

## Einführung

Die Physik beschreibt Zustände und ihre Veränderungen mit der Zeit, also Zustandsänderungen. Um einen Zustand zu beschreiben, benötigen wir Größen, die diesen Zustand charakterisieren. Diese bezeichnet man als die Zustandsgrößen. Bei den Zustandsgrößen handelt es sich im Allgemeinen um messbare Größen, die durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Diese Beziehungen werden als physikalische Gesetze bezeichnet, d.h. die physikalischen Gesetze sind das Ergebnis unserer Bemühungen, die Zustände und ihre Veränderungen zu beschreiben und die dabei beobachtbaren Zusammenhänge letztendlich auf fundamentale Prinzipien zurückzuführen.

Ganz wichtig ist, dass Zustandsgrößen im Allgemeinen messbare Größen sind. Das bedeutet, die Gültigkeit der physikalischen Gesetze kann durch Messungen nachgeprüft werden. Messungen in der Natur selbst sind oft außerordentlich schwierig, da diese Messungen Einflüssen ausgesetzt sind, die der Messende, also der Experimentator, nicht kontrollieren kann. Zum Beispiel können die Gesetzmäßigkeiten des freien Falls nicht mithilfe von Regentropfen untersucht werden, weil bei derartigen Untersuchungen die ständig wechselnden Windbedingungen einen nicht kontrollierbaren Einfluss ausüben würden. Messungen in der Natur werden daher oft Resultate ergeben, die mit großen Fehlern behaftet sind. Seit Galileo Galilei (1564 - 1642) hat sich daher die "Experimentelle Physik" entwickelt, sodass Beziehungen zwischen den Zustandsgrößen heute durch entsprechende Laborexperimente verifiziert werden. Im Labor lassen sich nämlich die unerwünschten Einflüsse auf den Messprozess viel leichter kontrollieren, die Ergebnisse von Laborexperimenten sind wesentlich genauer. Mit dem Messprozess werden wir uns in Kap. 1.3 vertraut machen.

In dem Kap 1.1 wollen wir uns zunächst einen generellen Überblick über die Zustände mit ihren Zustandsgrößen und die Ursachen für ihre zeitlichen Veränderungen verschaffen.

## 1.1 Die fundamentalen Kräfte in der Natur

Zustände in der Natur werden immer im Raum und in der Zeit beobachtet, d.h. ein physikalisches Gesetz wird, neben vielen anderen Zustandsgrößen  $\xi_i$ , auch immer die Zustandsgrößen  $x, y, z$  für den Ort, und die Zustandsgröße  $t$  für die Zeit enthalten:

$$f(\{\xi_i\}, t, x, y, z) = 0 . \quad (1.1)$$

Dabei können die Zustandsgrößen  $\xi_i$  selbst wieder implizit vom Ort und von der Zeit abhängen. Veränderungen eines Zustands geschehen immer mit der Zeit, und das physikalische Gesetz (1.1) muss diese Veränderung richtig und experimentell verifizierbar beschreiben. Was sind nun die Ursachen für Zustandsänderungen?

Der Grund für Zustandsänderungen ist im Allgemeinen das Wirken von Kräften auf den Zustand. In der Natur kennen wir heute 4 fundamentale Kräfte:

- Die Gravitationskraft
- Die elektrische Kraft
- Die starke Kraft
- Die schwache Kraft

Die Eigenschaften dieser Kräfte wollen wir jetzt behandeln.

### 1.1.1 Die Gravitationskraft

Die Gravitationskraft  $F_G$  ist die fundamentale Kraft, die uns am vertrautesten ist. Sie ist dafür verantwortlich, dass wir “auf dem Erdboden bleiben”, d.h. sie beschreibt die anziehende Kraft zwischen Körpern mit Masse. Daher ist sie für einen großen Teil der Phänomene verantwortlich, die wir auf der Erde und am Himmel direkt beobachten können.

Die Ursache für die Existenz der Gravitationskraft ist die **schwere Masse**  $m$ .

Da das Wirken dieser Kraft immer die Existenz von zwei Massen  $m_1$  und  $m_2$ , zwischen denen sie wirken kann, voraussetzt, ist es einleuchtend, dass sie proportional zu dem Produkt aus diesen beiden Massen ist:

$$F_G \propto m_1 m_2 .$$

Von ebenso großer Wichtigkeit ist, über welchen Abstand  $r$  zwischen den beiden Massen diese Kraft wirken kann. Diese Frage wurde zum ersten Mal von Cavendish (1731 - 1810) experimentell mit Hilfe der von ihm entwickelten Gravitationswaage untersucht. Sein experimentelles Ergebnis war, dass

die Gravitationskraft quadratisch mit der Entfernung zwischen den Massen abnimmt:

$$F_G \propto \frac{m_1 m_2}{r^2} .$$

Die beiden letzten wichtigen Fragen sind, wie stark diese Kraft ist und ob sie immer nur anziehend wirkt, oder ob sie auch abstoßend zwischen den Massen wirken kann. Die erste Frage wird beantwortet durch die Einführung einer Proportionalitätskonstanten  $\Gamma$ , die ein Maß für die Gravitationsstärke ist. Der Wert dieser Gravitationskonstanten ist durch die Maßeinheiten bestimmt, mit denen wir die Zustandsgrößen  $m$  und  $r$  messen wollen. Auf diese Frage kommen wir im Kap. 1.3 zurück. Die Frage, ob die Gravitationskraft nur anziehend ist, muss bejaht werden. Bis heute ist kein Experiment bekannt, mit dem zweifelsfrei eine abstoßende Wirkung der Gravitationskraft nachgewiesen wurde. Dieses Ergebnis wird dadurch berücksichtigt, dass die Gravitationskraft immer negativ ist. Das heißt, sie wird beschrieben durch die Beziehung

$$F_G = -\Gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} .$$

Durch diese Beziehung wird u.a. auch ausgedrückt, dass die Gravitationskraft zwar mit dem Abstand zwischen den Massen abnimmt, dass sie aber erst dann verschwindet, wenn der Abstand sehr groß wird, d.h. für  $r \rightarrow \infty$ . Eine Kraft mit dieser Eigenschaft bezeichnet man als **langreichweitig** im Gegensatz zu einer **kurzreichweitigen** Kraft, deren Stärke schon bei endlichen Abständen verschwindet.

### 1.1.2 Die elektrische Kraft

Die elektrische Kraft  $F_C$  verdankt ihre Existenz der Tatsache, dass Körper nicht nur Masse besitzen, sondern unter Umständen auch geladen sein können.

Die Ursache für die elektrische Kraft ist die **elektrische Ladung**  $q$ .

Diese Kraft ist von ebenso großer Bedeutung wie die Gravitationskraft, denn sie ist verantwortlich für die Bindung der Naturbausteine zu komplexen Systemen. Als Naturbausteine wollen wir hier die positiv geladenen Atomkerne und die negativ geladenen Elektronen ansehen, die sich zunächst zu Atomen, dann zu Molekülen und schließlich zu makroskopischen Einheiten, wie z.B. dem Muskelgewebe, binden.

Die Eigenschaften der elektrischen Kraft sind in vielen Aspekten denen der Gravitationskraft sehr ähnlich. Diese Tatsache wurde zuerst von Coulomb (1736 - 1806) in einem Experiment entdeckt, das ganz ähnlich zu der Gravitationswaage von Cavendish aufgebaut war und deswegen den Namen Coulomb-Waage erhalten hat. Beide Kräfte unterscheiden sich natürlich durch

ihre Ursache (ersetze Massen  $m$  durch elektrische Ladungen  $q$ ) und durch ihre Stärke (ersetze Gravitationskonstante  $\Gamma$  durch elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0$ ). In den Maßeinheiten, die wir im Kap. 1.3 einführen werden, lautet die Beziehung für die elektrische Kraft:

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Diese Beziehung zeigt, dass auch die elektrische Kraft eine langreichweitige Kraft ist. Aber wichtiger ist, dass die elektrische Kraft im Gegensatz zur Gravitationskraft sowohl anziehend wie auch abstoßend sein kann. Dies liegt daran, dass wir 2 elektrische Ladungstypen in der Natur kennen.

In der Natur gibt es positive Ladungen  $q^+ = +|q|$  und negative Ladungen  $q^- = -|q|$ .

Die Kraft ist daher anziehend ( $F_C$  ist negativ), wenn das Produkt  $q_1 q_2$  negativ ist, dagegen ist sie abstoßend ( $F_C$  ist positiv), wenn das Produkt  $q_1 q_2$  positiv ist: “Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige Ladungen ziehen sich an”.

Ein anderer wichtiger Unterschied zwischen der Gravitationskraft und der elektrischen Kraft ist, dass die elektrische Ladung gequantelt ist.

Alle in der Natur beobachtbaren Ladungen  $q$  sind Vielfache einer **Elementarladung**  $e$ .

In den von den Naturbausteinen aufgebauten komplexen Systemen sind im Allgemeinen gleichviel positive Ladungen  $q^+$  wie negative Ladungen  $q^-$  vorhanden, d.h. diese Systeme sind nach außen neutral, also ungeladen. Dies ist der Grund dafür, dass in unserem täglichen Leben das Wirken der Gravitationskraft soviel leichter beobachtbar ist als das Wirken der elektrischen Kraft.

### 1.1.3 Die kurzreichweitigen Kräfte

In der Natur existieren noch zwei kurzreichweitige fundamentale Kräfte, die **starke Kraft**  $F_S$  und die **schwache Kraft**  $F_W$ .

Die Ursache für die starke Kraft ist die **starke Ladung**, die Ursache für die schwache Kraft ist die **schwache Ladung**.

Die Worte “starke” und “schwache” Ladung sind nur ein Ausdruck dafür, dass manche elementare Bausteine der Natur Eigenschaften besitzen, die als Ursache für die starke bzw. schwache Kraft anzusehen sind. In der Elementarteilchenphysik werden diese Kräfte mit einem Formalismus beschrieben, der im Rahmen dieses Lehrbuchs nicht behandelt werden soll.

Die Reichweiten der starken und schwachen Kraft sind kürzer als der Durchmesser des Atomkerns, und daher ist ihre Wirkung auf den Atomkern

und die noch kleineren Naturbausteine, die ihn aufbauen, beschränkt. Wir können die Wirkung dieser Kräfte daher nur bei den Zustandsänderungen des Atomkerns beobachten, und die Möglichkeiten der Beobachtung sind erst im 20. Jahrhundert entwickelt worden. Trotzdem sind auch diese Kräfte von großer Bedeutung, denn sie garantieren die Stabilität der Atomkerne, und sie sind verantwortlich für die Energieabstrahlung von der Sonne, die Voraussetzung für unsere Existenz ist. Wir werden uns wieder mit diesen Kräften in Kap. 16 beschäftigen, wenn wir z.B. die Gesetzmäßigkeiten des radioaktiven Zerfalls behandeln.

Abschließend wollen wir uns in der folgenden Zusammenstellung noch einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften der in der Natur vorkommenden **fundamentalen Kräfte** verschaffen:

Kraft	Ursache	Reichweite	Relative Stärke
Gravitationskraft	Schwere Masse	$\infty$	1
Elektrische Kraft	Elektrische Ladung	$\infty$	$10^{36}$
Starke Kraft	Starke Ladung	$10^{-15}$ m	$10^{38}$
Schwache Kraft	Schwache Ladung	$10^{-18}$ m	$10^{24}$

Obwohl daher die Gravitationskraft die Kraft mit der bei weitem geringsten Stärke ist, ist sie dennoch die Kraft, die als erste von Newton (1643 - 1727) in seinen berühmten “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” wissenschaftlich untersucht wurde.

**Anmerkung 1.1.1:** Um die Eigenschaften der 4 fundamentalen Kräfte zu erforschen, muss ihre Wirkung auf zwei Probesteilchen innerhalb der vorgegebenen Reichweiten experimentell möglichst vollständig vermessen werden. Dies ist, wegen ihrer großen Reichweiten, relativ problemlos möglich für die Gravitationskraft und die elektrische Kraft. Im Falle der kurzreichweitigen Kräfte ist dies aber schwierig, denn oft besitzen die Probesteilchen auch die gleichnamige elektrische Ladung. Im Experiment muss daher zunächst die abstoßende Wirkung der elektrischen Kraft überwunden werden. Dazu sind sehr große Energien notwendig, die Temperaturen von über 10 Mrd. °C entsprechen. Solche hohen Temperaturen werden im Inneren von Sternen erreicht, in Laborexperimenten erfordern sie den Bau großer Beschleunigeranlagen.

**Anmerkung 1.1.2:** In der modernen Physik wird der Begriff der Kraft ersetzt durch den Begriff des Felds bzw. der Wechselwirkung. Wir werden die physikalische Messgröße “Feld” erst bei der Behandlung der elektrischen Kraft einführen. Bei der Behandlung der Gravitation beschränken wir uns auf die Kraft  $F_G$ , obwohl auch in diesem Fall das Feldkonzept ohne Schwierigkeiten benutzt werden könnte.