

# Zwei Sünden Newtons

Fernwirkung und absoluter Raum – oder doch keine Sünden?

F. Herrmann

## 1 Einleitung

Wir Physikexperten von heute finden die Newton'schen Gesetze verständlich und plausibel. Wir finden sie so einfach und selbstverständlich, dass wir sie ohne Zögern unseren Schülerinnen und Schülern zumuten. Wir haben uns so an sie gewöhnt, dass es uns schwerfällt zu sehen, was für eine Leistung ihre Formulierung zu Newtons Zeit darstellte.

Mit welchen Schwierigkeiten ihre Formulierung verbunden war, offenbart sich aber schon, wenn man in Newtons *Principia* nur etwas mehr als das kurze Kapitel mit den drei Gesetzen liest, insbesondere das ebenfalls kurze Kapitel mit den Definitionen, das der Formulierung der drei Gesetze vorausgeht.

Eigentlich ist es ein Wunder, dass es Newton überhaupt gelungen ist, die Gesetze zu formulieren, denn ihm fehlte, aus heutiger Sicht, eine wesentliche Voraussetzung dafür: der Feldbegriff.

Das Fehlen des Feldbegriffs macht sich bei Newton an zwei Stellen bemerkbar. Man kann auch sagen, dass Newton zwei Hilfskonstruktionen erfinden musste, damit eine Beschreibung möglich wurde. Oder man kann es so ausdrücken: Die Newton'sche Mechanik hat zweierlei begriffliche Mängel. Um diese soll es im Folgenden gehen. Es ist das, was oben im Titel als seine Sünden bezeichnet wurde.

## 2 Fernwirkungen

Den ersten dieser Mängel erkennt man am Besten, wenn man das 3. Gesetz betrachtet. Es bezieht sich auf zwei Körper, etwa die Erde und den Mond, Abb. 1.

Die Erde übt auf den Mond eine Kraft aus, und der Mond auf die Erde. Nach dem dritten Gesetz sind diese Kräfte entgegengesetzt gleich. Die Kraft auf den Mond, also eine Wirkung am Ort des Mondes, wird verursacht durch die Erde, d. h. einen anderen, weit entfernten Körper. Da eine Kraft eine Impulsänderung zur Folge hat, siehe das zweite Newton'sche Gesetz, haben wir eine Impulsänderung der Erde, die mit einer entgegengesetzten Impulsänderung des Mondes einhergeht. Man würde eigentlich gern sagen, dass der Impuls irgendwie

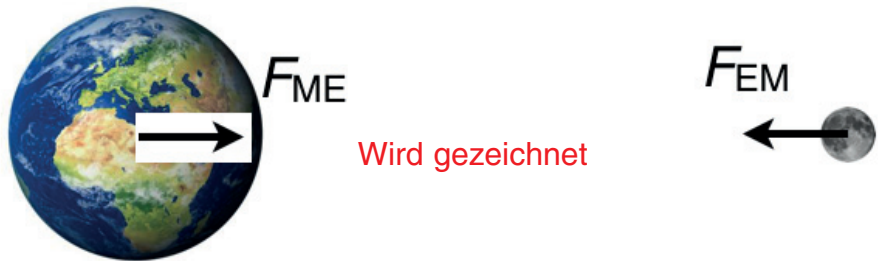


Abb. 1: Auf den Mond wirkt eine Kraft, weil sich in etwa 400 000 km Entfernung die Erde befindet.

vom Mond zur Erde gelangt ist (oder umgekehrt von der Erde zum Mond). Davon ist aber bei Newton nicht die Rede. Denn wenn er das gesagt hätte, so hätte man sofort gefragt: Wie kommt der Impuls denn da hinüber? Er muss ja irgendwie den Raum zwischen Mond und Erde überwinden; und wenn Impuls durch den Raum geht, so muss sich dort irgendetwas befinden, das den Transport ermöglicht. Oder etwas vorsichtiger ausgedrückt: Ein Raumgebiet, durch das Impuls hindurchgeht, muss sich in irgendeiner Eigenschaft von einem anderen Raumgebiet unterscheiden, durch das gerade kein Impuls hindurchgeht. Eine solche Eigenschaft kann man aber nicht.

Deshalb spricht Newton nicht von einem Impulstransport oder einem Transport von „Bewegung“ oder *Quantitas motus*. Stattdessen erfand er eine raffinierte Sprache, die es ermöglicht, diesem Problem aus dem Weg zu gehen. Es ist die Sprache, die wir alle kennen, die wir heute noch benutzen und die wir unseren Schülern und Studenten beibringen: „Der Mond übt auf die Erde eine Kraft aus“ und nicht: „Es geht Impuls vom Mond zur Erde“.

Nun ist allerdings auch mit der Newton'schen „Kraftsprache“ das Problem nicht ganz aus der Welt. Denn jetzt würde man vielleicht so fragen: Woher weiß denn der Mond, dass sich in 400 000 km Abstand die Erde befindet? Hierzu äußert sich Newton nicht, aber die Unzulänglichkeit, d. h. die fehlende Aussage über das Gebilde, das sich zwischen Erde und Mond befindet, fällt auch nicht so stark auf, wie wenn er gesagt hätte, der Impuls geht vom Mond zur Erde.

Die spätere Kritik an dieser Beschreibungsweise wird so ausgedrückt: Newton hat „Fernwirkungen“ angenommen. Man weiß heute, man weiß seit Mitte des 19. Jahrhunderts, dass das eine schlechte Vorstellung ist, aber man sieht es Newton nach: Er konnte nicht anders, er hatte den Feldbegriff noch nicht.

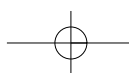
Wenn man Newtons Werk liest, so könnte man vielleicht zu der Schlussfolgerung kommen, Newton habe selbst an Fernwirkungen geglaubt; man mag sogar denken, er war wissenschaftlich noch nicht auf der Höhe. Mit einer solchen Auffassung würde man aber weit daneben liegen. Dass eine Fernwirkung ein unwissenschaftliches Konzept ist, war Newton klarer als kaum einem anderen. Gegen eine solche Vorstellung muss und musste sich jeder, der wissenschaftlich denkt, sträuben – auch damals schon. Und Newton selbst hat die Idee der Fernwirkung vehement kritisiert.

In einem Brief an den Gelehrten Richard Bentley (1662-1742) im Jahr 1693, also 6 Jahre nach Erscheinen der *Principia*, schreibt er [1]:

*Dass die Schwere über eine Entfernung durch ein Vakuum ohne die Vermittlung von irgendetwas anderem ... wirken sollte, ist für mich eine solche Absurdität, dass ich glaube, dass niemand, der in philosophischen Dingen eine hinreichende Denkfähigkeit hat, darauf hereinfallen könnte.*

*Die Schwere muss durch ein Agens verursacht werden, das ständig gemäß bestimmter Gesetze wirkt, aber ob dieses Agens materiell ist oder nicht, ist eine Frage, die ich der Betrachtung des Lesers überlasse.*

Also kurz: Fernwirkungen sind eine absurde Idee. Klarer als Newton selbst kann



man es kaum ausdrücken. Aber warum steht nichts davon in seinen Principia?

Hierauf findet man die Antwort in einer Ergänzung zur zweiten Auflage der Principia, aus dem Jahr 1713, also 26 Jahre nach der Erstauflage; Newton war 71 Jahre alt. Dort steht sein berühmtes *Hypoteses non fingo*, sinngemäß übersetzt: Ich spekuliere nicht. Er hatte an sein Werk einen hohen Anspruch gestellt: dass in seinen Argumenten nichts vorkommen sollte, was nicht beobachtet oder bewiesen ist.

Soweit die Fernwirkungen, seine erste „Sünde“.

### 3 Der absolute Raum

Nun zur Zweiten. Diese ist am deutlichsten zu erkennen, wenn man das 1. Gesetz betrachtet. Wir geben es in moderner, kurzer Formulierung wieder:

„Ein kräftefreier Körper bewegt sich geradlinig gleichförmig.“

Auf den ersten Blick erscheint es einleuchtend. Oder doch nicht? Eigentlich gar nicht. Denn jeder Körper bewegt sich geradlinig gleichförmig, wenn man das Bezugssystem geeignet wählt. Damit der Satz überhaupt einen Sinn bekommt, muss man erklären, gegen wen oder was sich der Körper geradlinig gleichförmig bewegt. Und das hat Newton natürlich gesagt, nämlich in dem schon erwähnten Kapitel mit Definitionen und Begriffsklärungen, das den Gesetzen vorausgeht. Dort wird erklärt, was er unter Bewegungsgröße versteht, unter Masse usw., und es wird auch erklärt, auf was sich eine Bewegung bezieht, nämlich auf den absoluten Raum: *Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand, stets gleich und unbeweglich.*

Eine Bewegung gegen den absoluten Raum nennt er eine wahre Bewegung. Andere Bewegungen heißen relative Bewegungen. Was er unter einer wahren Bewegung versteht, erläutert er ausführlich. Die Quintessenz finden wir in diesem Satz: *Die Ursachen, durch welche wahre und relative Bewegungen verschieden sind, sind die Kräfte, welche zur Erzeugung der Bewegung auf die Körper eingewirkt haben. Eine wahre Bewegung wird nur erzeugt oder abgeändert durch Kräfte, welche auf den Körper selbst einwirken, wogegen relative Bewegungen erzeugt und abgeändert werden können, ohne dass die Kräfte auf diesen Körper einwirken.*

Wenn wir also alle Kräfte kennen, so können wir auch entscheiden, ob eine Bewegung eine „wahre“ Bewegung ist. Denn wenn wir keine Kräfte haben, wird eine wahre Bewegung nicht verändert.

Wird ein Körper beschleunigt, so treten nach Newton Trägheitskräfte oder Scheinkräfte auf. Beschleunigt gegen wen? Natürlich gegen den absoluten Raum.

Nun kam man später zu der Überzeugung, dass es einen absoluten Raum nicht gibt. Hier, so das Urteil der Nachwelt, habe Newton gegen seinen eigenen Grundsatz „Hypoteses non fingo“ verstoßen.

So wirft ihm Ernst Mach 1897 vor [2]: *Das Newton auch in den eben mitgetheilten Überlegungen gegen seine Absicht, nur das Thatsächliche zu untersuchen, handelt, ist kaum nöthig zu bemerken. Ueber den absoluten Raum und die absolute Bewegung kann niemand etwas aussagen, sie sind bloss Gedankendinge, die in der Erfahrung nicht aufgezeigt werden können.*

Dies ist es, was wir Newtons zweite „Sünde“ nennen wollen – zunächst wenigstens.

### 4 Doch keine Sünden?

Wir fassen noch einmal zusammen. Es ging um die Behandlung von zwei Arten von Kräften:

1. Die Gravitationskräfte. Sie werden nach Newton verursacht durch andere Körper; die Kraft auf den Mond wird verursacht durch die Erde. Newton beschreibt sie als Fernwirkungen.
2. Die Trägheitskräfte. Für sie wird kein verursachender Körper angegeben. Sie kommen zustande durch eine „wahre“ beschleunigte Bewegung gegen den absoluten Raum.

Im Prinzip hätte Newton auch die Trägheitskräfte als verursacht durch andere Körper beschreiben können. Die Idee dazu lag gar nicht fern. Insbesondere wurde sie viel später durch Ernst Mach vertreten: Verursacher der Trägheitskräfte wären danach die Fixsterne. Wie eine solche Beschreibung mathematisch funktionieren könnte, wird sehr schön in einem leicht lesbaren Büchlein von D. W. Sciama beschrieben [3]. Ob Newton das nicht konnte, weil die Kenntnisse über die Fixsterne noch ungenügend waren, oder ob er es nicht wollte, wissen wir nicht. Jedenfalls hat er die andere Beschreibung gewählt: Er hat ein physikalisches Objekt, das die ganze Welt ausfüllt, postuliert, den „absoluten Raum“. Nehmen wir an, er hätte die Wahl gehabt zwischen der Beschreibung als von den Fixsternen ausgehenden Fernwirkungen und seinem absoluten Raum: Welche der beiden Ideen wäre die bessere, die gesündere, die modernere? Unserer Meinung nach die Zweite, der absolute Raum. Ihn trifft nicht die Kritik, die er selbst in seinem Brief an Bentley so vehement äußert, nämlich dass es absurd ist, eine Fernwirkung für möglich zu halten.

Man kann noch einen Schritt weiter gehen und sagen: Den absoluten Raum kann man als Vorläufer des modernen Gravitationsfeldes sehen, siehe auch die umfassende Arbeit *Das Problem der Trägheit* von D. Giulini [4]. Bei Newton hatte der Raum noch die Eigenschaft, durch nichts verursacht, also unabhängig von der Materie zu sein. Die Allgemeine Relativitätstheorie lehrt uns, dass das nicht zutrifft. Aber für diese Einsicht war die Welt noch lange nicht reif. Die Idee Newtons, dass Trägheitskräfte durch eine Bewegung gegen den absoluten Raum verursacht werden, ist eine sehr moderne Idee; sie beschreibt die Kräfte als eine lokale Wirkung.

Nun liest man heute aber allenthalben: „Den absoluten Raum gibt es nicht! Der Raum ist leer.“ Wir haben die Zitate gesehen.

Dies ist aber ein Standpunkt, den man schon lange nicht mehr vertreten kann. Das Gebilde, das man manchmal Raum, manchmal Gravitationsfeld, manchmal Vakuum und früher meist Äther nannte, ist nicht „nichts“. Es ist etwas vorhanden, das Eigenschaften hat, genauer: das lokale Eigenschaften hat. Der so genannte leere Raum hat sich im Laufe des 20. Jahrhunderts mehr und mehr gefüllt: die Quantenelektrodynamik sagt uns, dass das, was wir elektrische und magnetische Felder nennen, die angeregten Zustände sind, von etwas, das auch dann vorhanden ist, wenn die Feldstärken null sind, was sich dann im Grundzustand befindet. In den letzten Jahrzehnten kam noch die dunkle Energie hinzu. Auch im Zusammenhang mit der Gravitation kann man nicht sagen: Da ist nichts. Es ist etwas da, dessen Eigenschaften man benennen kann. Man kann die Raumkrümmung messen, und sie ist von Ort zu Ort unterschiedlich.

Die Situation ist in einem Punkt unbefriedigend, der dem Physiker vielleicht nicht wichtig erscheint, dem Lehrer dagegen um so mehr. Für dieses, die ganze Welt ausfüllende Etwas gibt es keinen passenden, allgemein gebräuchlichen Namen hat.

Früher hätte man es Äther genannt, die Quantenelektrodynamiker und die Teilchenphysiker nennen es Vakuum, die Gravitationsphysiker nennen es Gravitationsfeld oder Raum.

Nun ist der Name Äther vorbelastet, den mag niemand mehr in den Mund nehmen. Maxwell hat das sehr hübsch ausgedrückt [5]: *Aber neben diesen hohen metaphysischen Notwendigkeiten für ein Medium gab es auch banalere Gründe, die verschiedensten Äther einzuführen. Es wurden Äther erfunden, damit die Planeten darin schwimmen können, um elek-*

trische Atmosphären und magnetische Ausflüsse zu darzustellen, um Empfindungen von einem Teil unseres Körpers zu einem anderen zu vermitteln, und so weiter, bis der ganze Raum drei oder vier Mal mit Äther gefüllt war. Nur wenn wir uns klar machen, welchen umfangreichen und schädlichen Einfluss die Ätherhypothesen früher auf die Wissenschaft hatten, können wir den Horror verstehen, den nüchtern denkende Menschen im 18. Jahrhundert gegenüber dem Äther hatten...

Der Name **Vakuum** ist unpassend, denn Vakuum bedeutet das Leere, ist also sicher nicht geeignet etwas Vorhandenes zu bezeichnen.

Der Name **Gravitationsfeld** suggeriert, dass das, wovon man sprechen möchte, nur im Zusammenhang mit der Gravitation eine Rolle spielt.

Und die Bezeichnung **Raum** krankt an demselben Mangel wie das Vakuum: Raum ist im normalen Verständnis nur ein Ausdruck dafür, dass Platz für etwas anderes vorhanden ist.

## 5 Fazit

Der erste Mangel in Newtons Theorie (die erste Sünde), d.h. die Fernwirkungen, war

unvermeidlich. Newton selbst wusste, dass dieser Teil seiner Theorie ein Provisorium war, und er hat es deutlich gesagt, also: keine Sünde.

Der zweite Mangel (die zweite Sünde), d.h. der absolute Raum ist die modernste Beschreibung von Trägheitskräften, die zu seiner Zeit möglich war, also: auch keine Sünde.

Was dem absoluten Raum zu einem modernen Konzept noch fehlte, hat uns erst die Allgemeine Relativitätstheorie gebracht. Das lassen wir aber lieber Einstein selbst erklären: *Dadurch wird dem Raum als solchem eine Rolle ... zuerteilt, die ihn vor den übrigen Elementen der physikalischen Beschreibung auszeichnet: Er wirkt bestimmend auf alle Vorgänge, ohne dass diese auf ihn zurückwirken; ... Newton hatte diesen Mangel deutlich empfunden, aber auch klar verstanden, dass es für die damalige Physik keinen anderen Weg gab.*

## Literatur

- [1] I. Newton: *Four Letters from Sir Isaac Newton to Doctor Bentley*, Dodsley, London 1756  
 [2] E. Mach: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, F. A. Brockhaus, Leipzig 1897, S. 223

[3] D. W. Sciama: *the Physical Foundations of General Relativity*, Doubleday, New York 1969, S. 22f

[4] D. Giulini: *Das Problem der Trägheit*, *Philosophia Naturalis* 39 (2002), S. 343-374

[5] Maxwell in einem Artikel der *Encyclopædia Britannica* zum Stichwort *Ether* (Übersetzung F. H.): *But besides these high metaphysical necessities for a medium, there were more mundane uses to be fulfilled by aethers. Aethers were invented for the planets to swim in, to constitute electric atmospheres and magnetic effluvia, to convey sensations from one part of our bodies to another, and so on, till all space had been filled three or four times over with aethers. It is only when we remember the extensive and mischievous influence on science which hypotheses about aethers used formerly to exercise, that we can appreciate the horror of aethers which sober-minded men had during the 18th century.*

## Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Karlsruhe  
 Institut für Technologie, Wolfgang-Gaede-Str. 1,  
 76131 Karlsruhe  
 E-Mail: [friedrich.herrmann@icloud.com](mailto:friedrich.herrmann@icloud.com)

# Inertialsystem und Trägheitsgesetz

## F. Herrmann

### 1 Einleitung

Das erste Newton'sche Gesetz scheint nur dann eine sinnvolle, experimentell überprüfbare Aussage zu machen, wenn man ein Bezugssystem angibt, auf das sich die Aussage bezieht. Newton gibt ein solches Bezugssystem an: den absoluten Raum. Die Bewegung seines ersten Gesetzes ist eine „absolute Bewegung“. Was er unter einer absoluten Bewegung versteht, erklärt er, bevor er die drei Gesetze formuliert.

Schon zu Newtons Zeit nahm man Anstoß an dem von ihm eingeführten absoluten Raum. Der Philosoph *George Berkeley* (1685-1753) [1] verlangte, dass man von einer Bewegung eines Körpers nur relativ zu einem anderen Körper sprechen kann, und er gab auch einen Bezugskörper an, auf den sich die Bewegung der Newton'schen Gesetze beziehen sollte: die Fixsterne; ein Gedanke, der erst viel später zunächst durch *Ernst Mach* und dann durch *Einstein* wieder aufgegriffen wurde.

Die Newton'sche Definition der absoluten Bewegung hatte fast 200 Jahre lang gute Dienste geleistet; man schien sich am absoluten Raum nicht besonders zu stören.

Erst 1885 wurde die Newton'sche Konstruktion zur Begründung seines ersten Gesetzes durch eine geringfügig andere abgelöst: durch das Inertialsystem. Eingeführt wurde der Begriff 1885 von dem heute kaum noch bekannten Physiker *Ludwig Lange* (1863–1936). Seine Definition ist aber von der Newton'schen Definition des absoluten Raums nicht wesentlich verschieden. Langes Formulierung der Definition ist etwas umständlich. Man tut ihr aber keine Gewalt an, wenn man sie in modernen Worten fasst:

- Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, in dem sich ein kräftefreier Körper mit  $\vec{v} = \text{const}$  bewegt. (1)

Wir wenden uns nun dem Trägheitssatz zu. Er lautet etwa:

- In einem Inertialsystem bewegen sich kräftefreie Körper mit  $\vec{v} = \text{const}$ . (2)

Wenn man die Sätze (1) und (2) vergleicht, könnte man auf die Idee kommen, es handele sich um eine Tautologie, denn sie scheinen zu sagen:

- In einem Bezugssystem, in dem sich kräftefreie Körper mit  $\vec{v} = \text{const}$  bewegen, bewegen sich kräftefreie Körper mit  $\vec{v} = \text{const}$ .

Tatsächlich wurden die Sätze (1) und (2) falsch kombiniert. Um die Definition des Inertialsystems im Trägheitsgesetz unterzubringen, müssen wir formulieren:

- In einem Bezugssystem, in dem sich ein kräftefreier Körper mit  $\vec{v} = \text{const}$  bewegt, bewegt sich auch jeder andere kräftefreie Körper mit  $\vec{v} = \text{const}$ .

Nun hat aber die Definition des Begriffs Inertialsystem noch einen Haken und um diesen soll es im Folgenden gehen.

## 2 Was ist eine kräftefreie Bewegung?

Das Problem der Sätze (1), (2) und (3) steckt in dem Wörtchen „kräftefrei“. Wie erkennen wir, ob ein Körper kräftefrei ist? Die Antwort auf diese Frage scheint zunächst einfach zu sein: Wir erkennen Kräfte an ihren Quellen. Wir erkennen, dass auf einen Körper eine elektrische Kraft wirkt, wenn der Körper geladen ist, und sich ein anderer geladener Körper in der Nähe befindet. Entsprechend erkennen wir magnetische Kräfte, und ebenso die so genannten Kontaktkräfte. Damit Kräftefreiheit herrscht, müssen wir also zunächst dafür sorgen, dass solche Kräfte nicht auftreten. Bleiben aber noch die Gravitationskräfte. Die können wir auf dieselbe Art ausschließen – könnte man denken. So sagt es uns ein Hochschullehrbuch [2]:

- Eine fast vollkommene Annäherung an ein Inertialsystem wäre erst durch eine antriebslose Rakete im interstellaren Raum, fern von allen Massen realisiert, falls sie nicht rotiert.

Um zu sehen, wo hier das Problem steckt, müssen wir zunächst von jeglicher Fernwirkung absehen. Ob auf einen Körper eine Kraft wirkt oder nicht, entscheiden wir lokal und nicht dadurch, dass wir nachsehen, ob sich irgendwo in der Ferne ein Körper befindet, der die Kraft ausüben könnte. So können wir zum Beispiel leicht elektrische und magnetische Kräfte an den lokal messbaren Feldstärken der entsprechenden Felder erkennen.

Anders ist es bei Gravitationskräften. Der Grund ist, dass wir gravitostatische Kräfte grundsätzlich nicht von Trägheitskräften unterscheiden können. Diese Grundsätzlichkeit entsteht, wenn wir uns entschließen, das Äquivalenzprinzip, d. h. die Identität von schwerer und träger Masse ernst zu nehmen. Das war vor *Einstein* nicht der Fall. *Einstein* selbst bemerkt hierzu [3]:

- Die schwere und die träge Masse eines Körpers sind einander gleich. Die bisherige Mechanik hat diesen wichtigen Satz zwar registriert, aber nicht interpretiert. Die Auswirkungen auf unsere Vorstellung vom Inertialsystem erkennt man besonders gut, wenn man sich einem Gedankenexperiment überlässt: Wir gehen in den interstellaren Raum; in unserem Raumschiff gilt das Trägheitsprinzip und auch die beiden anderen Newton'schen Gesetze. Nun schalten wir die Triebwerke ein, auf konstanten Schub. Gelten nun die Newtonschen Gesetze im Bezugssystem des Raumschiffs nicht mehr? Wir

lassen einen Gegenstand los. Er fällt „zum Boden“. Wir schließen, dass ein Gravitationsfeld vorhanden ist. Mithilfe eines Federkraftmessers und der Gleichung

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$$

messen wir die Feldstärke  $\vec{g}$ .

Das Fallen geschieht in Übereinstimmung mit dem zweiten Gesetz. Gilt auch das erste? Ja, es gilt auch. Es sagt ja eine geradlinig-gleichförmige Bewegung voraus, wenn keine Kräfte wirken, und wenn welche wirken, so darf die Bewegung nicht geradlinig-gleichförmig sein. Das ist hier der Fall. Newtons Gesetze gelten in beiden Bezugssystemen.

Wir haben also keine Möglichkeit gravitostatische von Trägheitskräften oder „Scheinkräften“ lokal zu unterscheiden. Die Unterscheidung zwischen „richtigen“ und Scheinkräften ist ein Artefakt der vorrelativistischen Physik. Das bedeutet aber auch, dass wir prinzipiell nicht sagen können, ob ein Körper kräftefrei ist oder nicht. In einem Bezugssystem ist er kräftefrei, in anderen nicht.

In unserer Definition (1) und dem Gesetz (2) waren wir aber davon ausgegangen, dass die Frage, ob ein Körper kräftefrei sei, unabhängig vom Bezugssystem entschieden werden kann.

Wir könnten nun nach wie vor ein Bezugssystem, in dem keine Kräfte wirken, ein Inertialsystem nennen. Ein solches System stellt das Raumschiff dar, das weit weg von allen Sternen im Weltraum schwebt; aber auch der Einstein'sche fallende Fahrstuhl ist ein solches System. Das so definierte System ist aber nicht das, was man ursprünglich mit Inertialsystem meinte. Wheeler nennt es ein „frei schwebendes Bezugssystem“ [4]. Aber vor allem: Man braucht den Begriff Inertialsystem nicht mehr. Das erste Newton'sche Gesetz gilt immer, in jedem Bezugssystem. Wenn man akzeptiert, dass die Scheinkräfte von echten Kräften nicht zu unterscheiden sind, also echte Kräfte sind, so gilt das erste Gesetz in der nicht angetriebenen Rakete (Der Körper bewegt sich geradlinig-gleichförmig, weil keine Kräfte auf ihn wirken) und in der angetriebenen Rakete (Der Körper bewegt sich nicht geradlinig-gleichförmig, weil eine Kraft auf ihn wirkt).

Dass man den Begriff Inertialsystem nicht braucht, sagt am deutlichsten *Einstein* selbst [5]:

- Die eigentliche Leistung der (allgemeinen) Relativitätstheorie liegt darin,

dass sie die Physik von der Notwendigkeit der Einführung des „Inertialsystems“... befreit hat. Das Unbefriedigende in diesem Begriff liegt darin: Er wählt ohne Begründung unter allen denkbaren Koordinatensystemen gewisse Systeme aus. Es wird dann angenommen, dass die Gesetze der Physik nur in Bezug auf solche Inertialsysteme gelten (z. B. der Trägheitssatz und das Gesetz von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit).

Und an anderer Stelle [6]:

- Was hat die Natur mit den von uns eingeführten Koordinatensystemen und deren Bewegungszustand zu tun? Wenn es schon für die Naturbeschreibung nötig ist, sich eines von uns willkürlich eingeführten Koordinatensystems zu bedienen, so sollte die Wahl von dessen Bewegungszustand keinen Beschränkungen unterworfen sein: die Gesetze sollten von dieser Wahl ganz unabhängig sein (Allgemeines Relativitätsprinzip).

## 3 Der Unterricht

Wir brauchen den Begriff Inertialsystem nicht, weil es sich bei den physikalischen Größen träge und schwere Masse nicht um zwei verschiedene Größen handelt, sondern um eine einzige. Die Begründung für die prinzipielle Äquivalenz von Trägheit und Schwere wird durch die Allgemeine Relativitätstheorie gegeben.

Nun führt man zwar die Allgemeine Relativitätstheorie im Unterricht der Schule (noch) nicht ein. Man kann aber die Identität von träger und schwerer Masse, auch wenn man die Physik nicht allgemeinrelativistisch darstellt, also ohne die Gravitation geometrisch zu beschreiben, als fundamentales Naturgesetz behandeln und nicht nur als zufällige Übereinstimmung von zwei Werten. Auf diese Art gehen wir im Karlsruher Physikkurs mit dem Äquivalenzprinzip um.

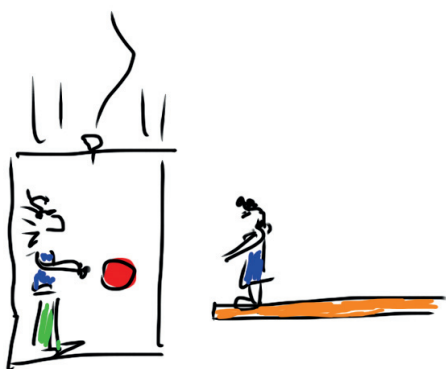
Wir beschreiben also Gravitationsphänomene mit einer „klassischen Feldtheorie“, d. h. so, wie man in der Schule auch elektrostatische Phänomene beschreibt. Wie wir eine elektrische Kraft aus Ladung und elektrischer Feldstärke berechnen:

$$F = Q \cdot E,$$

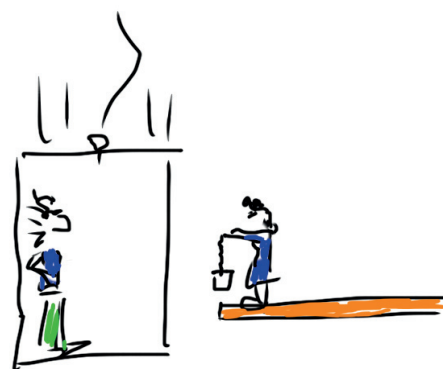
so berechnen wir eine Gravitationskraft aus Masse und Gravitationsfeldstärke:

$$F = m \cdot g.$$

Der Wert der Gravitationsfeldstärke ist bezugssystemabhängig. Im Raumschiff, das



**Abb. 1:** Willy: „Der Ball schwebt vor mir, die Gravitationsfeldstärke muss null sein.“ Lilly: „Die Gravitationsfeldstärke ist nicht null; Willy und der Ball fallen gleich schnell.“



**Abb. 2:** Willy: „Die Feldstärke ist null. Die Feder ist gedehnt weil in den Körper Impuls hineinfließt, sodass er schneller wird.“ Lilly: „Der Körper wird nicht schneller. In den Körper fließt über das Gravitationsfeld ein Impulsstrom, und dieser fließt über die Feder wieder ab.“

weit weg von allen Himmelskörpern dahintreibt, ist  $g = 0$ . Falls aber das Triebwerk eingeschaltet wird, ist die Feldstärke (im Bezugssystem des Raumschiffs) von null verschieden. Dass Feldstärkewerte vom Bezugssystem abhängen haben die Schülerinnen und Schüler schon bei anderer Gelegenheit erfahren: Das magnetische Feld eines Elektronenstrahls verschwindet in einem Bezugssystem, das sich mit den Elektronen mitbewegt.

Den Inhalt der Newton'schen Gesetze formulieren wir nicht in der Form, wie es Newton getan hat. Da die Gesetze nicht mehr und nicht weniger beinhalten als die Impulserhaltung (siehe auch „Mechanik ohne Fernwirkungen von H. Hauptmann, in diesem Heft), können sie ersetzt werden durch den einen Satz: **Impuls lässt sich nicht erzeugen oder vernichten.** Und der Impulssatz gilt in jedem Bezugssystem.

Auch die Erscheinungen im Zusammenhang mit dem Raumschiff und dem fallenden Aufzug werden behandelt – allerdings in einem anderen Kontext, nämlich in einem Kapitel, in dem es ausschließlich um Bezugssystemwechsel geht. Aus ihm wollen wir hier einige Gedanken wiedergeben.

Abb. 1 zeigt den berühmten fallenden Aufzug. Willy befindet sich im Aufzug, Lilly steht außerhalb. Im Bezugssystem des Aufzugs bewegt sich der Ball nicht. Willy schließt, dass keine Kraft auf den Ball wirkt (dass kein Impulsstrom in den Ball hineinfließt), die Gravitationsfeldstärke muss also null sein.

Aus Lillys Sicht stellt sich die Situation anders dar: Auf alle Körper wirken Gravitationskräfte (in alle Körper fließt über das Gravitationsfeld ein Impulsstrom hinein), sie kann die Gravitationsfeldstärke messen. Dadurch ändert sich der Impuls des Balls im Aufzug. Wir sehen: In beiden Bezugssystemen gelten dieselben Gesetze, kein Bezugssystem ist ausgezeichnet. Und was wir noch lernen: Die Gravitationsfeldstärke ist bezugssystemabhängig.

Abb. 2 zeigt noch einmal Willy und Lilly. Wieder fragen wir, wie die beiden das Geschehen interpretieren. Lilly sagt: Die Gravitationsfeldstärke ist von null verschieden, auf den Körper, der an der Feder hängt, wirkt eine Kraft (in den Körper fließt über das Gravitationsfeld ein Impulsstrom hinein, und er fließt über die Feder und über mich wieder ab), darum wird die Feder verlängert; oder kurz: Der Körper ist schwer.

Willy sagt, die Feldstärke ist null, aber Lilly ist beschleunigt, sie beschleunigt auch den Körper an der Feder, sie übt eine Kraft auf den Körper aus (es fließt ein Strom negativen Impulses von Lilly über die Feder in den Körper). Daher wird die Feder verlängert. Das liegt an der Trägheit des Körpers.

Wir sehen also: Die Masse äußert sich, je nach Bezugssystem als Schwere oder als Trägheit.

Als Merksätze formulieren wir im KPK: **Die Gravitationsfeldstärke ist bezugssystemabhängig. Die Masse äußert sich je nach Bezugssystem anders: als Schwere oder als Trägheit.**

#### 4 Fazit

Abschließend noch einmal einen ganz kurz-sicheren Blick auf die historische Entwicklung des Begriffs Inertialsystem: 1687 hat Newton den absoluten Raum eingeführt. Er brauchte ihn, um seine drei Gesetze formulieren zu können. Der absolute Raum hatte fast 200 Jahre lang gute Dienste geleistet, als Lange 1885 den Begriff Inertialsystem einführte. Nach weiteren 30 Jahren stellt Einstein 1915 fest, dass das Konzept überflüssig ist. 100 Jahre danach befindet sich der Begriff aber immer noch in den Lehrbüchern.

#### Literatur

- [1] Berkeley's Philosophical Writings, New York: Collier, 1974, Library of Congress Catalog Card Number: 64-22680
- [2] H. Vogel: Gerthsen - Kneser - Vogel, Physik, Springer-Verlag, Berlin 1977, S. 40
- [3] A. Einstein: Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, Akademie-Verlag, Berlin 1973, S. 54
- [4] E. F. Taylor und J. A. Wheeler: Physik der Raumzeit, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1994, S. 438
- [5] A. Einstein: Grundzüge der Relativitätstheorie, Akademie-Verlag, Berlin 1970, S. 138
- [6] A. Einstein: Mein Weltbild, Carl Seelig (Hrsg.), Ullstein Taschenbücher-Verlag, Frankfurt am Main 1957, S. 130

#### Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Karlsruher Institut für Technologie, Wolfgang-Gaede-Str. 1, 76131 Karlsruhe  
E-Mail: [friedrich.herrmann@icloud.com](mailto:friedrich.herrmann@icloud.com)

# Zum sprachlichen Umgang mit dem Kraftbegriff

P. Schmälzle

## 1 Einleitung

Am Beispiel des physikalischen Kraftbegriffs zeigt sich besonders deutlich, wie anspruchsvoll das Erlernen einer korrekten Fachsprache ist. Wir erwarten von unseren Schülerinnen und Schülern ein Umlernen; sie sollen vertraute Sprechweisen aufgeben und sich in den wenigen Stunden des Physikunterrichts anders ausdrücken, als sie das gewohnt sind. Dieser Konflikt zwischen Alltagssprache und physikalischer Fachsprache sollte im Unterricht gezielt thematisiert werden, um die angestrebte kommunikative Kompetenz auf Schülerseite zu erreichen. Wie an einem abschließenden Beispiel gezeigt wird, kann der Umgang mit dem physikalischen Begriff Kraft auch bei erfahrenen Lehrkräften zu sprachlichen Problemen führen.

## 2 Aufwertung der Sprache im Physikunterricht durch die Bildungsstandards

Einer der vier Kompetenzbereiche der bundesweit gültigen KMK-Bildungsstandards Physik heißt „Kommunikation“. Daran ist zu erkennen, dass der Sprache im aktuellen Physikunterricht große Bedeutung zukommt. Die Aufwertung der Sprache im Physikunterricht in den letzten Jahren zeigt sich in Baden-Württemberg recht deutlich in der Formulierung der (zentralen) Abituraufgaben im Fach Physik. Vergleicht man Aufgaben von vor zwanzig Jahren mit heutigen Aufgaben, so zeigt sich, dass die Schülerinnen und Schüler heute auf der sprachlichen Ebene deutlich stärker gefordert sind, während der reine Rechenaufwand zurückgefahren wurde.

Schon vor Einführung der Bildungsstandards forderten Physikdidaktiker eine stärkere Berücksichtigung der Sprache im Unterricht. So weist G. Merzyn in seinen 10 Thesen zur Sprache im naturwissenschaftlichen Unterricht daraufhin, dass die Sprache für den naturwissenschaftlichen Unterricht eine „vielfach unterschätzte, eminent wichtige Rolle“ spielt (These 1). Und in seiner These 3 heißt es: „Eine Naturwissenschaft lernen heißt zu einem erheblichen Teil: den Umgang mit den Begriffen lernen“ [1].

Der korrekte Umgang mit physikalischen Begriffen stellt für die Schülerinnen und Schüler an vielen Stellen eine große Herausforderung dar. Eine Ursache dieser allen Lehrkräften vertrauten Schwierigkeiten ist nach H. Muckenfuß darin zu sehen, dass physikalische Begriffe durchweg „theoriegeladen“ sind. Die damit verbundenen Probleme zeigen sich beim Erlernen des physikalischen Kraftbegriffs besonders deutlich. Muckenfuß schreibt dazu: „Der physikalische Begriff „Kraft“ ist aber nur im Kontext der Theorie der Mechanik zu verstehen, er ist grundsätzlich verschieden von den alltagssprachlichen Bedeutungen und nicht aus diesen ableitbar“ [2].

Dementsprechend ist bei der Einführung des physikalischen Kraftbegriffs besondere Sorgfalt erforderlich. Wenn der Begriff Kraft im Anfangsunterricht Physik erstmals auftaucht, sind unsere Schülerinnen und Schüler mit dem Wort Kraft der Alltagssprache schon sehr vertraut. Die damit verbundenen Vorstellungen weichen jedoch stark von dem ab, was durch den

auf Newton zurückgehenden physikalischen Begriff Kraft zum Ausdruck kommen soll. In der Alltagssprache ist Kraft etwas, von dem eine Person (oder ein technisches Gerät) mehr oder weniger viel hat. Wer stark ist, hat große Kraft. „Kraft haben“ bringt eine gewisse Fähigkeit, ein Vermögen, eine Potenz zum Ausdruck.

Demgegenüber bringen Kräfte in der Physik Wechselwirkungen zwischen Körpern (allgemein: zwischen physikalischen Systemen) zum Ausdruck. Das zeigt sich auch im sprachlichen Umfeld des physikalischen Kraftbegriffs. Über Kräfte muss in der Physik anders gesprochen werden als das im Alltag üblich ist. Physikalisch korrekt sind nur spezielle Formulierungen:

- Körper A **übt** auf Körper B eine Kraft **aus**.
- Dann **erfährt** Körper B eine Kraft; bzw. dann **wirkt** auf Körper B eine Kraft.

Während im Alltag von „Kraft haben“ die Rede ist, müssen im Physikunterricht mit dem Wort Kraft die Verben ausüben, erfahren, wirken verwendet werden. Dieser Konflikt zwischen vertrauter Alltagssprache und korrekter Fachsprache wird am Beispiel des Kraftbegriffs besonders offensichtlich – er ist aber beim Erlernen vieler physikalischer Fachbegriffe existent. Nach Muckenfuß ist dieser Konflikt notwendiger Bestandteil der physikalischen Begriffsbildung auf dem Weg hin zu einer Kommunikationskompetenz der Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht, wie das Abb. 1 zum Ausdruck bringt [3].

Dieser Konflikt zwischen vertrauten Alltagsvorstellungen und der theoriegelade-

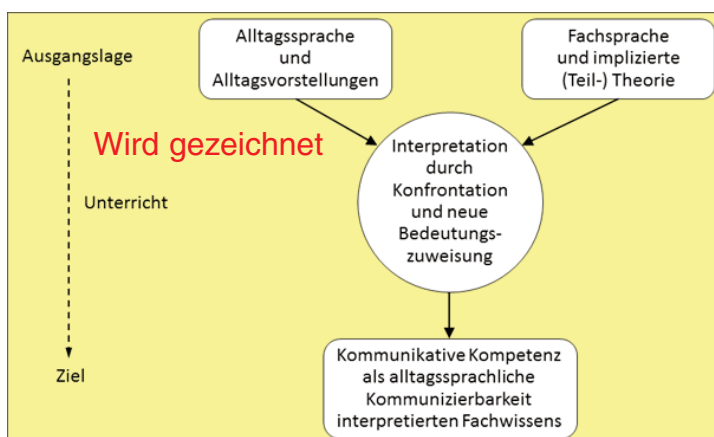
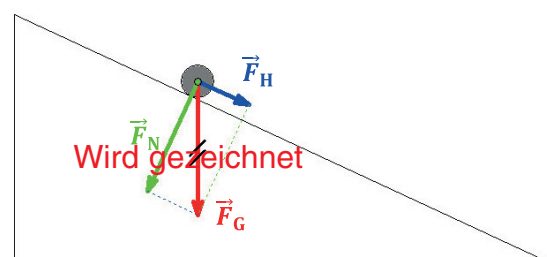


Abb. 1: Begriffsbildung im Physikunterricht nach H. Muckenfuß

Abb. 2: Kräftezerlegung an der schiefen Ebene



nen Bedeutung des physikalischen Begriffs Kraft sollte im Unterricht aufgegriffen und gezielt thematisiert werden. Ohne diese Konfrontation wird es kaum gelingen, verständlich zu machen, weshalb im Physikunterricht mit dem Wort Kraft sprachlich anders als im Alltag umgegangen werden muss. Auch von Lehrbuchautoren sollte dieser Konflikt in den entsprechenden Schulphysikbüchern explizit angesprochen werden. Es reicht unserer Meinung nach nicht aus, überall fachlich korrekte Sätze zu formulieren und zu hoffen, dass die Schülerinnen und Schüler dadurch die Fachsprache nach und nach übernehmen. Hier wird von den Kindern im Unterricht ein Umlernen erwartet und das sollte auch begründet werden, um es nachvollziehbar zu machen.

Angesichts des dargestellten Konflikts zwischen Alltagssprache und der erwünschten korrekten Fachsprache erscheint es uns kontraproduktiv, im Unterricht Wortschöpfungen wie „Muskelkraft“, „Motorkraft“ oder „Magnetkraft“ zu verwenden. Schließlich suggerieren diese Begriffe doch sehr stark, dass die Muskeln, der Motor oder der Magnet „Kraft haben“. Wenig hilfreich auf dem Weg zu einer korrekten Fachsprache erscheinen auch Abbil-

dungen von Magneten, die überschrieben sind mit: „Magnete haben große Kraft“.

#### 4 Konfliktpotenzial auch für erfahrene Lehrkräfte

Nicht nur unseren Schülerinnen und Schülern bereitet der korrekte Umgang mit dem physikalischen Kraftbegriff immer wieder Probleme. Auch als erfahrene Lehrkraft oder als Schulbuchautor kann man hin und wieder ins Straucheln kommen, wenn zu klären ist, wer welche Kraft auf wen ausübt. Das lässt sich am Beispiel von Abb. 2 verdeutlichen. Dabei geht es bei der Behandlung des Themas „Schiefe Ebene“ um die Zerlegung der Gewichtskraft in zwei Komponenten, die parallel und orthogonal zur schiefen Ebene gerichtet sind. Auf diese Weise erhält man die Hangabtriebskraft und die Normalkraft. Auf wen wirken diese Kräfte? Bei der Hangabtriebskraft ist die Sache klar: Schließlich beschleunigt diese Kraft den Körper längs der schiefen Ebene. Also handelt es sich um eine Kraft, die auf den Körper wirkt. Bei der Normalkraft scheint die Sache nicht so eindeutig. Da findet man in (aktuellen) Physikbüchern durchaus die Aussage: „ $\vec{F}_N$  ist die Kraft, mit der der Körper auf die Unterlage drückt“. Damit wird durch Zerlegung aus der Ge-

wichtskraft – also aus einer Kraft, die der Körper erfährt – eine Kraft, die der Körper ausübt! Hieran ist zu erkennen, wie schwierig der Umgang mit Kräften für uns alle ist.

#### 5 Fazit

Der korrekte fachsprachliche Umgang mit dem physikalischen Kraftbegriff stellt für alle am Physikunterricht Beteiligten ein anspruchsvolles Unterfangen dar. Die damit verbundenen Schwierigkeiten sollten uns Lehrkräften bewusst sein. Das auf Schülerseite erforderliche sprachliche Umlernen sollte nicht stillschweigend erwartet, sondern offen angesprochen werden.

#### Literatur

- [1] Merzyn, Gottfried; *Sprache und naturwissenschaftlicher Unterricht, 10 Thesen, Praxis der Naturwissenschaften, Heft 2/47, 1998 (S. 1)*  
 [2] Muckenfuß, Heinz; *Lernen im sinnstiftenden Kontext, Cornelsen Verlag Berlin, 1995 (S. 246)*  
 [3] *ebenda (S. 267)*

#### Anschrift des Verfassers

StD Dr. Peter Schmälzle,

## Wer zieht? Wer drückt?

F. Herrmann

### 1 Einleitung

In einem Seminar für Studierende des Lehramts Physik (5. bis 7. Semester) bekommen die Teilnehmer die Aufgabe, die Kräfte beim Tauziehen in eine Abbildung einzuzichnen und die Zusammenhänge zwischen diesen Kräften zu diskutieren, Abb. 1. Es wird ihnen gesagt, dass sich die beiden Personen A und B in Ruhe befinden und in Ruhe bleiben, und dass jede Person „mit einer Kraft von 200 N zieht“.

Die Studierenden arbeiten in kleinen Gruppen und dürfen miteinander reden. Sie bekommen keine Hilfe vom Dozenten. Am Ende sollen sie ihr Ergebnis präsentieren.

Sie diskutieren, welche Kraft im Seil wirkt, und einigen sich nach längerer Diskussion darauf, dass diese Kraft 400 N beträgt (obwohl es zunächst einige abweichende Meinungen gegeben hatte).

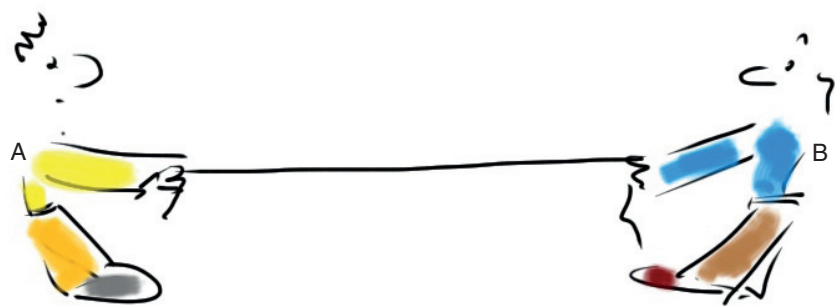


Abb. 1: A übt auf B, und B übt auf A eine Kraft aus.

So geschehen vor nicht allzu langer Zeit an der Fakultät für Physik am Karlsruher Institut für Technologie. Die beteiligten Studierenden hatten bis dahin die Newton'sche Mechanik dreimal „gelernt“: in der Mittelstufe des Gymnasiums, in der Oberstufe des Gymnasiums und in der Experimentalphysikvorlesung. Außerdem hatten sie in der Theorievorlesung die Ha-

milton- und Lagrangemechanik kennen gelernt. Sie machten keineswegs den Eindruck, besonders untalentierte zu sein.

Dieses Ergebnis zeigt, dass etwas an unserem Mechanikunterricht nicht stimmt, sowohl an der Schule als auch an der Hochschule. Es ist offensichtlich, dass der Kraftbegriff nicht verstanden wurde. Wir wollen uns im Folgenden auf die Suche nach den



Abb. 2: Die Feder verursacht die Kraft.

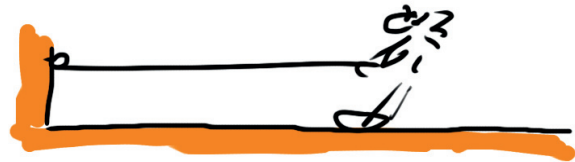


Abb. 3: Das Männchen zieht.

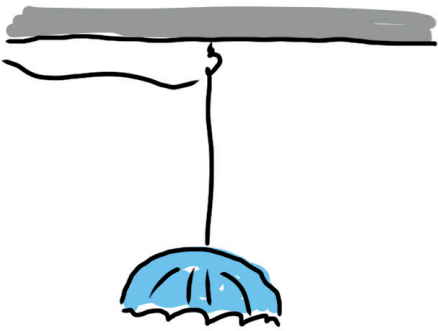


Abb. 4: Die Lampe zieht.

Ursachen begeben. Wir schauen dazu nicht so sehr darauf, welche physikalischen Gesetze, in denen die Kraft auftritt, eingeführt werden, oder wie sie eingeführt werden. Vielmehr wollen wir danach fragen, was zum Kraftbegriff gesagt wird, und wie über Kräfte gesprochen wird.

## 2 Das Kraftgefühl

Interessant sind schon die ersten Sätze, die zur Kraft gesagt werden. Sie sind leicht auszumachen: Man sieht in einem Physikbuch im Sachregister nach, auf welcher Seite die Kraft zum ersten Mal angesprochen wird. Dabei findet man:

- in einem Schulbuch:  
*Der Begriff der Kraft geht auf unser Muskelgefühl zurück.*
- in einem Hochschulbuch [1]:  
*Wir meinen, daß wir in unserem Muskelgefühl eine unmittelbare, wenigstens qualitative Vorstellung des Kraftbegriffs besitzen.*
- in einem anderen Hochschulbuch [2]:  
*Der Grundbegriff der Statik ist die Kraft; er stammt von dem subjektiven Gefühl der Anstrengung beim Ausführen einer körperlichen Arbeit.*
- in einem dritten Hochschulbuch [3]:  
*Ebenso wie die Begriffe Länge und Zeit besitzt auch der Kraftbegriff eine unmittelbar anschauliche Bedeutung, die keiner weiteren Erklärung bedarf. Körperliche Kraft wird durch Muskeln ausgeübt, sie wird als eine Muskelempfindung vom Ausübenden erlebt.*

Das letzte Zitat sagt es besonders deutlich: Der Kraftbegriff ist so anschaulich, dass er keiner weiteren Erklärung bedarf. Uns stehe also über unser „Muskelgefühl“ oder dem „Gefühl der Anstrengung“ ein, wenn auch grobes, Messgerät für die Kraft zur Verfügung: große Anstrengung – große Kraft; kleine Anstrengung – kleine Kraft.

Nun nehmen wir zwar die Betätigung eines Muskels als Anstrengung wahr, aber nicht über ein spezifisches Signal eines Sinnesorgans, sondern über einen Willensakt. Für welche physikalische Größe ist diese Anstrengung, dieses Muskelgefühl, ein Maß? Zum einen übt man, während man einen Muskel gespannt hält, Kräfte aus. Wenn man zum Beispiel einen Wagen schiebt eine Kraft auf den Wagen und eine auf die Erde. Zum anderen verbraucht der Muskel Energie, und zwar egal, ob er etwas bewegt (also mechanische Energie abgibt) oder nicht (also nur Wärme produziert).

Das „Muskelgefühl“ weist also sowohl auf Kräfte hin, als auch auf einen Energieumsatz. Wir glauben nicht, dass diese Einführung „keiner weiteren Erklärung bedarf“. Kraft und mechanischer Energiestrom liegen begrifflich nah beieinander. Immer wenn man Energie mechanisch überträgt – mit einer Fahrradkette, mit einem Treibriemen oder hydraulisch –, fließt ein Energiestrom und es wirkt eine Kraft (es fließt ein Impulsstrom). Die Begriffe treten also oft gemeinsam auf, beide physikalischen Größen haben von null verschiedene Werte. Man muss also damit rechnen, dass sie leicht verwechselt werden.

Es ist auch gar nicht zu verstehen, warum man so gern an das Muskelgefühl appelliert, denn die Natur hat uns mit Sinnesorganen für die Kraft oder den Druck ausgestattet, die unabhängig vom Energiestrom sind. Die Tastsensoren in unserer Haut sind als Kraft- oder Drucksensoren nicht weniger zuverlässig, als unsere Temperatur-, Licht- und Schallsensoren. Durch sie spüren wir Kräfte, egal ob unsere Mus-

keln im Spiel sind oder nicht. So kann man recht gut eine Vorstellung von der Größe der Maßeinheit Newton vermitteln: Ein leichter Druck mit dem Finger auf die Haut, oder auch ein 100-g-Gewichtsstück, das man sich auf den Arm legt. (Dass man hier darauf achten muss, ob man auf einen Druck oder eine Kraft schließt, ist ein anderes Problem, das uns hier aber nicht beschäftigen soll.)

Die Aussage unserer Studierenden, nämlich, dass die Kraft im Seil von Abb. 1 gleich der Summe der Kräfte der beiden Personen ist, erscheint nun fast folgerichtig: Die Kraft ist, so wird gesagt, ein Maß für die Anstrengung. Beide Personen strengen sich an. Wenn man mit der Anstrengung den Energieumsatz assoziiert, so stimmt die Überlegung. Der gesamte Energieumsatz ist gleich der Summe der Einzelumsätze.

## 3 Wer verursacht die Kraft?

Dass es ungeschickt ist, an die Energiequelle, in unserem Fall die Muskeln, zu appellieren, erkennt man auch wenn man eine etwas andere Frage stellt.

Wir betrachten die Anordnung von Abb. 2. Man kann die verschiedensten Kräfte benennen und einzeichnen: Die Kraft der Feder auf das linke Seilstück, die Kraft der Feder auf der rechte Seilstück, die Kraft des linken Seilstücks auf die Halterung etc. Nun eine Frage, die vernünftig klingt, es aber nicht unbedingt ist: Wer verursacht diese Kräfte? Wer nicht lange nachdenkt, wird wahrscheinlich spontan antworten: Die Feder. Dabei gibt es aber ein Problem. Was veranlasst einen denn, die Feder als den Kraftverursacher auszumachen? Es stimmt: Ohne Feder hätten wir die Kräfte nicht. Wir hätten sie aber auch nicht ohne die Seilstücke und ohne die Halterung.

Betrachten wir noch einige andere Situationen. Wer ist in Abb. 3. für die Kräfte verantwortlich? Hier ist die spontane Antwort sicher: Das Männchen. Und in Abb. 4? Die

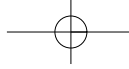


Abb. 5: Ziehen hier beide Federn?



Abb. 6: Und hier beide Männchen?





Lampe natürlich. Wie ist es aber in Abb. 5? Hier müssten wohl beide Federn die Ursache sein. Wird die Kraft dadurch doppelt so groß?

Und in Abbildung 6? Hier verursachen beide Männchen die Kraft, wäre man gezwungen zu sagen.

Dass diese spontanen Antworten plausibel erscheinen, muss einen Grund haben. Worin zeichnen sich denn Federn und Männchen und Lampe vom Rest der jeweiligen Anordnung aus?

Sie stellen eine Quellen mechanischer Energie dar. Dabei spielt es keine Rolle, ob sie in der betrachteten Situation wirklich Energie abgeben. Die Tatsache, dass sie mechanische Energie abgeben könnten, lässt sie als Verursacher erscheinen. Wenn man an das eine Ende der gespannten Feder einen beweglichen Körper hängen würde, so würde dieser beschleunigt, er würde von der Feder Energie bekommen; ebenso könnte das Männchen einen Körper beschleunigen oder auch die Lampe, wenn sie herabsinkt. Was die Kraftverursacher auszeichnet, ist, dass sie Energie mechanisch abgeben könnten.

#### 4 Wer zieht? Wer drückt?

Die Auszeichnung der Energiequelle als „Verantwortlichen“ für eine Kraft äußert sich noch in einer anderen Sprechgewohnheit, nämlich in der Verwendung der Wörtchen drücken und ziehen.

Es geht uns hier nur um die Verben und nicht um die Substantive Druck und Zug. Druck und Zug ordnet man einem Spannungszustand zu. Die Verben „drücken“ und „ziehen“ beschreiben eine Aktivität.

Betrachten wir, um konkret zu sein, das Drücken. Es erfordert etwas, das drückt, und etwas das gedrückt wird. Das Verb taugt scheinbar dafür, eine Situation zu beschreiben, bei der es um Kräfte geht, denn auch bei einer Kraft gibt es etwas, das sie ausübt und etwas, auf das sie ausgeübt wird. Und tatsächlich wird auch gern an diese Übereinstimmung appelliert. Die Sätze „A übt auf B eine Druckkraft aus“ und „A drückt auf B“ scheinen dieselbe Aussage zu machen. Nur: Der erste Satz ist physikalisch genormte Fachsprache, egal, was man sich dabei denkt. Der zweite gibt sich eher als Aussage der Umgangssprache, und er wird von den Lernenden sicher auch so wahrgenommen.

Wir betrachten als Beispiel den Satz: „Willy drückt auf den Klingelknopf.“ Dies ist im Sinn der Umgangssprache ein vernünftiger Satz. Es klingt aber absurd, wenn man sagte: Der Klingelknopf drückt auf Willy. Der Klingelknopf drückt nicht; er

wird gedrückt. Willy ist aktiv, der Klingelknopf passiv.

Physikalisch ist es natürlich richtig zu sagen: Willy übt auf den Klingelknopf eine Kraft aus, und der Klingelknopf auf Willy – aber, wie gesagt, das ist Fachjargon, den unsere unsere Schülerinnen und Schüler lernen müssen, auch wenn er nicht unbedingt plausibel ist.

Warum erscheint uns die Aussage: „Der Klingelknopf drückt auf Willy“ unsinnig? Weil man die aktive Rolle des Drückens der Energiequelle zuordnet.

Natürlich kann man den Schülerinnen und Schülern sagen, dass man auch die Wörter drücken und ziehen im Physikunterricht anders verwendet als im täglichen Leben, dass man also sagt, „der Klingelknopf drückt“, oder dass beim Tauchen unsere Ohren auf das Wasser drücken und nicht nur das Wasser auf die Ohren. Wir würden aber dringend davon abraten, die Bedeutung von sehr gebräuchlichen Verben im Physikunterricht umzudefinieren. Die Schülerinnen und Schüler würden uns dabei gewiss nicht folgen.

Was ist also zu tun? Die Verben „drücken“ und „ziehen“ nur verwenden, wenn es klar ist, dass man eine umgangssprachliche Aussage macht; nicht den Verdacht aufkommen lassen, dass man eine Aussage über Kräfte machen möchte.

#### 5 Antriebskraft & Co

Wir hatten es bisher zu tun mit der Verwechslung von Kraft und Energiestrom (bzw. Impulsstrom und Energiestrom). Zu allem Überfluss spukt nun noch eine andere Verwechslung durch die Physikbücher. Wir betrachten einen Satz, den man sinngemäß in vielen Büchern, Fachzeitschriften und Web-Texten findet:

*Die Antriebskraft, die vom Motor auf die Räder übertragen wird, kann ...*

Etwas, das von A nach B übertragen wird, befindet sich, nach allgemeinem Sprachgebrauch, erst bei A und dann bei B. Bei dem zitierten Satz trifft das auf die Kraft, wenn man das Wort im Sinne der Physik benutzt, nicht zu. Richtig wird die Aussage, wenn man das Wort Kraft mit dem identifiziert, was in der Physik Energie genannt wird, diesmal also nicht mit dem Energiestrom.

Die Ursache für eine solche Verwechslung kommt wohl nicht von dem Gebrauch der Bezeichnung Kraft für die Größe  $F$ , sondern folgt aus einer anderen Tradition.

In der Vergangenheit hatte das Wort noch andere Bedeutungen. So bezeichnete man damit sowohl das, was wir heute Energie nennen – die kinetische Energie

hieß „lebendige Kraft“, als auch das, was heute Impuls heißt. Bei dem historischen Streit „um das wahre Kraftmaß“ zwischen Anhängern der Descartes'schen Auffassung und Leibniz ging es um die Frage, ob der Ausdruck  $m \cdot v$  oder  $m \cdot v^2$  das „wahre“ Maß für die Beschreibung einer Bewegung sei. Diese Tradition steckt offenbar so tief auch in der Fachsprache, dass das Wort Kraft für die Größe  $E$  genommen wird, ohne dass der Lehrer oder der Buchautor es selbst merkt. Die zunächst sorgfältigst eingeführten Größen Energie und Kraft werden lustig durcheinander geworfen.

(Nebenbei sei bemerkt: Genau so wie es weit verbreitet ist, mechanische Energie als Kraft zu bezeichnen, so ist es gang und gäbe, elektrische Energie als Strom zu bezeichnen.)

#### 6 Fazit

Was kann man daraus für den Unterricht schließen:

1. Die Kraft nicht über das Muskelgefühl oder die Anstrengung einführen.
2. Die Feder nur als Verursacher bezeichnen, wenn auch klar ist, dass sie das ihrer Eigenschaft als Energiequelle verdankt.
3. Darauf achten, dass die Verben „drücken“ und „ziehen“ nicht so benutzt werden, dass man meint, sie charakterisierten die Vektorgröße Kraft.
4. Vermeiden des Ausdrucks Kraftübertragung (ebenso auch Drehmoment und Leistungsübertragung). Nun ist es aber nicht zu vermeiden, dass die uns Anbefohlenen außerhalb der Schule mit diesem losen Jargon konfrontiert werden. Wir müssen sie daher im Unterricht darüber aufklären, dass das Wort Kraft, auch wenn es im physikalischen Kontext gebraucht wird, nicht nur als Bezeichnung der Größe  $F$  sondern auch für die Energie, benutzt wird.

#### Literatur

- [1] A. Sommerfeld: *Vorlesungen über Theoretische Physik, Mechanik, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1944, S. 5*
- [2] M. Born: *Die Relativitätstheorie Einsteins, 5. unveränderte Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1969, S. 11*
- [3] W. Macke: *Mechanik der Teilchen, Systeme und Kontinua, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1962, S. 6*

#### Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Karlsruher Institut für Technologie, Wolfgang-Gaede-Str. 1, 76131 Karlsruhe  
E-Mail: [friedrich.herrmann@icloud.com](mailto:friedrich.herrmann@icloud.com)

