

Jürgen Ehlers

Modelle in der Physik

Was immer die „Realität“ sein mag,
man muß erklären können, wie man
die Welt wahrnimmt (Roger Penrose).

Allgemeine Vorbemerkungen

Nach meinem Verständnis sollte es bei dem interdisziplinären Gespräch um die Frage gehen, wie in verschiedenen Wissensgebieten Kenntnisse erworben werden, insbesondere wie über die Richtigkeit (Wahrheit?) von Aussagen entschieden wird. Der Modellbegriff, so war die Meinung, eigne sich zum Einstieg in ein solches Gespräch.

Aus meiner Sicht (des theoretischen Physikers) ist das Ziel der Physik, zumindest in der Grundlagenforschung, die Aufstellung möglichst umfassender *Theorien* für durch Beobachtung und *Messung* erfaßbare Naturdinge und -vorgänge. *Modelle* sind Hilfsmittel, um zu Theorien zu gelangen oder Theorien vereinfacht, oft anschaulich, darzustellen. Aus dieser Sicht erscheint mir der Theoriebegriff primär, der Modellbegriff sekundär.

In der Physik dienen Modelle dazu, die Vielfalt und Komplexität realer Sachverhalte durch Beschränkung auf eine übersehbare Menge ausgewählter, meist durch Messungen quantifizierbarer Merkmale zu reduzieren und dadurch rational analysierbar zu machen. Mit den ausgewählten Merkmalen bzw. *Begriffen* werden über die Sachverhalte Sätze formuliert, über deren Zutreffen objektiv, also personenunabhängig, entschieden werden kann und die experimentell überprüfbar sind.

Man spricht von Theorien, wenn die Aussagen ein widerspruchsfreies, logisch-mathematisches System bilden, das aufgrund einer Interpretation viele durch Beobachtungen bzw. Messungen überprüfbare Folgerungen enthält. Eine Theorie wird *adäquat* (richtig, brauchbar oder wahr) genannt, wenn sich die tatsächlich experimentell geprüften Folgerungen als richtig erwiesen haben (Richterfunktion). Experimentell bestätigte, als allgemeingültig erachtete Aussagen über wahrnehmbare oder durch Messungen ermittelbare Vorgänge werden *Naturgesetze* genannt.

In der Physik entstehen Modelle aus anschaulichen Vorstellungen, werden dann durch mathematische Formeln ergänzt und oft schließlich durch mathematische Strukturen ersetzt.

Jede modellfundierte Aussage ist durch die vorgenommene Reduktion auf die ausgewählten Merkmale in ihrer Repräsentation konkreter Sachverhalte eingeschränkt. Dadurch werden insbesondere quantitative Aussagen widerlegbar und führen zur Aufstellung neuer Modelle. Dementsprechend weist die Geschichte der Physik Folgen von einander ablösenden Theorien bzw. Modellen auf, wobei mehr oder weniger vollständig einsehbar ist, daß die späteren Theorien ihre Vorgänger als in einem (von der späteren Theorie aus beurteilt) eingeschränkten Bereich als Näherungen enthalten.

Bisher haben sich Theorien durchweg als verbesserungsbedürftig und -fähig erwiesen. Dennoch gibt es einige Theorien, die in einem jeweils großen, wenn auch begrenzten, Erfahrungsbereich mit angebbarer, oft hoher Genauigkeit als endgültig richtig angesehen werden können. In solchen *abgeschlossenen Theorien* kann man die Produkte der Physik sehen.

Atommodelle

1. Die Bedeutung von Modellen für die physikalische Grundlagenforschung kann beispielhaft an der Geschichte der Atomphysik im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts dargestellt werden. Schon vor 1900 hatte sich in der Chemie und in der kinetischen Gastheorie vielfältig die Annahme bewährt, die Materie bestände aus kleinsten Einheiten, den Atomen (von Molekülen werde ich der Einfachheit halber absehen). Wenn sie zuträfe, müßten unter anderem die im Periodensystem zutage tretenden Unterschiede und Ähnlichkeiten chemischer Elemente sowie die von den Elementen im Gaszustand ausgestrahlten, sie kennzeichnenden Farben (Spektren) auf den Eigenschaften ihrer Atome beruhen. Das Ziel der hier zu skizzierenden Forschungen war, Atommodelle zu entwerfen, die entsprechende Erklärungen ermöglichen.¹

¹ Hier zeigt sich bereits ein prinzipieller Unterschied zur Modellbildung in der Architektur. Dort dient das Modell, jedenfalls ursprünglich, als Vorbild für ein von Menschen zu errichtendes Gebäude; hier geht es um die Erfindung eines Gedankendinges, aus dessen mit angenommenen Naturgesetzen erschlossenen Eigenschaften sich zum Beispiel Wellenlängen berechnen lassen, die andererseits im Laboratorium an wirklichen Gasen gemessen wurden oder für künftige Messungen vorhergesagt werden können.

An *Erfahrungstatsachen* standen schon um 1860 Spektren zur Verfügung, deren Wellenlängen mit relativen Genauigkeiten von einem hundertstel Prozent gemessen worden waren. Das Handbuch der Spektroskopie von 1910 enthält auf 5.000 Seiten eine riesige Datenmenge. Dazu kamen ab 1906 Streuexperimente (siehe unten). Dieses Material galt es zu deuten, wofür um 1900 als *Theorien* die klassische Newtonsche Mechanik und die Maxwell-Lorentzsche Elektrodynamik zur Verfügung standen.

2. Im Jahre 1885 entdeckte *Johann Jakob Balmer*, daß 13 gemessene Wellenlängen λ des atomaren Wasserstoffs sich durch die Formel

$$\lambda^{-1} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (1)$$

mit $n = 2$ und $m = 3, \dots, 16$ darstellen lassen. Er fand für die Konstante R den Wert

$$R = 109721 \text{ cm}^{-1}. \quad (2)$$

(Dank der Verbesserung experimenteller Verfahren wurde hundert Jahre später, 1985, bereits

$$R = 109737,315211(11) \text{ cm}^{-1} \quad (2')$$

angegeben.) Balmer vermutete sofort, daß seine Formel für „alle“ Paare natürlicher Zahlen mit $n < m$ richtige Wellenlängen ergäbe; Spektrallinien für mindestens $n = 1, 2, 3, 4$ und hunderte von m -Werten sind gefunden worden.

Balmers Formel gab den Physikern ein Rätsel auf. Schwingende Saiten und ähnliche mechanische Gebilde erzeugen Grund- und Oberschwingungen, wobei im einfachsten Fall $\lambda = \frac{2l}{n}$ gilt ($l = \text{const.}, n = 1, 2, \dots$). Wie muß ein Gebilde beschaffen sein, um ein

Balmerspektrum hervorzubringen?

3. *Joseph John Thomson* identifizierte 1899 Elektronen als im Vergleich mit Atomen viel leichtere, elektrisch geladene Teilchen und entdeckte somit als erster ein Elementarteilchen, das in allen Atomen vorhanden sein mußte, da es mittels elektrischer Kräfte aus jedweder Materie „herausgezogen“ werden konnte.

1903 übernahm er ein im selben Jahr von *Lord Kelvin (William Thomson)* vorgeschlagenes Atommodell und untersuchte bis 1906 dessen Eigenschaften. Nach Kelvin und Thomson besteht ein Atom aus einer Kugel homogen verteilter positiver elektrischer Ladung, in der sich punkartige Elektronen bewegen (Plumpudding-Modell). Danach werden die Elektronen von der positiven Ladung wie mit einer elastischen Kraft zum Zentrum gezogen und stoßen einander wechselseitig ab.

Durch Vergleich einiger Eigenschaften dieses Modells mit Messungen an verschiedenen Stoffen, zum Beispiel Streuung von Röntgenstrahlen, fand Thomson, daß die Anzahl der Elektronen ungefähr dem aus der Chemie bekannten Atomgewicht gleich, so daß die Masse eines Atoms überwiegend nicht die seiner Elektronen sein kann. Es blieb ein Rätsel, wie Atome in stabilen Zuständen existieren können; denn nach der Elektrodynamik müßten ihre Bewegungen durch Ausstrahlung gebremst werden, und stabile Konfigurationen ruhender Ladungen gibt es nicht, wie schon Earnshaw 1831 gezeigt hatte. Auch blieb die Balmerformel (1) ungeklärt. Immerhin gab es Anzeichen dafür, daß die Regelmäßigkeiten des Periodensystems mit bevorzugten Anordnungen der Elektronenbewegungen ringförmiger Bahnen zusammenhängen könnten.

Fazit: Das Modell erbrachte zwar keine der von ihm erwarteten Leistungen, aber es deutete Lösungsmöglichkeiten an und warf Fragen für die weitere Forschung auf.²

4. *Ernest Rutherford* und seine Mitarbeiter hatten 1908 experimentell festgestellt, daß die von radioaktiven Substanzen ausgesandten α -Strahlen aus zweifach positiv geladenen Teilchen mit der Masse von Heliumatomen bestehen. Durch Beschuß von Metallfolien mit im Vergleich zu Elektronen sehr schweren α -Teilchen fanden Rutherfords Mitarbeiter Geiger und Marsden 1909 heraus, daß einige der α -Teilchen von der Folie reflektiert wurden. Dieser Befund war mit Thomsons Modell unvereinbar: Weder die leichten Elektronen noch die homogene positive Ladung können schwere Teilchen nahezu zurückwerfen (R.: „Es war, als ob eine gegen ein Blatt Papier gefeuerte Kanonenkugel zum Schützen zurückkehrte.“). Rutherford fand bald (1911) eine in der Folgezeit bestätigte Erklärung: Die Masse eines Atoms ist in einem gegenüber dem Atom sehr kleinen, positiv geladenen Kern enthalten, dessen Ladung von den Ladungen der ihn umgebenden Elektronen neutralisiert wird. Er leitete eine Streuformel her und zeigte damit, daß ein schwerer Kern tatsächlich ein Zurückprallen von α -Teilchen bewirken kann. Ein homogener Strahl vom Querschnitt F aus Teilchen der Masse m , Ladung ze und der Geschwindigkeit v werde senkrecht gegen eine Folie gerichtet, deren Kerne die Ladung Ze tragen. Dann beträgt der Bruchteil derjenigen Teilchen, die um einen Winkel zwischen θ und $\theta + d\theta$ abgelenkt werden:

$$\frac{d\sigma}{F} = \left(\frac{zZe^2}{2mv^2} \right)^2 \cdot \frac{d\theta}{\sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3)$$

² Hier zeigt sich ein weiterer Unterschied in der Rolle der Modelle. In der Physik geht es um die Anpassung an empirische Befunde, in der Architektur um die Konkretisierung ästhetischer Auffassungen.

Damit war nicht nur die oben erwähnte Massenfrage beantwortet, sondern auch die von Thomson gefundene Beziehung zwischen Elektronenanzahl (= Kernladungszahl) und Atomgewicht bestätigt und erklärt, da letzteres ungefähr doppelt so groß ist wie die nunmehr als Kernladungszahl identifizierte Ordnungszahl der Elemente im Periodensystem. Ungelöst blieben weiterhin das Stabilitätsproblem und die Erklärung der Spektren.

5. Die zuletzt erwähnten Probleme (Stabilität, Spektren) lassen sich mit klassischer Mechanik und Elektrodynamik nicht lösen; das war mittlerweile klar geworden. Nur durch neue Hypothesen, die die klassischen Gesetze teilweise außer Kraft setzen müßten, war hier weiterzukommen. Zu dieser Auffassung hatte sich *Niels Bohr* 1912 durchgerungen.

Max Planck hatte 1900 eine neue Konstante mit der Dimension eines Drehimpulses (Länge x Impuls) in die Physik eingeführt, das „Wirkungsquantum“ h ; und 1905 hatte *Albert Einstein* begründet, daß sich die Energie einfarbigen Lichtes der Schwingungszahl ν in Elementarvorgängen nur um Vielfache von $h\nu$ ändern kann. Dies mußte sich auf die Emission von Licht auf Atome auswirken. Aber wie?

Kurz nachdem er auf Balmers Formel (1) aufmerksam gemacht worden war, gelang Bohr der erste Schritt in Richtung einer Quantentheorie des Atombaus. Seine Annahmen waren:

i) Im Wasserstoffatom läuft das Elektron strahlungslos auf solchen Kreisbahnen, für die der Drehimpuls ein (ganzzahliges) Vielfaches des Wirkungsquantums beträgt:

$$2\pi m v r = n \cdot h. \quad (4)$$

Diese Bedingung zeichnet unter allen klassisch möglichen Bewegungen die stationären Zustände mit den aus (4) (klassisch) folgenden Energien

$$E_n = -\frac{m e^4}{2 \hbar^2 n^2} \quad (5)$$

($\hbar = \frac{h}{2\pi}$) aus.

ii) Bei einem Übergang vom m -ten in den n -ten Zustand sendet das Atom im Einklang mit dem Energiesatz ein Lichtquant der Frequenz ν aus, also

$$h \nu = E_m - E_n. \quad (6)$$

Aus (5 und 6) ergibt sich durch elementare Umformung Balmers Formel (1) mit

$$R = \frac{m e^4}{4 \pi c \hbar^3}, \quad (7)$$

so daß der früher der Messung entnommene Wert (2) bzw. (3) nun aus bekannten Konstanten berechnet und damit „verstanden“ werden konnte (Physikalische Modelle führen zu quantitativen Folgerungen, die neue experimentelle Prüfungen erlauben, die bei Aufstellung der Theorie nicht bekannt waren.).

So erfolgreich Bohrs Modell auch ist, es widerspricht den Gesetzen der klassischen Physik. So ergab sich die Aufgabe, eine Theorie zu finden, die die Bohrschen Formeln widerspruchsfrei abzuleiten erlaubt.

6. Eine Lösung der letztgenannten Aufgabe kann hier nicht skizziert werden. Sie ging in den Jahren 1925/1926 aus grundlegenden Arbeiten von *Werner Heisenberg, Max Born, Pascual Jordan, Paul Dirac* und *Erwin Schrödinger* hervor.

In der Quantentheorie werden die Energien der stationären Zustände des Wasserstoffatoms nicht mehr durch Anwendung einer Mischung klassischer und quantenhafter Formeln auf ein anschauliches Modell bestimmt, sondern aus Schrödingers Eigenwertgleichung:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta - \frac{e^2}{r} \right) \Psi = E\Psi \quad (8)$$

berechnet. An die Stelle eines Modells tritt eine mathematische Struktur.

Die Quantenmechanik ermöglicht darüber hinaus die Berechnung der Spektren von Atomen mit mehreren Elektronen, was mit den früheren Modellen unmöglich war, und erklärt ein riesiges Tatsachenmaterial, darunter auch das Periodensystem.

„Es wäre zu wünschen, daß eine Veranstaltung wie die heutige nicht nur zu einer seltenen Stunde der Erbauung gedeiht, sondern zu einer wiederkehrenden Beschäftigung mit diesen grundlegenden Fragen“ (Erhard Scheibe bei ähnlicher Gelegenheit).

Literatur

Bohr, N.: *Collected works*, vol. 1, J. R. Nielsen (ed.), North Holland, Amsterdam 1972, vol. 2, U. Høyen (ed.), *ibid.*, 1981.

Ludwig, G.: *Die Grundstrukturen einer physikalischen Theorie*, 2. Auflage, Berlin: Springer 1990.

Pais, A.: *Inward Bound*, Oxford: Clarendon Press 1986, esp. ch. 9.

Schrödinger, E.: *Quantisierung als Eigenwertproblem*. In: *Annalen der Physik* 79 (1926), S. 361ff.

Sommerfeld, A.: *Atombau und Spektrallinien*, Braunschweig: Vieweg 1919 u. später.

Straumann, N.: *Quantenmechanik*, Berlin: Springer 2002.

Weyl, H.: *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaften*, 5. Auflage, München: R. Oldenbourg-Verlag 1976.