

## 2. Teil: E l e k t r o m a g n e t i s m u s

### Elektrodynamik und die vier fundamentalen Kräfte der Physik

Die *Elektrodynamik* ist die Lehre von den *elektromagnetischen Kräften* (auch *elektromagnetische Wechselwirkung* genannt). Die elektromagnetische Kraft ist eine der vier fundamentalen Kräfte in der Natur. Sie spielt eine zentrale Rolle in den verschiedensten Bereichen der Physik (Atombau, Physik der Materie, Optik, Kern- und Teilchenphysik, Quantenelektrodynamik, etc.), für andere Naturwissenschaften (Chemie, Physiologie, etc.), sowie in der modernen Technik unserer Zivilisation (Elektrotechnik, Computing, Kommunikationssysteme, etc.). Der Begriff "*Elektromagnetismus*" soll auf die umfassende Bedeutung der Elektrodynamik hinweisen.

Es ist angebracht, an dieser Stelle kurz auf die *vier fundamentalen Kräfte in der Physik* einzugehen.

- Die **Gravitationskraft** wirkt zwischen *Massen*. Das elementare Kraftgesetz ist das *Newtonsche Gravitationsgesetz* (Abschnitt 1.3, Band I)

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad ,$$

wobei  $m_1$  und  $m_2$  die Massen zweier Massenpunkte sind,  $r$  ist ihr Abstand und  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$  die Gravitationskonstante. Die Gravitation bestimmt insbesondere Phänomene der Astrophysik und, zusammen mit der Allgemeinen Relativitätstheorie (Abschnitt 8.13, Band I), die Physik des Universums.

- Die **elektromagnetische Kraft** wirkt zwischen *elektrischen Ladungen*. Das elementare Kraftgesetz ist das *Coulombsche Gesetz* (Abschnitt 9.1)

$$F = C \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad ,$$

wobei  $q_1$  und  $q_2$  zwei Punktladungen sind,  $r$  ist ihr Abstand und  $C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  eine Konstante.

- Die **starke Kraft** wirkt zwischen *Hadronen*. Es gibt zwei Klassen von Hadronen: die *Baryonen* (*Proton*, *Neutron*, etc.) und die *Mesonen* (*Pion*, *Kaon*, etc.). Alle Hadronen sind zusammengesetzt aus den *Quarks*; zwischen ihnen wirkt (innerhalb der Hadronen) die *elementare starke Kraft*. Die Baryonen bestehen aus drei Quarks und die Mesonen aus einem Quark und einen *Antiquark* (Antiteilchen). Das Proton beispielsweise ist zusammengesetzt aus zwei *u-Quarks* (elektrische Ladung  $\frac{2}{3} e$ ) und

einem *d-Quark* (elektrische Ladung  $-\frac{1}{3}e$ ), wobei  $e = 1.60 \times 10^{-19}$  C die Elementarladung ist. Die Quarks sind Elementarteilchen<sup>1</sup>. Die *Nukleonen* (Protonen und Neutronen) der Atomkerne werden durch die starke Wechselwirkung zusammengehalten; die Coulomb-Wechselwirkung ist hier abstossend und dem Betrag nach kleiner. Dies schliessen wir aus der empirischen Tatsache, dass die *Atomkerne* gebundene Zustände der Nukleonen sind, d.h. aus der Tatsache ihrer Existenz. Die starke Wechselwirkung ist also auch verantwortlich für die Kernkräfte.

- Die **schwache Kraft** wirkt zwischen den *Leptonen* (und den Quarks). Die Leptonen (*Elektron, Elektron-Neutrino, Myon, Myon-Neutrino, etc.*) sind die zweite Klasse von Elementarteilchen; zwischen ihnen wirkt keine starke Kraft (im Gegensatz zu den Quarks). Die *schwache Wechselwirkung* ist beispielsweise verantwortlich für den Beta-Zerfall des freien Neutrons (Neutron  $\rightarrow$  Proton + Elektron + Antineutrino); allgemein für den Beta-Zerfall der Atomkerne. Sie ist ebenfalls verantwortlich u.a. für den Myon-Zerfall.

Die vier fundamentalen Kräfte unterscheiden sich hinsichtlich ihrer *Stärke* und ihrer *Reichweite* radikal. Um dies quantitativ darzustellen, betrachten wir einerseits die Kräfte zwischen zwei *Protonen* (rechter Teil der Fig. 9.1 und andererseits die Kräfte zwischen zwei Quarks im Innern des Protons (linker Teil der Fig. 9.1). Wir stellen nicht die Kräfte direkt dar, sondern die *potentielle Energie*  $U(r)$  eines Objekts im Kraftfeld des andern, als Funktion ihres Abstandes  $r$ . (Die Einheiten von  $|U(r)|$  in Fig. 9.1 sind relativ.) Für die zwei Protonen beispielsweise ist die potentielle Energie der Coulomb- bzw. der Gravitationskraft gegeben durch

$$U_C(r) = C \frac{e^2}{r} \quad ; \quad U_G(r) = -G \frac{m_p^2}{r} \quad ,$$

wobei  $m_p = 1.67 \times 10^{-27}$  kg die *Masse des Protons* ist. Die potentiellen Energien der *Quark-Quark-Kräfte* (linker Teil der Fig. 9.1) sind wesentlich komplizierter; sie sind vereinfacht dargestellt.

Das *Proton* hat eine elektrische Ladungsverteilung, deren räumliche Ausdehnung durch den Kugelradius  $r_p \approx 0.8 \times 10^{-15}$  m charakterisiert ist (Ladungsradius). Für  $r \gtrsim 10^{-15}$  m sind also die (äusseren) Kräfte zwischen zwei Protonen definiert; ihre potentiellen Energien sind in Fig. 9.1 dargestellt. Das Proton kann nicht in seine Quark-Bestandteile zerlegt werden, weil die starke Kraft zwischen zwei Quarks mit zunehmendem Abstand nicht abnimmt; somit existieren keine freien Quarks. Die potentiellen Energien der Quark-Quark-Kräfte sind deshalb in Fig. 9.1 auf Abstände  $r < 10^{-15}$  m ( $\equiv 1$  *Fermi* = 1 fm) beschränkt.

---

<sup>1</sup> *Elementarteilchen* sind Teilchen, die (aus heutiger Erkenntnis) nicht aus anderen Teilchen zusammengesetzt sind.

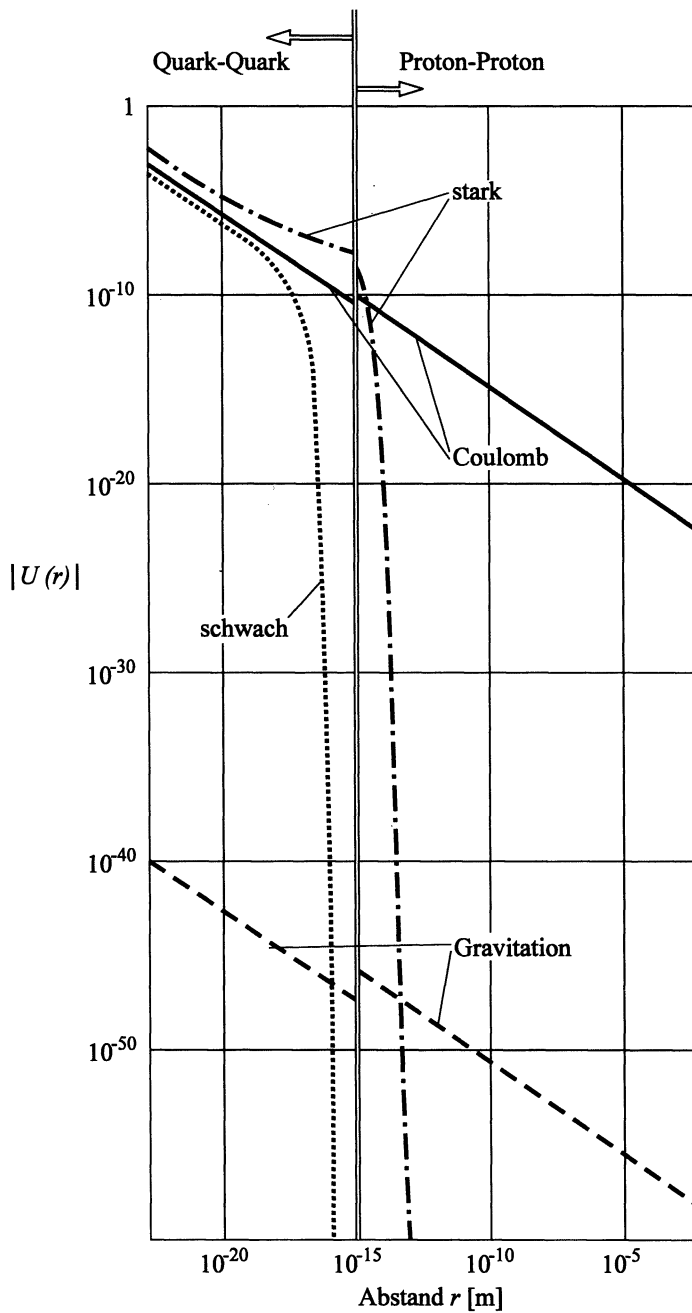


Fig. 9.1.

Der Fig. 9.1 entnehmen wir die folgenden interessanten Eigenschaften der vier fundamentalen Kräfte (man beachte die doppelt-logarithmische Darstellung). Wir betrachten zunächst die *Proton-Proton-Kräfte* ( $r > 1$  fm).

1. Die Beträge der potentiellen Energien der Coulomb- und der Gravitationskraft nehmen proportional zu  $1/r$  ab. Die potentiellen Energien der starken und der schwachen Wechselwirkung dagegen nehmen (als Funktion von  $r$ ) viel stärker ab. Dies hat zur Folge, dass für makroskopische Distanzen ( $r \gg 1$  fm) die starke und die schwache Wechselwirkung, sowohl gegenüber der Coulombkraft als auch gegenüber der Gravitationskraft, verschwindend klein sind: Wir sprechen (im Fall der starken und der schwachen Wechselwirkung) von "*kurzreichweitigen Kräften*". Ihre Kurzreichweitigkeit ist der Grund dafür, dass wir keinerlei "praktische" Erfahrung mit der starken und der schwachen Wechselwirkung haben.
2. Unabhängig vom Abstand  $r$  ist die *Gravitationskraft* um den Faktor  $10^{36}$  (!) *schwächer* als die Coulombkraft. Dies ist der Grund dafür, dass im atomaren Bereich, d.h. für Abstände von der Grössenordnung  $r \sim 10^{-10}$  m ( $\equiv 1$  Ångström = 1 Å), die *Gravitation* gegenüber den elektromagnetischen Kräften *vernachlässigbar* ist. Eine interessante Frage lautet: Warum spielen die Gravitationskräfte in der Physik überhaupt eine Rolle; warum sind sie nicht immer zu vernachlässigen gegenüber der Coulombkraft?

Nun gehen wir über zu den *Quark-Quark-Kräften* ( $r < 1$  fm).

3. Der Fig. 9.1 entnehmen wir, dass für Abstände  $r \lesssim 10^{-18}$  m die schwache Kraft praktisch gleich gross ist wie die Coulombkraft. Das ist kein Zufall: Es ist gelungen zu zeigen, dass die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung durch eine gemeinsame Theorie beschrieben werden, die *Weinberg-Salam-Theorie* der "*elektroschwachen*" Wechselwirkung. Diese Vereinheitlichung der beiden Kräfte ist 1983 mit der Entdeckung der *intermediären Vektorbosonen* ( $W^\pm$ ,  $Z^0$ ) erfolgreich abgeschlossen worden. Es ist ein Traumziel der Physiker, *alle* fundamentalen Kräfte durch eine gemeinsame Theorie beschreiben zu können. Es gibt Hinweise dafür, dass Vereinheitlichungen dieser Art bei extrem kurzen Distanzen möglich sein könnten. Bei sehr kleinen Abständen in Fig. 9.1 zeigen die elektroschwachen und die starken Kräfte tatsächlich ein ähnliches Verhalten.

In der heutigen Theorie der Elementarteilchen (*Quarks* und *Leptonen*) und ihrer Wechselwirkungen, im sogenannten "*Standardmodell*" der *Teilchenphysik*, spielt die Elektrodynamik in ihrer quantisierten Form, der "*Quantenelektrodynamik*" (QED), eine zentrale Rolle. Sowohl die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung als auch die Theorie der starken Wechselwirkung, die "*Quantenchromodynamik*" (QCD), sind der QED nachgebildet; alle

diese Theorien basieren auf dem Prinzip der *„lokalen Eichinvarianz“*, welches die Form der Wechselwirkung zwischen den Teilchen festlegt. [Gerard't Hooft, „Symmetrien in der Physik der Elementarteilchen“, Spektrum der Wissenschaft, 8/1980.] Der Elektromagnetismus ist also auch in dieser Hinsicht grundlegend.

Die Kräfte, mit denen wir es in der makroskopischen Mechanik zu tun hatten, sind – mit Ausnahme der Gravitationskräfte – alle elektromagnetischen Ursprungs: Federkräfte, Reibungskräfte, Torsionsmomente, Normaldrucke, Gas- und Flüssigkeitsdrucke, etc.. Diese Kräfte sind keine elementaren (fundamentalen) Kräfte. Sie kommen dadurch zustande, dass materielle Systeme deformiert und verändert werden oder sonstwie sich gegenseitig beeinflussen. Da die Materie aus Atomen und Molekülen zusammengesetzt ist, und diese durch *elektromagnetische Kräfte* zwischen Elektronen und Atomkernen zusammengehalten werden, sind alle diese Kräfte elektromagnetischer Herkunft.

Wir werden den Elektromagnetismus aufbauen, indem wir die Grundgesetze aus den makroskopischen Beobachtungen entwickeln (historischer Weg). Mit Hilfe dieser Gesetze behandeln wir laufend als Anwendungen Eigenschaften materieller Systeme (z.B. elektrische Leiter, Dielektrika, magnetische Eigenschaften etc.). Die Abschnitte, die Anwendungen zum Gegenstand haben, sind mit „A“ bezeichnet.