

schenden (Zeit-)Reisen in die Vergangenheit können getrost vergessen werden, ohne daß wir wissenschaftlich etwas versäumen.

Zur Darstellung des Zeitparameters können wir jede dauernd wachsende Funktion einer reellen Variablen wählen. Die physikalische Erfahrung zeigt jedoch, daß eine Wahl des Zeitparameters besonders wichtig ist, die sog. *Inertialzeit*: Sie ist für die Formulierung der Newtonschen Mechanik nötig (vergleiche Abschnitt 1.4). Um die Inertialzeit definieren zu können, müssen wir zuerst über die Bewegung kräftefreier Körper nachdenken. Wir wissen, daß es starre Körper gibt, aus denen ein „Bezugssystem“ – also drei sich in einem Punkt, dem „Ursprung“, treffende, aufeinander senkrechtstehende materielle Achsen – gebildet werden kann. Denken wir an die drei Linien, in denen sich die Wände in einer Ecke eines Zimmers schneiden. Wenn sich ein kräftefreier Körper in bezug auf diese Achsen *geradlinig* bewegt, so nennen wir das Achsensystem eine *Inertialbasis*. Als Beispiel nehmen wir eine Glasperle, der ein Stoß auf der glatten Tischfläche gegeben wird, ohne sie gleichzeitig ins Rotieren zu bringen: sie bewegt sich geradlinig relativ zu den Wänden, falls nicht durch Reibung gestört.

Die Inertialzeit ist nun durch diejenige Zeitskala definiert, für die ein auf eine Inertialbasis bezogener *kräftefreier* Massenpunkt auf seiner geradlinigen Bahn *in gleichen Zeiten gleiche Wegstrecken* zurücklegt. Wir sprechen von *geradlinig-gleichförmiger* Bewegung. Was bedeutet kräftefrei? Es ist nicht einfach, hier einen Zirkelschluß zu vermeiden. Wir wollen Kräftefreiheit annehmen, wenn größtmögliche Sorge getragen ist, daß keine erkennbaren Kräfte auf den Massenpunkt wirken. Unter einem *Inertialsystem* verstehen wir eine Inertialbasis zusammen mit der Inertialzeit. Es gibt unendlich viele solcher Inertialsysteme: Wenn einmal eines gefunden ist, so sind alle gegen dieses geradlinig-gleichförmig (also mit konstanter Geschwindigkeit) bewegten Systeme ebenfalls Inertialsysteme. Eines ist so gut wie jedes andere. Keines sollte ausgezeichnet sein.

Strenggenommen kann es kein aus realen Körpern bestehendes Inertialsystem geben, da diese immer Kräfte aufeinander ausüben. Inertialsysteme können aber *näherungsweise* für bestimmte Zwecke realisiert werden. So ist für Experimente im Labor ein mit der Erde mitrotierendes Bezugssystem als Inertialsystem benutzbar. Für großräumige Vorgänge wie die Bildung von Zyklonen in der Atmosphäre oder schon für die Ausmessung von Bohrlöchern und Kohlenschächten genügt dieses System nicht mehr, da wegen der Erdrotation Flieh- und Corioliskräfte wirken (Lotabweichung). Die letztere Trägheitskraft ist proportional zur Geschwindigkeit des bewegten Körpers. Wir gehen dann auf ein mit der Sonne fest verbundenes Bezugssystem über. Schließlich wird für die Beschreibung des Planetensystems ein an benachbarten Sternen gedanklich festgemachtes Bezugssystem benutzt.

Zeit ist Veränderung und Dauer: Uhren messen *Zeitdifferenzen*, Zeit-Dauern, also „Abstände“ in der Zeit. Als Maß der Zeitdauer benutzen wir *periodische* Veränderungen am Himmel oder in schwingungsfähigen Systemen im Labor. Periodische Veränderungen sind solche, die sich in gleichen Zeitabständen wiederholen. Wie zeitliche Periodizität festgestellt wird? Durch Vergleich mit anderen, genaueren Uhren. Hier ergibt sich ein ähnliches Problem wie bei den starren Maßstäben, das nur die Erfahrung durchbrechen kann. Der Schriftsteller Bruce Chatwin erzählt vom Aufsatz eines Schülers in Patagonien über nicht zuverlässige Chronometer: „Die Uhr dient dazu, Verspätungen festzustellen. Auch eine Uhr verbraucht sich, und so wie ein Auto Öl verliert, verliert die Uhr Zeit.“

Astronomische „Uhren“, die Zeitintervalle verschiedener Länge überdecken, sind etwa die Rotation der Erde relativ zur Sonne oder zum Sternhimmel (Sonnen-, Sterntag), der Umlauf der Erde um die Sonne (Jahr), der Sonnenfleckenzyklus (11 Jahre), die Umlaufdauer der anderen Planeten (Pluto: 248,4 Jahre) und Kometen (Halley: 77 Jahre; im Mittel haben die Perioden von Kometen aber die Größenordnung von einer Million Jahre) und die Präzession der Erdachse um den Him-

melspol (26000 Jahre). Ein Umlauf des Sonnensystems um das Milchstraßenzentrum beträgt etwa $2 \cdot 10^8$ Jahre. Die Genauigkeit dieser himmlischen Uhren ist sehr verschieden; die Erdrotation etwa ist periodisch mit einem relativen Fehler von $(1-2) 10^{-7}$.

Andererseits können wir die Schwingungsdauer eines Pendels verwenden, eine moderne Quarzuhr oder die Präzisions-Atomuhren der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Die tägliche Ganggenauigkeit optischer Atomuhren beträgt 10^{-17} . In der Tat wird die Sekunde, die Einheit der Zeit, über die Schwingungen einer Cäsium-Atomuhr definiert: Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der Schwingung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes des Atoms ^{133}Cs entspricht. Zwei Fragen ergeben sich sofort: Stimmt die „astronomische“ Zeit mit der Atomuhr-Zeit überein? Die Antwort ist negativ; in regelmäßigen Zeitabständen müssen Bruchteile von „Schaltsekunden“ eingefügt werden, um die weniger genaue astronomische Zeit mit der sehr präzisen Atomuhrzeit in Einklang zu bringen. Die Antwort auf die zweite Frage, welche Uhren Inertialzeit messen, ist näherungsweise: Atomuhren, insbesondere Uhren auf der im Schwerfeld der Sonne frei fallenden Erde, die keinen anderen Kräften ausgesetzt sind.

1.3 Materie und Masse

Ausdehnung und Veränderung sind als Eigenschaften der „Materie“ eingeführt worden. Was ist Materie? Wir haben von Teilchen, Körpern, Massenpunkten und beiläufig auch schon vom Licht gesprochen. Charakteristisch für Körper ist, daß sie Widerstand gegenüber Kräften ausüben, die sie verschieben wollen. Von allein bewegen sich nur die Himmelskörper; auf der Erde muß alles gezogen, geschleppt, gefahren und gehoben werden. Um dieses Beharrungsvermögen der Materie zu beschreiben, statten wir sie mit der sog. *trägen Masse* m_t aus. In der Newtonschen Mechanik ist das eine vom Ort und der Zeit *unabhängige* Größe, eine Konstante.

Eine weitere Eigenschaft von Massen, etwa der Erdmasse, ist es, andere Massen anzuziehen; das kennen wir nur zu gut, wenn wertvolle Dinge herunterfallen und zerbrechen. Die gegenseitige Anziehung von Massen, die im Alltagsleben nur dann spürbar wird, wenn mindestens eine der Massen sehr groß ist, drücken wir dadurch aus, daß wir den Körpern eine *schwere Masse* m_s zuordnen. Wie eine elektrische Ladung elektrische Kräfte hervorruft, so ist die schwere Masse die Quelle der Schwer- oder Gravitationskraft. Wenn ein Körper mit seiner schweren Masse eine Gravitationskraft auf einen zweiten ausübt, so leistet dieser mit seiner trägen Masse Widerstand gegen die angreifende Kraft. Wir bestimmen die Masse gewöhnlich mit einer Waage: Dabei werden die Beschleunigungen verglichen, die zwei (ungefähr) am selben Ort auf den Waagschalen ruhende Massen durch die Schwerkraft der Erde erhalten. Wir können die Masse daher nur als ein Vielfaches einer beliebig ausgewählten Vergleichsmasse festlegen. Als Masseneinheit 1 kg ist die Masse des 1889 hergestellten, in Paris aufbewahrten Internationalen Kilogrammprototyps definiert, eines Zylinders aus einer Platin-Iridium-Legierung. Er sollte dem Gewicht eines Kubikdezimeters Wasser bei 4°C entsprechen, ist jedoch um rund 27 mg schwerer geworden.

Nun das Überraschende: Im Rahmen der Messungen erweisen sich die beiden verschieden definierten Arten von Masse bei allen bisher untersuchten Körpern als proportional, d.h. als gleich bis auf einen gemeinsamen Zahlenfaktor. Durch geeignete Wahl der Masseneinheit kann dieser zu Eins gemacht werden. Die Messung von $\frac{m_s}{m_t}$ ergibt 1 bis auf einen gegenwärtigen relativen Fehler von 10^{-12} !

Noch eine Bemerkung zur *kontinuierlichen* Verteilung der Materie. Diese erlaubt die Einführung von Begriffen wie der Massen-„Dichte“ und der momentanen Geschwindigkeit eines strömenden Materials: Jedem Ort wird zu jeder Zeit ein Wert von Dichte und Geschwindigkeit der Teilchen zugeordnet. Wir sprechen dann von einem Dichte- bzw. Geschwindigkeitsfeld oder, allgemeiner, von einem Strömungsfeld. Es gibt aber

auch Felder ohne einen *Substanz*-Aspekt. Bei ihnen wird an einem Ort zu einer Zeit zwar keine greifbare Masse gefunden, aber an diesem Ort werden Kräfte auf eingebrachte Körper ausgeübt. Paradebeispiele sind das magnetische und das elektrische Feld, die auf Eisenspäne bzw. elektrische Ladungen wirken, wenn sie in den Bereich dieser Felder kommen. Felder haben eine Energiedichte, die, wie wir in Abschnitt 4.3 sehen werden, der Dichte einer trägen Masse entspricht. Da träge und schwere Masse gleich sind und schwere Massen Gravitationskräfte erzeugen, müssen wir solche Felder auch mit zur „Materie“ rechnen. In der quantenmechanischen Beschreibung der Materie ist die Unterscheidung zwischen Teilchen und Feld ohnehin nur noch als ein spezieller Zug in der mathematischen Modellbildung, nicht als „real-existierender“ Unterschied möglich (Quantenfeldtheorie).

1.4 Newtonsche Mechanik

Die Newtonsche Mechanik geht zunächst vom Teilchenbegriff aus, mit dem ein streng lokalisiertes Objekt beschrieben wird. Sie kann aber genauso gut auf Feldverteilungen in ausgedehnten Bereichen angewandt werden wie etwa in der Strömungsphysik. Die Grundgleichung der Newtonschen Mechanik besagt: „Die träge Masse eines punktförmigen Teilchens multipliziert mit seiner Beschleunigung ist gleich der an dem Teilchen angreifenden äußeren Kraft.“ Die Beschleunigung ist als zeitliche Veränderung der Geschwindigkeit definiert; diese wieder als zeitliche Veränderung des momentanen Ortes des Teilchens. Daraus ergibt sich, daß eine Änderung des Zeitparameters eine Änderung sowohl der Geschwindigkeit wie der Beschleunigung bewirken kann. Eine einfache Änderung ist gegeben, wenn wir den Zeitparameter mit einer konstanten Zahl multiplizieren. Ist sie größer als Eins, so bedeutet dies, daß langsamer gehende Uhren benutzt werden. Wir können auch eine Konstante zum Zeitparameter hinzuaddieren. Das heißt dann, daß wir den Zeit-Nullpunkt aller Uhren in *gleicher* Weise verschieben. *Allgemeinere* Ände-