

**No, you're not going to be able to understand it.
You see, my physics students don't understand it either.
That is because I don't understand it.
Nobody does.**

Richard Feynman zur Quantentheorie

2. Vom Atom zum Festkörper

2.1 Quantentheorie der Atome

2.1.1 Ausgangspunkt

- Heutzutage lernen wir schon in der Schule, was ein **Atom** ist; aber das war nicht immer so. Zwar haben schon die [alten Griechen](#) darüber nachgedacht (und den Namen geprägt), und zumindest einer kam zum Schluß, daß wenn man ein Stück Materie gedanklich in zwei Stücke teilt, und diesen Prozeß mit den resultierenden Stücken immer wieder weiterführt, man [irgendwann einmal](#) an ein Ende, an ein unteilbares Reststück, eben ein *Atom* kommen muß.
- Geglaubt hat das aber niemand so richtig, und noch zweieinhalbtausend Jahre später wurde **Ludwig Boltzmann**, von dem wir noch vieles hören werden, zum Selbstmord getrieben, weil auch noch im Jahre **1906** Kollegen ihm nicht abnehmen wollten, daß es Atome wirklich gibt.
 - Etwa **50** Jahre später schreibt Richard **Feynman**, einer der bekanntesten Physiker unserer Zeit, in seinem berühmten Textbuch "[Lectures on Physics](#)", daß die Atomhypothese die mit Abstand wichtigste Erkenntnis der Wissenschaft gewesen ist.
 - Heute können wir Atome "sehen", z.B. mit Hilfe des **Rastertunnelmikroskops**; das Beispiel im Link zeigt [Silizium Atome](#).
- Zunächst wollen wir einige hoffentlich bekannte, da zur Allgemeinbildung gehörende, Daten über Atome rekapitulieren.
- Atome bestehen aus [Elementarteilchen](#), sie haben einen sehr kleinen **Atomkern** und eine diesen Kern "umkreisende" **Elektronenhülle**.
 - Der Atomkern besteht aus **z** positiv geladenen [Protonen](#) und etwa gleichviel (elektrisch neutralen) [Neutronen](#). Jedes Proton besitzt genau eine positive Elementarladung **+e**. Protonen und Neutronen sind viel schwerer als [Elektronen](#), die Masse des Atoms wird deshalb fast vollständig durch den Atomkern bestimmt.
 - Ein elektrisch neutrales Atom hat demnach **z** Elektronen in der Elektronenhülle.
 - **z** heißt **Ordnungszahl** und bestimmt *eindeutig* die chemische Natur (den "Namen") des Elements.
 - Atome mit der gleicher Ordnungszahl, aber verschieden viel Neutronen im Kern, heißen [Isotope](#) des jeweiligen Elements. Viele Isotope sind **radioaktiv**, d.h. zerfallen im Laufe der Zeit, und kommen deshalb in der Natur nicht (mehr) vor.
- Atome haben eine Größe von ca. einem **Ångstrom [Å]**; eine [Maßeinheit](#) die extra für atomare Dimensionen eingeführt wurde. Da sie aber zugunsten der [SI Einheiten](#) immer weniger gebraucht wird, merken wir uns jetzt und immerdar:

$$1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm} \\ = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-8} \text{ cm}$$

- Der Atomkern alleine ist aber nur $\approx 10^{-6} \text{ nm}$ groß; auch ein einzelnes Elektron ist nicht viel größer. Die Größe des Atoms wird daher *nur* durch die Elektronenhülle definiert, das ist dann der Bereich in dem die Elektronen sich überwiegend aufhalten.
- Hier eine Übersicht mit einigen Beispielen

Atom	Atomkern z Protonen und ca. z Neutronen Ladung + z e	Elektronenhülle z Elektronen Ladung - z e
Wasserstoff (H) z = 1	1 Proton und 0 Neutronen ("Wasserstoff"), oder 1 Neutron (H - Isotop "Deuterium", stabil) oder 2 Neutronen (H - Isotop "Tritium"; radioaktiv)	1 Elektron
Helium (He) z = 2	2 Protonen 1 Neutron (instabil = radioaktiv) 2 Neutronen (stabil)	2 Elektronen
Und so weiter zum Periodensystem	****	****
Uran (U) z = 92	92 Protonen ≈ 143 ± einige Neutronen; viele radioaktive Isotope.	92 Elektronen

Einige hier wichtige Zahlen und [Maßeinheiten](#) sind:

Atomdurchmesser	1 – 2 Å = (0,1 bis 0,2) nm
Atomkerndurchmesser	≈ 10 ⁻¹⁵ m = 10 ⁻⁶ nm
Klassischer Elektronendurchmesser	5,64 · 10 ⁻¹⁵ m = 5,64 · 10 ⁻⁶ nm
Elementarladung	e = 1,6 · 10 ⁻¹⁹ C

Um zu diese Zahlen besser zu verstehen, machen wir jetzt eine Übung

Übung 2.1-1

Wie klein sind Atome?

Wie "umkreisen" die Elektronen den Atomkern? Die Antwort ist scheinbar einfach: Die Anziehungskraft zwischen einem positiv geladenen Kern mit z Protonen und *einem* negativ geladenen Elektron im Abstand r ist proportional zu $z \cdot e^2 / 4\pi\epsilon_0 r^2$; das ist exakt das gleiche Kraftgesetz wie bei der Gravitation - nur die Proportionalitätskonstante ist anders.

- Der Faktor $4\pi\epsilon_0$ sagt uns, daß das [SI Einheitensystem](#) verwendet wird. Im immer noch häufig gebrauchten (elektrostatischen) [cgs System](#), fällt er weg.
- *Hier steckt ein Problem.* Viele ältere Bücher, aber auch neuere (z.B. der "[Barrett](#)") halten sich nicht nur *nicht* an die internationale Vereinbarung, sondern machen auch noch Fehler innerhalb des benutzten Systems (z.B. [der "Barrett"](#)).
- Im "Basisbereich" gibt es einige Module zur Thematik:
 - [Zu Maßeinheiten allgemein](#), insbesondere auch Historie und [angelsächsischen Absonderlichkeiten](#)
 - [Zahlen, Daten, Fakten](#) zu den wichtigsten Einheiten und Konstanten
 - [Besonderheiten des \(immer noch häufig benutzten\) cgs Systems](#)

● Bei Atomen mit zwei oder mehr Elektronen wird die Situation aber sehr viel schwieriger als bei zwei oder mehr Planeten, da man die Wechselwirkung zwischen den Elektronen nicht wie bei den Planeten so ziemlich vernachlässigen kann, aber das ist nur ein *mathematisches*, nicht ein *prinzipielles* Problem. Im übrigen ist auch das Planetenproblem nicht mehr geschlossen lösbar falls man die Wechselwirkung zwischen den Planeten mitnimmt.

● Für das einfache Wasserstoffatom erhält man jedenfalls mathematisch dieselben Bewegungsgleichungen und dieselben (klassischen) Lösungen, wie sie für das System Sonne - Erde gelten: Beide drehen sich um den Schwerpunkt - d.h. der leichtere im wesentlichen um den schwereren Körper - und die Bahnen sind Ellipsen.

Die Übertragung dieses Planetenmodells auf Atome lag daher nahe; aber trotz zahlreicher Reparaturversuche scheitert das **Planetenmodell des Atoms** schon an folgendem Punkt:

- Eine *beschleunigte* Ladung - und ein Elektron auf einer Ellipsen- oder Kreisbahn *ist* eine beschleunigte Ladung - erzeugt eine elektromagnetische Welle, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. In dieser Welle steckt Energie, die abgestrahlt, und damit dem System entzogen wird. Aus der Himmelsmechanik oder der Raumfahrt wissen wir, daß bei Energieentzug (entspricht dem Abbremsen eines Raumschiffes), der Radius der Bahn kleiner wird.

- Die unvermeidliche Konsequenz des Planetenmodells ist daher, daß das Elektron auf einer Spiralbahn immer engere Kreise zieht und schließlich (nach sehr kurzer Zeit!) mit dem Atomkern zusammenstoßen würde.
 - *Es gab keinen Ausweg* - obwohl viele Versuche gemacht wurden - das Atom, bestehend aus Kern und Elektronen, im Rahmen der *klassischen* Mechanik irgendwie zu retten!
 - Auch aus anderen Gebieten der Physik gab es Hinweise, daß die klassische Physik an ihre Grenzen stieß, daß etwas neues, im alten System prinzipiell nicht darstellbares, erforderlich war - neue Grundgesetze, Paradigmen oder Gleichungen, wie auch immer man das ausdrücken wollte. Einige dieser [Stolpersteine der Physik](#) sind im Link dargestellt.
- Einigen großen Schritt nach vorne machte **1913** Niels **Bohr** und **1923** Louis **de Broglie**, die, wie wir heute sagen würden, das System der damaligen Physik um einige nicht näher begründete Axiome erweiterten. Dies wird Inhalt des nächsten Moduls sein.

Fragebogen

Multiple Choice Fragen zu 2.1.1