

## 2.2 Gesetze und Modelle (\*)

Der Physiker sucht nach *möglichst einfachen* Gesetzen und Zusammenhängen, mit deren Hilfe er die von ihm beobachtbaren Abläufe in der realen Welt beschreiben und vorhersagen (s. Kapitel 2.3) kann. Die Betonung liegt dabei auf dem Wort *einfach*. Im Zweifelsfall wird der Physiker immer geneigt sein, der Theorie mit der einfacheren Struktur den Vorzug zu geben, wenn sie denn nicht gegenüber der komplizierteren offensichtliche Mängel in der Verlässlichkeit oder dem Umfang ihrer Aussagekraft aufweist. Und in der Tat stellt eine allzu kompliziert strukturierte Theorie oft nur einen Zwischenzustand in der Erkenntnislage dar, der mit dem Fortschreiten der Forschung irgendwann überwunden wird und in eine wieder *schöne* und vergleichsweise einfache, aber umfassendere Theorie mündet. Ein gutes Beispiel hierfür ist der *Elementarteilchenzoo* der 50-er Jahre von schließlich etwa 200 Elementarteilchen, den es dann mit der Quark-Theorie gelang, auf nur 3\*4 Spezies<sup>†</sup> zu lichten. Die Faszination und Schönheit einer neuen Theorie zeigt sich oft auch darin, dass sie Widersprüche in der alten Theorie aufhebt, derer man sich oft im Grunde schon lange bewusst war, sie aber nicht so richtig wahr haben wollte und mit etwas vagen Argumenten *unter den Teppich gekehrt* hat. Ich nenne als Beispiel für eine derartige Situation das Konzept der klassischen Thermodynamik, die sich noch nicht auf die Quantenmechanik abstützen konnte. Zur Berechnung der Entropie musste die Anzahl der elementaren Zustände abgezählt werden, eine nicht lösbare Aufgabe, solange man einem in ein Volumen eingefangenen Teilchen zubilligte, dass es jede beliebige Geschwindigkeit annehmen kann. Erst die Quantenmechanik beschränkte die Anzahl dieser Zustände auf eine Menge von maximal abzählbar unendlich vielen Elementen. Ein weiteres vielleicht noch stärker beeindruckendes, weil noch leichter nachvollziehbares Beispiel ist das im Abschnitt 10.3.4 diskutierte Problem der Helligkeit oder vielmehr der Dunkelheit des Nachthimmels.

Auch die Kritik an dem geo-zentrischen Weltbild der Astronomen vor *Nikolaus Kopernikus* (eigtl. Kopernik) (Priester, Arzt und Astronom; \* 1473 in Thorn (heute Toruń/Polen); † 1543 in Frauenburg (heute Frombork/Polen)) und *Johannes Kepler* (\*1571 in Weil b. Böblingen; † 1630 in Regensburg) entzündete sich aus heutiger Sicht primär nicht an der Annahme, dass dieses Bild vielleicht falsch wäre in dem Sinne, dass es falsche Vorhersagen macht. Aber die Berechnungsformeln z.B. für die in diesem Modell zyklodischen Planetenbahnen waren eben so unästhetisch kompliziert. Da sind die Keplerschen Ellipsen doch viel ansprechender! Das Verhält-

---

<sup>†</sup>Das derzeit weitgehend akzeptierte und nahezu alle bisher bekannten experimentellen Daten gut beschreibende sog. *Standardmodell* der Elementarteilchentheorie postuliert 3 Familien aus jeweils 2 Quarks und 2 Leptonen als ruhemassebehaftete Bausteine der Materie, dazu eine Reihe von Teilchen teilweise ohne und teilweise mit Ruhemasse, die für die verschiedenen Wechselwirkungen verantwortlich sind.

nis der Physiker zu den von ihnen geschaffenen Modellen wird aus meiner Sicht sehr gut durch ein Zitat beschrieben, das der französische Physiker und Nobelpreisträger *Pierre-Gilles de Gennes* (\* 1932 in Paris; † 2007 in Orsay) in einem Interview als von dem amerikanischen Physiker (und ebenfalls Nobelpreisträger) *Richard Feynman* (\* 1918 in New York; † 1988 in Los Angeles) stammend nannte:

*Theory is the best guess.*

Welches Modell also zur Beschreibung eines Ablaufs benutzt wird, ist zum großen Teil eine Frage der Praktikabilität, manchmal auch des Geschmacks. Dies gilt natürlich nur, solange diese Modelle äquivalent, also ineinander umrechenbar sind und insbesondere von denselben Annahmen und Voraussetzungen ausgehen. Damit eine neue Theorie eine Chance hat, eine bereits bestehende abzulösen, muss sie insbesondere 3 Bedingungen erfüllen:

1. Sie soll mit möglichst allen denjenigen bisher bekannten experimentellen Fakten verträglich sein, die auch der bisherigen Theorie entsprechen.
2. Sie muss zusätzlich mit einigen experimentellen Fakten verträglich sein, die der bisherigen Theorie widersprechen.
3. Sie soll nicht unnötig kompliziert sein.

Wenn zur Erfüllung dieser Bedingungen eine Theorie geeignet ist, die mit einigen bisher als selbstverständlich angenommenen Vorstellungen bricht, z.B. die Anzahl der Raumkoordinaten auf  $N > 3$  erhöht, dann wird der Physiker ihr dennoch den Vorzug geben. Die Frage der mangelnden Anschaulichkeit spielt dabei eine eher untergeordnete Rolle, man vertraut auf den Effekt der Gewöhnung.

An dieser Stelle ist es angebracht, den Begriff des (physikalischen) Modells noch etwas genauer zu umschreiben: Ziel des Physikers ist es nicht, die reale Welt in all ihren Facetten und Nuancen vollständig zu beschreiben. Sein Ziel ist es vielmehr, von einem realen Objekt und seinem Verhalten das ihm eigene *typische* Verhalten zu extrahieren und von Störeffekten zu trennen, die dieses Bild verzerren. Ergebnis dieser Abstraktion und Vereinfachung ist ein physikalisches Modellsystem, ein Objekt, das es in dieser Reinheit in der realen Welt gar nicht gibt. Dennoch aber liefert erst das Studium solcher idealisierter Objekte das tiefere Verständnis für die Zusammenhänge in der realen Welt. Typische Beispiele solcher Idealsysteme sind das ideale (klassische) Gas, der ideale Festkörperkristall, die ideale Newtonsche Flüssigkeit etc. .

Der Physiker ist also der große Vereinfacher unter den Naturwissenschaftlern. Seine besondere Aufgabe dabei ist es, die (möglichst wenigen) *relevanten* Eigenschaften eines Objektes herauszuarbeiten. Dabei macht er immer wieder die Erfahrung, dass bei zusammengesetzten Systemen diese relevanten Eigenschaften gerade solche sind, die am Einzelobjekt nur schwer oder gar nicht erkannt werden können. Ob z.B. ein System von  $10^{24}$  identischen Molekülen eher als kubisch-flächenzentriertes

oder als kubisch-raumzentriertes 3D-Gitter kristallisieren wird, ist natürlich im Grundsatz durch die elektronische Struktur des einzelnen Moleküls festgelegt. Diese Neigung ist aber aus dieser Struktur nur äußerst schwer zu extrahieren, da sie für das Verhalten des Einzelmoleküls z.B. bei der Ausbildung von Absorptions- und Ionisationsspektren nur eine untergeordnete Rolle spielt. Vielteilchen-Systeme sind offenbar rückgekoppelte Systeme im Sinne des Kapitels 2.6.2 mit neuen nur dem Gesamtsystem, aber nicht oder nur schwer den Einzelbausteinen zuordbaren Eigenschaften.

Durch diese Art der Modellierung entsteht häufig so etwas wie eine Schalenstruktur von physikalischen Modellen der realen Welt, skaliert nach einer als für die aktuelle Betrachtungsweise wichtig angesehenen physikalischen Größe. Das kann z.B. die Energie sein, die die jeweiligen Systeme mit anderen austauschen können. Im einfachsten Fall ist dies einfach die typische geometrische Abmessung der betrachteten Objekte. Dann entsteht so etwas wie ein mit unterschiedlicher geometrischer Auflösung betrachtetes Bild unserer Welt:

Die *Elementarteilchenphysik* beschreibt die Gesetze, nach denen sich die derzeit als elementar angesehenen Quarks zu den Bausteinen der Atome (Protonen, Neutronen, Elektronen) und zu anderen in den Atomen nicht unmittelbar auffindbaren Teilchen (schwere Baryonen und Mesonen) zusammensetzen. Der typische Durchmesser eines Quarks beträgt ca.  $10^{-17} \cdot m$ , die bei der Bildung eines Hadrons (Baryon oder Meson) aus Quarks freiwerdende Energie liegt in der Größenordnung  $10^8 \cdot eV$  (zur Energieeinheit *Elektronenvolt* s. Kapitel 8.3).

Die *Kernphysik* befasst sich mit den Regeln des Aufbaus der Atomkerne aus den Bausteinen Proton und Neutron sowie der Umwandlung von Atomkernen untereinander. Atomkerne haben einen typischen Durchmesser von  $10^{-15} \cdot m$  (Wasserstoff) bis  $10^{-14} \cdot m$  (Uran); die bei der Bildung eines Atomkerns aus Protonen und Neutronen (und weiteren Teilchen) freiwerdende Energie pro Nukleon beträgt ca.  $10^7 \cdot eV$ .

Die *Atom- und Molekülphysik* befasst sich mit der Struktur der Elektronenhüllen, die sich um jeden Atomkern herum zu dessen elektrischer Neutralisierung bilden, sowie mit deren Veränderung bei der Anlagerung mehrerer Atome zu *Molekülen*. Die Wissenschaft dieser außerordentlich komplex strukturierten Bindungsmechanismen wird üblicherweise als *Chemie* bezeichnet. Moleküle haben eine typische Ausdehnung von  $10^{-9} \cdot m$ ; die bei der Bildung eines Moleküls aus seinen Atombestandteilen umgesetzte Energie kann beiderlei Vorzeichen haben und liegt in der Größenordnung von  $10^0 \cdot eV$ .

Die Wissenschaft von der Agglomeration einer makroskopischen Anzahl von Molekülen zu den verschiedenen Aggregatzuständen fest/flüssig/gasförmig und die Analyse der Systemeigenschaften dieser Aggregatzustände und ihrer Umwandlungen untereinander zerfällt in eine Vielzahl von Teilbereichen mit sehr unterschiedlichen Bezeichnungen und Schwerpunkten:

*Festkörperphysik, Materialwissenschaft, Physikalische Chemie, Rheologie, Thermodynamik* usw. .

Die Objekte, mit denen sich diese Wissenschaften befassen, haben meistens

Abmessungen im Bereich  $10^{-4} \cdot m$  bis  $10^1 \cdot m$ . Die Prozesse, die hierbei studiert werden, sind mit Energieänderungen der Größenordnung  $10^{-6} \cdot eV$  (thermische Energie  $\kappa \cdot T$  bei  $1 \cdot mK$ ) bis  $10^{25} \cdot eV$  (Schmelzwärme von  $1 \cdot kg$  Beryllium) verbunden.

In konsequenter Fortführung dieser Strukturierung wäre als nächstes die *Astrophysik* zu nennen, die sich mit der Entstehung und Fortentwicklung ganzer Himmelskörper befasst, also von Planeten, Kometen, Sternen etc. sowie von Agglomeraten solcher Körper zu Sonne/Planetensystemen, Sternhaufen und Galaxien. Die dabei auftretenden geometrischen Abmessungen reichen von  $10^3 \cdot m$  (Durchmesser der kleinsten Jupitermonde) bis ca.  $10^{21} \cdot m$  (Durchmesser unserer Galaxie). Die relevanten Energieumsetzungen reichen von  $10^{47} \cdot eV \approx 10^{22} \cdot kWh$  (gravitationsbedingte Bindungsenergie des Systems Erde-Mond) bis ca.  $10^{72} \cdot eV \approx 10^{47} \cdot kWh$  (Energieinhalt des im Zentrum unserer Milchstraße vorhandenen *schwarzen Lochs*).

Den Abschluss bildet dann die *Kosmologie*, also die Wissenschaft von der Entstehung und raum-/zeitlichen Entwicklung unserer Welt als ganzem. Die nun relevanten Abmessungen sind von der Größenordnung  $10^{26} \cdot m$ , die gesamte im Kosmos enthaltene Energie schätzt man auf ca.  $10^{89} \cdot eV \approx 10^{63} \cdot kWh$ .

Zu dieser an den geometrischen Abmessungen orientierten Sicht unserer Welt gibt es eine sehr ansprechende populärwissenschaftliche Darstellung sowohl als Buch wie als Video ([9]).

Der heutige Kenntnisstand der Wissenschaft ist dadurch gekennzeichnet, dass er in den Zentren der jeweiligen Einzeldisziplinen i.a. relativ weit fortgeschritten ist und die weißen Flecken der Erkenntnis mehr an den Grenzbereichen dieser Disziplinen zu finden sind, also z.B. bei den Fragen, wie aus den Eigenschaften des Einzelmoleküls oder -atoms auf die Festkörpereigenschaften eines Molekül- oder Atomkristalls geschlossen werden kann. Diese unter dem Schlagwort *Relevanz interdisziplinärer Forschung* allseits beschworene Situation wird wohl noch über lange Zeit ein Faktum bleiben.

Eine unmittelbare Folge dieses Denkens in unterschiedlich stark verfeinerten Modellen ist das besonders stark ausgeprägte Denken in Größenordnungen. Um nämlich beurteilen zu können, welche physikalischen Effekte in einem konkreten Fall relevant sind und welche (in diesem speziellen Fall) vernachlässigt werden können, muss man die Größenordnung der Werte kennen, die die physikalischen Größen annehmen. Treten z.B. Kräfte unterschiedlichen Ursprungs auf, wobei die Kräfte vom Typ A alle im Bereich  $1 \cdot N$  liegen, die Kräfte vom Typ B dagegen alle im Bereich von  $10^{-3} \cdot N$  und weniger, so wird man ohne Bedenken die Kräfte vom Typ B für die Analyse des Systems (zunächst) außer Acht lassen. Es entspricht der allgemeinen Erfahrung des Experimentalphysikers, dass es nur äußerst selten darauf ankommt, eine physikalische Größe genauer als auf etwa 1 % bis 1% zu kennen. Oft ist es sogar schwierig, sie überhaupt mit einer noch höheren Genauigkeit zu messen. Aus dieser Sicht also ist das Vernachlässigen von Effekten ausreichend niedriger Größenordnung nicht etwa eine tragbare Nachlässigkeit, sondern eher eine logische Notwendigkeit<sup>‡</sup>. Um sich also

---

<sup>‡</sup>Hier wird ein fundamentaler Gegensatz zur Denkweise des Kaufmanns, genauer des Buchhalters,

in der physikalischen Welt zurechtzufinden, sollte der Physiker eine ausreichende Anzahl von typischen Zahlenwerten physikalischer Kenngrößen griffbereit, am besten im Kopf haben, also typische Abmessungen wichtiger Objekte, Zeitkonstanten wichtiger physikalischer Prozesse und die damit verbundenen Energieänderungen usw. . U.a. deshalb habe ich am Ende eines jeden Heftes eine kleine Auswahl derartiger für den Inhalt dieses Heftes wichtiger Zahlenwerte zusammengestellt.

Insgesamt betrachtet bleibt unbestritten, dass der Physiker danach strebt, die in der realen Welt auftretenden Phänomene erklären zu können, d.h. auf eine Frage vom Typ

**Warum tritt unter gewissen Bedingungen der XYZ-Effekt auf?**

eine aus seinen Modellen und Gesetzen ableitbare Antwort geben zu können. Hierin ist er jedoch in 2 unterschiedlichen Richtungen und aus gänzlich unterschiedlichen Gründen eingeschränkt:

1. Bei komplexen Fragestellungen insbesondere aus der makroskopischen Welt ist eine umfassende und konkrete Antwort eben wegen der Komplexität des Problems nicht möglich. Ein uns allen bekanntes Beispiel ist die Frage nach einer Standort-bezogenen längerfristigen Wetterprognose. Die Einschränkung ist meist nicht von grundsätzlicher Natur, sie liegt also nicht in der physikalischen Theorie selbst begründet, sondern resultiert lediglich aus den begrenzten Möglichkeiten des diese Frage bearbeitenden Physikers bzw. aus dem begrenzten Umfang der ihm hierfür zur Verfügung stehenden Informationen.
2. Bei sehr grundlegenden Fragestellungen ist die Antwort eventuell bereits ganz oder partiell identisch mit einem der Axiome der aktuellen Theorie. Der Nicht-Physiker sieht i.a. dennoch keinen Grund, weshalb es verboten sein sollte, diese Fragen zu stellen. Der Physiker dagegen sieht im Rahmen der aktuellen Theorie keine Möglichkeit, hierauf zu antworten. Ein typisches Beispiel einer derartigen Frage ist die nach der tieferen Ursache für die Existenz der Gravitation:

**Warum wirkt zwischen 2 Körpern mit endlicher Masse eine gravitative Wechselwirkung?**

Diese Frage ist aus der Sicht des Physikers nicht beantwortbar. Auch der Hinweis auf den Austausch virtueller Gravitonen (Kap. 7.14) bzw. auf die lokale Krümmung des geometrischen Raumes (Abschnitt 3.2.14) wäre keine Antwort auf diese Frage, sondern lediglich eine andersartige Beschreibung der Tatsache, **dass** diese Wechselwirkung existiert, nicht aber eine Antwort auf die Frage, **warum** dies so ist. Diese Argumentation wird den Nicht-Physiker gelegentlich verwirren, sie ist aber eine unvermeidliche Konsequenz aus dem axiomatischen Aufbau jeder physikalischen Theorie.

---

deutlich. Dieser schreibt nicht nur ohne Bedenken einen Posten in Milliardenhöhe (also ca.  $10^9$  Euro) einschließlich der Centwerte in die Bilanz, also mit einer Auflösung von  $10^{-11}$ , sondern er glaubt auch noch fest an die Relevanz all dieser Ziffern.

Zum Abschluss dieses Kapitels möchte ich noch auf den *Vereinheitlichungswahn* des Physikers eingehen. Hierunter verstehe ich das Streben nach nicht nur möglichst einfach strukturierten Theorien, sondern insbesondere nach einer Theorie, die die physikalischen Objekte mit möglichst wenig objektspezifischen Parametern charakterisiert, und die insbesondere mit möglichst wenig Naturkonstanten auskommt. Man gibt sich also nicht damit zufrieden, z.B. die Masse von Proton, Neutron und Elektron genau zu kennen, sondern man sucht nach einer Theorie, aus der diese Zahlenwerte **zwangsläufig** resultieren. Ebenso versucht man, für die verschiedenen bekannt gewordenen Wechselwirkungen,

- die gravitative Wechselwirkung zwischen Teilchen mit endlicher Masse,
- die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen elektrisch geladenen Teilchen,
- die sog. schwache Wechselwirkung zwischen allen Elementarteilchen, die eine sog. schwache Ladung tragen, und schließlich
- die starke Wechselwirkung zwischen den Hadronen bzw. primär zwischen den sie bildenden Quarks,

eine gemeinsame Theorie zu finden, die sich dann in den jeweiligen speziellen Situationen auf die oben genannten Wechselwirkungen reduziert. An dieser Stelle ist die Diskussion noch an vielen Stellen offen und ungeklärt. Man ist z.B. bis heute nicht in der Lage, die Ruhemasse der Elementarteilchen theoretisch zu begründen. Ein anderes seit langem bekanntes und viele Physiker beunruhigendes Beispiel ist die von *Arnold Sommerfeld* (\* 1868 in Königsberg/(damals)Preußen; † 1951 in München) in die Theorie der Atomspektren eingeführte *Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante*

$$\frac{\mu_0 \cdot c_0 \cdot e^2}{2 \cdot h} = (137,0359895)^{-1} \quad (2.10)$$

Der Kehrwert dieser dimensionslosen, also vom gewählten Einheitensystem unabhängigen Naturkonstanten ist bis auf eine Korrektur der Größenordnung  $10^{-4}$  gleich der Primzahl 137. Ist dies ein Zufall, oder verbirgt sich dahinter die Auswirkung einer noch fundamentaleren Theorie? Physiker glauben i.a. nicht an Zufälle.