

2

Rudi Radlos und die einfachen Dinge *Mechanik, Masse und Materie*



Wie wir noch genauer sehen werden, besteht die physische „Welt“ aus drei Kontinenten: Mikronesien, Mesonesien und Makronesien.¹ Der erste Kontinent ist die Welt der Atome, auf dem zweiten leben wir und der dritte ist das gesamte Universum.² Auf den drei „Kontinenten“ gelten zum Teil dieselben, zum Teil andere Gesetze – anders als in der Mathematik.³ Dort gelten alle Regeln überall, auch für die kleinsten oder die größten Zahlen. Aber die Physik ist die reale Welt, die Mathematik die Welt der Ideen, des bloß Gedachten (nach dessen Regeln die reale Welt komischerweise funktioniert). *Size matters* (es kommt auf die Größe an), „die Dosis macht das Gift“, „mehr ist anders“ – das sind die gängigen Sprüche zu diesem Thema.⁴

Natürlich gibt es auch in der Physik die „Skaleninvarianz“, also Gegebenheiten, die sich in alle Größenordnungen transformieren lassen. Andernfalls könnten wir z. B. keine kleinen Modelle von großen Dingen bauen und damit ihr Verhalten studieren. Bei den Aufgaben der Messung physikalischer Größen unterscheiden sich die drei Welten oft gravierend. Wir messen Entfernungen in unserer „Mittelwelt“ mit dem Zollstock (mal salopp gesagt) – ein Verfahren, das sich im atomaren Bereich ebenso wenig eignet wie in fernen Galaxien. Auch von der Gravitation, der gegenseitigen Anziehung von Massen, merken wir im Alltag nichts (natürlich abgesehen von der allgegenwärtigen Erdanziehung) – aber sie hält unser Sonnensystem zusammen. Auch das ist wieder zu salopp gesagt, deswegen werden wir später hier noch genauer hinschauen.

Beschäftigen wir uns zuerst mit der Mechanik. Mechanik ist der Zweig der Physik, der die Bewegungen der Körper unter dem Einfluss von Kräften untersucht. Ihre Aufgabe ist es, die mechanischen Zusammenhänge mathematisch zu formulieren und Lösungsmethoden für mechanische Fragestellungen bereitzustellen.⁵ Und – Voraussetzung für alle Experimente – sie überhaupt erst einmal korrekt zu *messen*.

2.1 Messung von Raum, Zeit und Kraft

Rudi hatte sich von Willa einige pädagogische Tipps geben lassen. Daraufhin beschloss er, mit einem einfachen Thema anzufangen: dem Messen von Entfernungen. So begann er: „Natürlich hat auch in der Physik der Raum drei Dimensionen, genau wie in der Mathematik. Warum sollte es auch anders sein? Wir messen Länge, Breite und Höhe und benutzen dazu einen Vergleichsmaßstab: den Meter. Unser Meter hat schöne Kerben, an denen wir kürzere Längen ablesen können. Nun muss ich dich schon auf eine Gepflogenheit der Physiker hinweisen: Korrekterweise geben wir alle Maße immer zusammen mit ihrer Maßeinheit und der Messgenauigkeit an.“ „Na schön“, sagte Eddi, „das ist ja nichts Neues. Physikalisch gesehen bist du nicht 1,50 groß – ein kleiner dicker Knubbel – sondern $1,50 \pm 0,01$ m, weil ich nur auf einen Zentimeter genau ablesen kann.“⁶ Und ohne die physikalische ‚Dimension‘, wie man die Maßeinheit auch nennt, sagt eine Zahl nichts aus.“⁷ „Na prima“, grinste Rudi, „kaum hast du es verstanden, schon machst du es richtig.“ „Das hatten wir schon vor zwei Jahren: Jede Messung ist ohne die Kenntnis ihrer Genauigkeit völlig bedeutungslos. Jetzt wollen wir uns dabei nicht aufhalten, lass uns weitermachen.“⁸

Eigenschaften von Körpern werden gemessen

„Ja, wir Physiker interessieren uns für die messbaren Eigenschaften der Körper. Wir wollen nicht wissen, ob sie schön sind, und wir wollen auch nicht sagen, dass sie ‚schwer‘ sind. Wir möchten angeben, *wie* schwer sie sind – in einer eigens dafür geschaffenen Maßeinheit.“ „So ist es“, sagte Eddi, „der mathematische Körper hat ein Volumen, ist aber nur gedacht. Der natürliche, also physische Körper hat auch ein Volumen, aber dieses ist mit Stoff gefüllt. Den nennen wir ‚Materie‘. Sie verleiht dem Körper gewisse Eigenschaften, zum Beispiel eine bestimmte Festigkeit.“ Rudi nickte und Eddi fuhr fort: „Ihr sagt ja auch nicht: ‚Das hat aber lange gedauert‘, sondern gebt es in der passenden Maßeinheit an.“ „Ja“, sagte Rudi stolz, „und ich habe eine besonders fixe Sanduhr dafür entwickelt. Sie misst ein Sechzigstel eines Sechzigstels einer Stunde, und ich nenne es ‚Sekunde‘. Aber zurück zu den Körpern: Ihre träge Masse, mit der sie sich einer Geschwindigkeitsänderung widersetzt, wird in Kilogramm angegeben. Durch die Erdbeschleunigung erhält die Masse ein Gewicht, also eine Kraft, mit der sie auf die Erde drückt. Man nennt sie deswegen auch die schwere Masse – so wie bei dir. Das müssen wir aber noch genauer betrachten.“ „Ich hoffe nur, deine Physik bleibt weiterhin so einfach!“, sagte Eddi und verdrehte die Augen.

„Ja, aber *warum* verwenden wir diese Maßeinheiten?“, wollte Eddi dann wissen. „Tja, zum Teil ist es willkürlich, historisch gewachsen, ein Einigungsprozess“, erklärte Rudi, „Wir haben uns auf den Meter geeinigt, die Größe dreier mittlerer Füße unseres Stammes, und das Kilo ist ziemlich genau das Gewicht eines Laibes Ziegenkäse. Die Gelehrtenkommission der Stammesführerkonferenz hat es abgesegnet.⁹ Der Meter hängt als Referenz an der Hütte unseres Anführers. Bei der Zeitmessung sind die Dinge komplexer: Schon unsere Urahnen – besonders die Hirten – haben den nächtlichen Himmel beobachtet. Der „Hundsstern“ war jedes Jahr an der gleichen Stelle, und so wusste man, dass das Jahr aus 365 Tagen besteht.¹⁰ So haben sie den ersten bekannten Kalender gebaut.¹¹ Und was ein Tag ist, weißt ja sogar du!“ „Na, na!“, sagte Eddi warnend und fragte gleich weiter: „Und wieso hat der Tag 2 mal 12, also 24 h zu je 60 min zu je 60 Sekunden? Wozu habe ich euch Rundschädeln das Dezimalsystem beigebracht?!“ Rudi verzog das Gesicht: „Wieder historisch gewachsen.¹² Und bei unserem Zählwettbewerb haben wir ganz übersehen, dass man mit einer Hand bis 12 und mit zwei Händen bis 60 zählen kann. Also passt das doch!“¹³ „Und wie misst du die Zeit konkret?“, fragte Eddi überflüssigerweise. „Ganz einfach: durch Vergleich mit Bekanntem – mit den Definitionen, auf die wir uns geeinigt haben. Ein Eichvorgang bestimmt die abgeleiteten Größen, zum Beispiel eiche ich ein Pendel, dessen Schwingungsdauer eine Sekunde beträgt, mit einer Sanduhr, deren Durchlauf

eine Minute dauert – und die mit einer Stundenuhr, von denen ich 24 für eine Tageslänge brauche.“ Rudi holte Luft – diese langen Sätze beanspruchten ihn doch sehr.

Hier wollen wir die Szene verlassen, damit keine Langeweile aufkommt. Das Gesagte können wir in einer Zeile zusammenfassen. Denn wir unterscheiden 3 Dinge: die physikalische Größe, die Dimension (in „{ }“) und die Maßeinheit (in „[]“):

Länge l {L} [m], Masse m {M} [kg], Zeit t {T} [s]¹⁴

Das sind fundamentale Einheiten der Physik: Länge ist Länge, Masse ist Masse, Zeit ist Zeit. Sie lassen sich nicht auf andere Größen zurückführen, aber andere Größen werden aus ihnen (bzw. den zugehörigen Gesetzen oder Dimensionen) abgeleitet: Geschwindigkeit ist Weg dividiert durch Zeit, also ist ihre Einheit [m/s]. Oft werden auch kleine oder andere Buchstaben verwendet, aber auch andere (teils „exotische“) Maßeinheiten – z. B. Länge l [Zoll], Masse m [Pfund], Zeit t [Stunde].

Hier können wir auch sauberer unterscheiden: „Dimensionen“ sind die qualitativen Eigenschaften einer Größe (Länge, Masse, Zeit), „Einheiten“ ihre Messgröße (m, kg, s).

So wird eine physikalische Größe angegeben: der Zahlenwert (auch „Maßzahl“ genannt) und das „Einheitenzeichen“ als Abkürzung für die Maßeinheit in „[]“. Plus, wie schon gesagt, die Messgenauigkeit des Zahlenwertes. Anders als in der Küche eines Feinschmeckers gibt es hier keine „Prise Salz“, keinen „Schuss Rum“, keine „Messerspitze Butter“. Und wir dürfen auch nicht beliebige Einheitenzeichen mischen – etwa [mm], [Pfund] und [Jahr], denn im offiziellen „SI-Einheitensystem“ sind die Einheitenzeichen definiert, genormt und festgeschrieben.¹⁵ Natürlich ist es oft unpraktisch, die genormten Größen darin anzugeben – das Alter der Erde wird man nicht in Sekunden messen. Aber das ist normale Bequemlichkeit oder Gepflogenheit. Auf jeden Fall müssen sich die „umgangssprachlichen“ Einheiten immer in das korrekte Maß umrechnen lassen.

Die einfachste Messung ist die des Ortes – so einfach, dass wir sie im Leben kaum bemerken. Höchstens ein Autofahrer oder ein Segler fragen sich manchmal verzweifelt: „Ei, wo bin ich denn?“ Auf einer Linie genügt eine Angabe, auf einer Fläche braucht man zwei: „e3“ auf einem Schachbrett, „49°26'18"N 8°39'10"E“ auf der Erdoberfläche. Im Raum braucht man drei Koordinaten – und immer eine Angabe des Nullpunktes. Jede Entfernung wird immer relativ zu einem Bezugspunkt gemessen.

Wenn wir die drei „Grundgrößen“ der klassischen Physik betrachten (Länge, Masse, Zeit), dann kommen wir sofort zu weiteren – im täglichen Leben oft wichtigen – Einheiten: z. B. der „Dichte“. Natürlich hätte ich noch erwähnen müssen, dass sich aus der Länge unmittelbar das Volumen [m³] ableiten

Tab. 2.1 Dichte einiger Gebrauchsmaterialien

| Material | [g/cm ³] | Material | [g/cm ³] |
|--------------------|----------------------|--------------|----------------------|
| Platin | 21,45 | Meerwasser | 1,02 |
| Gold | 19,29 | Wasser | 1,00 |
| Blei | 11,34 | Eis | 0,92 |
| Kupfer | 8,92 | Olivenöl | 0,92 |
| Eisen | 7,86 | Alkohol | 0,79 |
| Granit | ca. 2,8 | Lindenholz | ca. 0,5 |
| Aluminium | 2,70 | Kork | ca. 0,12–0,20 |
| Porzellan | ca. 2,4 | Styropor | ca. 0,015 |
| Erdreich (trocken) | ca. 1,3–2,0 | Kohlendioxid | 0,0020 |
| Salzsäure | 1,2 | Luft | 0,0012 |

lässt, aber das ist nun fast *zu* einfach. Die Dichte wird auch „spezifisches Gewicht“ genannt. Sie ergibt sich ganz einfach aus der Masse bzw. dem Gewicht eines Körpers, dividiert durch sein Volumen:

$$\text{Dichte} \left[\text{kg} / \text{m}^3 \right] = \frac{\text{Masse} [\text{kg}]}{\text{Volumen} [\text{m}^3]}$$

Und Sie alle kennen die Geschwindigkeit = Länge [m]/Zeit [s] oder das geläufigere Maß [km/h], die bekannten „Ka-em-ha“. Man könnte auch sagen: „Die Dimension der Geschwindigkeit ist die Dimension der Länge dividiert durch die Dimension der Zeit“. Die Dimension der „Dichte“ (s. o.) wäre M/L³.

Zur Illustration sehen Sie in Tab. 2.1 die Dichte einiger Stoffe des täglichen Lebens,¹⁶ gemessen in der praktischeren Einheit [g/cm³]¹⁷ und natürlich mit einer Messgenauigkeit von – sagen wir mal – ungefähr $\pm 5\%$ oder weniger. Wenn eine Zahl mit x Stellen angegeben ist, dann gelten diese üblicherweise als „sicher“ und die nächste als unsicher. Kurz: „21,2“ heißt „21,2?“ – was nach der 3. Stelle folgt, ist unsicher.

Nun wissen Sie, warum Eis auf Wasser schwimmt, warum Metalle das nicht tun und warum sich Meerwasser unter Süßwasser schichtet.

Eine physikalisch exakte Messung

„Also wir messen“, sagte Eddi, „Aber die zentrale Frage ist doch: *Wie* messen wir?“ „Genau“, sagte Rudi, „wir messen *genau*. Und wir geben an, *wie* genau. In der gesamten Physik gilt ein eiserner Grundsatz: Jede Messung ist ohne die Kenntnis ihrer Genauigkeit völlig bedeutungslos. Die Angabe ‚Der Hinkelstein wiegt 5 Kilo‘ ist also physikalisch unkorrekt: Es muss z. B. $5 \pm 0,2 \text{ kg}$ “

heißen. Die Genauigkeit schätzen wir oder ermitteln sie als Mittelwert aus mehreren Messungen, üblicherweise drei.“¹⁸

„Lass uns das ausprobieren!“, sagte Eddi und stellte sich neben Rudis sorgfältig eingeritzten Längenmaßstab aus bestem Hartholz, der sogar eine Millimeter-Einteilung hatte. Rudi nahm hintereinander drei Maße und notierte die Werte: 182,7 cm, 183,4 cm und 183,5 cm. Dann rechnete er:

$$\frac{182,7 + 183,4 + 183,5}{3} = 183,2$$

„Du bist also 183,2 cm oder 1,832 m groß“, sagte er, „und zwar mit einer geschätzten Genauigkeit von 3,3 mm. ,183,2 ± 0,33 cm‘ müsste ich schreiben.“¹⁹ Eddi wiegte den Kopf: „Als Wissenschaftler bin ich skeptisch. Vielleicht drückt mein mit Wissen gefüllter Kopf mich zusammen? Vielleicht bin ich im Liegen sogar noch größer?!“²⁰ „Ja, das sollten wir ausprobieren. Wenn der Effekt sich deutlich von der Messungenauigkeit abhebt, dann kann ich ihn akzeptieren. Leg’ dich auf dieses Brett und ich messe deine Länge – von ‚Größe‘ würde ich hier nicht sprechen – noch einmal.“

Eddi folgte seiner Anweisung und Rudi machte seine drei Messungen: „Im Durchschnitt 185,7 ± 0,4 cm. Erstaunlich. Der Effekt liegt deutlich über der Messgenauigkeit. Du bist im Liegen 2,5 cm länger. Klar, bei deinem schweren Kopf!“

Mehr ist nicht dazu zu sagen. Nur eins noch: Wenn die umständliche Angabe „± x [Einheit]“ fehlt, dann geht man davon aus, dass die letzte angegebene Dezimalstelle um ± 1 ungenau ist: 9,81 bedeutet, dass der Wert zwischen 9,80 und 9,82 liegt.

2.2 Grundbegriffe von Kraft und Bewegung

Auch hier beginnen wir mit den einfachsten Werkzeugen in unserem Kasten: den Begriffen. Zum Beispiel „Kraft“. Kraft ist eine Fähigkeit, etwas zu bewirken, etwa die Bewegung eines Körpers zu ändern (Beschleunigung, d. h. Geschwindigkeits- oder Richtungsänderung) oder einen Körper zu verformen. Sowohl eine Kraft als auch eine Bewegung haben eine Richtung. Und beide brauchen einen Bezugspunkt: Eine Kraft hat einen Bezugspunkt (wo die Kraft angreift) und eine Richtung sowie eine Größe. Eine Bewegung wird auch immer relativ zu einem Bezugspunkt festgestellt.

Kraft und Gegenkraft

Rudi saß am Ufer des Sees, auf dem Fritz („Fritzi“ gerufen), der Fischer, und Eddi in ihren Booten herumpaddelten. Offensichtlich versuchten sie, in einem zwischen ihnen gespannten Netz ein paar Fische für das Abendessen zu fangen. Was auch erfolgreich war, denn nach einiger Zeit fuhren sie aufeinander zu und wuchteten das volle Netz gemeinsam in Fritzis Boot. Dann paddelte Eddi zu dem Steg an Land, auf dem Rudi saß. Er kam einen halben Meter vor dem Steg zu stehen und sagte zu Rudi: „Mach mich fest!“

Rudi tat so, als sei er in Gedanken versunken und ignorierte das kurze Grasseil, das Eddi ihm hinhielt. „Steig halt rüber!“, sagte er wie nebenbei. Was Eddi auch tat, mit einem großen Schritt.

Was dann folgte, können Sie sich denken: Es gab einen großen „Platsch!“ und Eddi lag im Wasser. Denn durch seinen kräftigen Schritt hatte er das Boot, das ungefähr sein Gewicht (genauer: seine Masse) hatte, im Wasser nach hinten geschoben. Am Ende der Bewegung war der Steg nicht den geschätzten halben, sondern einen vollen Meter von ihm entfernt und sein Schritt führte ihn ins Leere. Die Kraft, mit der er sich vom Boot abstieß, erzeugte eine gleich große Gegenkraft, die das Boot von ihm weg schob. Und da die Masse des Bootes ungefähr seiner eigenen entsprach, schob er das Boot genauso schnell und damit weit weg, wie er sich vorwärts bewegte – und diese Strecke fehlte ihm dann bei seinem Schritt.

Darüber dachten die beiden nach, nachdem Eddi sich beruhigt hatte. Und es dauerte lange, bis er sich beruhigt hatte, denn er fühlte sich von Rudi hereingelegt und akzeptierte dessen Entschuldigung, es hätte nur pädagogischen Zwecken gedient, nicht im Geringsten. „Wenn es aber ein großes und schweres Boot gewesen wäre“, fragte er, „hätte ich es dann mit derselben Kraft abgestoßen?“ „Ja, hättest du. Stößt du dich mit einer Kraft F vom Boot ab, übst du eine Gegenkraft $-F$ auf das Boot aus. Und Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung, wie du an dieser Formel siehst.“ Und er schrieb sie hin:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{b}$$

Rudi erklärte weiter: „Beides sind gerichtete Größen, ‚Vektoren‘, wie wir Fachleute sagen, und die Beschleunigung \vec{b} . Umgekehrt ist die Beschleunigung gleich der Kraft \vec{F} geteilt durch die Masse. Ist die Masse groß, wie bei dem dicken Schiff, dann ist die Beschleunigung klein, das Schiff setzt sich kaum in Bewegung, und du fällst nicht ins Wasser.“ Eddi begann zu verstehen: „Wenn ich also einen kräftigen Schritt nach Osten mache, dann schiebe ich mit gleicher Kraft die Erde nach Westen und ihre Drehung verlangsamt

sich ein wenig?“²¹ „So ist es“, bestätigte Rudi, „aber da sie hunderttausend Milliarden Milliarden mal schwerer ist als du, bemerkt es kein Schwein.“²²

Recht hat er. Und wenn 1,4 Mrd. Chinesen (zu je 70 kg) gleichzeitig in die Höhe springen würden, dann wäre das Massenverhältnis zur Erde immer noch ca. 10^{11} zu $6 \cdot 10^{24}$ – die Erde ist einfach verdammt schwer. Anders dagegen ein Hubschrauber: Er dreht seinen Rotor, aber der Rotor dreht auch ihn. Deswegen hat er den senkrechten Propeller am Heck, um die entsprechende Gegenkraft zu erzeugen.

Mit diesem Zusammenhang (Kraft gleich Masse mal Beschleunigung) wird auch die Definition der Maßeinheit „Newton“ klar: $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$. Ein Newton ist also die Kraft, die eine Masse von 1 kg mit 1 m/s^2 beschleunigt. Denn die Beschleunigung ist die Veränderung der Geschwindigkeit (m/s) pro Zeit (s). Mit ihr werden wir uns gleich noch beschäftigen.

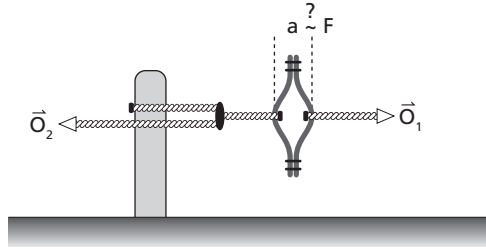
Die SI-Einheiten sind menschlich, stammen aus der „Mittelwelt“. Sie sagen langsam „einundzwanzig“ – 1 s. Sie halten Ihre Unterarme mit den Fingerspitzen gegeneinander – 1 m. Sie werfen einen leichten Medizinball – 1 kg. So weit, so gut. Was in aller Welt ist aber 1 Newton?! Ganz einfach: Sie *tragen* den Ball – 10 N ziehen an Ihrem Arm. 1 Apfel oder 100 g Wurst auf der Waage – 1 N (genauer: 0,981 N). In der Weltraumstation hat der Medizinball immer noch eine Masse von 1 kg und setzt sie einer Beschleunigung entgegen, aber auf die Waage bringt er ... nichts!

Zwei kämpfende Böcke

Ein weiteres lehrreiches Beispiel sahen die beiden am nächsten Tag. Zwei Böcke, etwa gleich groß, trugen einen Revierkampf aus, indem sie mit ihren Hörnern aneinanderrannten. „Die Kopfschmerzen möchte ich nicht haben!“, sagte Eddi, „Das ist ja, als ob ich mit dem Kopf gegen eine Felswand rennen würde!“ „Ist es das wirklich?“, fragte Rudi, „Wenn der eine Bock gegen einen Felsen donnert, ist es doch nur die halbe Kraft, denn der Felsen steht still. Wenn er aber gegen den anderen Bock knallt, der mit gleicher Geschwindigkeit auf ihn zurennt, dann muss er doch doppelt so viel Kraft aufwenden, oder!?“ Eddi schüttelte den Kopf: „Das sehe ich nicht so. Denn der zweite Bock mit seiner Geschwindigkeit – und die ist wichtig! – ersetzt den Felsen. Stünde er still, würde er durch den Aufprall des Gegners in Bewegung gesetzt.“

„Wie könnten wir das testen?“, fragte Rudi, noch zweifelnd. Eddi hatte eine Idee: „Wir binden einen Ochsen an einen Pfahl und lassen ihn ziehen. Mit deiner famosen Erfindung messen wir die Kraft. Dann ersetzen wir den Pfahl durch einen zweiten Ochsen, der in die andere Richtung zieht. Dazu müssen wir nur das Seil zum Pfahl durchschneiden, wenn der zweite angezo-

Abb. 2.1 Das Ochsen-Experiment mit dem Kraftmesser



gen hat.²³ Im Idealfall ändert sich dein Kraftmesser nicht. Wie funktionier er überhaupt?“ (Abb. 2.1)

„Ich habe zwei biegsame Weidenzweige aneinandergebunden. Wenn ich sie beide nach außen ziehe, kann ich die Kraft dadurch messen, dass ich den Abstand a messe.“ „Welcher Kraft F entspricht ein Zentimeter für a ?“ „Das weiß ich nicht.“ „Ist a denn immer genau proportional zu F ?“ „Das weiß ich auch nicht.“ „Das sind aber ziemlich viele ‚Weiß ich nicht!‘“ Rudi blieb gelassen: „Die Physik macht eben Fortschritte, abhängig von der Technik. Wenn ich meinen Kraftmesser geeicht habe, wissen wir mehr.“²⁴

Was soll ich Ihnen sagen? Das Experiment ergab das von Eddi vorausgesehene „Nullresultat“: Der Pfosten „zog“ mit derselben Kraft gegen den Ochsen Nr. 1 wie der Ochse Nr. 2. In der modernen Welt finden wir diese Regel im Straßenverkehr wieder (wenn es auch ein makaberes Beispiel ist): Die physikalische Wirkung ist dieselbe, wenn ein Auto gegen eine Betonwand kracht oder in ein mit gleicher Geschwindigkeit entgegenkommendes Auto mit gleicher Masse.

Ein schöner Beleg für das Prinzip „Kraft gleich Gegenkraft“. Und die Summe aller Kräfte ist null. Das bringt uns zu einer neuen Anwendung.

Kraft und Gewicht

„Hatten wir das nicht schon?!“, fragte Eddi mit gerunzelter Stirn, als sie über den Fall eines Körpers zur Erde und die dabei wirkenden Kräfte sprachen. „Nein“, sagte Rudi und Eddi konterte: „Klar hatten wir das schon! Ich erinnere mich genau, vor etwa zwei Jahren, als wir unter dem Apfelbaum saßen.“²⁵ „Na, schön, wenn du meinst. Fass es noch einmal zusammen, bitte!“ Eddi holte aus: „Die Geschwindigkeit ist der zurückgelegte Weg, in diesem Fall der Fallweg – haha! Schönes Wortspiel! – dividiert durch die Zeit oder anders gesagt: die zeitliche Veränderung des Weges. Beim freien Fall wird sie durch eine Kraft hervorgerufen, die durch die konstante Erdbeschleunigung entsteht. Wir haben ja damals erkannt, dass die Erde mit ihrer Riesenmasse alle Körper zu sich zieht. Wir wissen nur nicht, warum. Werden sie nicht

durch eine Gegenkraft gehalten – wie bei uns, die wir durch die Kraft, die der feste Boden auf uns ausübt, gestützt werden –, dann fallen sie und werden immer schneller.“ „Kannst du etwas kürzere und weniger verschachtelte Sätze verwenden?!“, maulte Rudi. „Na, gut. Die Geschwindigkeit v ist gleich der Beschleunigung g mal der Zeit t . Beschleunigung ist definiert als Geschwindigkeitsänderung pro Zeiteinheit. Geschwindigkeit ist definiert als Wegänderung pro Zeiteinheit. Den Weg nenne ich s . Kürzer kann ich es nicht sagen. Nur aufschreiben.“ „Dann mach’s!“ Und Eddi tat es, wobei er gleich die Einheiten hinzufügte:

$$v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = g \left[\frac{\text{m/s}}{\text{s}} \right] \cdot t [\text{s}]$$

$$v = \frac{ds}{dt} \Rightarrow s = \int v \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

„Ein Integral ...“, sagte Eddi, „Kannst du dich erinnern?“ Rudi konnte sich erinnern, um sich keine Blöße zu geben, und spann den Faden weiter: „Wenn ich also die Zeit t für verschiedene Fallhöhen s messen kann, dann kann ich daraus die Erdbeschleunigung g bestimmen.“

Gesagt, getan. Es dauerte ein paar Stunden, bis die beiden in verschiedenen Experimenten den Wert von g mit einfacher Genauigkeit bestimmt hatten: $g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$. Eine gute Annäherung, denn in einer DIN-Norm (DIN 1305) wird sie als $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ festgelegt.²⁶

Das brachte die beiden sofort zu einer praktischen Anwendung: die Messung der Reaktionszeit. Rudi hielt einen ca. 50 cm langen Holzmaßstab an eine glatte Felswand. Die Testperson musste ihren Daumen dicht über sein unteres Ende halten. Irgendwann ließ Rudi den Stab los, und die Versuchsperson sollte ihn so schnell wie möglich mit dem Daumen gegen die Wand drücken. Die Jäger des Stammes waren die schnellsten. Sie schafften es, den Stab nach ca. 20 cm zu stoppen. Rudi rechnete:

$$t = \sqrt{\frac{2s}{g}} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{0,4}{9,8}} \approx 0,20 \text{ s.}$$

„Was ist aber nun mit dem Gewicht?“, fragte Eddi. „Es ist die Kraft, die der Erdbeschleunigung entspricht“, sagte Rudi, „Die Gewichtskraft G ist die Masse m , multipliziert mit der Erdbeschleunigung g . Gewicht ist keine Eigenschaft eines Körpers wie seine Masse, sondern eine Kraftwirkung.“ Eddi schaute ihn fragend an: „Würde das bedeuten, dass etwas auf dem Mond *weniger* wiegt? Der ist ja viel kleiner als die Erde und müsste ein kleineres ‚ g ‘

<http://www.springer.com/978-3-642-54408-8>

$E=mc^2$: Physik für Höhlenmenschen

Beetz, J.

2015, XII, 359 S. 119 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-642-54408-8