

Das 3. Newton'sche Gesetz und der physikalische Kraftbegriff

U. Backhaus

11. Juni 2001

So übernehmen die Kräfte die Rolle ... (einer) Art Geister, auf die man das Bewirken, das ja rätselhaft bleibt, schieben kann, gerade weil man sie nicht sieht und von ihnen eigentlich nichts weiß. ... Die Anziehung des Nagels (vom Magneten), dass er in Bewegung gesetzt wird, muss eine Ursache haben, das muss einer machen. Kräfte sind die verdinglichten Ursachen und die postulierten Täter. Man muss sie erfinden und verdinglichen, weil der Magnet selbst, der 'Gegenstand', so sichtbar passiv herumliegt. Der ist sicher nicht der Täter! (Jung et al. 1981 [5])

Inhaltsverzeichnis

1	Lernschwierigkeiten beim Kraftbegriff	2
2	Das Wechselwirkungsprinzip	3
3	Mechanische Wechselwirkungen	4
4	Trägheitskräfte	5
5	Schlussfolgerungen	6
6	Bilder	9

1 Lernschwierigkeiten beim Kraftbegriff

Die Schwierigkeiten, die Lernende mit dem Kraftbegriff haben, sind seit langem bekannt. Jung beschrieb sie bereits 1976 und gab seitdem mit seinen Mitarbeitern und Nachfolgern immer wieder Anregungen zu ihrer Lösung. So machte er 1981 auf ein wunderbares Buch von Warren (*Warren 1979* [12]) aufmerksam, das alle fachlichen Probleme und die Schwierigkeiten von Studenten mit dem Newton'schen Kraftbegriff mustergültig beschrieb.

Seitdem hat es immer wieder didaktische Diskussionen über den Kraftbegriff gegeben, und es sind einige alternative Vorschläge zu seiner Einführung gemacht worden (z.B. *Wiesner et al. 1994* [13], *Muckenfuß 1988* [7], *Backhaus et al. 1996* [3] und [4], *Wodzinski 1996* [15]). Diese Diskussionen haben jedoch kaum einen Einfluss auf die Schulbuchliteratur gehabt und auch an den Lernschwierigkeiten der Schüler (und Studenten!) nur wenig geändert.

Diese Lernschwierigkeiten beruhen u.a. darauf, dass das Wort „Kraft“ auch in der Alltagssprache viel verwendet wird, dass aber seine Bedeutung selbst dort, wo eine physikalische Interpretation nahe liegt, fast nichts mit dem physikalischen Kraftbegriff zu tun hat. Der Bedeutungsinhalt liegt vielmehr deutlich näher beim physikalischen Energiebegriff ([3]). So haben umfangreiche Untersuchungen (z.B. [8], [14]) immer wieder gezeigt, dass die Vorstellungen von Schülern nicht scharf genug sind, um zwischen Kraft- und Energiebegriff zu unterscheiden:

- Kräfte werden als eine *Eigenschaft von Körpern* betrachtet.

Die Ursache ... ist deine Muskelkraft..

Stelle fest, wer in deiner Klasse die größte Kraft zum Dehnen hat.

- Kräfte werden als ein *Kennzeichen von Aktivität* angesehen und im Allgemeinen nur Lebewesen oder zumindest bewegten Körpern zugeschrieben.

Die Kraft kann von Menschen oder Tieren, aber auch von Gegenständen kommen. Wir sprechen von der Kraft des Windes

(Maschinen) verwenden die Kraft von Tieren, aber auch den Wind, das Wasser und die Sonne.

- Kräfte können (z.B. mit Hilfe von Treibriemen) *übertragen* und (auf Kosten eines längeren Weges) *gespart* werden.

Wenn man Kraft spart, muß man einen größeren Weg einsetzen.

Kraftersparnis gibt es nicht umsonst.

Die eingestreuten Zitate zeigen, dass selbst neuere Schulbücher diese Schwierigkeiten unfreiwillig verstärken. In vielen dieser Sätze kann offensichtlich das Wort „Kraft“ durch das Wort „Energie“ ersetzt werden, ohne dass die Aussagen dadurch falsch würden (einige werden im Gegenteil sogar richtiger!).

Im Gegensatz zum Alltagsgebrauch des Wortes ist der physikalische Kraftbegriff durch die folgende Charakteristika gekennzeichnet:

- Kräfte sind *keine Eigenschaften von Körpern*. Sie beschreiben vielmehr einen gewissen Aspekt von Wechselwirkungen zwischen Körpern.
- Das Ausüben von Kräften ist *kein Anzeichen von Aktivität*: Auch tote und unbewegte Körper üben Kräfte aus – ebenso oft und häufig sehr viel größere!
- Bei Wechselwirkungen sind die gegenseitigen Kräfte *immer gleich groß* (auch bei den herkömmlichen Situationen zum Kräftevergleich!). Der Kraftbegriff ist deshalb völlig *symmetrisch*.

Die Fehlvorstellungen über den physikalischen Kraftbegriff, die auf diesen Diskrepanzen beruhen, werden auch durch Unterricht über Mechanik kaum beeinflusst. Trotzdem gilt anscheinend die Kraft weiterhin als einfacher Begriff, zumindest als einfacher als die Energie. Sie steht deshalb i.d.R. ganz am Anfang schulischen Mechanikunterrichts.

2 Das Wechselwirkungsprinzip

Die drei Newton'schen Gesetze der Mechanik legen fest, was in der Physik mit dem Wort „Kraft“ gemeint ist. Nach diesen Gesetzen

- kann der Bewegungszustand eines Körpers nur *von außen* geändert werden (Trägheitssatz),
- wird ein Körper durch *von anderen Körpern* auf ihn ausgeübte Kräfte beschleunigt (Grundgleichung der Mechanik) und
- kann ein Körper nur dann eine Kraft auf einen anderen ausüben, wenn jener umgekehrt auch eine Kraft auf diesen ausübt (Wechselwirkungsprinzip). In Newtons Worten:

Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wirkungen zweier Körper auf einander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung.

Auf das Beispiel von Magnet und Eisenkörper angewendet, das häufig zur Erläuterung des Wechselwirkungsprinzips angewendet wird, heißt das: Experimente zeigen, dass *Magnete und Eisen sich gegenseitig anziehen*.

Die Sätze machen deutlich, dass mit dem physikalischen Kraftbegriff nicht eine Eigenschaft eines Körpers beschrieben wird, sondern dass er eine *symmetrische Beziehung* zwischen zwei Körpern quantitativ erfasst. Insofern kann das 3. Newton'sche Gesetz als konstitutiv für den physikalischen Kraftbegriff angesehen werden. Es rückt die Wechselwirkung zwischen zwei Körpern in den Mittelpunkt – und es grenzt den physikalischen Kraftbegriff von Beginn an deutlich gegen den Alltagsbegriff ab.

In der Mechanik beeinflussen sich Körper immer gegenseitig - sie wechselwirken miteinander. Trotzdem interessiert man sich oft nur für die Folgen auf einen dieser beiden Körper. Man zerlegt das Geschehen deshalb gedanklich in zwei Teile. Dafür wird der Kraftbegriff verwendet, z.B. in der folgenden Formulierung:

Immer wenn Körper A eine Kraft auf einen Körper B ausübt, übt B auch eine Kraft auf A aus. . . .

(oder konkret: Wenn ein Magnet einen Körper aus Eisen anzieht, dann zieht dieser auch den Magneten an.)

Auch diese Formulierung des Gesetzes ist noch weitgehend symmetrisch¹. Sie beinhaltet *keinerlei zeitliche Reihenfolge* (zuerst Körper A, dann Körper B) und *keine Aussage über Ursache und Wirkung* (Actio und Reactio). Die übliche Verwendung des Kraftbegriffes verbirgt jedoch diese Symmetrie in unterschiedlichem Maße: Die Sprechweisen

- Magnet und Eisenkörper üben eine Kraft aufeinander aus.
- Der Magnet übt auf den Eisenkörper eine Kraft aus.
- Auf den Eisenkörper wirkt eine Kraft.

konzentrieren ihre Aufmerksamkeit zunehmend auf den Eisenkörper. Sie suggerieren dadurch eine Unsymmetrie, die dem physikalischen Kraftbegriff nicht eigen ist².

3 Mechanische Wechselwirkungen

Bei der Einführung des Kraftbegriffes geht es also um die Untersuchung von Wechselwirkungen. Was ist damit gemeint? Einseitige und gegenseitige Beeinflussung gibt es in vielen Bereichen des täglichen Lebens und der Umwelt, z.B. bei

- der Beleuchtung eines Gegenstandes mit einer Lampe,
- dem Erröten unter dem Blick eines geliebten Menschen oder
- der psychologischen Motivation oder Unterdrückung eines Menschen.

In der Mechanik geht es dagegen um eine ganz bestimmte Art von Wechselwirkung, nämlich um Anziehung (Bild 1), Abstoßung (Bild 2) und Reibung (Bild 3) zwischen verschiedenen physikalischen Körpern, bei denen – auf beiden Seiten! – Beschleunigungen und/oder Verformungen auftreten (Bild 4). Diese Effekte treten i.d.R. bei direktem Kontakt zwischen Körpern auf (Bilder 2 und 3). Die Körper können sich aber auch über Distanzen beeinflussen (z.B. mit Stangen, Seilen, Treibriemen (Bild 1)) – und sogar ohne Hilfsmittel (wie bei der magnetischen Anziehung zwischen Eisen und Magneten und bei der Gravitation zwischen Erde und Mond).

Beschleunigung eines Körpers und seine Verformung treten nicht immer gleichzeitig auf:

¹Die perfekte Symmetrie der zweiten Newton'schen Formulierung ist allerdings bereits verloren gegangen: Dass diese Formulierung eine gewisse Suggestivwirkung besitzt bemerkt man z.B. daran, dass nirgendwo für Magnete und Eisen umgekehrt formuliert wird („Wenn Eisen einen Magneten anzieht, dann zieht auch der Magnet das Eisen an.“). Wie leicht in die Formulierungen Andeutungen von *Ursache* und/oder *Aktivität* einfließen macht der folgende Satz deutlich: „Offensichtlich zieht der Magnet mit einer Kraft den Eisenkörper an, und gleichzeitig wirkt der Eisenkörper mit einer Kraft auf den Magneten *zurück*“: Offensichtlich *reagiert* der Eisenkörper auf eine Aktivität des Magneten („actio = reactio“).

²Damit soll nicht behauptet werden, die Beziehung zwischen Magnet und Eisenkörper sei völlig symmetrisch. Nur: *Der Kraftbegriff erfasst diese Unsymmetrie nicht!*

- Verformungen treten immer auf, wenn sich die Körper über Punkte (z.B. durch Seile oder Haken (Bilder 1, 2 und 4)) oder Flächen (z.B. bei der Reibung (Bild 3; Achtung: Die Verformung des Autos ist falsch gezeichnet!)) beeinflussen. Bei Volumenkräften wie der Gravitation jedoch können Körper beschleunigt werden, ohne dabei verformt zu werden: Ein fallender Regentropfen ist (nahezu) perfekt rund.
- Trotz offensichtlicher Wechselwirkung wird ein Körper nicht immer beschleunigt (Bild 5). In solchen Fällen zeigt sich jedoch immer, dass er mit (mindestens) einem weiteren Körper wechselwirkt: Eins der Kinder in Bild 5 muss sich am Eis oder an einer Bande festhalten. Die beiden beschleunigenden (nicht die verformenden) Einflüsse kompensieren sich dann: *Kräftegleichgewicht!*

Die auftretenden Effekte sind zwar i.a. bei den beteiligten Körpern unterschiedlich stark ausgeprägt (Bild 6). Aber: *Immer wenn der Effekt bei einem der Partner größer wird, dann wird er es auch beim anderen.* Die Größe der Beschleunigung und/oder der Verformung eines beteiligten Körpers ist also ein Maß für die *Intensität* oder *Heftigkeit* der Wechselwirkung.

4 Trägheitskräfte

Es scheint Situationen zu geben, in denen Kräfte auftreten, ohne dass eine Wechselwirkung zwischen physikalischen Körpern zugrunde läge:

1. Wird nicht der Fahrer eines startenden Autos in die Rückenlehne seines Sitzes gepresst, ohne dass er von irgendwem oder irgend etwas gezogen oder gedrückt würde?
2. Wird man nicht in einem nach unten losfahrenden Aufzug viel leichter, ohne dass man von jemandem nach oben gezogen würde?
3. Wird man nicht in einem Kurve fahrenden Bus zur Seite geschleudert, aber niemand stößt einen?

Die Beispiele sind leichter zu durchschauen, wenn man zunächst nicht sich selbst, sondern einen anderen Menschen oder, noch besser, einen Gegenstand *von außen* betrachtet, Physiker würden sagen, den Vorgang in einem *Inertialsystem* beschreibt. Dann erweisen sich alle obigen Beispiele als Vorgänge, bei denen ein Körper beschleunigt wird:

1. Der Fahrer des Autos wird schneller. Dazu ist eine Kraft erforderlich, die die Rückenlehne auf ihn ausübt.
2. Der Insasse eines ruhenden oder mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Aufzuges hat trotz der Schwerkraft eine konstante Geschwindigkeit: Der Boden drückt ihn ebenso stark nach oben, wie die Erde ihn nach unten zieht. Im losfahrenden Aufzug bewegt er sich beschleunigt nach unten: Der Boden drückt ihn nicht so stark wie üblich nach oben.

3. Damit der Insasse des Busses mit um die Kurve kommt, muss er nach innen gezogen oder gedrückt werden. Wenn das nicht durch den Boden oder eine Haltestange geschieht, bewegt er sich geradeaus weiter, bis er von der Außenwand des Busses in die Kurve gezwungen wird (Bild 7).

Die Schwierigkeiten rühren daher, dass man geneigt ist, die eigene Bewegung relativ zu der unmittelbar wahrgenommenen Umgebung zu erfahren und zu beschreiben. Ist diese beschleunigt, und man selbst mit ihr, nimmt man sich als ruhend wahr, obwohl man tatsächlich beschleunigt wird. Für diese Beschleunigung ist die Wechselwirkung mit einem anderen Körper erforderlich: Der Autofahrer spürt deshalb einen Druck im Rücken. Da er trotz dieser Kraft (glaubt er) nicht beschleunigt wird, schließt er auf eine Kraft, die ihn „in die Lehne drückt“.

Etwas formaler: Wenn auf einen Körper eine Kraft wirkt, dann wird er (in einem Inertialsystem) beschleunigt: $F = ma$. Beschreibt man den Vorgang jedoch im mitbeschleunigten Bezugssystem, dann bleibt der Körper – trotz (z.B. anhand der verformten Rückenlehne) nachweisbarer äußerer Einwirkung – in Ruhe: Das 2. Newton'sche Gesetz gilt nicht im beschleunigten Bezugssystem! Wenn man aber an diesem Gesetz festhalten will, dann kann man es formal retten, indem man die Gleichung umschreibt und den zusätzlichen Term auf der linken Seite auch als Kraft *bezeichnet*:

$$F - ma = 0 \quad \text{oder} \quad F + F_{tr} = 0 \quad \text{mit} \quad F_{tr} = -ma.$$

Auf diese Weise ist das 2. Newton'sche Gesetz wieder erfüllt: Die Gesamtkraft auf den ruhenden Körper ist null. Man muss dafür aber in Kauf nehmen, dass für F_{tr} das 3. Newton'sche Gesetz nicht gilt: F_{tr} beschreibt eben keine physikalische Wechselwirkung! Die so formal eingeführte Kraft wird aus diesem Grund als *Scheinkraft*³ bezeichnet.

Schwierigkeiten mit Scheinkräften treten insbesondere dann auf, wenn sie in Bildern und Beschreibungen benutzt werden, ohne dass deutlich gemacht wird, dass der Vorgang in einem beschleunigten Bezugssystem beschrieben wird. So wird z.B. an einen Körper auf einer Kreisbahn neben der auf einer realen physikalischen Wechselwirkung beruhenden Zentripetalkraft die so genannte „Zentrifugalkraft“ angetragen und gleichzeitig die Kreisbahn eingezeichnet. Die Zentrifugalkraft ist jedoch eine Scheinkraft im obigen Sinne. Es gibt sie nur im mitrotierenden Bezugssystem. *In diesem Bezugssystem gibt es keine Kreisbahn – der Körper ist in Ruhe!*⁴ Selbst einem an dieser Stelle sonst so gründlichen Buch wie [9] unterläuft dieser Fehler (Bild ??): Im rechten Bild sollten statt an dem Körper auf der Scheibe Kreise an Körper außerhalb angetragen werden!

5 Schlussfolgerungen

Es sollte deutlich werden, dass die Kraft in der Physik ein komplexer Begriff ist, der fast nichts mit der Verwendung des Wortes in der Alltagssprache zu tun hat. Insofern ist ihre Einführung auf der ersten Seite des Mechanikkapitels eines Schulbuches, insbesondere

³Diese Terme werden oft auch als *Trägheitskräfte* bezeichnet. Dieser Ausdruck wird jedoch in unterschiedlichen Bedeutungen verwendet.

⁴Zur Problematik der Scheinkräfte bei gleichförmigen Kreisbewegungen siehe auch den Aufsatz von Wagner und Dupré ([10]) und die daran sich anschließende Diskussion ([2], [11]).

aber die dabei oft verwendete Assoziation mit der eigenen (!) Muskelkraft, irreführend. Der Kraftbegriff hat sich aus vielfältigen Erfahrungen und in einem sehr langwierigen schwierigen Prozess entwickelt. Wenn man auch in der Schule diesen Prozess in der Regel nicht selbst zum Unterrichtsgegenstand machen wird, so sollten doch zunächst die wichtigsten zugrunde liegenden Erfahrungen thematisiert und aus physikalischer Sicht beschrieben werden⁵. Das erfordert einige Zeit, in der allerdings sehr viel über die Welt und die Art, wie sie durch die Physik beschrieben wird, gelernt werden kann.

Durch Betonung des Wechselwirkungsprinzips wird versucht, eine deutliche Abgrenzung gegenüber dem Alltagsbegriff zu erreichen. Zusätzlich wird dadurch der Unterschied zum Energiebegriff verdeutlicht, mit dem gerade der unsymmetrische Aspekt der Wechselwirkung erfasst wird: Der „aktive“ Partner gibt Energie an den „passiv(er)en“ ab.

Bei den meisten in der Schule behandelten Vorgängen besteht keine Notwendigkeit, Scheinkräfte wie die „Fliehkraft“ einzuführen. Bei Beschleunigungsvorgängen und entsprechenden Schülervorschlägen kann stattdessen deutlich gemacht werden, dass auch in solchen Fällen die Beschreibung in einem Inertialsystem am einfachsten und elegantesten ist.

Literatur

- [1] U. Backhaus: *Die Kraft ist ein Zwillingsspaar – Beispiele zur Einführung des Wechselwirkungsprinzips in der Schule*, Naturwissenschaften im Unterricht/Physik (in diesem Heft)
- [2] U. Backhaus, M. Frenzel: *Anmerkungen zu [10]*, MNU 51/8, 503 (1998)
- [3] U. Backhaus, M. Frenzel: *Kraft und Energie – Zwei konkurrierende Größen bei der Einführung in die Mechanik?*, MNU 49/4, 241 (1996)
- [4] U. Backhaus, H. J. Schlichting, L. Schön: *Physikbuch 7/8*, Diesterweg, Frankfurt 1995
- [5] W. Jung, H. Wiesner, *Verständnisschwierigkeiten beim physikalischen Kraftbegriff – Eine Untersuchung zum Kraftbegriff bei Physikstudenten*, Physik und Didaktik **2**, 111 (1981)
- [6] K. Liebers u.a.: *Physik plus, Gymnasium Klassen 7/8, Sachsen-Anhalt*, Volk und Wissen, Berlin 2000
- [7] H. Muckenfuß: *Bewegungsarten von Körpern als Zugang zum Kraftbegriff*, NiU-PC **36/34**, 11 (1988)
- [8] D. Nachtigall: *Vorstellungen im Bereich der Mechanik*, Naturwissenschaften im Unterricht, Physik/Chemie **34/13**, 16 (1986)
- [9] *Tipler, Physik*, Spektrum Verlag, Heidelberg

⁵Einige Beispiele dazu werden an anderer Stelle in diesem Heft gegeben ([1]).

- [10] B. Wagner, T. Dupr'e: *Kräfte bei der Kreisbewegung – Zur Didaktik der Trägheitskräfte*, MNU 49/7, 423 (1996)
- [11] B. Wagner, T. Dupré: *Antwort auf [2]*, MNU 51/8, 504 (1998)
- [12] J. W. Warren: *Understanding Force*, John Murray: London 1979
- [13] H. Wiesner: *Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik. Schülervorstellungen, Lernschwierigkeiten und didaktische Folgerungen.*, Physik in der Schule 32(4), 122 (1994)
- [14] K. Weber, *Schwierigkeiten beim Erlernen der Newtonschen Mechanik*, Physik in der Schule 29/4, 122 (1991)
- [15] R. Wodzinski, *Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht*, LIT Verlag: Münster 1996

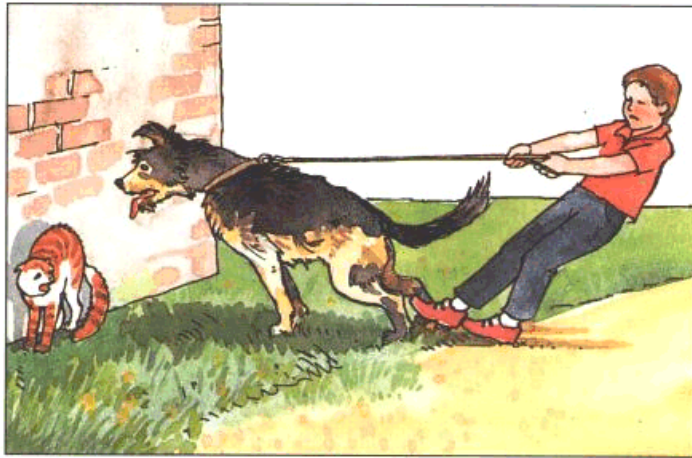


Abbildung 1: Wer zieht hier wen? (aus [4])

6 Bilder



Abbildung 2: Wechselwirkung zwischen Ball und Kopf (aus [4])

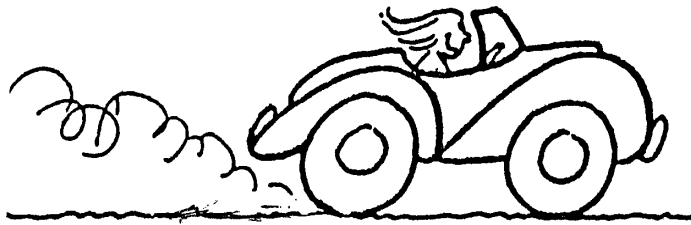


Abbildung 3: Wer setzt das Auto in Bewegung?



Abbildung 4: Gewichtheber und Gewicht verformen sich gegenseitig. (aus [4])

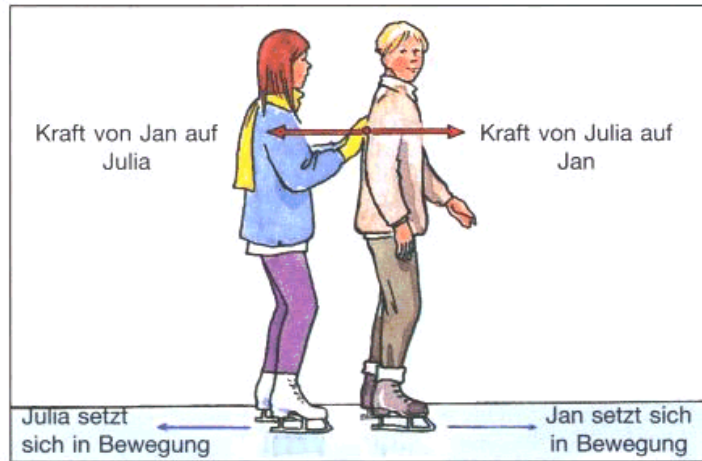


Abbildung 5: Beide Kinder üben eine Kraft aufeinander aus. (aus [4])

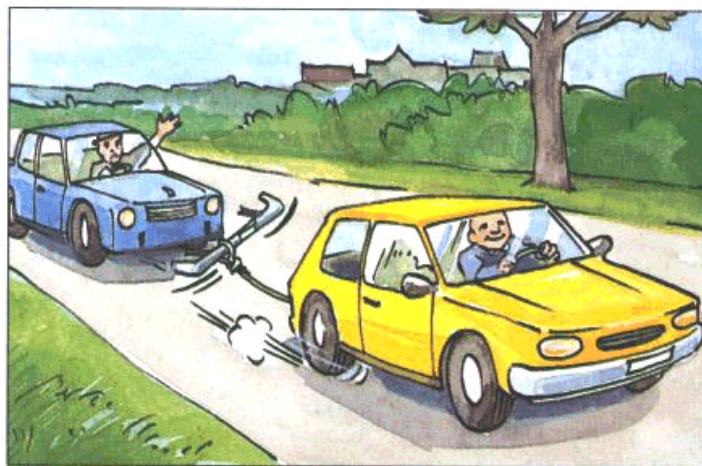


Abbildung 6: Abschleppen darf man nicht zu „heftig“. (aus [4])

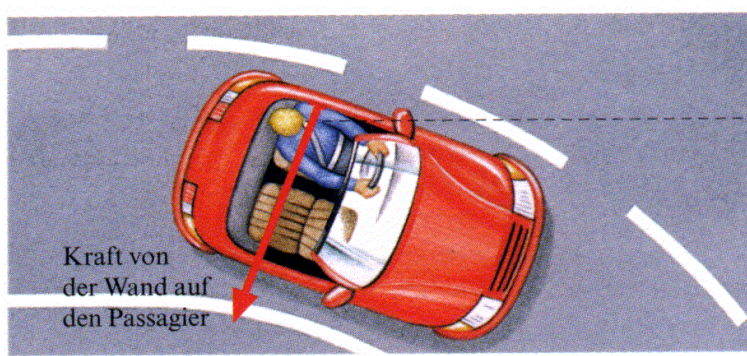


Abbildung 7: Der Fahrer wird um die Kurve gedrückt. (aus [6])

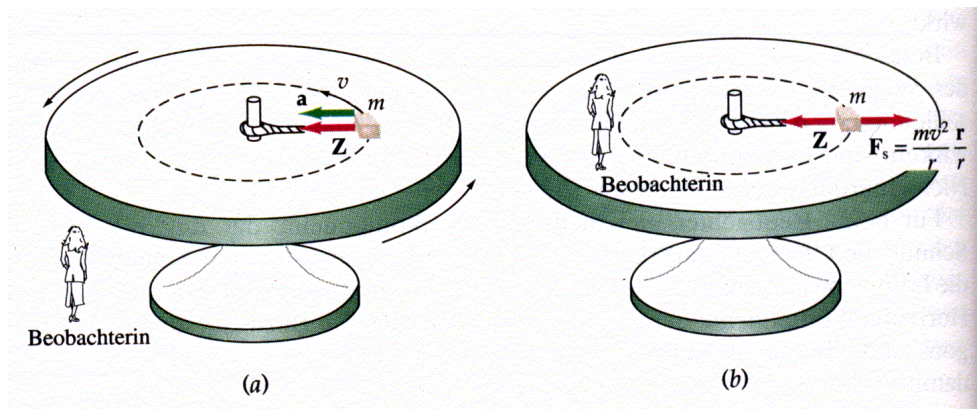


Abbildung 8: Scheinkraft bei der Beschreibung einer Kreisbewegung im mitrotierenden Bezugssystem (aus [9])