Verständnisprobleme beim Kraftbegriff

Eine Sammlung einiger Aspekte zur Behandlung des Kraftbegriffes
im Schulunterricht und in universitären Vorlesungen in
Ingenieurwissenschaften, Mathematik und den Naturwissenschaften

Dr. rer. nat. J. W. Warren, M. Sc., Ph. D.
Senior Lecturer, Physics Dept.
Brunel University, London

Die englische Originalausgabe *Understanding Force* erschien 1979 bei John Murray, 50 Albemarle Street, London.

Aus dem Englischen übersetzt von

Udo Backhaus und **Thorsten Schneider**

Universität Koblenz, 1998

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur deutschen Ausgabe

Kurz nachdem dieses Büchlein von Warren 1979 in England erschienen war, machte es Walter Jung in Deutschland bekannt und brachte es in die physikdidaktische Diskussion um den Kraftbegriff ein. Es zeigte sich (natürlich) schnell, daß die von Warren beschriebenen Lernschwierigkeiten auch unter deutschen Schülern und Studenten weit verbreitet waren.

In der Folgezeit wurden die Schwierigkeiten intensiv diskutiert und viele Vorschläge zu ihrer Überwindung gemacht – allerdings ohne durchgreifenden Erfolg: Die Newtonsche Mechanik bleibt (zu?) schwierig, und Anfänger fallen immer noch und immer wieder in die Alltagsbeschreibung mechanischer Phänomene zurück.

In letzter Zeit erwecken manche Schulbücher und auch einige didaktische Aufsätze den Eindruck, als seien die Erkenntnisse von Warren und seinen Nachfolgern wieder in Vergessenheit geraten. Da die Originalausgabe seit langem vergriffen ist und die englische Sprache, trotz zunehmender europäischer Integration, immer noch eine wesentliche Verständnisbarriere für (Lehramts-) Studenten darstellt, schien es uns sinnvoll, den ursprünglichen Text von Warren ins Deutsche zu übersetzen und auf diese Weise erneut zu versuchen, seine Grundaussagen in die Anfängerausbildung einzubringen.

Wir haben davon abgesehen, den Text durch neuere Literaturzitate und durch Hinweise auf nachfolgende empirische und didaktische Untersuchungen zu aktualisieren. Sollte der Text auf breites Interesse stoßen, könnte eine solche Aktualisierung eventuell Gegenstand einer neuen Auflage sein.

Koblenz, im Oktober 1998 Udo Backhaus

Vorwort

Der Kraftbegriff ist im Studium der Ingenieurwissenschaften, der Naturwissenschaften und der angewandten Mathematik von grundlegender Bedeutung. Die Kraft wurde lange als einfacher Begriff betrachtet, der weniger abstrakt ist als beispielsweise der Energiebegriff, und es wurde zu wenig darauf geachtet, sie sorgfältig einzuführen. Dies führte zu einer Vielzahl von falschen oder zumindest in die falsche Richtung weisenden Vorstellungen über den Kraftbegriff, die auch in Schulen und Universitäten verbreitet wurden.

In diesem Buch wird versucht, einige Probleme darzustellen, mit denen sich Schüler und Studenten aufgrund ihrer falschen oder zumindest ungenauen Vorstellungen vom Kraftbegriff auseinandersetzen müssen. Die ersten drei Kapitel fassen die dem Kraftbegriff zugrindeliegenden Prinzipien und Ideen und einige allgemeine damit zusammenhängende Schwierigkeiten zusammen. Kapitel 4 behandelt einige spezielle Arten von Kräften und Probleme, deren Behandlung oft zu den Mißverständnissen beiträgt. In Kapitel 5 werden Tests und Übungsaufgaben für Studienanfänger besprochen. Sie machen die Brisanz der Fehler und der damit verbundenen Verwirrung deutlich, die bei der Anwendung der elementaren Mechanik auf alltägliche Phänomene auftreten. Der letzte Abschnitt behandelt noch einige fachdidaktische Fragen.

Die Abbildungen 1, 14 und 15 erschienen ursprünglich in Aufsätzen der Zeitschrift „Physics Education".

Kapitel 1

Kinematik

1.1 Geschwindigkeit und Beschleunigung

Die wissenschaftliche Untersuchung von Bewegungen beruht auf der Beobachtung von Örtern und der zugehörigen Zeitpunkte. Die Entfernung eines Körpers von einem (Bezugs-) Punkt wird als seine **Verschiebung** bezeichnet. Die Verschiebung ist eine vektorielle Größe, sie setzt sich also zusammen aus Richtung und Betrag (s. Anhang 1, S. 53).

Beliebig viele Vektoren können mit Hilfe der Parallelogrammregel addiert werden. Diese Idee läßt sich vielleicht am besten erarbeiten, indem man die Resultierende einer Anzahl aufeinanderfolgender Verschiebungen eines Körpers betrachtet. Auf diese Weise können wir die Verschiebung eines Reisenden von seinem Startpunkt der **zurückgelegten Strecke** gegenüberstellen. Dadurch kann verdeutlicht werden, daß der Mittelwert einer Vektorgröße bei einer periodischen Bewegung gleich null ist.

Der Quotient aus der Verschiebung eines Körpers und der dafür benötigten Zeit wird seine **Durchschnittsgeschwindigkeit** in dem zugehörigen Zeitintervall genannt. Die **Momentangeschwindigkeit** ist der Grenzwert für ein infinitesimales Zeitintervall, also die Ableitung der Verschiebung nach der Zeit.

Lehrer und Buchautoren sind sich weitgehend einig, diese vektorielle Größe als *Geschwindigkeit* (velocity) zu bezeichnen, während die Ausdrücke *Schnelligkeit* oder *Tempo* (speed) benutzt werden sollte, um die zeitliche Änderung des zurückgelegten Weges zu beschreiben. In diesem Sinne *beschreibt* ein großer Teil der getesteten Studenten korrekt den Unterschied zwischen den Begriffen Geschwindigkeit und Schnelligkeit. Unglücklicherweise wird jedoch weder das Wesentliche dieser Unterscheidung immer richtig *verstanden*, noch wird diese Ausdrucksweise konsequent *verwendet*. Die Verschiebung wird in einführenden Büchern nur sehr selten erörtert, und die Geschwindigkeit wird meist als Schnelligkeit in einer bestimmten Richtung beschrieben. (In einem einführenden Buch wird z.B. erläutert, ein Zug habe eine Schnelligkeit, wenn er auf gerader Strecke fahre, dagegen habe er eine Geschwindigkeit, wenn er um die Kurve fahre!) Sehr oft wird das Wort „Geschwindigkeit“ benutzt, wenn „Schnelligkeit“ zutreffender wäre, zum Beispiel bei der Erörterung der Schall- oder der Licht- „Geschwindigkeit“ oder der Mündungs-„Geschwindigkeit“ eines

Gewehres. In zahllosen Aufgaben werden Zahlenwerte für „Geschwindigkeiten“ angegeben, ohne daß Aussagen über die Bewegungsrichtung gemacht werden. Unter diesen Umständen kann es nicht verwundern, daß Studenten keinen Sinn für die Wichtigkeit einer Unterscheidung entwickeln, die während der Einführung zwar gemacht, dann aber vergessen wird.

Der Quotient aus der Geschwindigkeitsänderung und der zugehörigen Zeit wird **Durchnittsbeschleunigung** genannt. Bildet man hiervon den Grenzwert, so erhält man die **Momentanbeschleunigung** als Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit. Auch die Beschleunigung ist eine vektorielle Größe, die die gleiche Richtung besitzt wie die Geschwindigkeitsänderung. Im nichtwissenschaftlichen Gebrauch bedeutet der Begriff Beschleunigung üblicherweise eine Zunahme der Schnelligkeit, und viele Mißverständnisse beruhen auf diesem Unterschied zwischen der wissenschaftlichen und der alltäglichen Bedeutung des Begriffes. Manchmal entsteht diese Verwirrung auch durch die ungenaue Definition der Beschleunigung als *Steigerung* der Geschwindigkeit und durch die zusätzliche Benutzung des Begriffes *Verzögerung* zur Beschreibung bestimmter Fälle von Beschleunigung.

Die folgende Testaufgabe wurde entwickelt, um zu untersuchen, wie weit Schüler und Studenten die beschriebenen Konzepte verstanden haben. Zunächst sollen in einer Liste von Größen, die u.a. die Schnelligkeit, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung enthält, die Vektorgrößen identifiziert werden. Anschließend soll anhand von Abb. 1 die folgende Problemstellung bearbeitet werden:

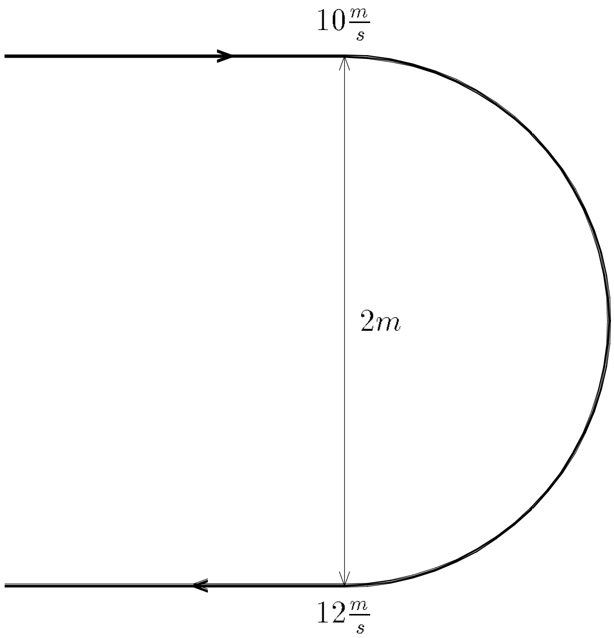


Abbildung 1: Diagramm aus einem Test. Der Kandidat soll mittlere Geschwindigkeit und mittlere Beschleunigung für den halbkreisförmigen Teil der Bahn berechnen.

> *Ein Körper bewegt sich auf der dargestellten Bahn. Dabei wächst seine Schnelligkeit auf dem halbkreisförmigen Teil der Bahn gleichmäßig von $10\frac{m}{s}$ auf $12\frac{m}{s}$. Berechne für diesen Abschnitt der Bewegung*

a) die Durchnittsgeschwindigkeit und

b) die Durchnittsbeschleunigung.

(Setze der Einfachheit halber $\pi = \frac{22}{7}$.)

Die durchschnittliche Schnelligkeit beträgt $11\frac{m}{s}$. Daraus ergibt sich die Laufzeit für die halbkreisförmige Bewegung zu $\frac{2}{7}s$. Die Durchschnittsgeschwindigkeit ist die Verschiebung geteilt durch die benötigte Zeit, also $7\frac{m}{s}$ senkrecht nach unten. Die Geschwindigkeitsänderung beträgt $22\frac{m}{s}$ nach links. Damit ist die Durchschnittsbeschleunigung $77\frac{m}{s^2}$ nach links.

Richtige Antworten auf diese Fragen erhält man praktisch nie. Fast alle Schüler bzw. Studenten nennen die durchschnittliche Schnelligkeit als Antwort auf die Frage nach der Durchschnittsgeschwindigkeit, obwohl sie im ersten Teil zwischen Schnelligkeit und Geschwindigkeit unterschieden haben. Die Frage nach der Beschleunigung bleibt in der Regel unbeantwortet.

Jemandem, der nicht mit der oben beschriebenen Begriffsbildung vertraut ist, muß diese Aufgabe tatsächlich wie eine Fangfrage vorkommen. Für jemanden jedoch, der verstanden hat, was mit den Begriffen Geschwindigkeit und Beschleunigung gemeint ist (nämlich die Änderung eines *Vektors* geteilt durch die benötigte Zeit), sollten die Antworten auf Anhieb klar sein.

1.2 Vorzeichen

Ein Skalar besteht aus einem Vorzeichen und einem Betrag, z. B. eine Masse von 10 Kilogramm, eine potentielle Energie von minus 5 Joule oder das Datum 55 v.Chr.. Ein Vektor ist aus einem (immer positiven) Betrag und einer Richtung zusammengesetzt. Die Komponenten eines Vektors in einem kartesischen Koordinatensystem können positive oder negative Vorzeichen haben, und wenn wir unsere Betrachtung auf eine Richtung beschränken, untersuchen wir im Endeffekt eine bestimmte kartesische Koordinate. Viele grundlegende Überlegungen in der Mechanik beschränken sich notwendigerweise auf nur eine Dimension, und so wird die Existenz von positiven und negativen Werten fälschlicherweise als Hinweis betrachtet, daß es sich um Vektoren handelt. Möglicherweise ist das ein Grund dafür, daß einige Skalare, z.B. die potentielle Energie, oft fälschlicherweise für Vektoren gehalten werden.

Bei der Beschränkung auf nur eine Dimension muß eine Richtung für alle Vektoren als positiv festgesetzt werden. Dadurch werden Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft positiv, wenn ihre Richtung mit einer positiven Verschiebung übereinstimmt. Oft sorgt dabei jedoch eine inkonsequente Verwendung des Beschleunigungsbegriffes für Verwirrung. Viele Autoren sprechen nämlich im Zusammenhang mit langsamer werdenden Körpern von negativer Beschleunigung oder von Verzögerung. Die dadurch hervorgerufene Verwirrung kann am einfachen Fall einer harmonischen Bewegung demonstriert werden, die durch die folgende Gleichung beschrieben wird:

$$x = a \sin \omega t.$$

Während der ersten Viertelperiode sind Verschiebung und Geschwindigkeit des Körpers beide positiv. Bei harmonischen Bewegungen ist die Beschleunigung stets entgegengesetzt zur Verschiebung gerichtet. In der ersten Viertelperiode ist sie also negativ. Da die Beschleunigung entgegengesetzt zur Geschwindigkeit gerichtet ist, wird der Körper langsamer.

Während der nächsten Viertelperiode ist die Verschiebung immer noch positiv und die Beschleunigung negativ. Die Geschwindigkeit ist negativ, und die Schnelligkeit des Körpers wird größer.

Während des dritten Viertels ist die Verschiebung negativ, die Beschleunigung infolgedessen positiv. Die Geschwindigkeit ist negativ, und ihr Betrag nimmt ab.

Im vierten Abschnitt ist die Verschiebung negativ und die Beschleunigung daher positiv. Die Geschwindigkeit ist jetzt positiv, und ihr Betrag wird größer.

Zeit	Verschiebung	Geschwindigkeit	Beschleunigung	Schnelligkeit
$0 - \frac{T}{4}$	+	+	-	abnehmend
$\frac{T}{4} - \frac{T}{2}$	+	-	-	zunehmend
$\frac{T}{2} - \frac{3T}{4}$	-	-	+	abnehmend
$\frac{3T}{4} - T$	-	+	+	zunehmend

Vorzeichen der Vektoren bei linearer harmonischer Bewegung

Diese Vorzeichen ergeben sich automatisch, wenn wir obige Gleichung benutzen und Geschwindigkeit und Beschleunigung berechnen, indem wir einmal bzw. zweimal nach der Zeit differenzieren. Wenn man jedoch eine kleiner werdende Geschwindigkeit als negative Beschleunigung bezeichnet, passen die Vorzeichen im zweiten und dritten Abschnitt der Periode nicht zu dieser Auffassung.

Besonders interessant bei diesem Problem sind die beiden Punkte, an denen der Körper momentan in Ruhe ist. Am ersten dieser beiden Punkte, zur Zeit $t = \frac{T}{4}$, ist der Betrag der Geschwindigkeit null, die Beschleunigung dagegen hat ihren größten Betrag und ist negativ. Bei $t = \frac{3T}{4}$ ist die Schnelligkeit wieder null, während die Beschleunigung wieder ihren maximalen Betrag hat, aber positiv ist. Schüler und Studenten sind so gut wie nie mit der Vorstellung vertraut, daß ein Körper momentan in Ruhe sein kann, obwohl er gerade beschleunigt wird. Ohne sich diesen Umstand bewußt zu machen, kann man aber nicht verstehen, wie sich etwas aus der Ruhe in Bewegung setzen oder wie ein Ball oder Gasmolekül von einer Wand zurückprallen kann.

Ähnliche Schwierigkeiten werden bei der Untersuchung senkrechter Wurfbewegungen oder frontaler Zusammenstöße von Fahrzeugen verursacht, wenn das negative Vorzeichen zur Beschreibung kleiner werdender Geschwindigkeiten benutzt wird.

1.3 Gleichförmige Kreisbewegungen

In zwei oder drei Dimensionen haben die Änderungsrate eines Vektors und der Vektor selbst nicht unbedingt dieselbe Richtung. Um das zu verstehen, ist es unbedingt erforderlich, die allgemeine Bedeutung der Beschleunigung als Änderungsrate der Geschwindigkeit und *nicht* als deren Zunahme zu kennen. Schülern und Studenten, die gelernt haben, die Beschleunigung als Zunahme der Geschwindigkeit zu betrachten und eine negative Beschleunigung oder Verzögerung für deren Abnahme zu verwenden, fällt es sehr schwer, sich vorzustellen, daß ein Körper eine Beschleunigung erfährt, wenn er mit konstanter Schnelligkeit seine Bewegungsrichtung ändert. Wegen der Bedeutung gleichförmiger Kreisbewegungen ist das ein ernsthaftes Problem.

Einige Beschreibungen dieses Phänomens in Lehrbüchern verschärfen diese Schwierigkeiten offensichtlich noch. In einigen Fällen wird einerseits behauptet, die Geschwindigkeit eines Körpers auf einer Kreisbahn sei konstant, dann aber wird berechnet, daß die Änderungsrate $\frac{v^2}{r}$ betrage! Manchmal wird die Beschleunigung als konstant bezeichnet, obwohl sie dauernd ihre Richtung ändert. Gelegentlich wird die ganze Beschreibung in der umgekehrten Reihenfolge entwickelt: Erst wird ein Experiment zur Messung der Zentripetalkraft beschrieben, und dann erst aus der Existenz einer Kraft überhaupt auf eine Beschleunigung geschlossen.

Wahrscheinlich erwächst die Schwierigkeit großenteils daraus, daß die Diskussion gewöhnlich nur halbherzig geführt wird: Die komplizierte Idee, daß die Beschleunigung ein Vektor ist, wird aus der Geschwindigkeitsänderung hergeleitet, aber die Geschwindigkeit wird nur selten aus der Änderung der Verschiebung abgeleitet. Im folgenden stellen wir einen Zugang dar, der von den Grundprinzipien ausgeht.

Betrachten wir die Verschiebung (bezüglich des Zentrums) eines sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω auf einer Kreisbahn mit dem Radius r bewegenden Punktes, wie sie in Abb. 2 a gezeigt wird.

Wenn sich der Punkt bei P_1 befindet, ist seine Verschiebung $\vec{R}_1$. Entsprechendes gilt für P_2 und $\vec{R}_2$. Diese Verschiebungen haben beide den selben *Betrag* r. Sie sind jedoch verschieden, da sich ihre Richtungen unterscheiden.

Der Winkel zwischen $\vec{R}_1$ und $\vec{R}_2$ sei $\delta\theta$, so daß gilt $\frac{\delta\theta}{\delta t} = \omega$. Die Differenz $\delta\vec{R} = \vec{R}_2 - \vec{R}_1$ zwischen $\vec{R}_1$ und $\vec{R}_2$ ergibt sich als der Vektor, der zu $\vec{R}_1$ addiert werden muß, um $\vec{R}_2$ zu erhalten (s. Abb. 2 a). Die Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen P_1 und P_2 ist dann $\frac{\delta\vec{R}}{\delta t}$. Ihr Betrag ist näherungsweise $r\frac{\delta\theta}{\delta t}$, ihre Richtung die von P_1 nach P_2. Durch die Bildung des Grenzwertes für δt gegen null erhält man die Momentangeschwindigkeit im Punkt P_1 in Form des Vektors $\vec{V}_1$, der in P_1 tangential zur Kreisbahn ist und den Betrag $r\frac{\delta\theta}{\delta t} = r\omega$ hat.

Wenn die Herleitung der Geschwindigkeit verstanden ist, ergibt sich die Herleitung der Beschleunigung in ganz natürlicher Weise. In Abb. 2 b ist die Differenz zwischen $\vec{V}_1$ und $\vec{V}_2$ eingezeichnet. Wenn wir das Vektordiagramm in Abb. 2 c betrachten und zum Grenzwert übergehen, erhalten wir die Beschleunigung in P_1 als einen Vektor, der radial nach innen zeigt und den Betrag $r\omega^2$ hat.

Die Änderung der Beschleunigung läßt sich aus Abb. 2 d herleiten. Dort ist zu sehen, daß die Änderungsrate der Beschleunigung in P_1 ein Vektor des Betrages $r\omega^3$ ist, der entgegengesetzt zur Geschwindigkeit gerichtet ist. Letztere Überlegung sollte helfen, den vektoriellen Charakter der Beschleunigung zu verstehen.

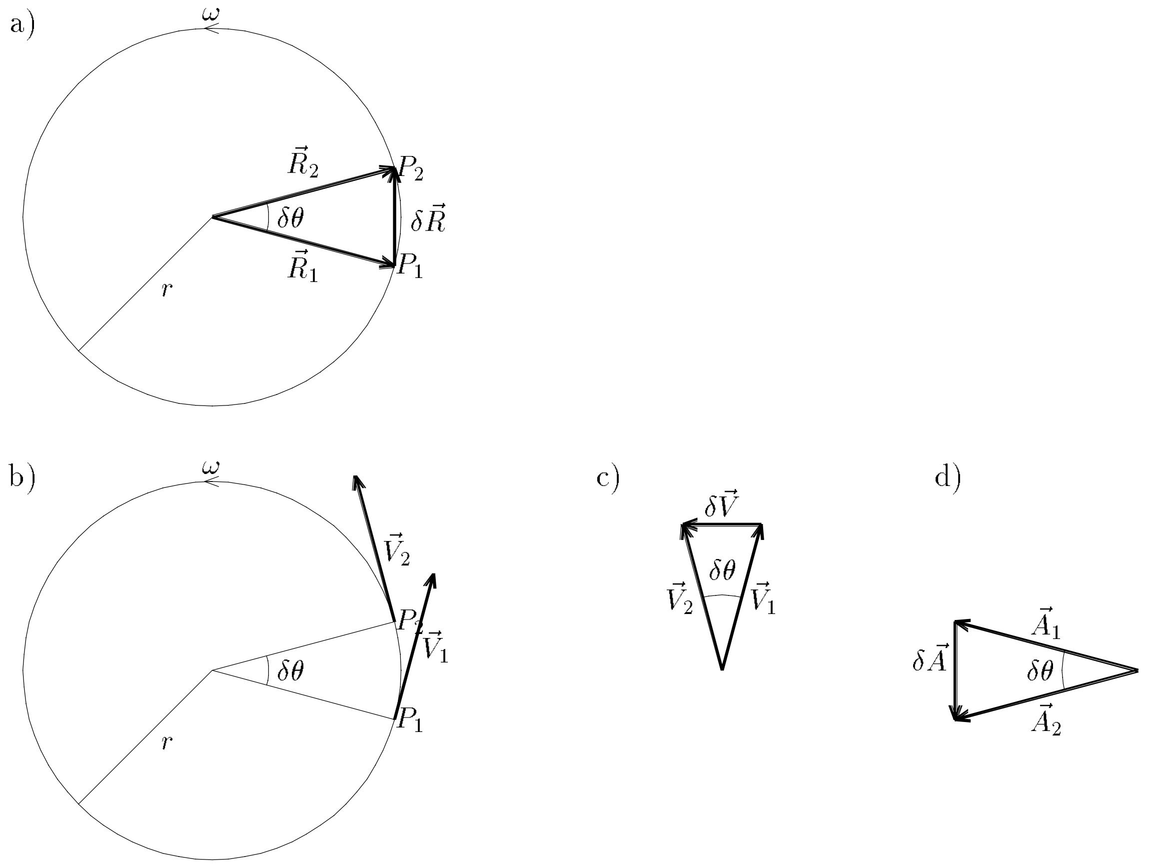


Abbildung 2: Vektordiagramme zur Ableitung der Ausdrücke für Geschwindigkeit, Beschleunigung und Änderung der Beschleunigung bei gleichförmigen Kreisbewegungen

Kapitel 2

Die Newtonschen Bewegunggesetze

2.1 Das erste Gesetz

Das erste Newtonsche Gesetz kann folgendermaßen formuliert werden:

> *Ein Körper bewegt sich geradlinig und mit konstanter Schnelligkeit, solange keine resultierende Kraft von außen auf ihn einwirkt.*

Stattdessen könnte auch gefordert werden, daß die Geschwindigkeit konstant bleibt. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß die Geschwindigkeit deutlich von der Schnelligkeit abgesetzt worden ist.

Es muß betont werden, daß die Bewegungsgesetze keinen Unterschied machen zwischen verschiedenen Zuständen gleichförmiger geradliniger Bewegung. So ist ein ruhender Körper lediglich ein Spezialfall, der keine größere Bedeutung besitzt als beispielsweise ein Körper, der sich mit einer Geschwindigkeit von 137 $\frac{m}{s}$ in eine bestimmte Richtung bewegt. Die häufig zu findenden falschen Definitionen der Statik als Wissenschaft von den ruhenden Körper und der Dynamik als Wissenschaft von den bewegten Körper legen tatsächlich eine solche unrichtige Unterscheidung nahe. In ähnlicher Weise werden auch die Begriffe Gleichgewicht und Ruhe miteinander identifiziert.

Das erste Gesetz (das auch in der speziellen Relativitätstheorie seine Gültigkeit behält) definiert ein Bezugssystem. Bei näherer Betrachtung ergeben sich größere Probleme bei der Formulierung eines solchen Gesetzes. Wie läßt sich feststellen, ob sich ein Körper mit konstanter Geschwindigkeit bewegt oder nicht? Wir brauchen ein Bezugssystem (und nicht nur eine Tafel), um Geschwindigkeit und Richtung zu definieren zu können. Newton nahm den Fixsternhimmel als ein solches Bezugssystem, und wir werden dasselbe tun. Fragen nach der Gültigkeit eines solchen Vorgehens und nach der Existenz eines Verfahrens, das die die Gültigkeit dieses Gesetzes sicherstellt, werden in diesem Buch nicht behandelt. Hier reicht es zu fordern, daß die physikalischen Gesetze vom idealen Standpunkt eines imaginären „inertialen Beobachters“ aus betrachtet werden können, der das erste Newtonsche Gesetz bei allen seinen Messungen bestätigt findet.

2.2 Begriffliche Schwierigkeiten mit dem ersten Gesetz

Die Schwierigkeiten, die sich der Einführung in die Mechanik mit dem ersten Newtonschen Gesetz ergeben, hängen nicht mit so fortgeschrittenen Fragestellungen wie der nach der Natur des absoluten Raumes zusammen. Die Probleme entstehen dadurch, daß die abstrakten Begriffe, die sich als für die Beschreibung von Phänomenen erforderlich herausgestellt haben, mit der nichtwissenschaftlichen Interpretation von Alltagserfahrungen in Konflikt stehen. Unsere Vorstellungen über Kraft und Bewegung beruhen auf physischen Empfindungen, und so unterscheiden wir natürlich zwischen dem Zustand der Bewegung und dem der Ruhe. Wir wissen, daß wir uns anstrengen müssen, um gegenüber unserer Umgebung in Bewegung zu bleiben, und deshalb sind wir tief in unserem Inneren davon überzeugt, daß eine Kraft nötig ist, um Bewegung *aufrecht zu erhalten*, und daß diese Bewegung in die Richtung der einwirkenden Kraft erfolgt. Physiker dagegen gehen davon aus, daß Kräfte nur zur *Änderung* einer Bewegung erforderlich sind – eine Vorstellung, die dem „Alltagsverständnis“ total widerspricht.

Die in Kapitel 5 beschriebenen Tests zeigen, wie sich die Unfähigkeit, das erste Gesetz zu akzeptieren, auf die Art und Weise auswirkt, in der Studenten Phänomene interpretieren. In welchem Ausmaß an den vorwissenschaftlichen Konzepten von Kraft und Bewegung festgehalten wird, und das sogar von hochrangigen Experten, zeigt sich bei der Analyse von Lehrbüchern. Bei der Diskussion der Brownschen Bewegung z.B. wird oft nahegelegt, oder sogar explizit formuliert, daß die momentane Bewegung der Teilchen dieselbe Richtung hat wie die resultierende Kraft. Die Studenten lernen, daß der Weg einer freien Ladung eine elektrische Feldlinie sei (und fragen dann bei Demonstrationsexperimenten, die Elektronenstrahlen zeigen, „Warum folgen die Elektronen nicht den Kraftlinien?“).

Formulierungen der Linke-Hand-Regel fordern oft zu Recht, daß der Daumen in Richtung der Kraft zeigt, während in der Grafik der Daumen mit „Bewegung“ beschriftet ist. Im Englischen beruht dieser Fehler vielleicht auf der Eselsbrücke, die davon Gebrauch macht, daß ein „m“ sowohl in „motion“ als auch in „thumb“ enthalten ist. Wenn schon eine Eselsbrücke für nötig gehalten wird, wäre es viel besser, wenn sich Studenten daran erinnerten, daß der **D**aumen einen **D**ruck anzeigt (‚Thumb’ represents ‚thrust’.).

Manchmal wird die Kraft auch als *Ursache* einer Bewegung eingeführt. Die Definition der Arbeit beginnt oft mit Sätzen wie „Wenn eine Kraft einen Körper bewegt ...“. Von Körpern wird gesagt, daß sie sich „mit großer Kraft bewegen“ oder daß sie „durch ihren eigenen Schwung in Bewegung bleiben“. Diese und ähnliche Formulierungen in Büchern erwecken den Eindruck, daß die Autoren unbewußt die grundlegende Aussage des ersten Gesetzes ablehnen, das ja tatsächlich eine höchst schwierige Idee formuliert. In der Ausbildung darf niemals vergessen werden, daß man eine Aussage mit aller Aufrichtigkeit unterschreiben kann, ohne sie tatsächlich zu glauben.

2.3 Das zweite Gesetz

Die Änderungsrate des Impulses eines Körpers ist proportional zur resultierenden eingeprägten Kraft und hat dieselbe Richtung wie diese Kraft.

Bei passender Wahl der Einheiten kann diese Proportionalität durch eine Gleichung ersetzt werden:

$$\text{Kraft} = \frac{d}{dt}(mv) \tag{1}$$

Für Körper mit konstanter Masse wird daraus:

$$\text{Kraft} = m * \frac{dv}{dt} = \text{Masse} * \text{Beschleunigung}. \tag{2}$$

Meistens ist Gleichung (2) genau genug, aber es ist besser, von der allgemeinen Formulierung der Gleichung (1) auszugehen, die direkt zum Impulsbegriff und, in Verbindung mit dem dritten Gesetz, zur Impulserhaltung führt . Absolut notwendig ist die Formuliering (1) sogar bei der Anwendung des zweiten Gesetzes auf Probleme mit veränderlichen Massen, wie z.B. Raketen. Außerdem erleichtert sie später die Anwendung des Kraftbegriffs in der speziellen Relativitätstheorie.

Manchmal wird argumentiert, das erste Gesetz sei ein Spezialfall des zweiten Gesetzes für den Fall, daß die Kraft null ist. Angesichts der offensichtlichen Schwierigkeiten, die zugrundeliegenden Ideen zu verarbeiten, erscheint es jedoch erforderlich, zunächst das qualitative Grundkonzept der Kraft als etwas, das Beweguneng *ändert*, abzusichern, bevor man die quantitative Formulierung des zweiten Gesetzes behandelt.

Wir müssen uns darüberhinaus fragen, ob wir naturwissenschaftliche Gesetze, Axiome oder Definitionen untersuchen. Diese Unsicherheit geht auf Newton selbst zurück, der von „Axiomen oder Gesetzen der Bewegung“ (axiomata sive leges motus) schrieb. Für uns ist es sicher unmöglich, das Problem vollständig zu lösen, aber es sollte betont werden, daß das zweite Gesetz einen Zusammenhang zwischen einem beobachteten Effekt und seiner Ursache (der Kraft) beinhaltet und daß ein solcher Zusammenhang, wenn er widerspruchsfrei angewendet werden kann, auf etwas hinausläuft, was man üblicherweise ein Gesetz nennt.

2.4 Begriffliche Schwierigkeiten mit dem zweiten Gesetz

In der einführenden Literatur findet man immer wieder Probleme, die mit dem Verständnis quantitativer Beziehungen zusammenhängen, die Proportionalitäten beinhalten. Um sie zu überwinden, werden viele Experimente, Demonstrationen und numerische Rechenbeispiele zur geradlinigen gleichmäßig beschleunigten Bewegung behandelt. Die Absicht ist lobenswert, aber eine mögliche Folge besteht darin, daß Schüler Bewegungen immer mit Kräften in Bewegungsrichtung assoziieren. Möglicherweise werden dadurch die Verständnisprobleme mit dem ersten Gesetz noch vergrößert.

Die Schwierigkeiten fortgeschrittener Studenten beruhen in der Regel eher auf den physikalischen Aspekten des zweiten Newtonschen Gesetzes als auf mathematischen Problemen. Sie sind sich oft nicht sicher, welche Kräfte wirken, auf welchem Mechanismus sie beruhen und wo sie angreifen. Nach alltäglichen Phänomenen gefragt neigen sie stark dazu, auf verschiedene Körper wirkende Kräfte durcheinanderzuwerfen und zusätzlich mehrere nichtexistente Kräfte einzuführen.

Solche Verwechslungen ergeben sich oft aus einem falschen Verständnis des dritten Gesetzes oder aus der Mehrdeutigkeit des Begriffes „Gewicht“, auf die später noch eingegangen wird (s. Kapitel 4.1). Um solche Verwirrungen zu vermeiden, empfiehlt es sich, für jede Wechselwirkung zwei oder mehr Diagramme zu zeichnen, von denen jedes die Kräfte zeigt, die an einem bestimmten Körper angreifen.

Es besteht eine große Unsicherheit darüber, wie und wo Kräfte auf einen Körper wirken. Üblicherweise werden alle Arten von Kräften so dargestellt, als griffen sie am Schwerpunkt an. Die meisten vom Autor getesteten Studienanfänger gehen davon aus, daß ein Automotor irgendwie eine Kraft direkt auf das Auto ausübt. Sie verstehen nicht, daß der Motor die Reibungskraft hervorruft, die die Straße auf die Räder ausübt. Z.T. beruht das wahrscheinlich darauf, daß ihnen beigebracht worden ist, „Reibungskräfte wirken stets bewegungshemmend.“

Man sollte sich außerdem ansehen, was bei der Behandlung von Kreisbewegungen über die Zentripetalkraft gesagt wird. Statt zu betonen, daß die Gravitationskraft die Zentripetalkraft *ist*, wird zu oft gesagt, sie sei *gleich* der Zentripetalkraft. Auf diese Weise wird den Studenten nahegelegt, sich zwei verschiedene aber gleich große Kräfte vorzustellen, die beide nach innen wirken.

Darüberhinaus stiftet der Begriff der resultierenden Kraft viel Verwirrung. Offensichtlich stellen sich viele Studenten unter der Resultierenden eine zusätzliche Kraft vor, und viele Diagramme in Lehrbüchern erwecken tatsächlich diesen Eindruck. Das könnte mit eigenen Symbolen für die resultierenden Kräfte vermieden werden, z.B. mit gestrichelten Linien im Gegensatz zu durchgezogenen oder mit verschiedenen Farben. Die Bezeichnung „beschleunigende Kraft“ wird mal für die Resultierende benutzt, mal für eine der angreifenden Kräfte.

Alle diese Schwierigkeiten könnten durch präzise Beschreibungen der Phänomene und klare Diagramme vermieden werden.

2.5 Das dritte Gesetz

> *Kräfte entstehen durch Wechselwirkungen zwischen Körpern. Die Kraft, die ein Körper A auf einen Körper B ausübt, ist betragsmäßig gleich, entgegengesetzt gerichtet und wirkt entlang derselben Geraden wie die Kraft, die Körper B auf A ausübt.*

Um das Gesetz allgemein anwenden zu können, muß der Begriff des Körpers so erweitert werden, daß er Strahlung mit umfaßt, z.B. bei der Compton-Streuung eines Photons an einem Elektron. Solche Fälle gehen jedoch über den engeren Rahmen der Newtonschen Mechanik hinaus.

Durch Kombination des zweiten mit dem dritten Gesetz läßt sich der Impulserhaltungssatz herleiten. Es ist interessant zu erwähnen, daß das dritte Gesetz in der relativistischen Mechanik nicht überall exakt gültig ist, obwohl die Zeit in einer Weise transformiert wird, daß der Impulserhaltungssatz weiterhin gilt.

Die Anwendung des dritten Gesetzes auf die Wechselwirkungen zwischen den Teilen eines ausgedehnten Körpers macht es möglich, die ersten beiden Gesetze auf die Bewegung des Massenmittelpunktes anzuwenden. Sie führt außerdem zu neuen Begriffen, z. B. dem des Trägheitsmomentes.

2.6 Begriffliche Schwierigkeiten mit dem dritten Gesetz

Das dritte Gesetz von Newton wird oftmals mißverstanden wegen der höchst unglücklichen Gewohnheit, es in einer der folgenden schlagzeilenartigen Formulierungen auszudrücken: „Zu jeder Aktion gibt es eine ebenso große, aber entgegengesetzt gerichtete Reaktion.“ Oder: „Jeder Aktion steht eine ebenso große Reaktion entgegen.“[1] Diese Formulierungen gehen auf die lateinische Fassung von Newtons *Pricipia* zurück. Newton stand sicher in der damaligen Tradition des klassischen Lernens, das Schüler zum Erstellen von Epigrammen erzog. Aber er ergänzte seine Formulierung, indem er genau sagte, was er meinte. Vielen Generationen war das Epigramm jedoch wesentlich besser bekannt als die zugehörige Erklärung. Dabei wäre es viel besser, die Bedeutung des Gesetzes zu erläutern, den Slogan aber wegzulassen.

Die Begriffe „Aktion“ und „Reaktion“ suggerieren eine zeitliche Abfolge und eine Beziehung in der Art von Ursache und Wirkung. Die Kräfte jedoch, auf die sich das dritte Newtonsche Gesetz bezieht, treten immer gleichzeitig auf und sind von derselben Natur. Die zweite Formulierung des Epigrammes ist noch schlechter als die erste, weil das Verb „entgegenstehen“ den Eindruck erweckt, beide Kräfte griffen am selben Körper an. Demzufolge glauben viele Studenten, das Gesetz beziehe sich ausschließlich auf Gleichgewichtszustände. Vielleicht sollte erklärt werden, daß „entgegenstehen“ früher lediglich „in entgegengesetzte Richtungen sehen“ bedeutete, aber nicht unbedingt einen Widerstreit beinhaltete. Ein „Gegenüber“ hat man ja nicht nur bei einem Duell, sondern auch beim Tanzen oder bei einem vertraulichen Gespräch.

Sehr häufig wird der Begriff „Reaktion“ bei der Behandlung von Reibungsphänomenen benutzt. Das übliche Diagramm ist das in Abb. 3 a. Die Gravitationskraft auf den Klotz, üblicherweise auch Gewicht genannt, ist mit $\vec{W}$ bezeichnet. Die durch Molekularkräfte hervorgerufene Kraft, mit der der Tisch von unten gegen den Block drückt, wird als „Normalkraft“ $\vec{N}$ bezeichnet und so dargestellt, als wirke sie durch den Massenmittelpunkt

[1] Im Deutschen oft noch kürzer: „Actio gleich Reactio.“ (Anm. d. Übersetzer)

(Meist wird sie sogar so gezeichnet, als griffe sie dort an!). Natürlich halten Studenten $\vec{N}$ oft für die „Reaktion“ auf $\vec{W}$ im Sinne des dritten Gesetzes. Es ist sehr gut möglich, daß diejenigen, die solche Bilder zeichnen, das ebenfalls glauben und deshalb den Kraftpfeil zu $\vec{N}$ durch den Schwerpunkt zeichnen. Damit sich der Klotz im Gleichgewicht befindet, muß aber $\vec{N}$ offensichtlich *rechts* vom Schwerpunkt angreifen (s. Abb. 3 b, die dicken Punkte markieren die Angriffspunkte der Kräfte.).

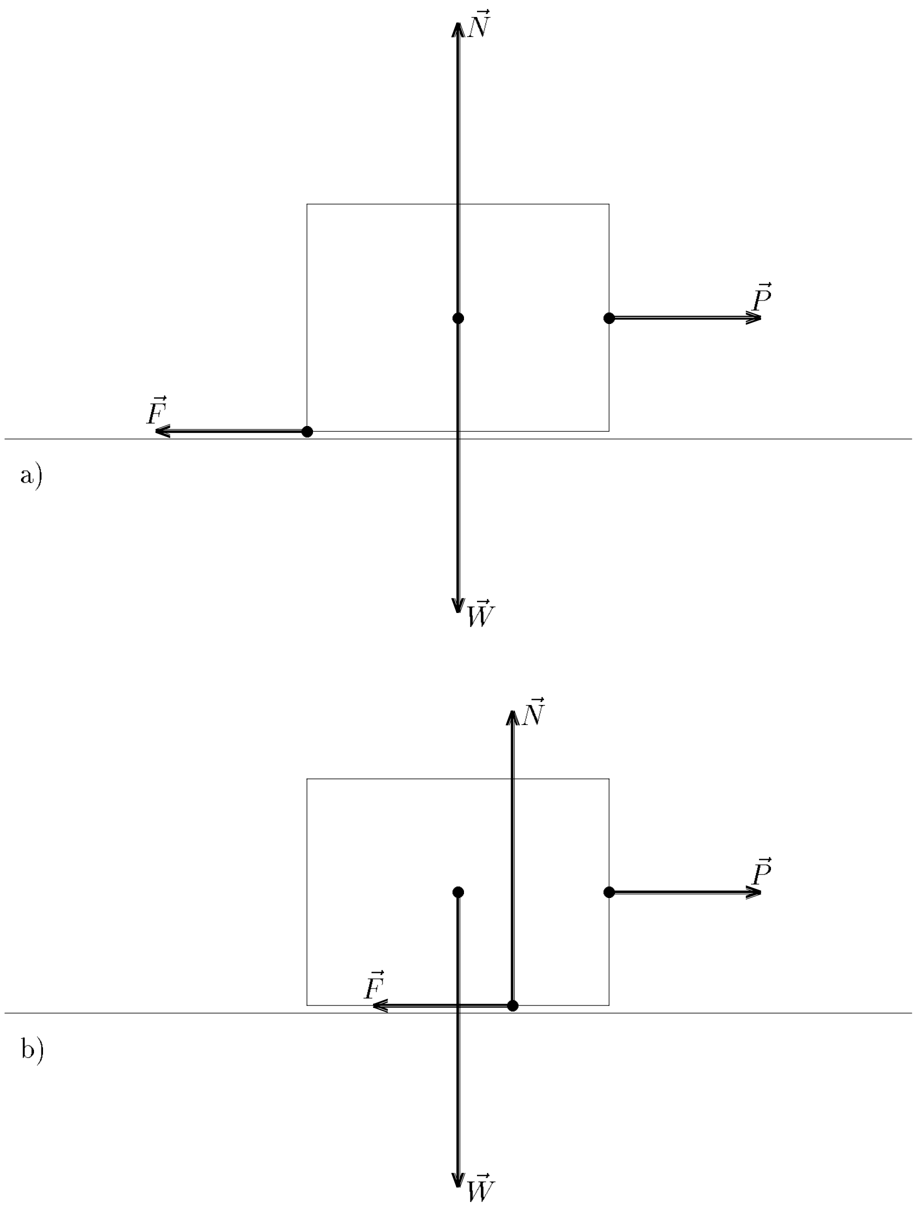


Abbildung 3: a) Häufig vorkommende Fehldarstellung des Systems von Kräften, die bei Reibung zwischen Klotz und Unterlage Gleichgewicht am Klotz herstellen sollen.
b) Richtige Darstellung

Der häufige Gebrauch des Wortes „Reaktion“ in solchen Zusammenhängen verleitet zu der Annahme, bei der Wechselwirkung zwischen einem Körper und dem Boden habe die Kraft, die der Boden auf den Körper ausübt, notwendigerweise denselben Betrag wie die Gravitationskraft auf den Körper.

Die Verwechslung zwischen Kräftepaaren, die an zwei verschiedenen Körpern angreifen (entsprechend dem 3. Gesetz), und Kräftepaaren, die an einem einzelnen Körper im Gleichgewicht angreifen (entsprechend dem 1. Gesetz), wird oft explizit gelehrt. So wird die beim Schieben eines Tisches entstehende Reibungskraft, die der Boden auf den Tisch ausübt, so daß dieser nicht beschleunigt wird, oft fälschlicherweise als Reaktion auf die Kraft bezeichnet, die die Hand auf den Tisch ausübt. Bei vernachlässigbarer Reibung dagegen wird die zeitliche Änderung des Impulses (oder das Negative davon) völlig irreführenderweise als Trägheitskraft oder Trägheitsreaktion bezeichnet. Ein besonders krasses Beispiel für eine solche irreführende Formulierung des 3. Gesetzes zeigt der folgende Auszug aus einem Lehrbuch für Ingenieure: „Befindet sich ein Körper in Ruhe oder bewegt er sich mit konstanter Geschwindigkeit, so muß es zu jeder an ihm greifenden Kraft eine gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft geben.“. Genannt wird dieser Satz dann das „Gesetz der Reaktionskräfte“. Im weiteren Verlauf wird der Begriff der Gegenkraft dann meist für eine Kraft benutzt, die an demselben Körper angreift wie die erste, manchmal aber wird er für eine Kraft verwendet, die an einem anderen Körper angreift! (s. Anhang 5, S. 65)

Kapitel 3

Scheinkräfte

3.1 Reale Kräfte und Scheinkräfte

Die Newtonsche Mechanik kann in voller Allgemeinheit formuliert werden unter ausschließlicher Verwendung realer Kräfte. Mit „real" bezeichnen wir Kräfte, die auf Wechselwirkungen zwischen Körpern im Sinne von erkennbaren Gesetzen beruhen und auf die die verschiedenen Erhaltungssätze der Mechanik (für Energie, Impuls und Drehimpuls) anwendbar sind. Manchmal allerdings erscheint es angebracht, auch scheinbare (imaginäre) Kräfte einzuführen. Diese „Kräfte" unterscheiden sich von den realen insofern, daß man sie nicht auf Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Körpern zurückführen kann. Sie erfüllen keine Gesetze außer gewissen mathematischen Regeln, und sie verletzen mindestens einen der Erhaltungssätze.

Es muß betont werden, daß es zwar manchmal bequem ist, diese Scheinkräfte zu benutzen, daß sie aber nicht erforderlich sind.

Zwei Arten von Scheinkräften werden benutzt, die unglücklicherweise im Englischen sehr ähnliche Namen haben („inertial forces" und „inertia forces"), im Deutschen sogar meist mit demselben Terminus bezeichnet werden: „Trägheitskräfte". Ihr Charakter ist grundverschieden, aber in manchen Fällen sind sie sich zum Verwechseln ähnlich.

Inertial forces werden teilweise mit Coriolis (1792-1843) assoziiert, inertia forces mit d'Alembert (1717-83).[1]

3.2 Coriolis-Kräfte (Inertial forces)

Wie weiter oben (s. S. 7) erwähnt, gelten die Newtonschen Gesetze der Bewegung für einen hypothetischen „ruhenden Beobachter". Ein Beobachter, der in Bezug auf den ruhenden Beobachter beschleunigt wird, wird die Newtonschen Gesetze in seinem Bezugssystem nicht

[1] Sie werden deshalb in dieser Übersetzung als „Coriolis-Kräfte" bzw. als „d'Alembert-Kräfte" bezeichnet, obwohl die Bezeichnung „Coriolis-Kraft" im Deutschen meist eine speziellere Bedeutung hat. (Anm. d. Ü.)

anwenden können. Wenn z.B. auf einen Körper keine äußeren Kräfte einwirken, beobachtet der ruhende Beobachter, daß die Geschwindigkeit des Körpers konstant ist. Der nicht ruhende Beobachter dagegen sieht den Körper relativ zu sich beschleunigt.

Der nicht ruhende Beobachter kann verschiedene Standpunkte einnehmen: Er kann einerseits die Perspektive des ruhenden Beobachters für besser halten als seine eigene. Dies ist im wesentlichen die von Kopernikus und allen nach ihm lebenden Astronomen getroffene Entscheidung, die unser Planetensystem vom heliozentrischen Standpunkt aus statt aus der Sicht des eigenen Observatoriums beschreiben. Er könnte aber auch einen egozentrischen Standpunkt einnehmen und sich selbst als unbeschleunigt betrachten. In diesem Fall könnte er entweder nur reale Kräfte verwenden, müßte die Newtonschen Gesetze aber fallenlassen, oder er könnte die ersten beiden Gesetze beibehalten. Dann müßte er aber zusätzliche Scheinkräfte („inertial forces“ bzw. „Coriolis-Kräfte“) einführen, die auf ihn selbst und auf alle anderen Körper in seinem System wirken.

Die Anwendung von Coriolis-Kräften soll am Beispiel eines Geschosses erläutert werden, das auf der Nordhalbkugel der Erde genau nach Norden abgefeuert wird. Ein Beobachter, der nicht an der Rotation der Erde beteiligt ist, kann als ruhend betrachtet werden (Natürlich gibt es noch die Bewegung der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne und andere großräumige astronomische Bewegungen, aber die sollen hier außer Betracht gelassen werden.). Diesem Beobachter ist sofort klar, warum die Kugel östlich des Längenkreises durch das Gewehr aufschlägt. Der Drehimpuls muß erhalten bleiben, so daß sich die Winkelgeschwindigkeit des Geschosses bei der Annäherung an die Rotationsachse der Erde erhöht und das Geschoß dem Erdboden in Rotationsrichtung vorauseilt. Es ist jedoch sehr lehrreich, das Problem auch aus der Sicht des Schützen zu betrachten, der ja kein ruhender Beobachter ist. Er muß *inter alia* eine fiktive Coriolis-Kraft einführen, die auf das Geschoß wirkt und es ostwärts ablenkt. Viele Probleme der Dynamik der Atmosphäre und der Ozeane werden auf diese Weise behandelt.

Eine nützliche einführende Abhandlung über Coriolis-Kräfte hat Elton (1971) geschrieben, obwohl dort den Kräften eine gewisse Realität zugeschrieben wird, die nicht mit der hier beschriebenen Interpretation übereinstimmt.

3.3 D'Alembert-Kräfte (Inertia forces)

Es gibt eine Darstellung der Gesetze der Mechanik, die d'Alembert zugeschrieben wird, obwohl sie auf mehrere Physiker zurückgeht. Dieser Darstellung können verschiedene Fassungen gegeben werden, und demzufolge gibt es eine ganze Reihe von Formulierungen des „d'Alembertschen Prinzips“. In seiner berühmten „Mechanik“ liefert Ernst Mach eine historische und kritische Übersicht (Mach 1919).

D'Alembert betrachtete ein System aus mehreren miteinander wechselwirkenden Körpern, auf die Kräfte von außen ausgeübt werden. Zusätzlich üben die Körper über verschiedene „Zwangsbedingungen“ Kräfte aufeinander aus. So erfährt jeder Körper eine resultierende „effektive“ Kraft, die eine Beschleunigung entsprechend dem zweiten Newtonschen Gesetz hervorruft. In einigen Abhandlungen wird jedem Körper zusätzlich eine fiktive

„d'Alembert-Kraft" (inertia force) oder „entgegengesetzte effektive Kraft" zugeordnet, die entgegengesetzt zur Resultierenden der realen Kräfte gerichtet und dieser betragsmäßig gleich ist. Auf diese Weise werden Probleme der Dynamik scheinbar zu Gleichgewichtsproblemen, die dann mit den Methoden der Statik analysiert werden können. Die Logik dieser Methode ist allerdings nicht leicht zu durchschauen, benutzt sie doch an einigen Stellen der Argumentation implizit die Newtonschen Gesetze, obwohl sie doch gerade auf ihrer Verneinung beruht.

Die Methoden von d'Alembert bieten keinerlei Vorteile bei den Problemen, die üblicherweise in einführenden Büchern zur Mechanik behandelt werden. Daher brauchen wir uns nicht genauer mit ihnen zu beschäftigen. Wichtig ist jedoch, daß die Benutzung dieser imaginären d'Alembert-Kräfte zu einer häufigen, oft aus dem Zusammenhang gerissenen, Beschwörung solcher Kräfte geführt hat, ohne daß deren Natur beachtet wird. Einige Autoren glauben sogar, diese angenommene d'Alembert-Kraft gehöre entsprechend dem dritten Newtonschen Gesetz zu der Resultierenden aller realen Kräfte. Dieses Argument erweckt den Eindruck, auf keinen Körper im Universum könne je eine resultierende Kraft ausgeübt werden.

Offensichtlich üben Scheinkräfte auf einige Wissenschaftler eine starke Anziehungskraft aus. Dies demonstriert die Einführung eines sehr fähigen Autors (Den Hartog, 1948), der, anders als die meisten anderen Autoren, die Originalarbeit d'Alemberts in übersetzter Form zitiert. Er erläutert die altertümlichen Formulierungen des Originals und nennt die Resultierenden der realen Kräfte „negative inertia forces". An der entsprechenden Stelle benutzte d'Alembert jedoch ausschließlich reale Kräfte. Es ist also derart üblich geworden, zu den realen Kräften völlig imaginäre negative Kräfte einzuführen, daß ein Autor unserer Tage es für ganz natürlich hält, reale Kräfte als negative Scheinkräfte zu bezeichnen!

3.4 Vergleich zwischen Coriolis- und d'Alembert-Kräften

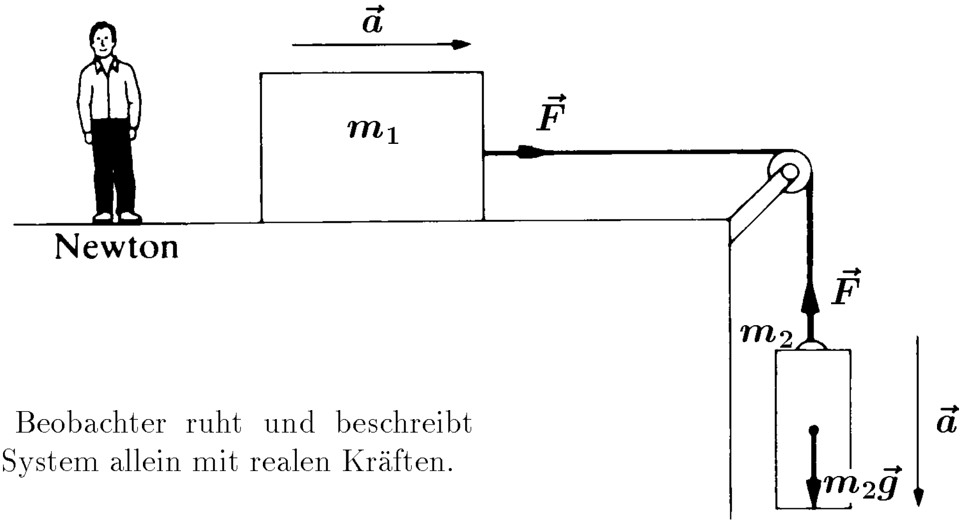
Die verschiedenen Arten von Scheinkräften können anhand des einfachen, allerdings ziemlich künstlichen, Beispiels in Abb. 4 miteinander verglichen werden. Zwei Körper mit den Massen m_1 und m_2 sind über ein masseloses Seil miteinander verbunden, das über eine reibungsfreie Rolle geführt ist. m_1 gleitet reibungsfrei über eine horizontale Fläche.

Teil (a) zeigt das System in Newtons Betrachtungsweise. Auf jeden Körper wirkt eine Kraft vom Betrage F, die sich aus der Spannung des Seiles ergibt. Die Blöcke haben Beschleunigungen gleichen Betrages a in den gezeigten Richtungen. Eine einfache Analyse mit Hilfe des zweiten Newtonschen Gesetzes führt auf folgenden Ausdruck für den Betrag der Beschleunigung:

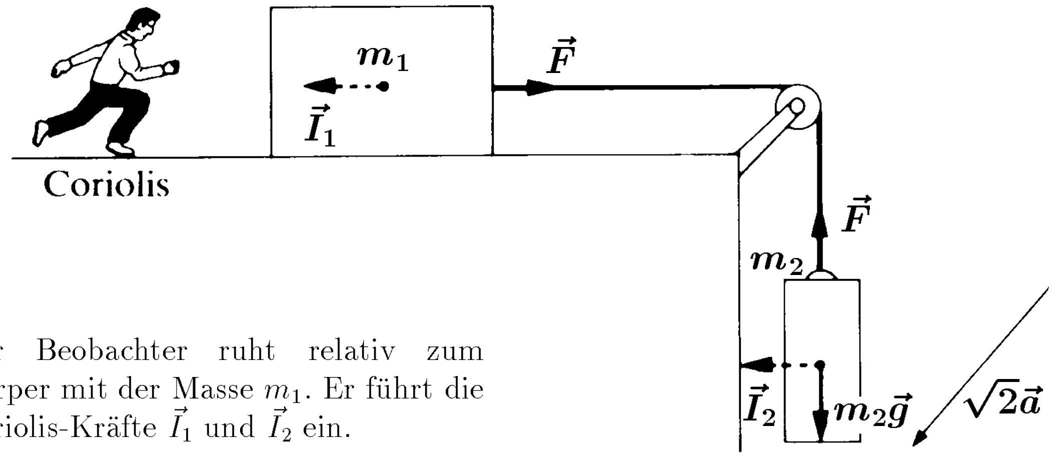
$$a = \frac{m_2}{m_1 + m_2} g$$

Der Beobachter befindet sich in Ruhe und benötigt keinerlei fiktive Kräfte.

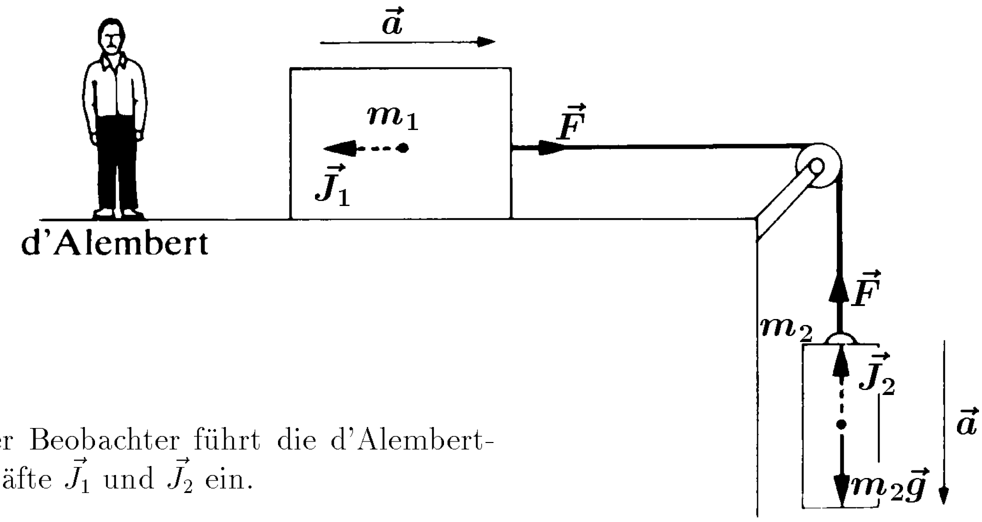
Teil (b) zeigt das System in der Beschreibung nach Coriolis. Bezüglich des Inertialsystems ist der Beobachter so beschleunigt, daß er relativ zum Block m_1 unbeschleunigt ist.



(a) Der Beobachter ruht und beschreibt das System allein mit realen Kräften.



(b) Der Beobachter ruht relativ zum Körper mit der Masse m_1. Er führt die Coriolis-Kräfte $\vec{I}_1$ und $\vec{I}_2$ ein.



(c) Der Beobachter führt die d'Alembert-Kräfte $\vec{J}_1$ und $\vec{J}_2$ ein.

Abbildung 4: Ein einfaches System in der Beschreibung von a) Newton, b) Coriolis und c) d'Alembert

Er kann die auf m_1 wirkende reale Kraft $\vec{F}$ messen. Um das erste und zweite Newtonsche Gesetz beibehalten zu können, führt er die auf m_1 wirkende Coriolis-Kraft $\vec{I_1}$ ein, die den Betrag $m_1 a$ hat und zu der von Newton beobachteten Beschleunigung entgegengesetzt gerichtet ist. Die Masse m_2 erfährt für diesen Beobachter eine Beschleunigung vom Betrage $\sqrt{2}a$ in der gezeigten Richtung. Dementsprechend stellt er sich zusätzlich eine Scheinkraft $\vec{I_2}$ vom Betrage $m_2 a$ in der gezeigten Richtung vor.

Offensichtlich erfüllen die „Kräfte“ $\vec{I_1}$ und $\vec{I_2}$ nicht das dritte Newtonsche Gesetz. Darüberhinaus gelten auch die Erhaltungssätze nicht.

Natürlich hätte sich Coriolis auch mit m_2 bewegen können – mit entsprechenden Konsequenzen.

In Teil (c) sehen wir das System, wie es ein Anhänger d'Alemberts beschreiben würde. Auf die Massen m_1 und m_2 wirken die fiktiven d'Alembert-Kräfte $\vec{J_1}$ und $\vec{J_2}$ mit den Beträgen $m_1 a$ und $m_2 a$ und Richtungen entgegengesetzt zur beobachteten Beschleunigung. In diesem Fall gelten weder die Newtonschen Gesetze noch irgendein Erhaltungssatz.

Coriolis-Kraft $\vec{I_1}$ und d'Alembert-Kraft $\vec{J_1}$ stimmen interessanterweise in Richtung und Betrag überein und greifen am selben Punkt an. Unter gewissen Umständen können also diese beiden völlig verschiedenen Betrachtungsweisen leicht miteinander verwechselt werden. Insbesondere beschränken manche Autoren ihre Anwendung des d'Alembert-Prinzips auf starre Körper. In diesen Fällen kann man einen beschleunigten Beobachter einführen, dessen Coriolis-Kräfte mit den d'Alembert-Kräften eines anderen Beobachters übereinstimmen. Diese Äquivalenz gilt jedoch nicht für alle Arten von Zwangsbedingungen.

3.5 Scheinkräfte und Kreisbewegungen

Betrachten wir einen Körper der Masse m, der eine gleichförmige Kreisbewegung mit der Schnelligkeit v und dem Radius r ausführt. Wenn der Kreismittelpunkt in Bezug auf einen Beobachter in einem Inertialsystem nicht beschleunigt ist, kann dieser das System in einfacher Weise newtonsch beschreiben: Es wirkt eine Zentripetalkraft (Resultierende aller realen Kräfte) mit dem Betrag $m\frac{v^2}{r}$ auf den Körper. Diese Beschreibung ist so einfach, daß es unverständlich ist, daß von Studenten in Einführungskursen andere, oft verwirrende Betrachtungsweisen erwartet werden.

Um den Standpunkt von Coriolis einnehmen zu können, muß der Beobachter bezüglich der Fixsterne rotieren. Die Masse m erscheint ihm unbeschleunigt, und zu der von ihm beobachteten realen Kraft stellt er sich eine weitere, betragsmäßig gleiche aber entgegengesetzt gerichtete „Kraft“ vor, die sich mit dieser im Gleichgewicht befindet. Er könnte sie „Zentrifugalkraft“ nennen, aber in seinem System bewegt sich m überhaupt nicht relativ zum Mittelpunkt. Deshalb gibt es keinen Grund, die Begriffe zentripetal und zentrifugal zu benutzen. Manchmal wird betont, die Beschreibung aus der Sicht des bewegten Beobachters sei bei einem solchen System ebenso richtig wie die aus der Sicht des ruhenden Beobachters. Dies ist richtig – vorausgesetzt, daß die Sicht des bewegten Beobachters auch konsequent benutzt wird. Normalerweise wird jedoch vom Körper gesagt, er vollführe eine gleichförmige Kreisbewegung – das ist die Beschreibung des ruhenden Beobachters – und dann die Coriolis-Kraft eingeführt. Wenn wir jedoch Coriolis-Kräfte verwenden, müssen wir konsequenterweise den Körper als ruhend ansehen, während sich das restliche beobachtbare Universum um einen geeigneten Punkt dreht. Dies erfordert die Existenz von riesigen auf alle anderen Körper der Welt wirkenden Scheinkräften, die aber normalerweise vergessen werden.

In solchen Fällen ist oft unklar, ob der (stillschweigend) angenommene bewegte Beobachter am umlaufenden Körper festgemacht ist (wie der Fahrer eines Autos) oder ob er als unabhängig rotierend gedacht wird. Als Argument für die „Realität“ von Coriolis-Kräften wird manchmal vorgebracht, ein Insasse in einem Auto „fühle“ bei Kurvenfahrten eine Kraft, die ihn nach außen drücke. Dies ist im Grunde eine psychologische Deutung, die auf unseren unbewußten Versuchen beruht, uns zu unserem unmittelbaren Umfeld in Beziehung zu setzen, das wir als feststehend ansehen. Für diese Argumentation muß der Beobachter aber auf umlaufendenen Körper bezogen werden (oder ihn selbst darstellen).

Manchmal wird stattdessen folgendermaßen argumentiert: Wenn durch die Vorrichtung, über die die Zentripetalkraft ausgeübt wird, ein Schnitt gelegt würde, würde der Körper aufgrund der „Zentrifugalkraft“ anfänglich eine Beschleunigung erfahren. Diese Betrachtungsweise postuliert einen Beobachter, der nicht mit dem Körper umläuft. Das ist ein recht seltsames Argument für die Realität der Coriolis-Kraft, da es ja nur in dem Moment anwendbar ist, in dem der Körper nicht mehr in kreisförmiger Bewegung ist! Der rotierende Beobachter würde dieselbe Beschleunigung unbeteiligten, zufällig tangential vorbeiziehenden Körper zuschreiben, die niemals an der Rotation teilgenommen haben.

Wenn man die d'Alembertsche Methode benutzt, muß man sich eine Scheinkraft vorstellen, die entgegengesetzt zur realen Zentripetalkraft gerichtet ist. In diesem Fall wird der Standpunkt eines ruhenden Beobachters beibehalten, auf die Newtonschen Gesetze der Bewegung aber verzichtet. Welche Vorteile das bei anderen Problemen auch immer haben mag, zu dem hier betrachteten Problem trägt es kaum etwas anderes als Verwirrung bei.

Ob man nun eine Coriolis- oder eine d'Alembert-Kraft benutzt, auf jeden Fall sollte der rein imaginäre Charakter dieser Kraft deutlich werden. Trotzdem werden bei einem umlaufenden Körper manchmal reale Zentrifugalkräfte angenommen. Wahrscheinlich ist dies Ausdruck eines falschen Verständnisses des dritten Newtonschen Gesetzes – oder Anzeichen seines Mißbrauchs.

Möglicherweise hat ein Student korrekterweise gelernt, daß es zu einer Zentripetalkraft auf einen umlaufenden Körper entsprechend dem dritten Newtonschen Gesetz eine gleich große und entgegengesetzt gerichtete Kraft geben muß, die an einem weiteren Körper angreift. Fälschlicherweise nimmt er aber an, diese Kraft greife am umlaufenden Körper selbst an. Ursache für diesen Fehler ist wahrscheinlich die weit verbreitete Unsicherheit darüber, an welchen Körpern Kräfte angreifen. Eine andere Möglichkeit ist, daß das dritte Newtonsche Gesetz in der Form „actio gleich reactio“ gelernt worden ist und der Student daraus auf eine Reaktion an dem Körper schließt, auf den auch die Aktion wirkt.

Es sollte betont werden, daß die dem dritten Gestz entsprechende Gegenkraft zu der Zentripetalkraft nicht zwangsläufig zentrifugal gerichtet ist. Die Erde beispielsweise übt eine Gravitationskraft auf den Mond aus, und dieser übt eine entgegengesetzt gerichtete Gravitationskraft auf die Erde aus. *Beide* Kräfte sind zum Massenschwerpunkt gerichtet, *beide* sind dementsprechend zentripetal.

Fast immer treten Mißverständnisse auf, wenn der Begriff der Zentrifugalkraft in Lehrbüchern eingeführt wird. Diese Mißverständnisse könnten ganz leicht vermieden werden, indem der Begriff einfach weggelassen wird. Ein interessantes Beispiel dafür ist in einem einführenden Lehrbuch zu finden, das die Kreisbewegung geladener Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern behandelt. In einem elektrischen Feld, heißt es dort, werde „die elektrische Kraft durch die Zentripetalkraft ausgeglichen (balanced)“, in einem Magnetfeld dagegen werde „die magnetische Kraft durch die Zentrifugalkraft kompensiert (counterbalanced).“

Bemerkenswerterweise werden Scheinkräfte in Büchern sehr oft zwar im Zusammenhang mit Kreisbewegungen eingeführt, bei allen anderen Problemen aber, z.B. bei linearen Bewegungen, Geschoßbahnen oder elliptischen Planetenbahnen, nicht wieder benutzt. So läuft die Scheinkraft Gefahr, zu einem Geheimnis zu werden, das ein spezielles Problem umgibt.

Wenn ein Leser einen Kollegen hat, der darauf besteht, daß auf Körper, die eine gleichförmige Kreisbewegung ausführen, eine Zentrifugalkraft wirkt, sollte er ihm folgende Fragen stellen:

- Ist diese Kraft real oder imaginär?
- Wenn sie imaginär ist, handelt es sich um eine Scheinkraft im Sinne von Coriolis oder im Sinne d'Alemberts?
- Ist der Beobachter in Bewegung oder in Ruhe?
- Welche der Newtonschen Gesetze sind anwendbar?
- Wenn das dritte Gesetz gilt, welche Kraft ist der „Partner“ der Zentrifugalkraft?
- Wo im Körper greift die Kraft an?
- Führt sie zu Kräften, die an anderen Körpern angreifen?
- Würde eine ähnliche Kraft auf einen Körper wirken, der sich beschleunigt auf einer Geraden bewegt?

Es wird sicher interessant sein, seine Reaktion zu beobachten.

Kapitel 4

Spezielle Probleme

4.1 Das Gewicht

Unter „Gewicht“ wird normalerweise die auf einen Körper wirkende Gravitationskraft verstanden. Manche Autoren meinen damit jedoch die Kraft, die ein aufliegender Körper auf seine Unterlage ausübt. Noch seltener wird die von der Unterlage auf den Körper ausgeübte Kraft so genannt. Die Unterlage wird normalerweise als relativ zur Erdoberfläche ruhend betrachtet, hin und wieder kann sie aber auch ein beschleunigter Aufzug sein. Manchmal wird das Gewicht mit dem Produkt mg gleichgesetzt, ohne daß sein Angriffspunkt explizit genannt wird. Zusätzlich ergibt sich das Problem, daß wegen der Erdrotation die Richtung der Beschleunigung $\vec{g}$ nicht ganz mit der der Gravitationsbeschleunigung in Richtung Erdmittelpunkt übereinstimmt.

Sehr oft wird Gewicht als Anziehungskraft auf einen Körper definiert, dann aber heißt es, das Gewicht drücke nach unten auf die Unterlage; daher ist oft unklar, an welchem Körper die Kraft angreift. Darüberhinaus wandert der Angriffspunkt des Gewichts unvorhersehbar zwischen dem Schwerpunkt und der Oberfläche eines Körpers hin und her.

Die Verwendung des „Gewichtes“ im Sinne der Kraft, die auf die Unterlage ausgeübt wird, ist heute eher selten; früher war sie wahrscheinlich weiter verbreitet. Wenn die nach oben gerichtete Kraft auf den Körper in Abb. 3 a so oft als „Reaktionskraft“ bezeichnet wird, dann liegt das wohl daran, daß sie ursprünglich von den Autoren so genannt wurde, die mit „Gewicht“ die vom Körper auf die Unterlage ausgeübte Kraft meinten. In diesem Fall ist das „Gewicht“ tatsächlich eine nach unten gerichtete Kraft mit gleichem Betrag und entgegengesetzter Richtung zu der nach oben wirkenden Kraft der Abb. 3 b, die zudem entlang derselben Geraden wirkt. In diesem Sinne gehörte „Gewicht“ tatsächlich gemäß dem dritten Gesetz mit der aufwärts gerichteten Kraft auf den Körper zusammen. Allerdings würde es dann nicht zum Erdmittelpunkt zeigen.

Der Autor ist zu der Überzeugung gelangt, daß dem Begriff des Gewichtes eine so große Unbestimmtheit anhaftet und daß er so viel Verwirrung stiftet, daß er diesen Begriff in seinen Vorlesungen nur sehr selten verwendet und stattdessen sehr genau sagt, von welcher Kraft er gerade spricht.

Ein Körper wird als „gewichtslos“[1] bezeichnet, wenn er keinen Kontakt mit einer Unterlage hat, z.B. weil er sich in einem die Erde umkreisenden Raumschiff (also im freien Fall) befindet. Diese Formulierung ist offensichtlich durchaus sinnvoll, wenn mit „Gewicht“ die Kraft auf die Unterlage gemeint ist. Junge Menschen jedoch, die in einer Welt groß geworden sind, in der Hinweise auf Gewichtslosigkeit fast alltäglich sind, haben meistens gelernt, daß das Gewicht die Gravitationskraft auf einen Körper ist. Daraus schließen sie natürlich, daß ein Astronaut deshalb gewichtslos ist, weil er das Gravitationsfeld der Erde verlassen hat. Die meisten von uns getesteten Studenten schätzten, daß die Schwerkraft in der typischen Höhe eines künstlichen Satelliten (200 km) weniger als ein Prozent von der Schwerkraft in Meereshöhe betragen muß. Offensichtlich sagt ihnen weder die $\frac{1}{r^2}$-Abhängigkeit des Gravitationsgesetzes sehr viel, noch haben sie sich jemals Gedanken darüber gemacht, warum ein Satellit eine gekrümmte Bahn beschreibt. Andere Studenten vermuten, daß die Schwerkraft auf Flughöhe noch einen wesentlichen Betrag hat, daß sie aber von der „Zentrifugalkraft“ aufgehoben wird. Sicherlich wäre die Feststellung nützlich, daß die Schwerelosigkeit nicht von der Bahnform abhängt. Die meisten der getesteten Studenten vermuten nämlich, sie trete nur bei Kreisbahnen auf.

Zusätzliche Verwirrung hinsichtlich der Schwerelosigkeit wird durch gewisse Fehler in älteren Science-Fiction-Romanen hervorgerufen. In dem bekannten Roman „Die Reise zum Mond“ (Verne 1865) wird von den Reisenden fälschlicherweise behauptet, sie spürten während des ganzen Fluges dasselbe Gewicht wie auf der Erde – außer beim Durchqueren eines kleinen Bereiches, in dem sich die Gravitationsfelder von Erde und Mond gegenseitig kompensieren (Das Feld der Sonne wurde vergessen!).

Die physiologischen Effekte, die auf das Gewicht zurückgeführt werden, verdienen etwas Beachtung. Die auf der Erde lebenden Organismen sind einem auf ihr ganzes Volumen wirkenden Gravitationsfeld ausgesetzt. Sie werden von Kräften gestützt, die an ihrer Oberfläche angreifen und entweder über eine große Fläche verteilt sind, wie das bei Wasserpflanzen oder -tieren der Fall ist, oder lokalisiert sind wie bei Bäumen und Pferden. Wenn entgegengesetzt gerichtete Kräfte an verschiedenen Teilen eines Körpers angreifen, sagt man, er stehe unter Spannung. Alle Lebewesen sind solchen Spannungen ausgesetzt, und Struktur und Stoffwechsel werden dadurch beeinflußt. Dieser Spannungszustand ist bei großen Landlebewesen wie dem Menschen beachtlich; so führt das Entfernen der Abstützung zu massiven physiologischen Störungen. Sogar ein kleines Samenkorn wird durch die nicht zusammenfallenden Angriffspunkte der durch Gravitation und Boden ausgeübten Kräfte unter Spannung gesetzt, und das veranlaßt die Wurzel, in den Boden zu treiben, wenn der Samen keimt.

Ähnliche Spannungszustände können erzeugt werden, indem man Organismen durch Kräfte beschleunigt, die an ihren Oberflächen angreifen. Wenn z.B. ein Saatkorn im Boden in Rotation gehalten wird, wachsen die Wurzeln entgegen der Richtung der Stützkraft, die nun nicht mehr vertikal ist. Manche Menschen haben in einem stark beschleunigendem Flugzeug ernste Probleme mit der starken Spannung, der sie ausgesetzt sind. Diese beruht jedoch nicht auf der Beschleunigung, sondern darauf, daß diese Menschen an verschiede-

[1] im Deutschen meist als „schwerelos“ (Anm. d. Übersetzer)

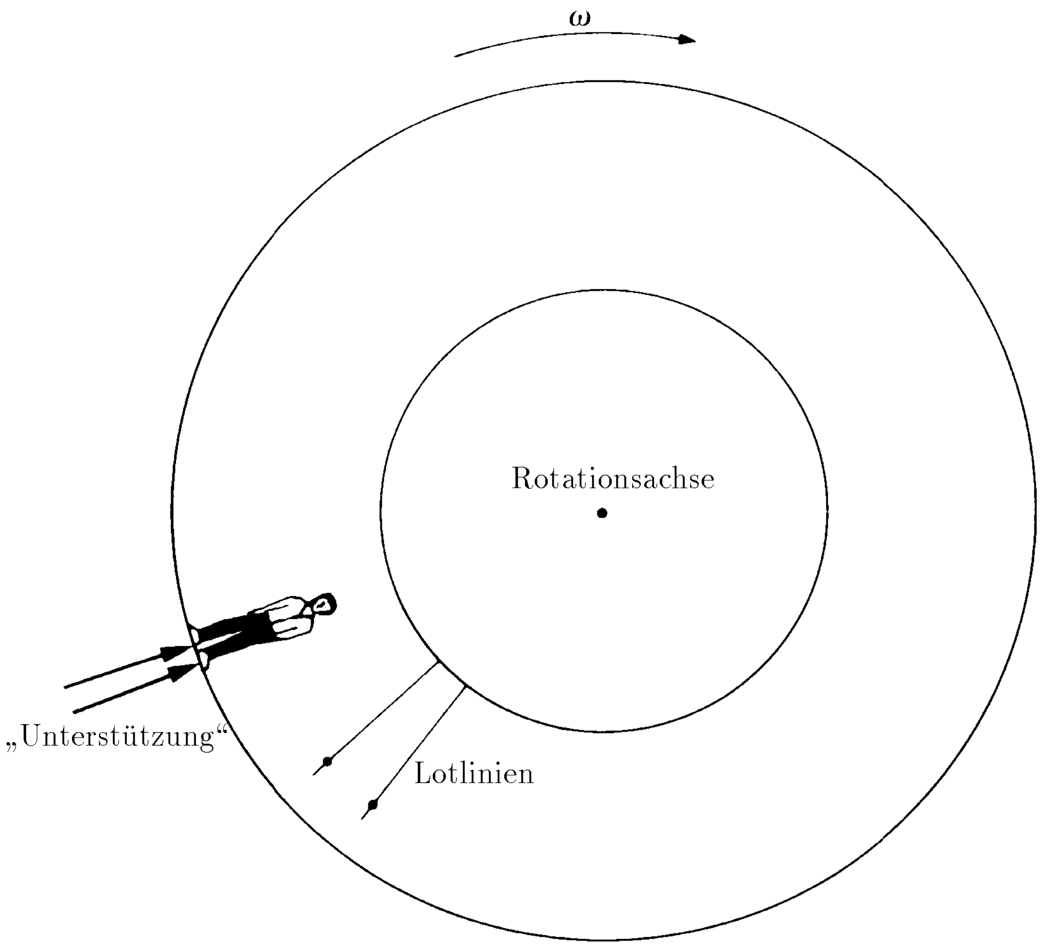


Abbildung 5: „Künstliche Schwerkraft“ in einer rotierenden Raumstation

nen Punkten angreifenden Kräften ausgesetzt sind. Wenn sie in der Nähe des Planeten Jupiter frei fallen würden, würden sie zwar eine sehr große Beschleunigung erfahren, aber gewichtslos sein[2].

In Raumstationen kann durch Beschleunigung eine „künstliche Gravitation“ erzeugt werden, um die auf der Erde auf uns wirkenden Kräfte wenigstens näherungsweise zu simulieren. Allerdings sollte man die Äquivalenz zwischen Beschleunigung und Gravitation nicht zu wörtlich nehmen: Eine Raumstation rotiere um ihre Achse (s. Abb. 5). Die Außenwand (der „Boden“) übt dann eine nach innen gerichtete Kraft auf die Füße eines Astronauten aus. Dadurch werden Spannungen in seinem Körper hervorgerufen, die eine ähnliche Wirkung haben, wie die, an die er sich auf der Erde angepaßt hat.

Er könnte annehmen, sich in einem radial nach außen gerichteten Gravitationsfeld zu befinden. Allerdings könnte er mit einfachen mechanischen Versuchen seine Situation leicht

[2]besser: nicht unter Spannung stehen! (Anm. d. Ü.)

von der auf der Erde unterscheiden. Er könnte z.B. Gegenstände fallen lassen oder Lote an verschiedenen Stellen aufhängen. Dabei würde er feststellen, daß sein „Kraftfeld“ stärker wird, wenn sich seine „Kraftlinien“ voneinander entfernen.

4.2 Verformungen

Bei der Untersuchung elastischer Verformungen haben wir es normalerweise mit Körpern im Gleichgewicht zu tun, auf die Parre von entgegengesetzt gerichteten Kräften wirken, die an verschiedenen Stellen des Körpers angreifen.

Die Dehnung eines Drahtes oder Stabes wird durch zwei betragsmäßig gleiche Zugkräfte an den beiden Enden verursacht. Eine mechanische Spannung wird zwar in Krafteinheiten gemessen. Sie ist jedoch etwas ganz anderes als eine resultierende angreifende Kraft! Die häufig zu hörende Behauptung, der Draht werde durch eine Kraft gedehnt, ist daher irreführend. Diagramme zeigen häufig zwar die Belastung am einen Ende eines eingespannten Probekörpers, die von der Befestigung ausgeübte Kraft jedoch nicht. Die Kraft, die der Faden auf einen Pendelkörper ausübt, wird oft als „Fadenspannung“ bezeichnet.

Man könnte annehmen, solche Ungenauigkeiten in der Formulierung seien harmlos, da sie kaum Spielraum für Mißverständnisse zu bieten scheinen. Daß solche Mißverständnisse trotzdem auftreten, wird erst deutlich, wenn man diese Vorstellungen auf das Phänomen der Oberflächenspannung (siehe das folgende Kapitel) oder auf einfache Scherungen ausweitet.

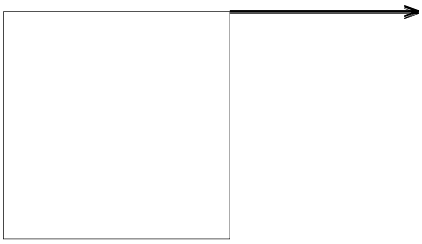
Die Diagramme a und b der Abb. 6 zeigen in Lehrbüchern häufig zu findende Fehldarstellungen der Kräfte, die eine Scherung verursachen. Die Kräfte in beiden Diagrammen würden eine Rotationsbeschleunigung des Körpers hervorrufen, und in (a) würde zusätzlich eine Translationsbeschleunigung entstehen. Um den Effekt zu erzeugen, der als Scherung bezeichnet wird, benötigt man die in Abb. 6 c gezeigte Kombination entgegengesetzter Kräftepaare.

Das in Abb. 6 d gezeigte System von Druckkräften wird manchmal als äquivalent mit dem in Abb. 6 b bezeichnet, obwohl diese Kräfte doch offensichtlich eine völlig andere Wirkung haben würden.

Obwohl die Kräfte in Abb. 6 c und 6 d verschiedene Verformungen des Körpers zur Folge haben, sind ihre Wirkungen auf molekularer Ebene doch äquivalent.

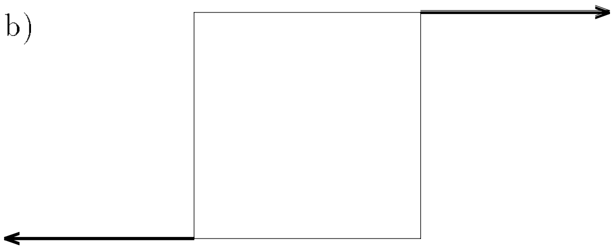
Nach dem dritten Newtonschen Gesetz gibt es immer, wenn Kräfte oder Kräftepaare auf einen Körper wirken, entsprechende Kräfte oder Kräftepaare, die auf andere Körper wirken. Manche Autoren nehmen anscheinend an, ein Gleichgewicht sei die Folge dieses „Gegeneinanders“ der Kräfte nach dem dritten Newtonschen Gesetz. Sie verstehen offensichtlich nicht, daß zwei auf verschiedene Körper wirkende Kräfte nicht in dieser Weise miteinander kombiniert werden können. Manchmal wird fälschlicherweise behauptet, den von außen einwirkenden Kräfte wirkten interne Kräfte entgegen, eine Behauptung, die die eben beschriebene Interpretation nahegelegt. Fehldarstellungen wie die in 6 a und 6 b gezeigten können zumindest zum Teil auf diese Weise erklärt werden.

Weitere Beispiele solcher Absurditäten zeigen Abbildungen 7 und 8. Abb. 7 zeigt eine verbreitete Darstellung eines einzelnen Kräftepaares, das an einem Ausschnitt eines geboa)



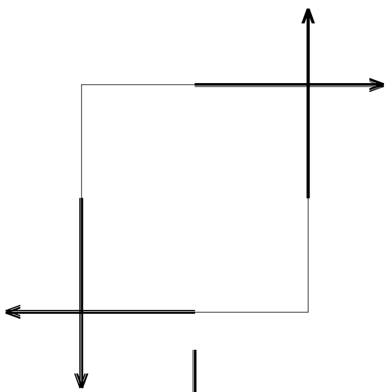
Eine einzelne Kraft würde eine Translations- und eine Rotationsbeschleunigung hervorrufen.

b)



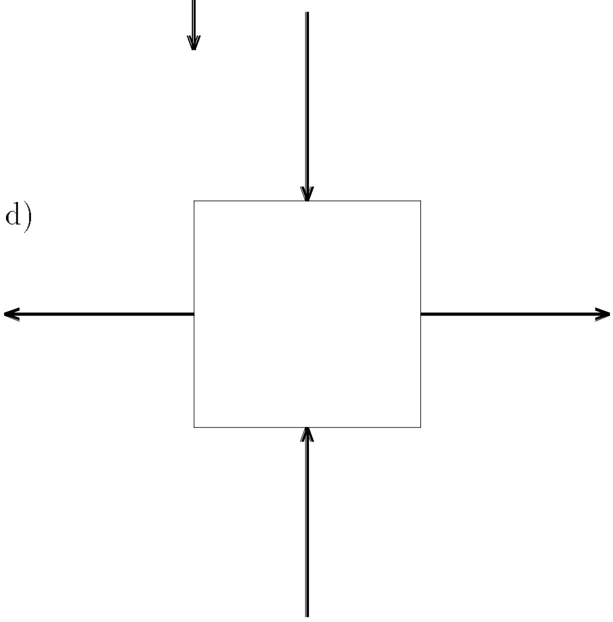
Ein einzelnes Kräftepaar würde eine Rotationsbeschleunigung hervorrufen.

c)



Entgegengesetzt gleiche Kräftepaare würden allein eine Scherung hervorrufen. Die Kräfte greifen an den gesamten Oberflächen an.

d)



Ein weiteres System von Kräften, das eine Scherung bewirken würde. Die Kräfte greifen wieder an den gesamten Oberflächen an.

Abbildung 6: a) und b) zeigen weit verbreitete falsche Darstellungen der Kräfte, die eine Scherung hervorrufen sollen. c) und d) sind beide richtig, erzeugen aber verschiedene Verformungen.

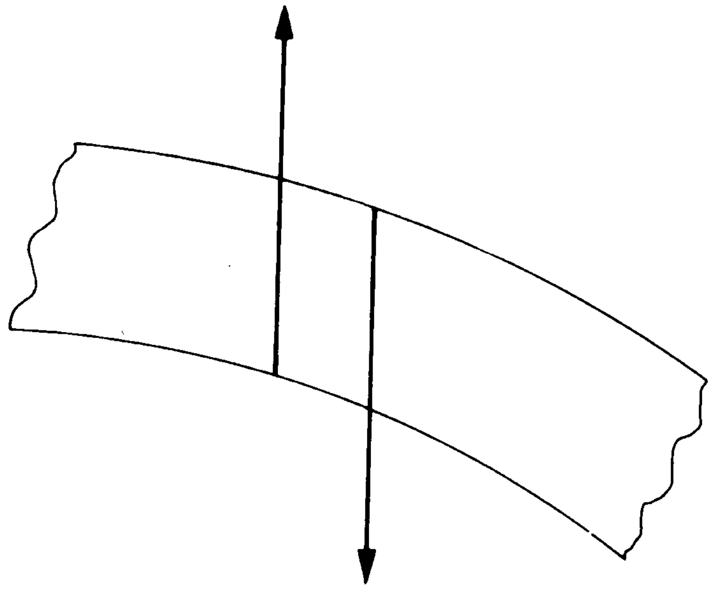


Abbildung 7: Häufig zu findende Fehldarstellung der an einem gebogenen Balken angreifenden Kräfte. Das Paar würde eine Winkelbeschleunigung hervorrufen.

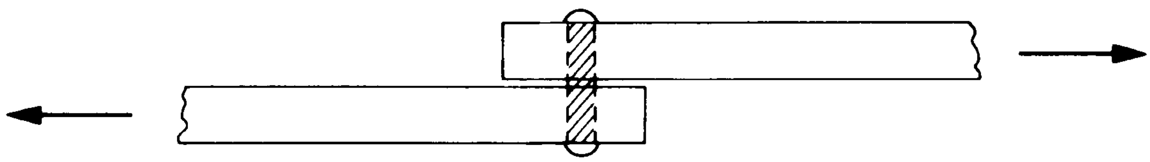


Abbildung 8: Falsche Zeichnung zur Erläuterung der Scherung einer Niete. Auch dieses Kräftepaar hätte eine Winkelbeschleunigung zur Folge.

genen Balkens angreift. Es fehlt das von außen angreifende Kräftepaar, das erforderlich ist, damit keine Winkelbeschleunigung auftritt.

In Abb. 8 soll die Scherung einer Niete gezeigt werden, die zwei Metallriegel miteinander verbindet, an denen Zugkräfte wirken. Da die eingezeichneten Kräfte nicht entlang derselben Linie wirken, kann sich das gezeigte System nicht im Gleichgewicht befinden. In Wirklichkeit würden die sich Riegel verbiegen.

4.3 Die Oberflächenspannung

Es entspricht langjähriger Lehrtradition, die Ursache der Oberflächenspannung auf zwischenmolekulare Kräfte zurückzuführen. Seltsam ist daher, daß nicht auch die Inkompressibilität von Festkörpern und Flüssigkeiten mit molekularen Modellen erklärt wird (s. Anhang 2, s. S. 56).

Die von Büchern angebotenen „Erklärungen“ der Oberflächenspannung enthalten so viele haarsträubende Fehler bezüglich der elementaren Mechanik, daß sie zwangsläufig einen wesentlichen Anteil an der Verwirrung haben müssen, die Studenten in dieser Hinsicht empfinden. Sie offenbaren sehr deutlich, daß auch Studenten höherer Semester nicht frei von dieser Verwirrung sind!

Traditionellerweise wird folgendermaßen argumentiert: Von Molekülen wird gesagt, sie zögen sich gegenseitig an und die Anziehung werde mit zunehmender Entfernung schnell schwächer. Die Folgen dieser Kräfte werden in Diagrammen wie in Abb. 9 dargestellt. Ein Molekül im Inneren einer Flüssigkeit werde von allen Seiten gleich stark angezogen und bleibe deshalb im Gleichgewicht. Ein Molekül an der Oberfläche werde jedoch auf einer Seite weniger stark angezogen als auf der anderen. Auf Moleküle an der Oberfläche wirke also eine nach innen gerichtete resultierende Kraft. Diese seien deshalb bestrebt, nach innen zu wandern; die Oberfläche stehe deshalb unter Spannung.

Es ist unfaßbar, daß eine Analyse wie diese jemals veröffentlicht werden konnte! Denn es ist offensichtlich (oder sollte es zumindest sein), daß sie unsinnig ist. Aber sie wurde nicht nur veröffentlicht, sie galt sogar lange Zeit als ernstzunehmende wissenschaftliche Erklärung. Die Argumentation muß daher genau untersucht werden.

Erstens muß man feststellen, daß normalerweise davon ausgegangen wird, daß zwischen den Molekülen nur Anziehungskräfte wirken. Daraus ergibt sich die geheimnisvolle Frage, warum die Materie nicht in sich zusammenstürzt. Tatsächlich ist Materie schwerer zu komprimieren als auszudehnen. Und wie kommt es, daß Moleküle Materie nicht widerstandslos durchdringen können, daß man Gase in Behältern aufbewahren kann und Gase Druck ausüben? Die selten gestellte Frage, was Teilchen auseinander hält, ist ebenso bedeutsam wie die Frage, was sie zusammenhält.

Zweitens wird angenommen, ein Molekül *bleibe im Gleichgewicht*, wenn es von allen Seiten gleichstark angezogen wird. Aber die Argumentation geht von anziehenden Kräften aus, deren Betrag mit zunehmender Entfernung abnimmt. Dann würde aber ein Molekül bei der kleinsten Verschiebung eine Kraft *weg vom Gleichgewichtspunkt* erfahren, und das System wäre völlig instabil.

Drittens wird angenommen, Moleküle im Innern einer Flüssigkeit würden von allen Seiten gleich stark *angezogen*. Dies beschreibt einen Körper unter Zug. Aber in fast allen Fällen, in denen wir es mit Oberflächenspannung zu tun haben, steht der Großteil der Flüssigkeit unter Druck, normalerweise aufgrund des atmosphärischen Drucks.

Als nächstes wird behauptet, die Moleküle an der Oberfläche unterlägen einer nach innen gerichteten Kraft, die „versuchte, sie zu bewegen“. Dies steht jedoch im Widerspruch zum Newtonschen Kraftbegriff. Gäbe es nämlich eine resultierende nach innen gerichtete Kraft auf die Oberflächenmoleküle, so würde die Oberfläche nach innen beschleunigt, und Materie, wie wir sie kennen, könnte nicht existieren.

Zum Schluß müssen wir noch die falsche Annahme hervorheben, eine resultierende Kraft sei dasselbe wie eine Spannung.

Diese absurde „Erklärung“ wird ungeachtet aller Kritik (z. B. Warren 1965) und sogar trotz der Zweifel ihrer eigenen Befürworter immer noch gelehrt. In der „Tribology“ (Schools Council 1974), die eine herkömmliche Darstellung enthält, wird folgende Bemerkung ge-

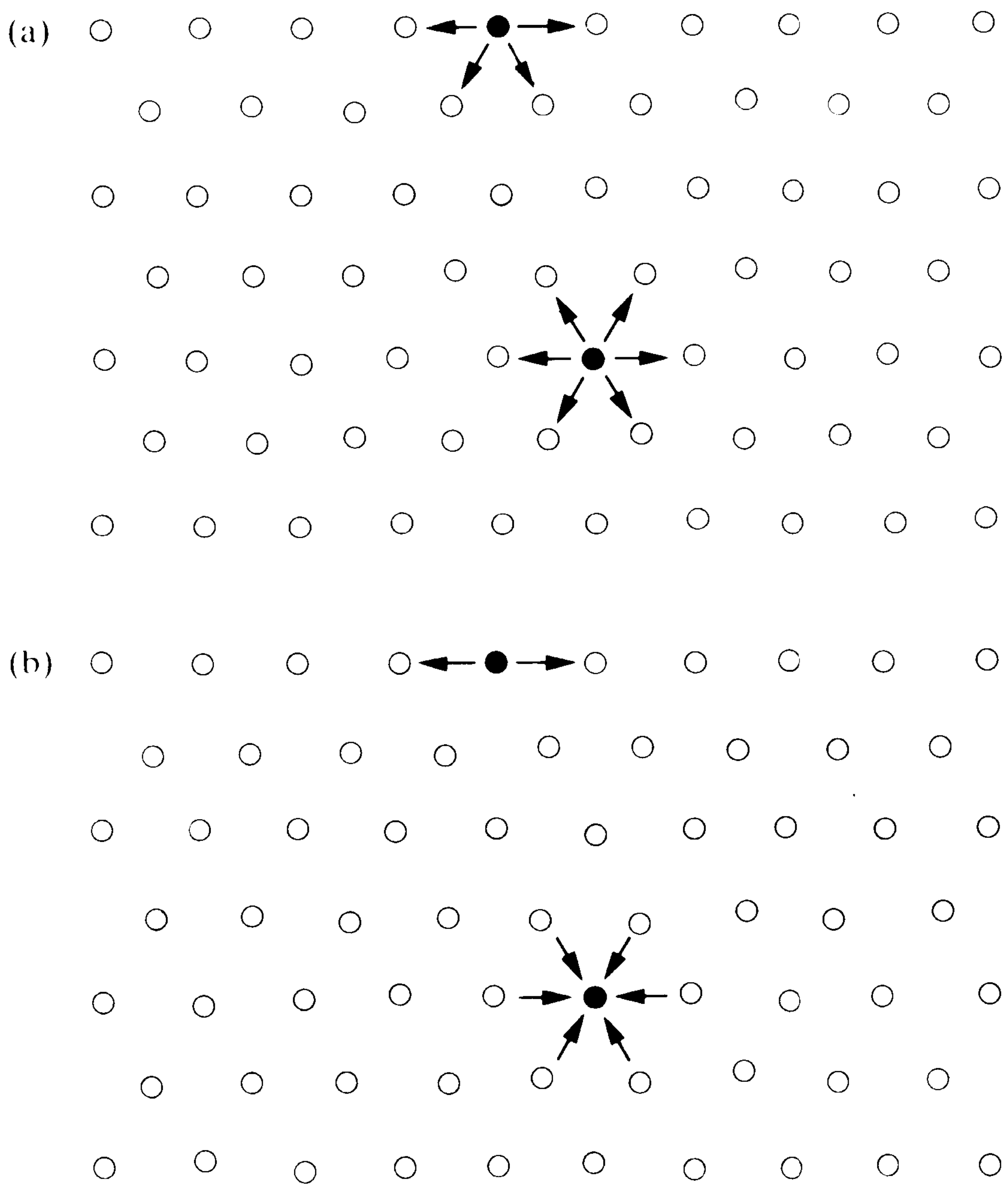


Abbildung 9: Zwischenmolekulare Kräfte in einer Flüssigkeit werden häufig wie in a) dargestellt. Diese Darstellung ist falsch, da sie zur Folge hätte, daß die Oberfläche nach innen beschleunigt wird und das Innere unter Zug steht. b) zeigt die richtige Darstellung: Die Oberfläche steht unter Zug, das Innere unter Druck.

macht: „Es mag seltsam klingen, daß eine Kraft, die als Resultierende vieler Einzelkräfte in die Flüssigkeit hinein gerichtet ist, die Ursache für eine Oberflächenspannung sein soll, entlang der Oberfläche und senkrecht zu der durch Moleküle hervorgerufenen resultierenden Kraft.“ Dies ist ein weit verbreitetes Problem für Studenten und Lehrer. Sie haben Schwierigkeiten zu erklären, wieso Kräfte in einer gewissen Richtung rechtwinklig zu sich selbst Spannungen verursachen sollen. Offensichtlich gehen sie also von der grotesken Annahme aus, es gäbe eine resultierende Kraft.

In einigen Lehrbüchern findet man die herkömmliche Darstellung mit der Verfeinerung, es gäbe neben den Anziehungskräften, die die Oberflächenspannung hervorriefen, auch (meist als „Reaktion“ bezeichnete) Abstoßungskräfte, die für Stabilität sorgten. Die Logik dieser Argumentation ist jedoch merkwürdig. Wenn von der Existenz intermolekularer Anziehungs- und Abstoßungskräfte ausgegangen wird, sollte man eigentlich erwarten, daß die Erklärung auf der Resultierenden aller Kräfte beruht. Wenn man jedoch zuläßt, die Anziehungskräfte abzutrennen und aus ihnen zu folgern, daß die Oberfläche unter Zug steht, so muß man analog die abstoßenden Kräfte betrachten und mit ihnen beweisen, daß die Oberfläche unter Druck steht.

Eine weitere Erklärung ist noch erwähnenswert. In ihr wird die Theorie vertreten, die Oberflächenmoleküle würden angezogen, wenn sie aus ihrer Gleichgewichtslage weiter nach außen schwängen, und abgestoßen, wenn sie sich weiter nach innen bewegten. (Bei dieser elementar klingenden Beschreibung wird etwas geschwindelt, indem nämlich ein Molekül mit einem ideal elastisch springenden Ball verglichen wird, bei dem der Unterschied zwischen anziehenden und abstoßenden Kräften größer ist. Tatsächlich beeinträchtigt das jedoch die Argumentation nicht.) Dann wird angenommen, die Moleküle seien trotzdem einer resultierenden Anziehungskraft ausgesetzt, da die Anziehungskräfte längere Zeit wirkten. Dabei wird jedoch der Umstand übersehen, daß die kurzreichweitigen Abstoßungskräfte zwar eine kürzere Zeit wirken, daß sie aber um soviel größer als die Anziehungskräfte sind, daß die über eine Schwingungsperiode gemittelte Kraft gerade verschwindet.

4.4 Jets und Rückstoß

Flüssigkeits- und Gasjets werden oft durch das Ausstoßen von Flüssigkeiten oder Gasen aus einer entsprechend konstruierten Düse erzeugt, oftmals mit einer sehr hohen Geschwindigkeit. Um einen Flüssigkeitsstrahl mit hoher Geschwindigkeit zu erzeugen, muß eine Kraft auf die Flüssigkeit ausgeübt werden. Nach dem dritten Newtonschen Gesetz muß also eine dem Betrage nach gleich große Gegenkraft auf den treibenden Mechanismus wirken.

Als einfaches Beispiel betrachten wir den Raketenballon in Abb. 10. Da sich die Geschwindigkeit der Luft beim Austreten durch die nach hinten spitz zulaufende Düse erhöht, muß innerhalb der Düse ein Druckgefälle herrschen, so daß der Druck bei hoher Geschwindigkeit gering ist, wie es das bekannte Prinzip von Bernoulli fordert. Daher muß der Betrag der durch die von der komprimierten Luft auf das Ende mit der Düse ausgeübte Kraft geringer sein als der der auf das andere Ende wirkenden Kraft. Der Ballon wird von einer Kraft vorangetrieben, die der auf die ausgestoßene Luft wirkenden Kraft entgegengerichtet

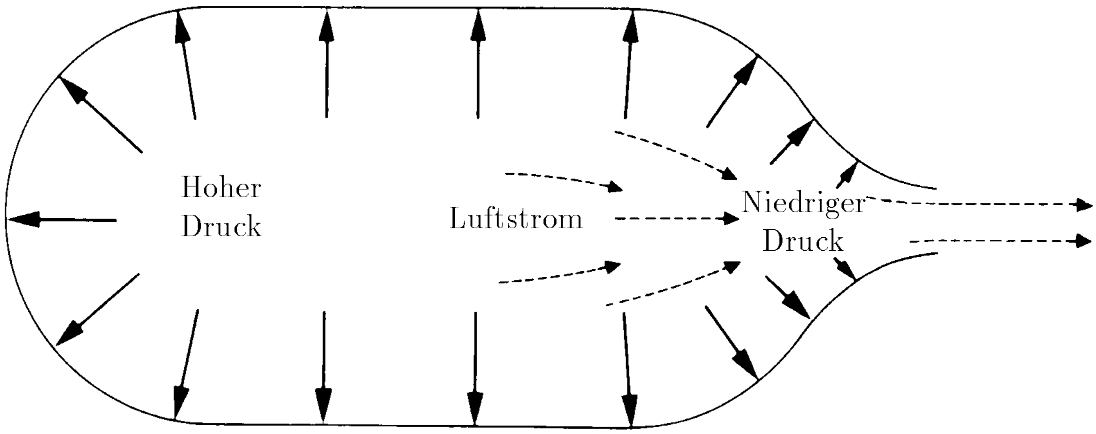


Abbildung 10: Ballon mit „Düsenantrieb". Komprimierte Luft übt eine größere Kraft auf das linke Ende als auf das rechte Ende aus. Die effektive Antriebskraft wirkt also auf das Ende ohne Düse. (Die Pfeile bezeichnen Kräfte, die die Luft auf die Ballonwand ausübt.)

und dieser betragsmäßig gleich ist.

Häufig wird angenommen und manchmal auch ausdrücklich gelehrt, daß in diesem Fall die treibende Kraft auf die Düse wirkt und diese den Ballon schiebt. Dabei sollte klar sein, daß es dafür keinen Mechnismus gibt. Im Gegenteil: Es muß eine Kraft geben, die in Richtung des Strahls auf die Düse wirkt, verursacht teilweise durch Reibung und teilweise durch die Resultierende der axialen Komponenten der Kräfte, die durch den Luftdruck auf die Düse ausgeübt werden. Nicht die Düse *schiebt* den Ballon: Die Düse wird vom Ballon *gezogen.*

Eine Standardaufgabe besteht darin, die Rückstoßkraft an der Düse eines Schlauches zu berechnen, die einen Wasserstrahl mit gegebener Schnelligkeit und gegebenem Querschnitt ausstößt. Die Erfahrung zeigt jedoch, daß eine Düse, die sich von einem Schlauch oder einem Wasserhahn löst, weggestoßen wird – nicht zurückgezogen, wie es diese „Theorie" suggerieren würde. Die korrekte Interpretation solcher Phänomene wird erschwert durch die andere alltägliche Erfahrung, daß eine Düse vom Schlauch zurückgezogen wird. Die Ursache dafür sind Kräfte, die das Wasser in den Krümmungen auf den Schlauch ausübt. Diese Kräfte hängen mit der Richtungsänderung zusammen.

Rücktreibende Kräfte auf eine Düse werden manchmal in Beschreibungen von Maschinen, wie z.B. der Dampfmaschine des Heron von Alexandria (Abb. 11), angenommen. Tatsächlich müssen die Kräfte jedoch an den Biegungen der Rohre angreifen.

Die rückstoßende Kraft, die an einem Fahrzeug angreift (z.B. einer Rakete oder einem Düsenflugzeug), das eine Flüssigkeit ausstößt, wird oft als Reaktion bezeichnet, und man spricht dann von einem „Rückstoßantrieb". Bemerkenswert ist, daß dieselben Menschen, die bei solchen Kräften von Rückstoß sprechen, das dritte Newtonsche Gesetz in der Form „Zu jeder Aktion gibt es eine gleich große und entgegengesetzt gerichtete Reaktion.“ ausdrücken. Nach dieser Ausdrucksweise ist nämlich *jede* Kraft notwendigerweise eine Reaktion. Deshalb muß es für sie unlogisch und verwirrend sein, wenn ein Spezialfall mit diesem Ausdruck von allen anderen Fällen unterschieden wird. Um ein Fahrzeug gegen dissipative Reibungskräfte oder die Gravitation anzutreiben oder um seine Geschwindigkeit zu erhöhen, muß eine Kraft von einem anderen Körper auf ihn ausgeübt werden. Also muß nach dem dritten Gesetz auch eine Kraft vom Fahrzeug auf diesen anderen Körper ausgeübt werden. Diese Aussage gilt für Autos ebenso wie für Düsen- und Propellerflugzeuge, Ruderboote, schrauben- und paddelgetriebene Schiffe, Segelboote und Pferdekutschen.

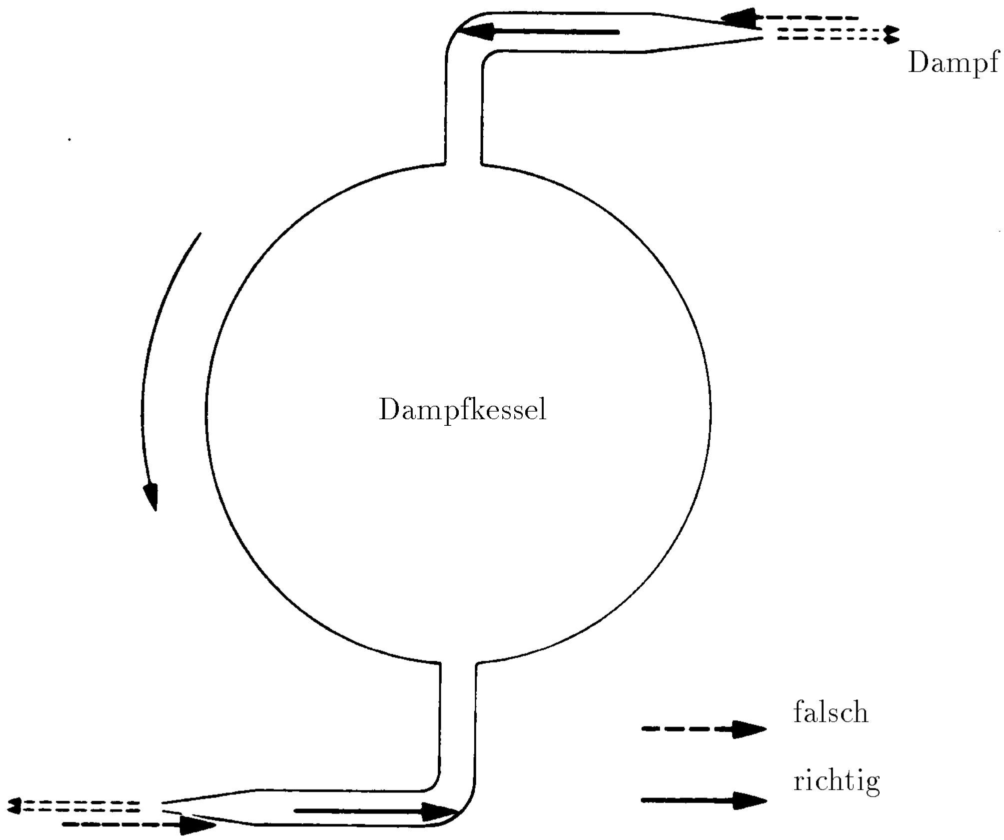


Abbildung 11: Dampfmaschine von Heron. Die nach hinten gerichteten Kräfte werden oft so dargestellt, als griffen sie an den Düsen an. Sie sollten so gezeichnet werden, daß verdeutlicht wird, daß sie auf die Biegungen ausgeübt werden.

4.5 Elastizität

Manchmal ist es bequem oder sogar erforderlich, Materialien als ideal elastisch zu betrachten oder sogar anzunehmen, die Elastizitätsmodule seien unendlich. Das wäre harmlos, wenn nicht der Eindruck erweckt würde, die Körper verhielten sich tatsächlich so. Dadurch können nämlich ernsthafte Mißverständnissen entstehen.

Durch veränderlichen Druck hervorgerufene Volumenänderungen sind bei Gasen in der Regel so groß, daß sie bei Strömungsproblemen berücksichtigt werden müssen. Bei Flüssigkeiten dagegen sind sie für gewöhnlich infinitesimal. Daher bezeichnet man Flüsigkeiten normalerweise als inkompressibel. Studenten nehmen dies manchmal wörtlich und stellen sich vor, der Kompressionsmodul sei unendlich.

Ähnliche Schwierigkeiten entstehen bei Wechselwirkungen zwischen Festkörpern, wenn die Vorstellung vermittelt wird, daß unendlich große Kräfte über unendlich kleine Entfernungen wirken und daß der ganze Körper ohne Zeitverzögerung reagiert. Tatsächlich reagiert nicht die ganze Masse des Körpers sofort auf eine auf die Oberfläche einwirkende Kraft. Stattdessen läuft eine Störung mit Schallgeschwindigkeit durch den Körper. Wenn z. B. aus einem Gewehr geschossen wird, das fest an einen Felsen gedrückt wird, darf nicht die Masse der Erde als zurückgestoßene Masse betrachtet werden. Die effektive Masse ist die der Materie, die von den Stoßwellen bei ihrer Fortpflanzung durch Gewehr und Felsen erreicht werden kann, während die Explosion noch andauert (Größenordnung: einige Millisekunden).

Eine wichtige Abweichung von der Elastizität ist die Hysterese, der Umstand also, daß Größe und Gestalt eines Körpers beim Entspannen oft von den Werten beim Spannungsvorgang abweichen. Studenten wird gewöhnlich beigebracht, diese Tatsache nicht zu beachten, und es wird von ihnen erwartet, daß sie von differierenden Meßwerten während des Spannens und Entspannens den Durchschnitt bilden. Dieses Phänomen hat jedoch bei rollenden Körpern wie Rädern eine große Bedeutung. Rad und Untergrund werden nämlich beim Rollen des Rades verformt, und unvollständige Elastizität, insbesondere Hysterese, führt zu Energiedissipation. Dies verursacht Rollreibung, die sich von der Haftreibung unterscheidet und im allgemeinen viel kleiner ist. Obwohl sie ein sehr allgemeines Phänomen ist, wird die Rollreibung sehr selten erwähnt, höchstens in Seminaren für Fortgeschrittene. Viel Verwirrung entsteht dann beim Versuch, den Reibungswiderstand von Fahrzeugen oder rollenden Körpern mit der Gleitreibung zu erklären.

4.6 Druck in Gasen und Flüssigkeiten

Seit Torricelli und Pascal ist bekannt, daß Flüssigkeiten und Gase Kräfte auf Flächen ausüben, mit denen sie Kontakt haben. Im statischen Fall stehen diese Kräfte senkrecht auf der Oberfläche, gleichgültig, ob es sich um die Fläche zwischen einem Fluid[3] und einem Festkörper, die Grenzfläche zwischen zwei Fluiden oder um die Kräfte handelt, die ein Teil eines Fluids auf andere ausübt. Solche Kräfte sind fast immer abstoßend, obwohl eine Flüssigkeit unter gewissen Umständen unter Zug gesetzt werden kann. Wenn die Wechselwirkung als gleichförmig über die Oberfläche verteilt angesehen werden kann, wird der Quotient aus Normalkraft und Fläche als *Druck* bezeichnet. (Einige Ingenieure benutzen den Begriff *Druckintensität* (pressure intensity).)

[3] Flüssigkeiten und Gase werden im Englischen oft mit dem Oberbegriff „Fluid“ bezeichnet. (Anm. d. Ü.)

Manche Lernenden haben große Schwierigkeiten zu verstehen, daß z. B. Dichte (Masse/Volumen) keine Masse ist und daß Schnelligkeit (Weg/Zeit) keine Entfernung repräsentiert. Deshalb wird auch der Druck (Kraft/Fläche) anscheinend ganz allgemein als eine Kraft betrachtet. Es scheint, daß eine von einem Druck verursachte Kraft mit dem Druck selbst verwechselt wird. Daher begegnen uns auch solche Formulierungen wie: „Der Druck ist eine Kraft, die in alle Richtungen wirkt.“, „Der Druck steht senkrecht auf der Oberfläche.“ und „Der Druck ist einin alle Richtungen zeigender Vektor (omnidirectional vector).“. Diagramme zeigen Pfeile, die senkrecht auf Flächen stehen und mit „Atmosphärendruck“ beschriftet sind. Es sollte dagegen klar gemacht werden, daß der Druck keine Kraft ist, sondern ein Zustand eines Fluids, durch den Kräfte hervorgerufen werden, die senkrecht an der Oberfläche angreifen. Die Kraft, die auf einen Teil einer Fläche wirkt, ist ein Vektor, aber der zu ihr gehörende Druck hat keine Richtung. Der Druck ist nämlich eine der Größen, die man Pseudoskalare nennt (s. Anhang 1, S. 53).

Ein etwas anderes Mißverständnis wird ausgedrückt durch Formulierungen wie „Der Druck drückt das Gas durch die Leitung.“. In Wirklichkeit jedoch ist der *Druckgradient* (nicht die „Druckdifferenz“) die Antriebskraft pro Volumen.

Der Druckbegriff kann nur dann unverändert auf Festkörper erweitert werden, wenn es sich um gleichmäßige Kompression handelt. Die Starrheit von Festkörpern verursacht im allgemeinen ein sehr komplexes Wechselspiel zwischen Spannung und Dehnung. Deshalb sollte der Druckbegriff nur dann für kompressive Spannung in Festkörpern benutzt werden, wenn die Spannung hydrostatisch erzeugt wird. Wir sollten auch sehr vorsichtig sein mit der Verwendung des Druckbegriffs bei der Behandlung von Wechselwirkungen zwischen Festkörpern, z. B. von Spannungen, die auftreten, wenn Schuhe auf den Boden drücken oder ein Nagel in die Wand geschlagen wird.

Kapitel 5

Tests

Es müssen Möglichkeiten gefunden werden festzustellen, ob ein Student einen physikalischen Begriff wie den der Kraft versteht. In einer Prüfung könnte er aufgefordert werden, einen Auszug aus einem Buch wiederzugeben – z. B. die Newtonschen Gesetze zu formulieren. Eine falsche oder unvollständige Antwort würde zeigen, daß er die Gesetze nicht verstanden hat. Eine wörtliche Wiedergabe könnte jedoch das Ergebnis sturen Auswendiglernens sein. Das soll nicht heißen, daß man keine Fragen über Texte aus Büchern stellen und nicht auch verlangen sollte, daß wichtige Ideen auswendig gelernt werden. Es heißt aber, daß noch etwas mehr erforderlich ist.

Es könnte auch nach einem Beispiel für die Anwendung eines Gesetzes gefragt werden. Da der Student anschauliche Beispiele wahrscheinlich genauso gelernt hat wie die Aussagen der Gesetze selbst, ist nicht sicher, daß er die Beispiele verstanden hat, nur weil er sie wiedergeben kann. Ein bekanntes Beispiel für die Anwendung des dritten Newtonschen Gesetzes ist der Raketenantrieb. Etliche Lehrbuchautoren beschreiben auch weitgehend korrekt, daß die Rakete eine Kraft auf die Abgase ausübt und die Abgase eine gleich große und entgegengesetzt gerichtete Kraft auf die Rakete ausüben. Trotzdem wenden einige dieser Autoren das Gesetz dann bei anderen Problemen falsch an. Offensichtlich haben sie das Raketenbeispiel irgendwo abgeschrieben, ohne es verstanden zu haben.

Eine bessere Möglichkeit, das Verständnis von Prinzipien zu untersuchen, scheint darin zu bestehen, Studenten aufzufordern, sie auf Probleme anzuwenden, für die sie wahrscheinlich keine vorgegebene Antwort gelernt haben. In der elementaren Mechanik ist das nicht schwierig, da ihre Prinzipien sehr vielfältige Anwendungen haben. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse solcher Befragungen beschrieben. Die meisten der befragten Studenten waren Studienanfänger in Ingenieursstudiengängen, Mathematik oder Naturwissenschaften.

5.1 Die Anwendung der Newtonschen Gesetze

Vor einigen Jahren stellte der Autor in einer Physikklausur eine Aufgabe, in der die Kandidaten die Newtonschen Gesetze nennen und sie dann anwenden sollten auf die Mechanik eines kleinen Körpers, z. B. einer Münze, die (a) auf einem Tisch liegt und (b) in die Luft geworfen wurde.

Als Antwort wurden zahlreiche Abhandlungen über die Mechanik der Münze geschrieben, aber keine davon machte, explizit oder implizit, Gebrauch von den Newtonschen Gesetzen. Dieselbe Frage wurde bei mündlichen Prüfungen mit einigen hundert Studenten im ersten Jahr und Bewerbern für Fortgeschrittenenkurse in Physik gestellt. Dabei wurden die Prüflinge einzeln oder in kleinen Gruppen befragt. Die befragten Studenten versuchen ausnahmslos, die Frage mit Hilfe ungeeigneter Begriffe zu beantworten, z. B. dem der Energie. Der Vorteil mündlicher Prüfungen besteht darin, daß es zwar schwierig, aber nicht unmöglich ist, die jungen Leute davon zu überzeugen, daß das Problem mit Hilfe der Newtonschen Gesetze diskutiert werden soll. Vorausgesetzt, daß sie eine Vorstellung von den Aussagen der Newtonschen Gesetze haben, können die besseren Studenten, allerdings mit deutlichen Schwierigkeiten, durch einen Gedankengang wie die folgenden geführt werden: „Die Münze auf dem Tisch ist in Ruhe. Aus dem ersten Gesetz folgern wir daraus, daß keine resultierende Kraft auf die Münze wirkt.“ (Probleme wie die Erdrotation werden üblicherweise nicht berücksichtigt.) „Die fliegende Münze befindet sich weder in Ruhe noch in gleichförmig geradliniger Bewegung. Also muß eine resultierende Kraft an ihr angreifen.“

Die Erweiterung der Diskussion auf das zweite Gesetz ist dann gewöhnlich viel einfacher, obwohl der Flug einer Münze manchmal folgendermaßen beschrieben wird: „Wenn sie aufsteigt, dann wird sie verzögert; am Umkehrpunkt sind actio und reactio gleich groß und entgegengesetzt gerichtet, so daß die Münze stoppt. Anschließend wird sie nach unten beschleunigt.“ Normalerweise besteht jedoch Übereinstimmung darin, daß die Beschleunigung der Münze während des ganzen Fluges konstant ist, und nach einigen Diskussionen wird den Studenten dann bewußt, daß aus dem zweiten Gesetz auch folgt, daß sich die Kraft nicht ändert.

Bis auf sehr wenige Ausnahmen sind die Studenten nicht in der Lage, das dritte Gesetz auf das Problem anzuwenden. Fast alle nehmen an, die Münze sei auf dem Tisch deshalb in Ruhe, weil „sich Kraft und Gegenkraft ausgleichen“. Der Umstand, daß sich das Gesetz auf Kräfte bezieht, die an *verschiedenen* Körper angreifen, daß sie es aber auf Kräfte anwenden, die auf *denselben* Körper wirken, ist ihnen in der Regel unverständlich. Bei der Diskussion der fliegenden Münze wird das dritte Gesetz gewöhnlich auf eine der folgenden Weisen falsch angewendet: „Die Gegenkraft zu der Gravitationskraft ist die Kraft, mit der die Münze hochgeworfen wurde.“ „Die Gegenkraft ist die auf die Luft wirkende Kraft.“ „Das Gesetz ist nicht anwendbar, weil die Münze nicht im Gleichgewicht ist.“

Der wichtige Umstand, daß sich das dritte Gesetz auf *Wechselwirkungen* bezieht, ist fast allen Studenten vollkommen unbekannt. Sie verstehen nicht, daß, wenn auf einen Körper eine Gravitationskraft wirkt, nach diesem Gesetz auch *auf einen anderen Körper* eine *Gravitations*kraft wirken muß.

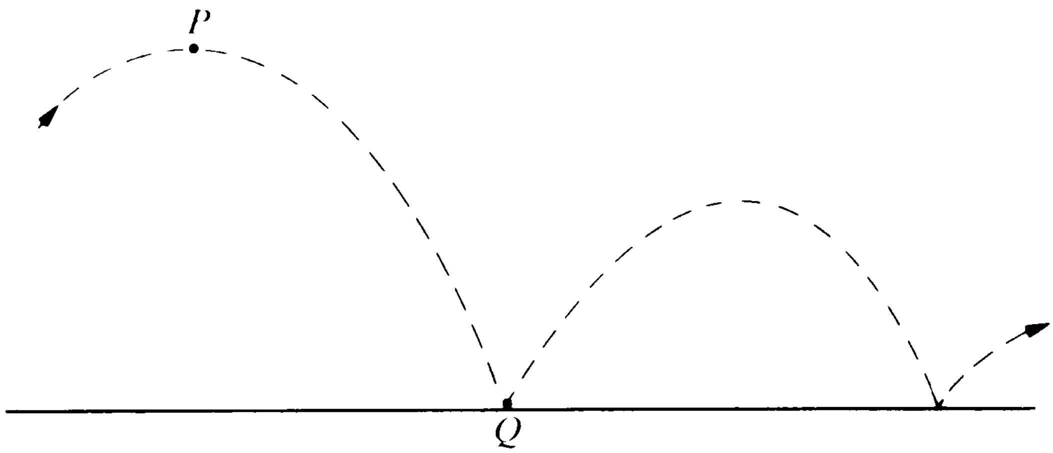


Abbildung 12: Diagramm zu einer Testaufgabe. Der Student wird aufgefordert, in den Punkten P und Q die Kräfte einzuzeichnen, die an dem Ball angreifen, und ihre relativen Beträge zu veranschaulichen.

5.2 Der springende Ball

Diese Aufgabe wurde Studienanfängern der Ingenieurs- und Naturwissenschaften und einer kleineren Zahl fortgeschrittener Physikstudenten (insbesondere angehenden Lehrern) gestellt. Das vervielfältigte Aufgabenblatt enthält die in Abb. 12 dargestellte Zeichnung, und der Student wird angewiesen, Pfeile zu zeichnen und zu beschriften, die die in den Punkten P und Q auf den Ball wirkenden Kräfte zeigen, und grob die relativen Beträge dieser Kräfte zu schätzen.

Die Antworten sind sehr unterschiedlich, haben aber einige Gemeinsamkeiten: Fast alle Probanden zeichnen die Gravitationskraft in P, etliche aber lassen sie in Q weg. In P wird oft eine Kraft in Richtung der Bewegung gezeichnet und gelegentlich eine aufwärts gerichtete Kraft, die den gleichen Betrag hat wie die Gravitationskraft. In den meisten Fällen wird in Q eine nach oben gerichtete Kraft eingezeichnet, die in der Regel „Reaktion“ genannt wird. Von dieser Kraft wird im allgemeinen gesagt, sie sei ebenso groß wie das Gewicht des Balles. Dabei sollte es offensichtlich sein, daß diese Rückstoßkraft relativ gesehen sehr groß sein muß, aber kaum ein Student erkennt dies.

In anschließenden Diskussionen bringen die Studenten ihre Überzeugung zum Ausdruck, die „Reaktion“ in Q müsse ebenso groß wie das Gewicht sein. Wenn dann darauf hingewiesen wird, daß der Ball ohne eine einwirkende Kraft mit konstanter Schnelligkeit geradeaus in den Erdboden fallen würde, sind sie sehr erstaunt und haben in der Regel keine Idee, wie dieses Problem gelöst werden könnte.

Lehramtsstudenten verschiedener Universitäten nach dem Vorexamen gehen mit dieser Aufgabe nur wenig besser um als Studienanfänger.

Die Interpretation der Antworten bei solchen Aufgaben wird dadurch erschwert, daß die Pfeile häufig so beschriftet werden, daß sie Größen darstellen oder darzustellen schei-

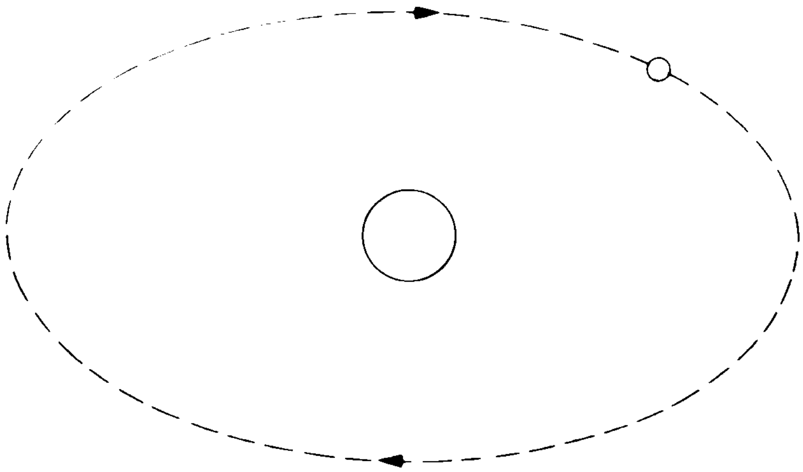


Abbildung 13: Diagramm zu einer Testaufgabe, die auf der falschen Darstellung von Kepler-Bahnen in manchen Lehrbüchern beruht. Die Studenten werden aufgefordert, die Kräfte einzuzeichnen, die auf den Planeten und seinen Satelliten wirken, und zu beschreiben, was an diesem Diagramm falsch ist.

nen, die keine Kräfte sind. Dazu gehören Vektoren wie Beschleunigung und Impuls, aber auch Skalare wie kinetische Energie und Trägheit, denen eine Richtung zuordnet wird. Die zusätzliche Aufforderung, keine anderen Größen als Kräfte einzuzeichnen, ändert nichts daran. Diskussionen in Tutorien legen den Verdacht nahe, daß für etliche Studenten alle diese Größen im wesentlichen dasselbe wie Kräfte sind.

5.3 Die Kepler-Bewegung.

Als wir mehrere Lehrbücher fanden, die bei Kepler-Bahnen den schwereren Körper im Mittelpunkt der Ellipse statt in der Nähe eines Brennpunktes darstellen, beschlossen wir herauszufinden, ob Studenten diesen Fehler bemerken. Wir vervielfältigten das bewußt falsche Diagramm in Abb. 13 und forderten Studienanfänger auf, den Fehler zu finden und Kräfte einzuzeichnen. Ungefähr ein Drittel entdeckte den Fehler, ein Drittel sagte, es sei nichts falsch, und ein Drittel behauptete, die Umlaufbahn müsse ein exakter Kreis sein.

In Diskussionen machten die Studenten des letzten Drittels deutlich, daß sie, wenn sie überhaupt von elliptischen Bahnen gehört hatten, glaubten, diese würden durch Störungen verursacht, die bei Abwesenheit anderer Körper unmöglich seien. Diese Überzeugung, die durch Argumente nur schwer zu überwinden ist, wird auch von Studenten nach dem Vorexamen geteilt. Diese interessante und völlig unerwartete Entdeckung läßt erwarten, daß ausführlichere Tests dieser Art andere weitverbreitete Mißverständnisse enthüllen werden, auf die geachtet werden muß.

Zu den von den Studenten eingezeichneten „Kräften“ gehören die übliche Kraft in Bewegungsrichtung, die Zentrifugalkraft, die Zentripetalkraft (die von der Gravitationskraft unterschieden wird), Aktions- und Reaktionskräfte, aber auch Größen, die keine Kräfte sind. Es ist bemerkenswert, daß am Satelliten oft Scheinkräfte eingezeichnet werden, am Planeten aber nur sehr selten.

Obwohl es sich nicht um eine gleichförmige Kreisbewegung handelt, werden die ein- und auswärts gerichteten Kräfte manchmal mit $m\frac{v^2}{r}$ beschriftet.

5.4 Das Auto in der Kurve

Diese Aufgabe wurde einigen hundert Studienanfängern gestellt. Die in den ersten beiden Jahren gewonnenen Ergebnisse wurden bereits detailliert veröffentlicht (Warren 1971 a). Die Aufgaben waren die folgenden:

> *Ein Auto fährt mit konstanter Schnelligkeit auf ebener Strecke. Es durchfährt eine Rechtskurve konstanter Krümmung. Es herrscht Windstille. Mache eine Skizze, die folgendes zeigt:*
>
> 1. *einen mit $\vec{R}$ bezeichneten Pfeil, der die Resultierende aller Kräfte repräsentiert, die auf das Auto in der Ebene wirken;*
> 2. *einen mit $\vec{F}$ bezeichneten Pfeil, der die Reibungskraft kennzeichnet, die der Boden auf das Auto ausübt;*
> 3. *eventuell geeignet bezeichnete Pfeile, die weitere Kräfte darstellen, die in der Ebene auf das Auto wirken.*

Aus Vergleichbarkeitsgründen wurden diese Aufgaben in den folgenden Jahren unverändert wiederverwendet, obwohl sie anscheinend leicht verändert werden sollten. Etwa ein Siebtel der Studenten zeichnet nämlich keine Skizze der geforderten Art, sondern stattdessen einen Hügel oder eine Perspektivzeichnung, die in der Regel nicht verständlich ist. Daher wäre es wahrscheinlich besser, eine vorgefertigte Skizze bereitzustellen. Das Symbol $\vec{R}$ wurde vorgeschlagen, um die Beschriftung im Diagramm so knapp wie möglich zu halten. Wahrscheinlich ist es jedoch eine Quelle der Verwirrung für die Studenten, bei denen $\vec{R}$ normalerweise für *Reaktion* steht – was immer das für sie bedeutet.

Das Problem sollte für jemandem, der den Begriff der Beschleunigung und das zweite Newtonsche Gesetz verstanden hat, keine Schwierigkeit darstellen. Die Beschleunigung ist in diesem Falle radial nach innen gerichtet. Also muß die resultierende Kraft in dieselbe Richtung zeigen. Da es keine Winkelbeschleunigung gibt, greift $\vec{R}$ am Massenmittelpunkt an. Es gibt nur zwei Körper, mit denen das Auto wechselwirken kann: die Straße und die Luft. Es existiert ein Luftwiderstand, der fast genau entgegengesetzt zur momentanen Geschwindigkeit gerichtet sein muß. Die resultierende Kraft $\vec{F}$ der von der Straße bewirkten Reibung, muß, vektoriell zum Luftwiderstand addiert, $\vec{R}$ ergeben. Also muß $\vec{F}$ in die in Abb. 14 eingezeichnete Richtung zeigen.

Als die Aufgabe 1969 zum ersten Mal gestellt wurde, gaben von 148 Studenten drei die richtige Antwort. Seitdem ist nur noch ein Student dazugekommen.

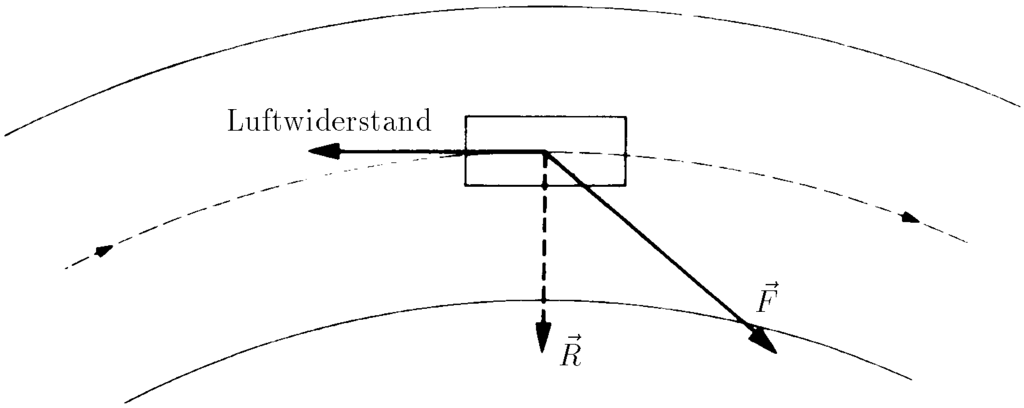


Abbildung 14: In unserem weit verbreiteten Test wird den Studenten kein Diagramm vorgegeben. Sie werden stattdessen aufgefordert, eine Zeichnung anzufertigen, die die resultierende Kraft $\vec{R}$, die Reibungskraft $\vec{F}$, die an den Reifen angreift, und eventuell weitere horizontal angreifende Kräfte einzuzeichnen, die an einem Auto angreifen, das eine gleichförmige Kreisbewegung ausführt. Nur vier von etlichen hundert getesteten Studenten gaben die hier gezeigte korrekte Antwort.

Von den Studenten, die klare Antworten geben, zeichnen 40% $\vec{R}$ nach vorne wirkend, 28% radial nach innen und 28% radial nach außen. Schon dieses Ergebnis läßt erahnen, daß gleichförmige Kreisbewegungen nur wenig verstanden worden sind. Noch bezeichnender ist vielleicht, daß in den meisten Fällen der mit $\vec{R}$ beschriftete Pfeil offensichtlich nicht die Resultierende der anderen eingezeichneten Kräfte darstellt. 1969 bezeichnete $\vec{R}$ in einem Drittel der verwertbaren Diagramme tatsächlich die resultierende Kraft. (In den meisten dieser Fälle stimmte $\vec{R}$ mit $\vec{F}$ überein, und keine weiteren Kräfte waren eingezeichnet.) In den folgenden vier Jahren sank der Anteil der Diagramme, in denen $\vec{R}$ tatsächlich die Resultierende darstellte, sehr schnell auf ein Zehntel.

Die resultierende Kraft $\vec{F}$ der Straßenreibung wird entweder nach hinten wirkend (40%), radial nach innen (40%) oder radial nach außen (20%) gezeichnet. Die Zahl der Fälle, in denen $\vec{F}$ eine nach vorn gerichtete Komponente hat, ist vernachlässigbar klein.

Den Luftwiderstand zeichnen 10% der Studenten ein. Andere eingezeichnete Kräfte sind die Zentrifugalkraft (40%), Zentripetalkraft (20%) und die Antriebskraft (25%). Die letzten beiden Gruppen schließen nicht die wenigen Studenten ein, die erkennen, daß Komponenten von $\vec{F}$ in diese Richtungen wirken. Die Klassifikation beruht auf den eingezeichneten Richtungen und nicht einfach auf den Bezeichnungen, da z. B. nach außen gerichtete Kräfte oft zentripetal genannt werden.

Man könnten erwarten, daß Studenten, die gelernt haben, Scheinkräfte zu benutzen, um an jedem Körper eine verschwindende Resultierende erhalten, das Problem anders behandeln als diejenigen, denen die Methoden Newtons beigebracht worden sind. Wir beobachten jedoch, daß die, die eine Zentrifugalkraft einführen, dies nicht in einer Weise tun, die mit den Methoden von Coriolis oder d'Alembert konsistent ist.

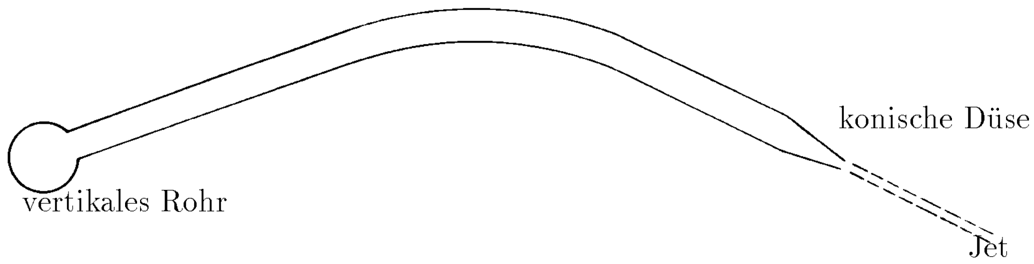


Abbildung 15: Diagramm aus einer Testaufgabe. Der Prüfling wird aufgefordert, die Kräfte einzuzeichnen, die das Wasser auf den Schlauch ausübt.

5.5 Jets

In einer weiteren Testaufgabe, die wir Studienanfängern in Physik stellten, benutzten wir ein Diagramm ähnlich wie in Abb. 11, das einen Rasensprenger darstellt. Die Studenten wurden aufgefordert, Pfeile einzuzeichnen, die die Kräfte darstellen, die das Wasser auf den Sprenger ausübt. Das Problem erwies sich als zu schwierig, und die meisten abgegebenen Diagramme waren, zumindest teilweise, unverständlich. Das einzige durchgängige Merkmal war, daß nach hinten gerichtete Kräfte eingezeichnet waren, die meist als „Reaktion" bezeichnet wurden. Sie griffen an der Düse an oder am Raum irgendwo in ihrer Nähe.

Ein einfacherer Test wurde dann mit einer Gruppe von 22 Erstsemestern in Physik durchgeführt (Warren 1975). Jeder Student erhielt die Zeichnung eines Schlauches (ähnlich Abb. 15) und sollte die vom Wasser ausgeübten Kräfte einzeichnen.

Nur zwei der Antworten zeigten eine Kraft am Schlauch, die darauf zurückzuführen ist, daß das Wasser aus der vertikalen in die horizontale Bewegungsrichtung abgelenkt wird. Eine davon und eine andere zeigten nach außen gerichtete Kräfte an der Krümmung. Sechzehn Lösungen zeigten eine nach hinten gerichtete Kraft an der Düse. In keinem Fall war eine nach vorn gerichtete Kraft an der Düse eingezeichnet.

Kapitel 6

Diskussion

6.1 Probleme

Es besteht keine Einigkeit über die Lehrziele in der elementaren Mechanik. Dem scheinbar klar definierten Ziel, den Studenten Lösungstechniken zu beizubringen, steht das scheinbar ziemlich vage Ziel gegenüber, ihnen ein Verständnis der Begriffe zu vermitteln. Man kann fragen, ob diese Unterscheidung tatsächlich von Bedeutung ist. Es ist nämlich fraglich, ob dem Verständnis eines wissenschaftlichen Begriffes eine andere Bedeutung gegeben werden kann als die der Fähigkeit, seine Anwendungen zu bewältigen: Jemand, der die wichtigen Probleme lösen kann, hat auch den zugrundeliegenden Begriff verstanden. Es ist jedoch notwendig, den Sinn dieser Aussage genau zu erläutern.

Ein wissenschaftliches Problem hat in der Regel sowohl qualitative als auch quantitative Aspekte. Qualitative Betrachtungen wie die in Kapitel 5 durch Aufgaben untersuchten setzen voraus, daß die Bedeutung bestimmter physikalischer Gesetze erkannt worden ist. Quantitative Überlegungen erfordern neben den nötigen mathematischen Kenntnissen die Fähigkeit, die relevanten Formeln anzuwenden, die Kenntnis der geeigneten Maßeinheiten und das Abschätzen von Genauigkeiten.

Viele der Schwierigkeiten, die Studenten mit dem Kraftbegriff haben – und mit anderen grundlegenden Begriffen der Physik –, entstehen wahrscheinlich aus dem weitverbreiteten Mißverständnis über die Natur physikalischer Probleme und den Umgang mit ihnen – sowohl in der Lehre als auch bei Prüfungen. Praktische Situationen werden zu oft als Ausgangspunkt für mathematische Übungen benutzt, statt umgekehrt die Mathematik als nützliches Instrument für die Untersuchung der Situation zu betrachten. Infolgedessen haben sich gewisse traditionelle Arten von „Problemen“ entwickelt, für deren Lösung es hauptsächlich erforderlich ist, sich an Formeln zu erinnern, mathematische Aufgaben zu lösen (typischerweise Termumformungen) und Zahlenwerte in Gleichungen einzusetzen. Es soll nicht gesagt werden, daß diese Fähigkeiten überflüssig seien. Natürlich sind sie sehr wichtig, aber sie sind nicht ausreichend.

Mit etwas Übung kann selbst ein mäßig begabter Student lernen, die Radialkraft $m\frac{v^2}{r}$ mit gleichförmigen Kreisbewegungen in Verbindung zu bringen. Wenn er durchschnittliche

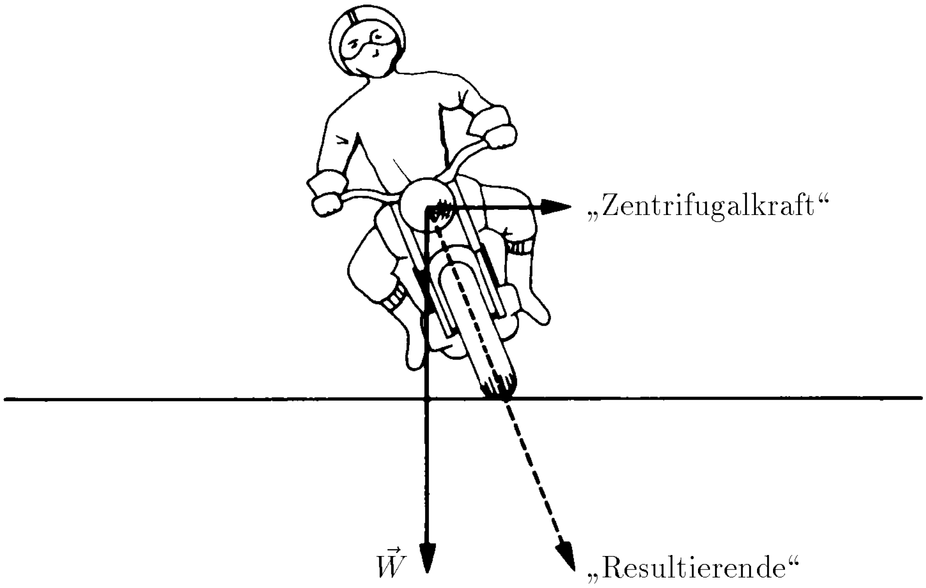


Abbildung 16 a: Herkömmliche Fehldarstellung der Kräfte, die an einem Motorradfahrer in der Kurve angreifen. Die eingezeichnete Resultierende würde Motorrad und Fahrer natürlich in den Boden hinein beschleunigen.

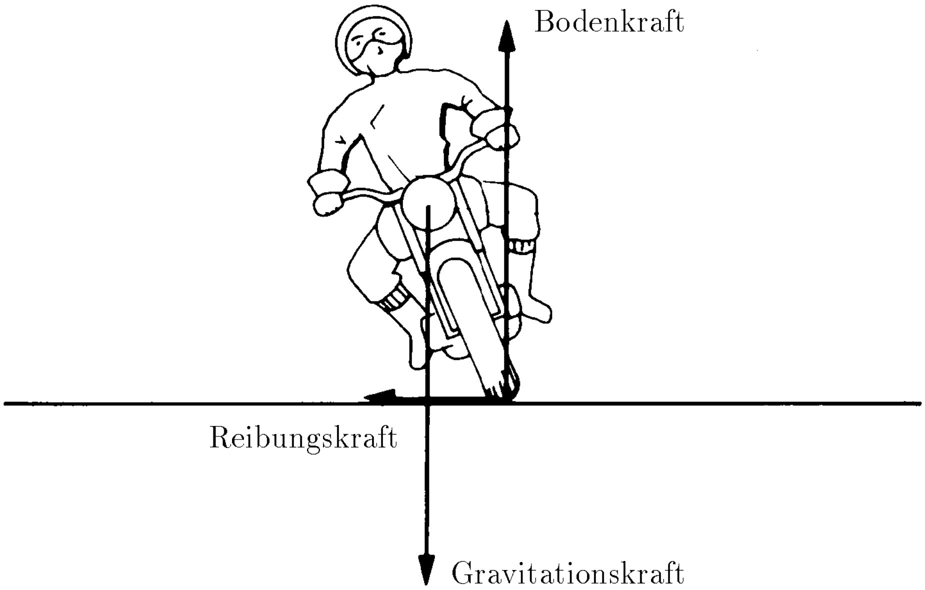


Abbildung 16 b: Korrekte Darstellung der realen Kräfte, die in dieser Ebene an dem Motorradfahrer angreifen. Sie sind äquivalent zu einer Einzelkraft , die am Schwerpunkt angreift, und bewirken eine Beschleunigung zur linken Seite des Bildes. Diese Einzelkraft wird manchmal so gezeichnet, als sei sie eine zusätzliche Kraft (die „Zentripetalkraft“). Manchmal steht ihr noch eine entgegengesetzt gerichtete Kraft gegenüber, die „Zentrifugalkraft“ – in einem Diagramm, das auch die realen Kräfte enthält.

algebraische Kenntnisse hat (oder das, was für gewöhnlich darunter verstanden wird), kann er richtige numerische Lösungen zu etlichen stereotypen Aufgaben finden. Allerdings wird er wohl keine klare Vorstellung davon haben, warum es eine solche Kraft gibt, an welchem Körper sie angreift und wo ihr Angriffspunkt ist. Seine Ratlosigkeit kann durch geeignet formulierte Problemstellungen leicht aufgedeckt werden. Die verschiedenen Arten von Testaufgaben führen also zu entgegengesetzten Ergebnissen: Im einen Fall scheint der Student das Gebiet zu beherrschen, im anderen dagegen nicht.

Abb. 16 a zeigt ein Diagramm, das so oder ähnlich in vielen Lehrbüchern zu finden ist. Die Gravitationskraft, die an einem sich in die Kurve legenden Motorradfahrer angreift, wird mit einer Zentrifugalkraft, einer Scheinkraft also, zu einer Resultierenden zusammengefaßt, von der ohne genaue Begründung gefordert wird, sie müsse durch den Auflagepunkt der Räder verlaufen. Wenn dies wirklich die Resultierende wäre, würde der Motorradfahrer natürlich beschleunigt im Boden versinken. Nun ergibt sich auf diese merkwürdige Weise tatsächlich der richtige Wert für den Neigungswinkel des Fahrers (oder in einer ähnlichen Aufgabe die Neigung einer Fahrbahn, mit der seitliche Reibung in einer Kurve vermieden werden kann). Wenn der einzige Zweck dieser Aufgabe darin bestünde, ein bestimmtes numerisches Ergebnis zu erhalten, dann könnte diese Analyse der Situation als korrekt betrachtet werden. Aber die konfusen Gedankengänge werden den Studenten nur verwirren, und er wird der weiteren Entwicklung der Mechanik schlechter folgen können. Eine richtige Behandlung des Problems wird natürlich auch zu der richtigen Antwort führen. Aber sie wird außerdem den Studenten in seinem Verständnis für die Mechanik voranbringen.

Ein Lehrer, der eine falsche Methode gelernt hat, kann davon überzeugt sein, daß er sie verstanden hat und daß sie einfach ist. Durch häufige Wiederholung hat er sich an sie gewöhnt, und seine eigene Selbstsicherheit überzeugt auch seine Studenten. Er betrachtet sie als korrekt, weil sie das liefert, was allgemein als richtige Antwort angesehen wird. Wenn ihm gesagt wird, die Methode sei falsch und er verwirre seine Schüler, ist er unfähig, die Kritik zu verstehen. Der Aufwand, der nötig ist, eine für ihn neue Methode zu erlernen, läßt ihm eine stichhaltige Behandlung schwieriger erscheinen als die vertraute unbegründete. Er sieht nicht, daß für einen Schüler, der noch keine Methode gelernt hat, eine Behandlung, die die Newtonschen Gesetze korrekt verwendet und nur reale Kräfte, aber keine Scheinkräfte benutzt, genauso einfach zu merken und unendlich leichter zu verstehen sein wird als eine unbegründete Methode. Es ist schon erstaunlich, wie viele Leute glauben, daß Schüler Analysen, die in Wirklichkeit nur zusammenhangloser Unsinn sind, „verstehen“, nur weil sie in der Lage sind, sie auf Verlangen wiederzugeben,

Vor einer Generation versuchten viele Physiklehrer, die Probleme mit dem sehr abstrakten Begriff der Masse zu umgehen, in dem sie ihn einfach wegließen. Der Gewichtsbegriff wurde als ausreichend konkret und eindeutig (!) betrachtet, um leicht verstanden werden zu können. Das zweite Newtonsche Gesetz wurde dann folgendermaßen formuliert:

$$\text{Kraft}/\text{Beschleunigung} = \text{W}/\text{g}$$

Studenten konnte beigebracht werden, eine bestimmte Art von Rechenaufgaben mit Hilfe dieser Gleichung zu lösen, und alles schien auf den ersten Blick zufriedenstellend.

Es stellte sich jedoch heraus, daß die Studenten in Wirklichkeit keinerlei Verständnis der Dynamik erworben hatten und ihre Schwierigkeiten mit den komplizierteren Begriffen und Problemen eher größer geworden waren. Sie kamen nämlich in ernsthafte Schwierigkeiten bei Phänomenen, die nichts mit Gravitation zu tun haben. Diese machen jedoch den weitaus größeren Anteil der Probleme aus, die in der Anfängerausbildung in Physik von Interesse sind. Der Autor war einer von vielen, die es als erforderlich erkannten, die Mechanik neu zu erlernen und dabei von ihren Grundprinzipien und Grundbegriffen, einschließlich der Masse, auszugehen.

Als die W/g-Formulierung unter Beschuß geriet, argumentierten ihre Verteidiger, ihre Schüler lernten auf diese Weise, Probleme zu lösen. Aber entweder war etwas an den Problemstellungen falsch oder an der Art, wie die Antworten bewertet wurden – oder an beidem.

Es hat sich also gezeigt, daß ein Problem, das in der Ausbildung oder als Prüfungsaufgabe nützlich sein soll, zunächst in korrekter Weise *qualitativ* behandelt werden muß. Es ist nur wenig wert, eine „richtige“ numerische Lösung zu finden, wenn unklar bleibt, was sie bedeutet. Natürlich sind auch die quantitativen Aspekte eines Problems wichtig. Zu oft werden jedoch Aufgaben gestellt mit zufällig ausgewählten Zahlenwerten, die keinerlei Realitätsbezug haben (Warren 1971(b)). Außerdem ist es in Lehrbüchern durchaus üblich, daß in ausgearbeiteten Beispielen Werte nur für ein oder zwei Bilder angegeben werden, Lösungen für vier.

6.2 Genauigkeit

Ein Hauptgrund für die Lernschwierigkeiten der Studenten ist der Mangel an Genauigkeit bei der Formulierung von Definitionen und Gesetzen. Eine Definition soll nicht nur ein Spruch zum Einprägen sein, sondern eine exakte Beschreibung eines Sachverhalts, so daß dieser wiedererkannt wird, wo immer er auftritt. Jedes Gesetz, auch ein vorläufiges, muß so präzise formuliert sein, daß unter keinen Umständen Zweifel über seine Aussage aufkommen können.

Die Mechanik befaßt sich mit den vorhersagbaren Folgen bekannter Ursachen. Begriffe, die nur vage Tendenzen beschreiben, sind dazu ungeeignet. Einige einführende Bücher „definieren“ Kraft mit der Aussage „Eine Kraft ist die Ursache dafür, daß sich ein Körper bewegt oder sich bewegen will.“[1]. Es ist schwer zu sagen, was an dieser Formulierung schlimmer ist, die schlechte Physik (*bewegen* statt *beschleunigen*) oder die absurde Logik. Da die Formulierungen „sich bewegen wollen“ und „sich bewegen“ einander gegenübergestellt werden, kann die oben angeführte Aussage nur bedeuten, daß Kraft etwas ist, das einen Körper entweder bewegt oder nicht! Eins der verblüffendsten Kennzeichen der traditionellen absurden Behandlung der Oberflächenspannung ist die Häufigkeit, mit der behauptet wird, die angebliche resultierende Kraft bewirke, daß die Moleküle „versuchten, sich nach innen zu bewegen“.

[1] „A force will cause a body to move or tend to move.“

Ein Gesetz der Mechanik, das oft ungenau formuliert wird, ist das Newtonsche Gravitationsgesetz. In seiner korrekten Form besagt es, daß jedes Teilchen im Universum jedes andere anzieht. Dabei ist die Kraft gegeben durch

$$\text{Kraft} = G\frac{m_1 m_2}{r^2},$$

wobei m_1 und m_2 die Massen der Teilchen sind, r der Abstand zwischen ihnen und G die universelle Gravitationskonstante. Die „Teilchen" in dem Gesetz sind materielle Körper, deren Abmessungen verglichen mit r infinitesimal klein sind. Es besteht also keinerlei Unsicherheit über die Größe der Entfernung und die Richtung der Kraft. Um das Gesetz auf ausgedehnte Körper anwenden zu können, muß man integrieren.

Es wird sehr oft gelehrt, dieses Gesetz sei anwendbar auf die Anziehung zwischen beliebigen Körpern, wenn man als Entfernung die Entfernung zwischen den Schwerpunkten nimmt. Es ist lehrreich, diese Aussage auf die Anziehung zwischen einem Teilchen und einem dicht benachbarten langen dünnen Stab anzuwenden. Wir könnten die Kraft einerseits berechnen, indem wir annehmen, die Masse des Stabes sei in seinem Schwerpunkt konzentriert. Andererseits könnten wir uns den Stab als aus zwei Hälften zusammengesetzt und deren Massen auf die jeweiligen Schwerpunkte konzentriert denken. Das würde zu einem anderen Wert für die Gravitationskraft führen. Tatsächlich würden wir für jede Art der Teilung einen anderen Wert erhalten. Daher liefert das Gesetz, in seiner üblichen Formulierung, nicht in jedem Fall einen eindeutigen Wert.

Obwohl das Newtonsche Gravitationsgesetz tatsächlich sehr exakt ist, muß es bekanntlich für die höchste Verfeinerung astronomischer Berechnungen durch ein noch genaueres Gesetz ersetzt werden. Diese Tatsache wird manchmal mit vollem Ernst als Rechtfertigung benutzt, es falsch zu unterrichten! Dabei ist es offensichtlich sinnlos, über Genauigkeit oder Ungenauigkeit eines Gesetzes zu diskutieren, wenn man es nicht präzise formuliert.

6.3 Sprache

Es wird immer schwieriger, sich mit Studenten zu verständigen, weil viele Fachausdrücke nicht mehr einheitlich verwendet werden. Mehrdeutigkeiten beim Gebrauch der Begriffe *Geschwindigkeit, Beschleunigung, Gewicht, gewichtlos* und *Gegenkraft* wurden bereits behandelt, aber es gibt noch viel mehr. Sogar so einfache mathematische Begriffe wie *Term* und *Faktor* werden von einigen Autoren verwechselt. Inzwischen definieren einige Mathematiklehrer sogar *Vektor* und *Funktion* anders als üblich.

Viele Schwierigkeiten entstehen durch falsche Verwendung des Begriffes der *Proportionalität.* Wenn $y = mx$ gilt, wobei m eine Konstante ist, dann heißt y direkt proportional zu x. Proportionalität wird jedoch oft so verwendet, als sei sie identisch mit dem allgemeinen linearen Zusammenhang $y = mx + c$, wobei c eine weitere Konstante ist. Zur Proportionalität gehört ein linearer Graph *durch den Ursprung des Koordinatensystems.* Es ist deshalb mißverständlich, einen Zusammenhang als linear zu bezeichnen, wenn man Proportionalität meint, und es ist falsch, ihn proportional zu nennen, wenn er nur linear ist.

Tatsächlich kommt es vor, daß Lehrbücher Versuchsergebnisse mit einem linearen Graphen darstellen, der nicht durch den Ursprung verläuft, und trotzdem behaupten, die Variablen seien proportional zueinander. Entsprechende Behauptungen werden über geradlinige Kurvenabschnitte aufgestellt, die offensichtlich nicht durch den Ursprung extrapoliert werden können. In so einem Fall wird vielleicht auch noch gesagt, das Verhältnis y/x sei konstant. Der Ausdruck „ist proportional zu" wird oft im Sinne von „ist abhängig von" benutzt, und in einigen Lehrbüchern hat er mal die eine und später wieder die andere Bedeutung.

Noch verwirrender ist es, wenn manchmal von einer abhängigen Variablen gesagt wird, sie sei zu zwei oder mehreren anderen Variablen proportional. Beispielsweise wird die Beschleunigung eines Körpers als proportional zur einwirkenden Kraft und umgekehrt proportional zu seiner Masse bezeichnet. Solche Beziehungen können jedoch nur durch Gleichungen angemessen beschrieben werden. Wenn wir eine abhängige Variable haben, die proportional ist zum Produkt zweier *unabhängiger* Variablen , ist es möglich, verschiedene Proportionalitäten zu den einzelnen Variablen abzuleiten, von denen jede unter anderen Umständen gültig ist, aber wir müssen dies den Studenten sehr sorgfältig beibringen, es sei denn, sie sind mit partieller Differentiation völlig vertraut.

Studenten lernen normalerweise die Addition von Vektoren, und die Summe wird dann als Resultierende bezeichnet. Einige Autoren ändern jedoch ihre Gewohnheiten, wenn sie Kräfte addieren. Es kann dann passieren, daß die auf einen Körper wirkende resultierende Kraft effektive Kraft genannt wird, während – man kann es kaum glauben! – eine der Komponenten als Resultierende bezeichnet wird.

Anhänger d'Alemberts, die Scheinkräfte (inertia forces) einführen, sagen von einem beschleunigten Körper, er befinde sich im „dynamischen Gleichgewicht". In dieser Betrachtungsweise ist jeder Körper im Gleichgewicht, entweder in einem statischen oder dynamischen, so daß das Wort Gleichgewicht seine Bedeutung verliert.

6.4 Kohärenz

Selbst auf der frühesten Entwicklungsstufe des Denkens gibt es ein Bedürfnis nach systematischen Regeln. Ein Kind lernt, daß gewisse Effekte immer auf bestimmte Ursachen folgen. Später wird es auch mit abstrakteren Prinzipien fertig. Zwei und zwei ergibt vier, ob es nun Äpfel, Stufen oder Pfennige addiert. Je mehr es lernt, desto komplexer werden die Regeln, aber das Verlangen nach Systematik und Konsistenz bleibt erhalten. Nirgendwo ist das wichtiger als in den Naturwissenschaften. Wenn wir Vorgänge in der Natur verstehen wollen, müssen wir in Zusammenhängen denken, gleichgültig ob wir an praktischen Anwendungen interessiert sind, an neuen Entdeckungen oder an geistigem Training oder ob wir ästhetische Befriedigung suchen.

Junge Leute sind beim Lernen von Mechanik viel zu oft einer verwirrenden Mischung aus Strenge und Chaos ausgesetzt. In der Vorlesung tritt eine Struktur in Erscheinung, die den Eindruck erweckt, klar zwischen Definitionen, Prinzipien und Gesetzen zu unterscheiden. Gewisse Regeln müssen (manchmal) punktgenau befolgt werden. Jedoch ändern sich diese Regeln bei jeder Gelegenheit auf völlig irrationale Weise. Was ist z. B. die Folge, wenn keine Kraft an einem Körper angreift? Es wird der Anschein erweckt, als bliebe der Körper dann manchmal unbeschleunigt, würde ein anderes Mal gestoßen oder könne sich im Kreis bewegen. Und was geschieht, wenn eine Kraft angreift? Der Körper könnte sich bewegen (oder „dazu neigen“) oder beschleunigen, oder weder das eine noch das andere und stattdessen gedehnt oder geschert werden. Von einer Ladung wird behauptet, sie bewege sich entlang der elektrischen Feldlinien, Tennisbällen oder Planeten dagegen wird keine Bewegung entlang der Feldlinien des Gravitationsfeldes zugeschrieben (siehe jedoch Anhang 5, S. 64).

Sehr oft benutzen verschiedene Lehrer unterschiedliche Betrachtungsweisen: So benutzt vielleicht der Physiklehrer die Newtonschen Gesetze, während der Mathematiklehrer d'Alembert-Kräfte verwendet, oder umgekehrt.

Im täglichen Leben und beim Lösen alltäglicher Aufgaben wird von jedem erwartet, logisch zu denken, ob er nun über eine wissenschaftliche Ausbildung verfügt oder nicht. Ein (Geschworenen-) Gericht muß Indizien über die kompliziertesten Vorfälle sammeln und mit ihrer Hilfe die Wahrheit finden. Das erfordert von Normalbürgern mit nur durchschnittlicher Schulbildung ein viel höheres Maß an logischem Denkvermögen, als manche Akademiker aufweisen, die Mechanik unterrichten oder Bücher darüber schreiben. Die angeborenen Fähigkeiten dieser Gelehrten sind anscheinend durch das Studium einer degenerierten geistigen Tradition und den Umgang mit ihr drastisch reduziert worden.

6.5 Schlußfolgerungen

Der Kraftbegriff ist für die Grundausbildung in Physik, Ingenieurswissenschaften und Mathematik von großer Bedeutung. Er wird jedoch offensichtlich weitgehend mißverstanden, nicht nur von Studenten, sondern auch von hochqualifizierten Wissenschaftlern. Es ist kaum einzuschätzen, wie schwierig dieser Begriff tatsächlich ist, da die Probleme mit ihm in der Praxis durch das schier unglaubliche Durcheinander bei der Einführung noch vergrößert werden. Diese Praxis dauert noch unverändert an, ohne daß irgendwelche Fachleute etwas dagegen unternehmen. Paradoxerweise würde der Kraftbegriff einfacher werden, wenn die Schwierigkeiten zur Kenntnis genommen würden und der Begriff entsprechend eingeführt würde.

Kapitel 7

Anhang

Anhang 1: Vektoren und Pseudovektoren

Das Wort „Vektor“ wird mit verschiedenen Bedeutungen verwendet. Manche Mathematiker benutzen den Begriff, um *beliebige* Größen zu beschreiben, die als Zeilen- oder Spaltenmatrix darstellber sind. Für Physiker, Ingenieure und die meisten Mathematiker ist es jedoch üblicher, ihn auf Größen zu beschränken, die einen Betrag und eine Richtung im realen Raum haben. Bei Anwendungen ist darüberhinaus die Unterscheidung zwischen *echten (polaren) Vektoren* und *Pseudovektoren (axialen Vektoren)* wichtig.

Als „echt“ werden solche Vektoren bezeichnet, die als in eine Richtung zeigend oder wirkend betrachtet werden können. Verschiebung, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Impuls und Kraft sind echte Vektoren. Ihre Dimension beinhaltet die Länge in der ersten Potenz, manchmal auch in höheren ungeraden Potenzen. Echte Vektoren sind ungerade Funktionen. Das bedeutet folgendes: Wenn in einem kartesischen Koordinatensystem gewisse Koordinatenrichtungen vertauscht werden, dann ändern sich die Vorzeichen der entsprechenden Vektorkomponenten.

Pseudovektoren enthalten die Orientierung einer Achse im Raum. Ihre Dimension enthält machmal die Länge gar nicht (wie z. B. die Winkelgeschwindigkeit), oder sie beinhalten sie quadratisch oder mit anderen geraden Potenzen (wie das Drehmoment oder der Drehimpuls). Pseudovektoren sind gerade Funktionen, d. h. ihre Komponenten ändern ihre Vorzeichen nicht, wenn Koordinatenrichtungen umgekehrt werden.

Sowohl Vektoren als auch Pseudovektoren können nach der Parallelogrammregel addiert und durch Bildung des inneren Vektorprodukts (Skalarprodukt) oder des äußeren Vektorprodukts (Kreuzprodukt) miteinander multipliziert werden.

Das Produkt zweier polarer Vektoren oder zweier Pseudovektoren ist eine gerade Funktion. In beiden Fällen ist das innere Produkt ein Skalar und das äußere Produkt ein Pseudovektor. Beispielsweise ist das innere Produkt der beiden echten Vektoren „Kraft“ und „Verschiebung“ ein Skalar, nämlich die „Arbeit“. Ihr äußeres Produkt ist ein Pseudovektor, nämlich das „Drehmoment“.

Der Flächeninhalt einer ebenen Fläche kann als das Kreuzprodukt zweier Vektoren betrachtet werden. Er ist damit ein Pseudovektor, und seine Achse ist das Lot auf der Fläche. Wenn wir das innere Produkt aus einem Flächeninhalt und einer dritten Verschiebung bilden, erhalten wir ein Volumen. Letzteres scheint zunächst ein Skalar zu sein. Als Produkt aus einer ungeraden und einer geraden Funktion muß es jedoch eine ungerade Funktion sein. Solche Größen werden als *Pseudoskalare* bezeichnet.

Pseudoskalare haben einen Betrag, aber keine Richtung. Ihre Dimension beinhaltet die Länge in ungeraden Potenzen. Beispiele sind die Dichte und die Gravitationskonstante G. Auch der Druck p in Fluiden ist ein Pseudoskalar. Am einfachsten kann er als Normalkraft $\vec{F}$ dividiert durch die Fläche $\vec{S}$ definiert werden. Da man aber solche Größen nicht direkt dividieren kann, schreibt man die Definition gewöhnlich wie folgt:

$$p = \frac{\vec{F} \cdot \vec{S}}{\vec{S}^2}$$

Die Dimension von p enthält eine reziproke Länge.

Die Terme einer Gleichung müssen alle von derselben Art sein: Skalar, Pseudoskalar, Vektor oder Pseudovektor. (Komplexere Tensoren werden hier nicht betrachtet.). Betrachten wir als Beispiel die Bernoullische Gleichung

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2).$$

Das Quadrat der Geschwindigkeit ist ein Skalar; Dichte ist ein Pseudoskalar. Also sind beide Seiten der Gleichung Pseudoskalare.

Diese Ideen können auch beim Elektromagnetismus verwendet werden. Ladung ist ein Skalar, daher ist die Stromstärke (Ladung/Zeit) ein Skalar, die Stromddichte (Stromstärke/Fläche) ein Pseudovektor und die Ladungsdichte (Ladung/Volumen) ein Pseudoskalar. Die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ (Kraft/Ladung) ist ein Vektor. Nach dem Coulombschen Gesetz ist die Dielektrizitätskonstante ε ein Pseudoskalar, daher ist die dielektrische Verschiebung $\vec{D}$ $(= \varepsilon\vec{E})$ ein Pseudovektor.

Ganz entsprechend ist die magnetische Feldstärke $\vec{H}$ ein Vektor, die Permeabilität μ ein Pseudoskalar und die magnetische Induktion (Induktionsflußdichte) $\vec{B}$ ein Pseudovektor.

Wenn sich eine positive Ladung q mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ in einem Magnetfeld mit der Induktion $\vec{B}$ bewegt, erfährt sie die Kraft

$$\vec{F} = (\vec{v} \times \vec{B})q.$$

Das äußere Produkt eines Vektors mit einem Pseudovektor ist ein Vektor, und die Richtungen ergeben sich aus der Rechte-Hand-Regel der Vektormultiplikation: Wenn man die ersten beiden Finger und den Daumen der rechten Hand ausstreckt und der Zeigefinger in die Richtung des ersten Faktors $\vec{v}$, der Mittelfinger in die Richtung des zweiten Faktors $\vec{B}$ zeigt, dann zeigt der Daumen in Richtung des Produktes, das senkrecht auf der von den Faktoren aufgespannten Ebene steht. (Eine negative Ladung, die sich in die entgegengesetzte Richtung bewegt, erfährt dieselbe Kraft).

Dieses Gesetz wird oft auch durch die Linke-Hand-Regel dargestellt, wobei der Zeigefinger in Richtung von $\vec{B}$ und der Mittelfinger in Richtung von $\vec{v}$ zeigt. Die Regel wird oft mißverständlich formuliert, indem den Fingern der magnetische Fluß bzw. die Stromstärke zugeordnet werden. Wie wir aber bereits gesehen haben, ist die Stromstärke ein Skalar, und ebenso der magnetische Fluß, der das innere Produkt von Induktion und Fläche ist.

Ähnliche Fehler werden häufig mit der Rechte-Hand-Regel gemacht, wenn die Richtung des elektrischen Feldes dargestellt werden soll, das in einem Körper induziert wird, der sich quer zur Richtung des Magnetfeldes bewegt. Hier sollte gesagt werden, der Zeigefinger repräsentiere $\vec{B}$, der Mittelfinger die Geschwindigkeit des Körpers und der Daumen die Richtung des erzeugten elektrischen Feldes im Körper. Meist wird jedoch gesagt, der Daumen zeige die induzierte Spannung oder den induzierten Strom – beides keine Vektoren. Der Ausdruck „Flußlinien“ ist sowohl bei elektrischen als auch bei magnetischen Erscheinungen falsch.

Anhang 2: Spannung und Oberflächenspannung

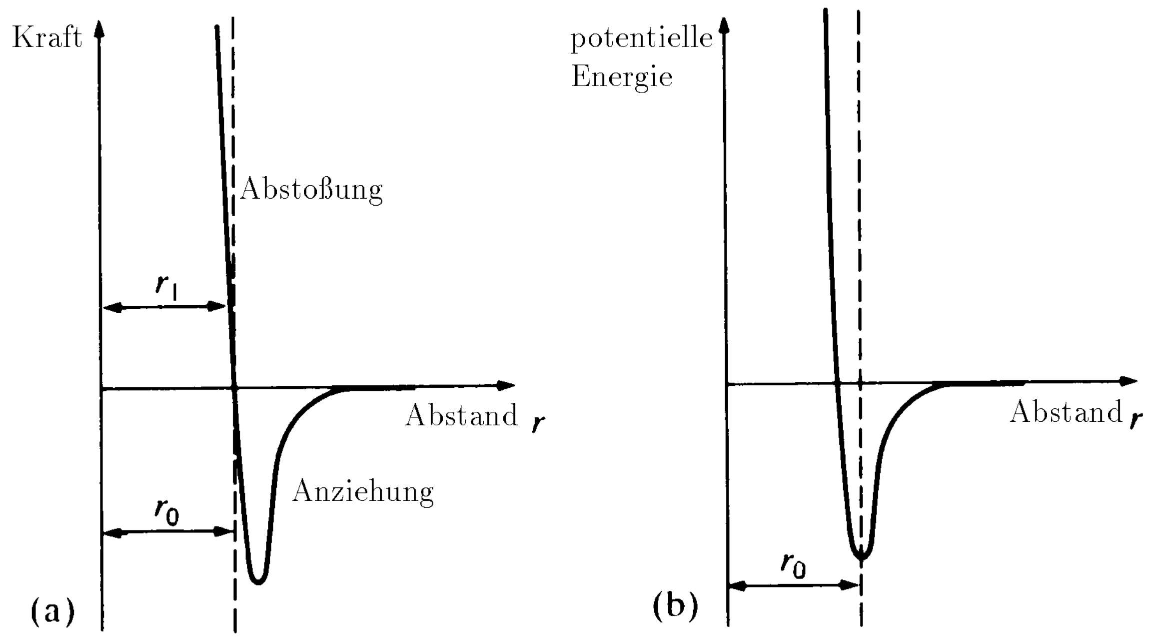


Abbildung 17: Abhängigkeit der Kraft und der potentiellen Energie von Abstand zwischen zwei einzelnen Molekülen

Die Schwierigkeiten beim Verstehen der molekularen Ursachen der Oberflächenspannung entstehen offensichtlich zum größten Teil dadurch, daß das grundlegendere Problem, die Spannung in Festkörpern zu verstehen, im allgemeinen nicht behandelt wird.

Um die Stabilität der Materie zu erklären, nehmen wir an, daß die Moleküle über Kräfte kurzer Reichweite miteinander wechselwirken, die auf sehr kurze Distanz eine Abstoßung und bei geringfügig höherem Abstand eine Anziehung bewirken. Dabei steigt die Anziehungskraft auf ein Maximum an und konvergiert dann sehr schnell gegen null, wie es in Abb. 17(a) für zwei Moleküle dargestellt ist. (siehe auch Anhang 3, S. 59.) Abb. 17(b) zeigt die zugehörige potentielle Energie der Moleküle. Die Kurven in (a) und (b) hängen miteinander zusammen, da die Kraft gleich dem negativen Gradienten der potentiellen Energie ist. r_0 ist der Gleichgewichtsabstand zweier isolierter Moleküle, bei dem die Steigung der potentiellen Energie null ist.

Moleküle sind nie in Ruhe, sondern oszillieren sehr schnell (mit Frequenzen der Größenordnung $10^{12} Hz$) um Gleichgewichtspunkte, die in Festkörpern ortsgebunden sind und sich in Flüssigkeiten mit Geschwindigkeiten bewegen, die klein sind im Vergleich zur Geschwindigkeit der Oszillationsbewegung.

Der Einfachheit halber betrachten wir eine eindimensionale Struktur in Form einer Reihe von Molekülen, die in Abb. 18 an ihren Gleichgewichtspositionen dargestellt sind. Von kleinen Abweichungen an den Enden der Reihe abgesehen haben diese „Gitterpunkte“

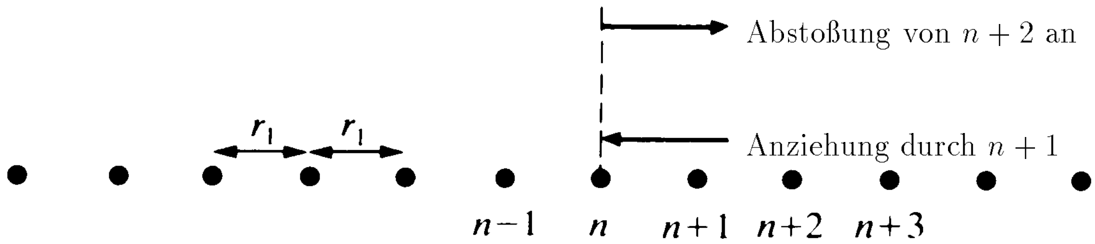


Abbildung 18: Wechselwirkungen innerhalb einer Reihe von Molekülen, die nicht unter Spannung steht.

einen konstanten Abstand r_1, der etwas kleiner ist als r_0. Jedes Molekül wird von den beiden nächsten Nachbarn abgestoßen, aber von weiter entfernten Molekülen angezogen. Wird ein Molekül etwas aus seiner Gleichgewichtslage ausgelenkt, dann wirkt die Resultierende aller Kräfte in Richtung der Ruhelage. Es handelt sich also um ein stabiles oszillierendes System. (Eine Krümmung der Reihe wird ausgeschlossen. In echten Körpern wird sie durch Wechselwirkung mit Molekülen außerhalb der Reihe verhindert.).

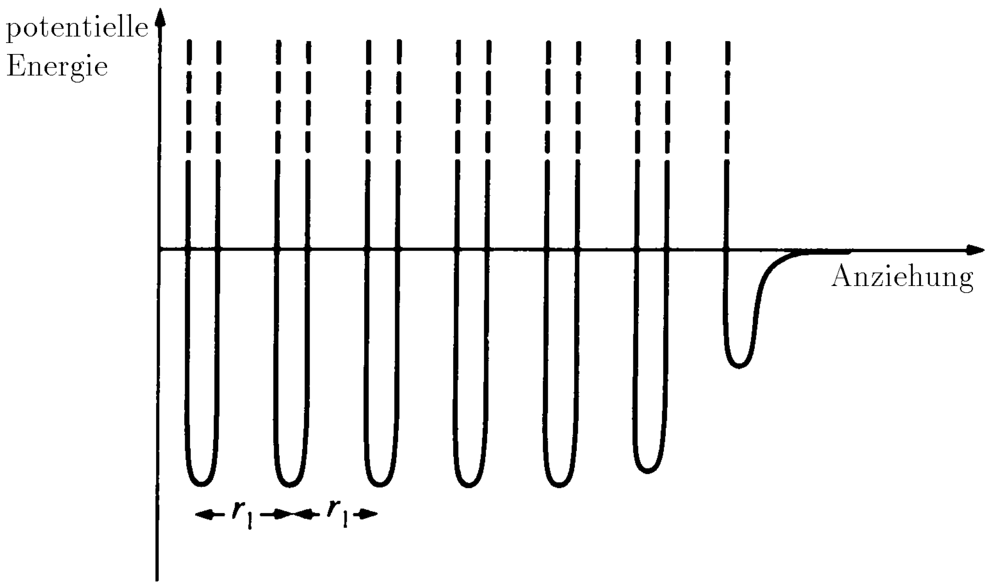


Abbildung 19: Potentialbarrieren für einen Teil einer Molekülreihe. Die abnehmenden Potentiale auf der rechten Seite gehören zu Randmolekülen.

Wenn der Körper nicht unter Spannung steht, ist die resultierende Kraft, die ein Teil auf die anderen ausübt, null, wenn man über einen relativ zur Oszillationsperiode großen Zeitraum mittelt. Wenn an beiden Enden der Reihe Anziehungskräfte von äußeren Körpern angreifen, wird der Abstand der Moleküle etwas vergrößert. Dadurch werden alle Moleküle rechts von Molekül n in ihren Gleichgewichtspositionen von allen links befindlichen Molekülen, einschließlich dem $n$ten, angezogen. Abb. 17(a) zeigt, daß die Reihe einer Zugspannung bis zu einem gewissen kritischen Wert widerstehen kann. Entsprechend kann sie einer Kompression unbegrenzt widerstehen.

Die potentielle Energie eines Moleküls an einem beliebigen Punkt der Reihe, ist, außer nahe den Enden, annähernd das Doppelte der Energie, die durch die Wechselwirkung mit einem Nachbarn in einem Abstand von etwa r_0 entsteht. Das liegt daran, daß jedes Teilchen zwei Nachbarn im Abstand r_1 hat, der sich nur wenig von r_0 unterscheidet, und weil die weiter entfernten Moleküle keinen wesentlichen Beitrag leisten (s. Abb. 17(b)). Die Teilchen oszillieren in den Potentialmulden, die Abb. 19 zeigt. Die Endmoleküle befinden sich in Mulden etwa der halben Tiefe, weil sie jeweils nur einen nahen Nachbarn haben.

Alle kondensierte Materie ist dreidimensional und daher komplexer als die oben beschriebene Struktur, aber diese allgemeine Beschreibung trifft immer noch zu. Moleküle an der Oberfläche befinden sich in deutlich flacheren Potentialmulden als die Moleküle im Innern. Deshalb gibt es „Oberflächenenergie“ in Festkörpern und Flüssigkeiten. Moleküle in Flüssigkeiten können sich frei bewegen. Im stationären Zustand wird deshalb die Moleküldichte an der Oberfläche geringer sein als die im Innern der Flüssigkeit. An der Oberfläche der Flüssigkeit sind die Moleküle so weit voneinander entfernt, daß die resultierenden Kräfte von allen Seite anziehend wirken, d. h. es herrscht dort eine Zugspannung.

Anhang 3: Kräfte großer und kleiner Reichweite

Wechselwirkungen zwischen zwei Körpern können je nach Art des Zusammenhanges zwischen Kraft und Abstand in zwei Klassen eingeteilt werden. Wie auch immer dieser Zusammenhang aussehen mag, auf jeden Fall nehmen die Kräfte, wenn die Körper nah beieinander sind, jenseits einer bestimmten Entfernung mit zunehmendem Abstand ab. Wechselwirkungen mit großer Reichweite wie die Gravitation fallen nur langsam mit dem Abstand ab, und es ist offensichtlich, daß diese Kräfte „durch den Raum“ wirken. Andere Wechselwirkungen jedoch, z. B. intermolekulare Kräfte, fallen sehr schnell mit dem Abstand ab. Von ihnen sagt man üblicherweise, sie wirkten, wenn die Körper in Berührung sind. Diese Ausdrucksweise ist allerdings in Wirklichkeit eine Tautologie. Oft wird in naiver Weise zwischen diesen beiden Klassen unterschieden: Kräfte mit großer Reichweite werden als geheimnisvoll angesehen, während die komplexeren Kräfte geringer Reichweite als gegeben hingenommen werden. Umgekehrt führt der kartesianische Aberglaube, die Materie sei undurchdringlich (D'Alembert schloß sich dieser Überzeugung an.) zu der Vorstellung, kurzreichende Wechselwirkungen träten ohne das Vorhandensein irgendwelcher Kräfte auf.

Die Bedeutung der „Reichweite“ in diesem Zusammenhang kann an einem einfachen Beispiel veranschaulicht werden. Betrachten wir die potentielle Energie eines Moleküls in einem Festkörper oder einer Flüssigkeit (Abb. 20). Die Wechselwirkung zwischen zwei Molekülen verhalte sich wie in Abb. 17 dargestellt. Jenseits eines Abstandes a, der minimal größer als r_0 ist, wirkt die Kraft anziehend, und ihr Betrag nimmt mit zunehmender Entfernung ab. Wenn wir annehmen, daß dieser Verlauf mit ausreichender Genauigkeit durch ein r^{-n}-Gesetz dargestellt werden kann, für $r > a$ also gilt

$$\text{Kraft} \sim \frac{1}{r^n},$$

dann gilt für die potentielle Energie eines Moleküls aufgrund der Anwesenheit eines anderen:

$$\text{potentielle Energie} \sim -\frac{1}{r^{n-1}}.$$

Die gesamte potentielle Energie des in Abb. 20 gezeigten Moleküls ergibt sich aus den Wechselwirkungen mit allen Molekülen in seiner Umgebung. Die nahen Nachbarn bis zum Abstand a liefern die Energie U_0. Um den Beitrag der weiter entfernten Moleküle zu ermitteln, betrachten wir eine Kugelschale zwischen r und $r + dr$. Die Anzahl der Moleküle in ihr wird als proportional zum Volumenelement $4\pi r^2 dr$ angenommen. Dadurch ergibt sich für die potentielle Energie

$$U = U_0 - A \int_a^b \frac{dr}{r^{n-3}},$$

wobei A eine Konstante ist und b eine Grenze darstellt, die von den Ausmaßen des Körpers abhängt.

Zwei Fälle müssen unterschieden werden:

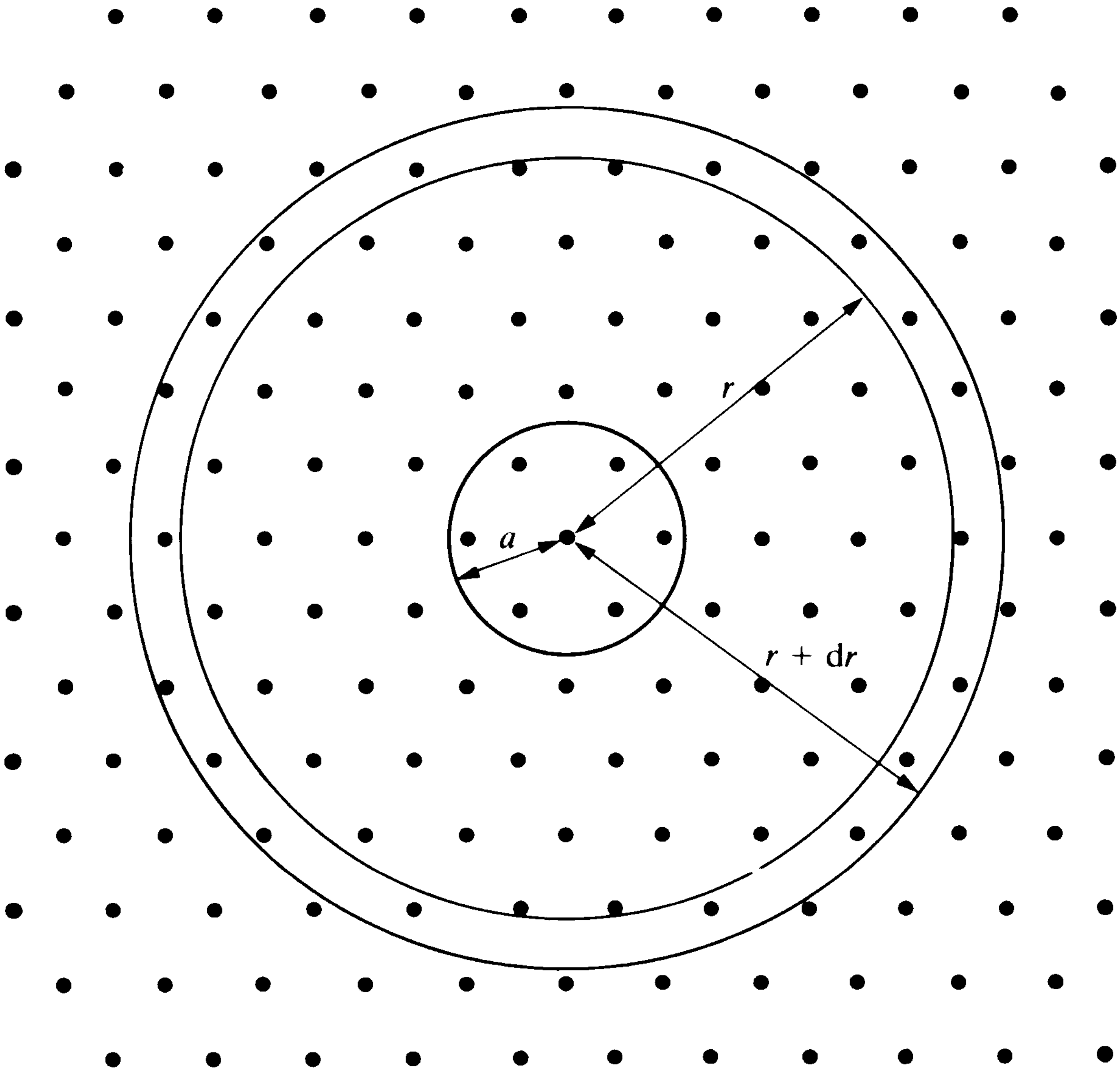


Abbildung 20: Wechselwirkungen zwischen den Molekülen eines Festkörpers oder einer Flüssigkeit. Das Molekül in der Mitte stößt alle Moleküle ab, die nicht weiter als a von ihm entfernt sind, und zieht alle anderen an. Die Anzahl der Moleküle in der Kugelschale zwischen r und $r + dr$ wird als proportional zur Größe ihres Volumens angenommen.

1. $n \leq 4$. Der Wert des Integrals wächst unbeschränkt mit der Größe der Probe und geht gegen unendlich, wenn b gegen unendlich geht. Dies ist der Fall langreichweitiger Kräfte. Sterne werden auf diese Weise durch Gravitationskräfte zusammengehalten, und ihre Eigenschaften hängen von ihrer Größe ab.

2. $n > 4$. Der Wert des Integrals geht an der oberen Grenze gegen null, wenn b gegen unendlich geht. Deshalb wird der Betrag durch die untere Grenze bestimmt, der die Wechselwirkungen mit den nahen Nachbarmolekülen darstellt. Dies ist der Fall kurzreichweitiger Kräfte.

Die Eigenschaften von Körpern in der Größe von Alltagsobjekten sind praktisch unabhängig von ihrer Größe. Beispielsweise sind die spezifische Verdampfungswärme von Flüssigkeiten und die Sublimationswärme von Festkörpern immer gleich, unabhängig der Größen der Probe. Das zeigt die kurze Reichweite der intermolekularen Wechselwirkungen.

Wenn wir jede Art von Materie genau untersuchen wollten, müßten wir uns natürlich vielen Schwierigkeiten mit dem oben genannten einfachen Argument stellen. Z. B. beinhalten die Wechselwirkungen in ionischer Materie Anziehung und Abstoßung entfernter Teilchen nach dem $\frac{1}{r^2}$-Gesetz. In diesem Fall sollten wir die Veränderung mit dem Abstand von der Gesamtladung einer Elementarzelle betrachten, die wieder auf eine kurzreichweitige Wechselwirkung führt.

Eine interessante Anwendung dieser Ideen ergibt sich bei Atomkernen. Die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon, die ungefähr proportional zur potentiellen Energie ist, ist über einen weiten Bereich von Kerngrößen annähernd konstant. Dies zeigt, daß die zugrundeliegenden Wechselwirkungen (durch ladungsunabhängige Kräfte im Kern) kurzreichweitig sind. Die elektrischen Abstoßungskräfte zwischen Protonen sind weitreichend und gewinnen deshalb bei größeren Kernen an Bedeutung. Diese Tatsache führt dazu, daß in Kernen mit höherer Massenzahl der Neutronenanteil größer ist und daß die Spaltung großer Kerne Energie freisetzt.

Bei allen angeführten Argumenten wurde stillschweigend vorausgesetzt, daß die Teilchen im Raum lokalisiert werden können. Eine einfache Anwendung der Heisenbergschen Unschärferelation zeigt, daß dies für unseren Zweck bei Molekülen und Kernen ausreichend gut erfüllt ist. Wegen ihrer geringen Masse können Elektronen jedoch nicht exakt lokalisiert werden. Deshalb gibt es keinen Grund zu glauben, es gäbe in Atomen Abstoßungskräfte mit kurzer Reichweite, die die Elektronen daran hindern, in den Kern zu stürzen.

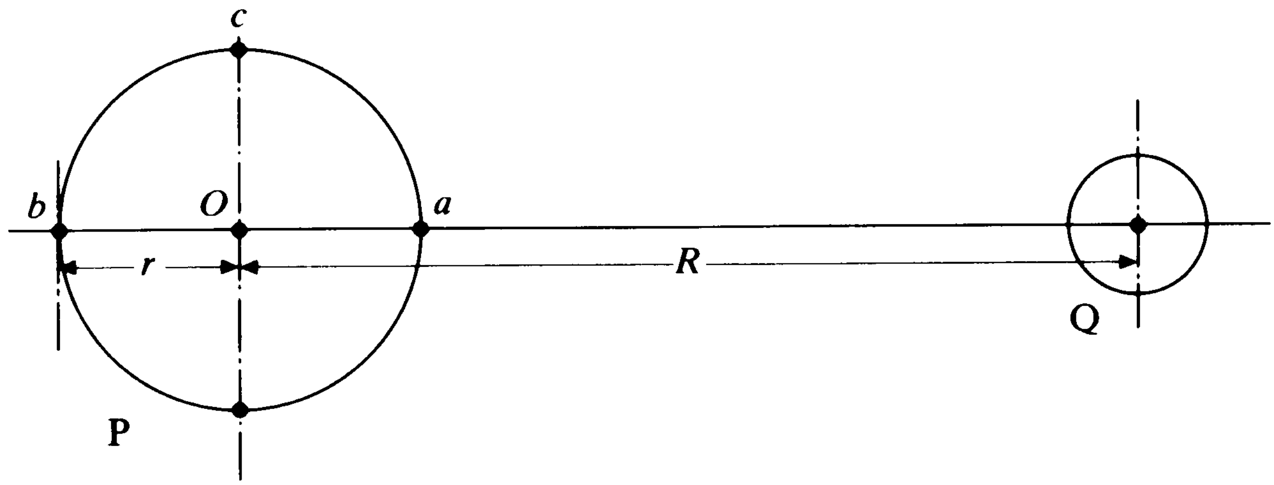


Abbildung 21: Zur Entstehung der Gezeitenkräfte an verschiedenen Stellen des Planeten P durch den Mond oder die Sonne Q.

Anhang 4: Gezeiten

Es ist allgemein bekannt, daß Gezeiten durch den gravitativen Einfluß des Mondes auf das Meer verursacht werden. Das ist aber bereits alles, was die meisten Menschen darüber lernen. Viele Menschen glauben, es gebe nur eine Flut am Tag, während die meisten Studenten, die es besser wissen, diese Tatsache seltsam finden. Sie sagen vielleicht: „Ich verstehe, warum sich das Meer auf der Seite anhebt, wo sich der Mond befindet, aber nicht, warum auch auf der anderen Seite ein Flutberg entsteht." Wenn sie jedoch die Ursache für die eine Erhebung verstehen würden, würden sie natürlich auch den Grund für die andere verstehen. In der Regel wird übersehen, daß der Mond die Erde genauso anzieht wie das Meer und daß der *Unterschied* zwischen den beiden Kräften entscheidend ist.

Betrachten wir die Himmelskörper P und Q, die als annähernd kugelförmig angesehen werden können (Abb. 21). Der Abstand zwischen ihren Mittelpunkten sei R, und der Radius von P sei r.

Die mittlere von Q auf jede Masseneinheit von P ausgeübte Kraft ist gleich dem Betrag dieser Kraft im Zentrum O,

$$A_O = G\frac{M_Q}{R^2}.$$

Dabei ist M_Q die Masse von Q und G die Gravitationskonstante.

Auf die Masseneinheit im Punkt a wirkt die Anziehungskraft

$$A_a = G\frac{M_Q}{(R-r)^2} = A_O\left(1+\frac{2r}{R}\right).$$

Dabei haben wir den Bruch in eine Taylorreihe entwickelt und angenommen, daß r^2

gegenüber R^2 vernachlässigbar klein ist.

Auf diese Weise sehen wir, daß die Masseneinheit bei a von Q mit einer Kraft angezogen wird, die um den Faktor $2A_O\frac{r}{R}$ vom Mittelwert abweicht und radial nach außen wirkt. Diese Abweichung können wir eine Gezeitenkraft nennen.

Entsprechend gilt in b

$$A_b = A_O\left(1 - \frac{2r}{R}\right).$$

Deshalb wirkt hier eine betragsmäßig gleich große Gezeitenkraft, die auch nach außen gerichtet ist, da A_b kleiner ist als A_O.

Die Kraft auf die Masseneinheit in c kann zerlegt werden in eine Komponente parallel zur Verbindungslinie zwischen den Mittelpunkten von P und Q, die in der angenommenen Annäherung gleich A_O ist, und eine Komponente in Richtung zum Mittelpunkt O, die gleich $A_O\frac{r}{R}$ ist. Wir können also sagen, daß in c und im gegenüberliegenden Punkt nach innen gerichtete Gezeitenkräfte wirken.

Weil sich die Kräfte an verschiedenen Stellen des Umfanges unterscheiden, wird der eigentlich kugelförmige Körper leicht verformt mit Ausbuchtungen in a und b. Die Rotation und die Bewegung auf der Umlaufbahn verursachen einen Umlauf der Flutberge auf der Oberfläche und damit die Gezeiten. An den dazwischenliegenden Punkten sind die Gezeitenkräfte nicht radial, und genaugenommen bewirken ihre horizontalen Komponenten Ebbe und Flut. Trägheit, Reibung und lokale Störungen verursachen Zeitverschiebungen, so daß Hochwasser in einem Punkt immer eine gewisse Zeit, nachdem Q über ihm bzw. unter ihm vorbeigekommen ist, auftritt.

Unsere Gezeiten werden von Sonne und Mond gemeinsam verursacht. Die vom Mond verursachten Gezeitenkräfte sind mehr als doppelt so groß wie die von der Sonne hervorgerufenen, und da die Tidenhöhe stärker als proportional mit der Gezeitenkraft zunimmt, bewirkt der Mond einen etwa sechsfach größeren Effekt als die Sonne. Da die Umlaufbewegung des Mondes im selben Sinn läuft wie die Erdrotation, haben die Intervalle zwischen zwei Tiden eine Länge von etwa 12.5 Stunden. Die Sonne allein würde Tiden in Intervallen von zwölf Stunden erzeugen. Im Endeffekt verursacht sie eine periodische Veränderung der Tidenhöhe. Es ist leicht einzusehen, daß die größte Gezeitenkraft dann entsteht, wenn Erde, Sonne und Mond bei Voll- oder Neumond in einer Linie stehen. Die größte Tidenhöhe entsteht dann ein oder zwei Tage später (Springflut). Ähnlich folgen die kleinsten Amplituden (Nippfluten) dem ersten oder dem letzten Viertel.

Einen nützlichen Artikel zu diesem Thema kann man in der Encyclopaedia Britannica finden.

Anhang 5: Typische Literaturzitate

Die Schwierigkeiten, auf die Studenten bei der Einführung des Kraftbegriffes stoßen, sollen anhand einiger Zitate aus Lehrbüchern veranschaulicht werden:

> *... Statik, die Lehre von den Kräften auf Körper in Ruhe ... Dynamik, die Lehre von den Bewegungen der Körper und von den Kräften, die diese Bewegung hervorrufen ...*
>
> (Murphy 1971)

Korrekterweise beschäftigt sich die Statik mit Körpern im Gleichgewicht, d. h. mit Körpern, die nicht beschleunigt sind, und die Dynamik mit Kräften, die Bewegungs*änderungen* hervorrufen. Die falsche Vorstellung, Ruhe sei der natürliche Zustand, Bewegung dagegen müsse erzwungen werden, wird in einführenden Lehrbüchern und im Anfangsunterricht oft implizit vermittelt.

> *Ein Körper der Masse m kg befindet sich auf einer horizontalen Fläche, die sich mit einer Beschleunigung von a ms^{-2} nach oben bewegt. Wie groß ist die Reaktionskraft (the reaction) zwischen Körper und Fläche?*
>
> *Die Reaktionskraft zwischen Körper und Fläche betrage F N. Da sich der Körper mit einer Beschleunigung nach oben bewegt, muß R größer sein als das Gewicht mg ...*
>
> *Wenn sich die Fläche mit der Beschleunigung a nach unten bewegt, muß das Gewicht mg größer als R sein ...*
>
> (Humphrey and Topping 1971)

In diesem Zitat werden Bewegung und Beschleunigung durcheinandergeworfen. Es ist völlig unwichtig, ob sich die Fläche nach oben oder unten bewegt oder ob sie sich in Ruhe befindet. Es kommt einzig und allein auf die Richtung der Beschleunigung an. Auffällig ist außerdem die Uneinheitlichkeit in der Bedeutung der Symbole, die zuerst für Zahlen stehen, dann aber für physikalische Größen. Diese Inkosequenz ist weit verbreitet.

> *Die Erfahrung zeigt uns, daß alle Körper senkrecht nach unten fallen, mit anderen Worten: Die Gravitationskraft der Erde ist zum Erdmittelpunkt gerichtet.*
>
> (Schools Council 1974)

Wörtlich genommen ist diese Aussage absurd, aber vermutlich ist gemeint, daß Körper in der Abwesenheit von Störungen aus der „Ruhe“ senkrecht nach unten zu fallen beginnen. In Wirklichkeit hat die Erfahrung in den letzten dreihundert Jahren gezeigt, daß fallende Körper nach Osten von der (durch ein Lot definierten) Vertikalen abweichen. Ein Beobachter, der an der Erdrotation nicht teilnimmt, würde beobachten, daß sich der fallende Körper entlang des Bogens einer Ellipse bewegt, in deren entfernteren Brennpunkt sich der Erdmittelpunkt befindet. An diesem Zitat sind jedoch die technischen Ungenauigkeiten weniger wichtig als die impliziten Annahmen über Kräfte. Offensichtlich soll der Leser glauben, die Körper bewegten sich in Richtung der wirkenden Kraft.

Kräfte erzeugen Bewegungen von Körpern oder versuchen sie zu erzeugen (produce or tend to produce). Wenn man gegen eine Mauer stößt, wird man keine Bewegung hervorrufen ... Aber wenn man mit einem Bulldozer stößt, erzeugt man Bewegung!

(Hay and Hughes 1972)

Bemerkenswert an diesem Zitat ist die Vorstellung, daß Kräfte Bewegung hervorrufen oder „versuchen hervorzurufen". Es wird übersehen, daß bei einem Stoß gegen eine Wand in der Regel entgegengesetzt gerichtete Kräfte vom Boden auf die Wand ausgeübt werden. Nur wenn das System so stark verformt wird, daß das Fundament bricht, gibt es eine resultierende Kraft auf die Wand.

Die wirkende Kraft (applied force) versucht, den Bewegungswiderstand zu überwinden. Merke: Der Bewegungswiderstand ist eine Reaktionskraft*, die ebenso groß wie die wirkende Kraft ist, aber niemals größer.*

(Timings 1973)

Hier wird die Vorstellung einer „Reaktionskraft", die an demselben Körper angreift wie die „Aktionskraft", explizit ausgesprochen. Diese Vorstellung kommt auch in den folgenden Auszügen (von denen die ersten beiden Formulierungen des dritten Gesetzes darstellen) zum Ausdruck:

Zu jeder Aktionskraft (action) muß es eine gleich große und entgegengesetzt gerichtete Reaktionskraft (reaction) geben, um ein Gleichgewicht zu erreichen.

(Douglas and Crichton 1972)

Wenn ein Körper ruht oder sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, dann gibt es zu jeder wirkenden Kraft eine gleich große und entgegengesetzt gerichtete Kraft.

(Lovelace 1970)

Wenn sich zwei Kräfte im Gleichgewicht befinden, dann müssen sie gleich groß, entgegengesetzt gerichtet und collinear sein. Der Beweis dieses Prinzips ist im dritten Newtonschen Gesetz enthalten.

(Jenson and Chenoweth 1972)

Diese Beispiele verdeutlichen die Verwechslung zwischen erstem und drittem Newtonschen Gesetz. Die zuletzt zitierten Autoren erweitern diese Vorstellung auf scheinbare d'Alembert-Kräfte:

> *Die ersten beiden Newtonschen Gesetze behandeln Kräfte, die sich nicht im Gleichgewicht befinden (unbalanced forces). Diese Kräfte müssen von außen angreifen. Das dritte Gesetz dagegen fordert, daß es zu jeder Aktionskraft eine gleich große und entgegengesetzt gerichtete Reaktionskraft gibt. Daraus folgt, daß die Reaktionskraft zu einer äußeren Kraft oder Aktionskraft eine innere Kraft oder Reaktion sein muß. Dabei kann es sich nur um die Trägheit des Körpers handeln ...*

Diese Beschreibung läßt den entscheidenden Punkt aus, daß sich das dritte Gesetz auf Kräfte bezieht, die an verschiedenen Körpern angreifen. Deshalb wird in der Argumentation die reale Kraft auf einen anderen Körper weggelassen und stattdessen die d'Alembert-Kraft eingeführt (die hier mit der Trägheit selbst durcheinandergebracht wird),als handele es sich um eine reale Kraft im Sinne des dritten Gesetzes. Korrekt angewandt bedeuten innere Kräfte solche Kräfte, die von einem Teil eines Körpers auf einen anderen ausgeübt werden. Hier aber werden sie so verwendet, als wirkten sie auf den Körper als ganzes.

Literaturverzeichnis

[1] Douglas, I. J. and Crichton, J. D. G. 1972. *Engineering Mechanics.* Edinburgh: Oliver and Boyd

[2] Den Hartog, J. P. 1948. *Mechanics.* New York: McGraw-Hill

[3] Elton, L. R. B. 1971. *Concepts of Classical Mechanics.* Maidenhead: McGraw-Hill

[4] Hay, G. A. and Hughes, D. 1972. *First-year Physics for Radiographers.* London: Bailliere Tindall

[5] Humphrey, D. and Topping, J. 1971. *Intermediate Mechanics, vol. I: Dynamics.* S. I. edn. London: Longman

[6] Jensen, A. and Chenoweth, H. H. 1972. *Applied Engineering Mechanics.* 3rd edn. New York: McGraw-Hill

[7] Lovelace, T. A. 1970. *Engineering Principles.* London: Nelson

[8] Mach, E. 1919. *The Science of Mechanics*, trans. T. J. McCormack. 4th edn. Chicago: Open Court Publishing Company

[9] Massey, B. S. 1970. *Mechanics of Fluids.* 2nd edn. London: Van Nostrand Reinhold Company

[10] Murphy, P. 1971. *Applied Mathematics Made Simple.* London: W. H. Allen

[11] Schools Council/Loughborough University of Technology. 1974-5. *Schools Council Engineering Science Project.* London and Basingstoke: Macmil- lan Education Ltd

[12] Timings, R. L. 1973. *Basic Engineering.* London: Longman

[13] Verne, J. 1865. *De la Terre à la Lune*

[14] Walker, J. D. l972. *Applied Mechanics.* 4th edn. London: English Universities Press

[15] Warren, J. W. 1965. *The Teaching of Physics.* London: Butterworths

[16] Warren, J. W. 1971a. *Circular motion.* Physics Education, vol. 6, p. 74

[17] Warren, J. W. 1971b. *Thinking quantitatively.* Physics Education, vol. 6, p. 238

[18] Warren, J. W. 1975. *Forces acting on a hose.* Phy.sics Education, vol. 9, p. 327