- ✔ Die Entwicklung neuartiger Fachwerkkonstruktionen auf der Basis neuer Erkenntnisse über den Aufbau von Knochen oder Pflanzen.
- ✔ Die Entwicklung von unbenetzbaren und selbstreinigenden Oberflächen auf der Basis pflanzlicher Vorbilder (Lotuseffekt).
- ✔ Entwicklung von Klettverschlüssen am Vorbild von Klettpflanzen (bereits 1956).

Die Ingenieurswissenschaften und die Physik

Üblicherweise werden die Ingenieurswissenschaften in drei Hauptgebiete unterteilt: Bauingenieurswesen, Maschinenbau und Elektrotechnik. Dies ist in Tabelle 1.1 dargestellt. Dabei existieren unzählige Untergebiete, die sich zum Teil nicht länger eindeutig den einzelnen klassischen Teilgebieten zuordnen lassen.

Bauingenieurswesen	Maschinenbau	Elektrotechnik
Baustatik und Baudynamik	Maschinenbau	Elektrotechnik
Bauwirtschaft	Mechatronik	Informatik
Geotechnik und Geohydraulik	Regenerative Energie und Energieeffizienz	
Umweltingenieurswesen		
Verkehrswesen		
Mechanik	Dynamik	Elektrizitätslehre
Dynamik	Elastizitätslehre	Gleichströme
Elastizitätslehre	Schwingungen und Wellen	Wechselströme
Schwingungen	Thermodynamik	Halbleiterbauelemente
Thermodynamik		

Tabelle 1.1: Die klassischen Teilgebiete der Ingenieurswissenschaften, einige wichtige Untergebiete sowie die relevanten Themen der Physik

Die in der Tabelle dargestellten Teilgebiete entsprechen dem Lehrangebot an meiner Heimatuniversität, der Universität Kassel. Sie mögen aber von Uni zu Uni oder von Fachhochschule zu Fachhochschule wechseln. Ebenfalls in diese Tabelle aufgenommen sind die Teilgebiete der (Experimental-) Physik, die in den jeweiligen Fachgebieten eine besonders wichtige Rolle spielen. Sie können der Tabelle entnehmen, dass unabhängig von Ihrem Fachgebiet im Bereich der Ingenieurswissenschaften die Physik auf jeden Fall eine äußerst wichtige Rolle spielen wird. Sie kommen also um die Physik nicht herum!

Rolle der Mathematik

Eine Wissenschaft fehlt in dieser Darstellung noch: Die Mathematik. In Abbildung 1.1 ist sie übergreifend oberhalb der Physik eingezeichnet, und das beschreibt die Rolle, die sie innerhalb der Naturwissenschaften einnimmt, ziemlich genau.

Ohne die Mathematik wäre eine einheitliche Darstellung der meisten Ergebnisse nicht möglich. Dies gilt für Physik, Ingenieurswissenschaften und die übrigen Naturwissenschaften gleichermaßen. Die Mathematik hilft, die Ergebnisse zu formulieren, zu ordnen, zu systematisieren und vor allem Gesetzmäßigkeiten zu erkennen und auszunutzen.

Aber alle Naturwissenschaften bedingen sich gegenseitig. Dies gilt auch für die Mathematik, die mehrfach von Entwicklungen in der Physik profitierte:

- ✔ Die Differential- und Integralrechnung wurde (unter anderem von Newton und Leibniz) entwickelt, um die Ergebnisse der Physik geeignet darstellen und erklären zu können.
- ✔ Die Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie (die weit jenseits der Themen dieses Buches liegt) von Albert Einstein führte zu bedeutenden Weiterentwicklungen der dazu notwendigen Mathematik.

Übersicht über das Buch

Bevor es mit der eigentlichen Experimentalphysik losgeht, wird im Folgenden ein kurzer Überblick über den Inhalt der einzelnen Teile dieses Buches gegeben.

Teil I: Die Grundlagen werden gelegt

Der vorliegende Teil I beschäftigt sich mit den Grundlagen, die für dieses Buch benötigt werden. In Kapitel 2 werden ihre Mathematikkenntnisse aufgefrischt. Dies betrifft vor allem die Vektorrechnung und die Differential- und Integralrechnung.

Kapitel 3 ist dann einem der wichtigsten Aspekte der Experimentalphysik gewidmet, der Durchführung von *Messungen* und der Darstellung der Ergebnisse. Dabei wird zunächst das Internationale Einheitensystem mit seinen sieben Grundgrößen vorgestellt und dann gezeigt, wie man von diesen Grundgrößen ausgehend zu abgeleiteten Größen gelangt. Schließlich wird dargestellt, wie man sehr große oder sehr kleine Zahlen sehr elegant und kurz mit Hilfe von Zehnerpotenzen und/oder Vorsilben darstellen kann.

Teil II: Kraftvoll in Bewegung: Die Mechanik

Thema von Teil II ist die *Mechanik*, die Lehre von der Bewegung von Körpern und den Kräften, die diese Bewegungen hervorrufen. Die Mechanik wird üblicherweise in zwei Teilgebiete unterteilt:

- ✔ Die *Kinematik* oder Bewegungslehre (Kapitel 4)
- ✔ Die *Dynamik*, die Kräfte und ihre Auswirkungen beschreibt (Kapitel 5 und 6)

In Kapitel 4 wird zunächst dargestellt, dass es zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Bewegungen gibt, die *gradlinige Bewegung* und die *Kreisbewegung*. Es wird gezeigt, dass es von Vorteil ist, beide Bewegungen mit verschiedenen Parametern zu beschreiben: Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung im Fall von gradlinigen Bewegungen und Winkel, Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung im Fall von Kreisbewegungen. Zudem werden in Kapitel 4 zwei Größen eingeführt, die im Zusammenhang mit der Beschreibung von Bewegungen von großer Bedeutung sind: Der *Impuls* und die *kinetische Energie*. Beide Größen sind sogenannte *Erhaltungsgrößen*; mit ihrer Hilfe kann man Prozesse, wie etwa Stöße, ausgezeichnet beschreiben.

Grundlage der in Kapitel 5 dargestellten Dynamik sind die drei *Newton'schen Gesetze*, die die Wirkung von *Kräften* auf Körper beschreiben. Neben den Kräften spielt auch die Masse der Körper eine äußerst wichtige Rolle. Außer dem zentralen Begriff der Kraft gibt es aber noch weitere wichtige Größen, die im Zusammenhang mit der Bewegung von Körpern eine große Rolle spielen und die in Kapitel 5 eingeführt werden: Arbeit, Energie, Leistung und Wirkung. Schließlich werden in Kapitel 6 Rotationsbewegungen von Körpern behandelt. Dies ist der erste Fall, in dem die *realen Dimensionen* eines Körpers eine Rolle spielen. Um dies besser beschreiben zu können, werden mit dem Drehmoment und dem Trägheitsmoment zwei neue Größen eingeführt. Schließlich werden in diesem Teil noch zwei Spezialthemen behandelt:

✔ Die Reibung

✔ Die Elastizitätslehre

Teil III: Sie kommen niemals zur Ruhe: Schwingungen und Wellen

Teil III beschäftigt sich mit Schwingungen und Wellen. *Schwingungen* sind periodisch wiederholte Bewegungen, die immer dann entstehen, wenn Körper gegen eine *Rückstellkraft* ausgelenkt werden. Wenn diese Rückstellkraft proportional zur Auslenkung ist, spricht man von harmonischen Schwingungen. Beispiele für solche harmonische Schwingungen sind Feder- und Fadenpendel. In Kapitel 9 wird die mathematische Beschreibung von Schwingungen ausgehend von der sogenannten *Schwingungsgleichung* dargestellt. Auf deren Grundlage werden wichtige Größen zur Beschreibung von Schwingungen, wie etwa die Schwingungsdauer, die Frequenz und die Kreisfrequenz, eingeführt.

Harmonische Schwingungen stellen so etwas wie den Idealfall dar. Es gibt aber auch Schwingungen, die diesem Idealfall nicht entsprechen. Dazu zählen gedämpfte und erzwungene Schwingungen.

Wellen sind Schwingungen, die sich räumlich ausbreiten. Beispiele sind Wasserwellen und Schallwellen, aber auch Licht ist eine Welle. In Kapitel 10 wird zunächst die sogenannte Wellengleichung eingeführt; zudem wird gezeigt, dass zur Beschreibung von Wellen neben den von den Schwingungen her bekannten Größen noch zwei weitere erforderlich sind, die Wellenlänge und die Wellenzahl. Schließlich wird in Kapitel 10 eine Reihe von Effekten vorgestellt, die ausschließlich bei Wellen auftreten: die Interferenz, die Beugung und der Dopplereffekt.

Teil IV: Den Durchblick haben: Die Optik

In Teil IV wird die Optik behandelt. In Kapitel 11 wird zunächst gezeigt, dass Licht eine Welle ist, genauer gesagt eine *elektromagnetische Welle*. Dabei wird sich zeigen, dass das sichtbare Licht nur ein kleiner Ausschnitt des gewaltigen *elektromagnetischen Spektrums* bildet, das von Wechselströmen bis hin zur Höhenstrahlung reicht. All diesen elektromagnetischen Wellen gemeinsam ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit, die *Lichtgeschwindigkeit*.

Die beiden folgenden Kapitel beschäftigen sich dann mit der Abbildung von Gegenständen durch optische Instrumente, die auf zwei wesentlichen Effekten beruht, der *Reflexion* (Kapitel 12) und der *Brechung* (Kapitel 13). Bei optischen Instrumenten spielt die Wellennatur des Lichts (fast) keine Rolle, es ist vielmehr ausreichend, Licht als Strahl zu betrachten.

Die Reflexion von Licht wird durch das sogenannte Reflexionsgesetz beschrieben und mittels Spiegeln zur Abbildung von Gegenständen ausgenutzt. Dabei sind vor allem sphärische *Hohlspiegel* von großer Bedeutung.

Brechung von Licht tritt immer dann auf, wenn ein Lichtstrahl von einem Material in ein anderes übertritt. Die Brechung wird durch das sogenannte Brechungsgesetz beschrieben; dabei spielt der *Brechungsindex* der einzelnen Materialien eine große Rolle. Die Brechung wird mittels Linsen zur Abbildung von Gegenständen eingesetzt.

Zum Schluss von Kapitel 13 werden mit dem menschlichen Auge, der Lupe und dem Mikroskop drei wichtige optische Instrumente vorgestellt und einige wichtige Größen eingeführt, mit denen die Abbildung durch optische Instrumente genauer beschrieben werden kann.

Teil V: Zwei Seiten einer Medaille: Elektrizität und Magnetismus

Teil V beschäftigt sich mit der Elektrizitätslehre und dem Magnetismus. Es wird gezeigt, dass Elektrizität und Magnetismus eng miteinander verbunden sind und dass das verbindende Element bewegte elektrische Ladungen sind. Von den fünf Kapiteln dieses Teils sind zwei den physikalischen Grundlagen gewidmet, während die drei verbleibenden eher in die physikalisch-technische Richtung gehen.

Kapitel 14 beschäftigt sich mit der *Elektrostatik*, der Lehre von ruhenden elektrischen Ladungen. Zunächst werden die Effekte beschrieben, die von ruhenden Ladungen hervorgerufen werden. Davon ausgehend werden zunächst die *Coulombkraft* und, noch wichtiger, das *elektrische Feld* eingeführt. Weitere wichtige Größen zur Beschreibung von elektrischen Feldern sind die elektrische Verschiebearbeit, das elektrische Potential und die elektrische Spannung. Das Thema von Kapitel 15 sind dann *Gleichstromkreise*.

In Kapitel 16 wird gezeigt, dass *Elektrizität* und *Magnetismus* eng miteinander verknüpft sind. Bewegte Ladungen erzeugen Magnetfelder, reagieren andererseits aber auch auf magnetische Felder. Dies führt zu Phänomenen wie dem Hall-Effekt, der Induktion und der Selbstinduktion, die alle in Kapitel 16 vorgestellt und erläutert werden. Praktische Anwendungen der Induktion sind Motor, Generator und Transformator.

In Anschluss werden in Kapitel 17 *Wechselstromkreise* behandelt. Kapitel 18 beschäftigt sich schließlich mit den Grundlagen der Halbleiterphysik und Halbleiterbauelementen.

Teil VI: Manche mögen's heiß: Die Thermodynamik

Teil VI beschäftigt sich mit der *Wärmelehre* oder *Thermodynamik*. In Kapitel 19 werden zunächst die Begriffe *Temperatur* und *Wärme* eingeführt. Anschließend werden die Speicherung von Wärme in Körpern sowie der Transport von Wärme behandelt. Es wird gezeigt, dass der Wärmetransport über drei Mechanismen erfolgen kann: Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung. In Kapitel 20 geht es dann um die Thermodynamik von idealen und realen Gasen.

In Kapitel 21 werden die sogenannten *Hauptsätze der Thermodynamik* vorgestellt. Sie bilden – ähnlich wie die Newton'schen Gesetze in der Mechanik – die Grundlage der Thermodynamik. Im Zusammenhang mit diesen Hauptsätzen werden auch verschiedene thermodynamische Prozesse vorgestellt und gezeigt, dass jede Wärmemaschine einen Wirkungsgrad kleiner als eins haben muss.

Teil VII: Der Top-Ten-Teil

Im letzten Teil dieses Buches, dem für alle »Für Dummies«-Bücher obligatorischen Top-Ten-Teil, werden zwei Zehnerlisten vorgestellt: Die erste betrifft zehn Experimentalphysiker, die die klassische Physik wesentlich mitgestaltet haben. In der zweiten Zehnerliste werden zehn bahnbrechende Experimente vorgestellt.