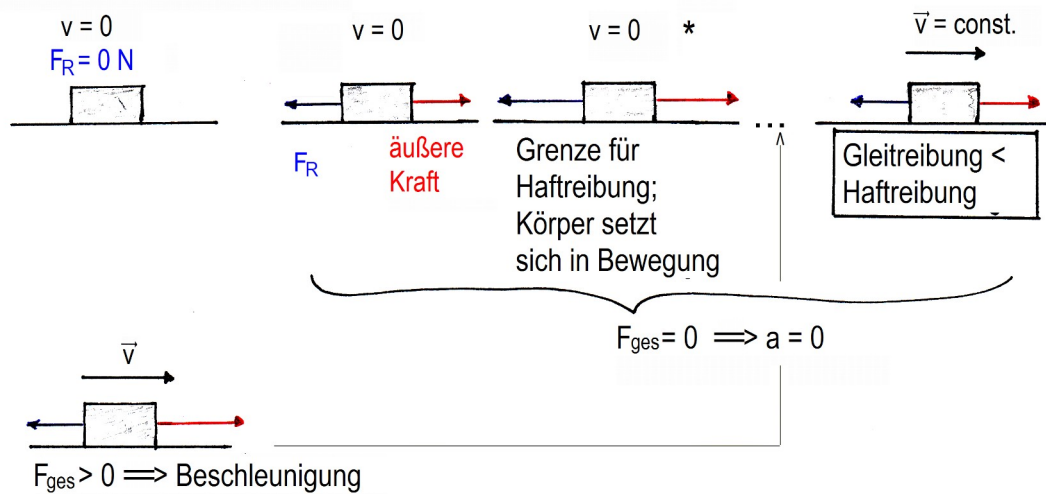


Reibungskraft F_R

Reibung zwischen Festkörpern

Versuch mit Holzklotz¹



Haft- und Gleitreibung werden durch Unregelmäßigkeiten der Oberflächen hervorgerufen.² Die maximale Haftreibung (*) ist größer als die Gleitreibung.

Die Rollreibung ist nochmals deutlich geringer. Sie wird durch die Verformung („Walken“) von Rad und Unterlage hervorgerufen.³

Beachte: Die Reibung ist von der Geschwindigkeit und



- 1 Diesen Versuch kannst du auch selbst zu Hause machen:
Statt eines Holzklotzes kann man auch ein schweres Buch (eine volle Saftpackung ...) verwenden.
Die einzelnen Schritte, wie sie oben gezeichnet, sind:
 - Wenn das Buch einfach daliegt, und man es nicht zu verschieben versucht, gibt es auch keine Reibungskraft.
 - Wenn man das Buch leicht nach rechts drückt, setzt es sich nicht in Bewegung. Die Haftreibungskraft wirkt mit einer gleich starken Gegenkraft dagegen.
 - Jetzt drückt man etwas fester dagegen. Es kommt der Moment, wo die Haftreibung es nicht mehr schafft, dagegen zu halten. Das Buch setzt sich in Bewegung. Man spürt, dass plötzlich die Gegenkraft etwas geringer geworden ist. Das ist die ...
 - ... Gleitreibung(kraft). Zum Aufrechterhalten der gleichförmigen Bewegung des Buches brauchst du eine etwas geringere Kraft als zum Wegschieben. (Denk an ein anderes Beispiel: Du willst einen schweren Schrank verschieben. Man weiß: Am schwersten ist es, ihn einmal in Bewegung zu setzen. Wenn er einmal gleitet, geht es etwas einfacher.)
 - [Bild in der 2. Zeile:] Wenn man das Buch beschleunigen will, muss man stärker anschieben als die Gleitreibung. Was der rote Vektor länger als der blaue ist, bleibt als Gesamtkraft übrig und ergibt nach $F = m \cdot a$ eine Beschleunigung.
- 2 Wenn man die Oberflächen der Unterlage und des Körpers mikroskopisch ansieht, so erkennt man, dass diese alles andere als flach sind. Sie sind rau und verzahnen sich. Stell dir das so vor:
bildagentur.panthermedia.net/aehnliche/medien/1100747/
- 3 Im Bild siehst du dieses Walken. (Schnittzeichnung: Das Grüne ist der Reifen.) Man kann es fast an jedem Fahrrad gut beobachten. Denn die meisten Leute pumpen ihr Rad nämlich nicht geschickt auf. Merke: Die Rollreibung steigt massiv, wenn der Reifen nur schlapp aufgepumpt ist. Das Fahren ist dann viel schwerer. Pumpe dein Rad immer gut auf! Probier's aus: Du merkst den Unterschied definitiv. (Am besten mit schmalen Reifen. Wenn man diese schlapp aufpumpt, ist der Unterschied noch krasser.) Es ist klar: Wenn du dein Fahrrad schiebst, kostet das keine Mühe. Stell dir aber vor, du hast – zumindest hinten – einen katastrophalen Achter und das Rad blockiert. Das Schieben ist das mühsam bis

der Größe der Auflagefläche unabhängig. (Versuch: aufrechter, liegender Holzklotz → gleiche F_R)⁴

⇒ Bremskraft⁵ ist unabhängig von v !

Die Reibung ist nur von der Normalkraft⁶ und vom Material⁷ abhängig:

$$F_R = \mu \cdot F_N$$

μ ... („mü“) Reibungszahl s. Tabelle

Reibungszahlen ⁸	μ_H	μ_G	μ_R
Gummi auf Asphalt			
trocken	0,85	0,8	0,03
nass	0,55	0,5	
Glatteis		0,05	
Bremsbelag auf Stahl		0,45	
Stahl auf Stahl	0,3	0,2	0,003

Bsp.: PKW $m = 1000 \text{ kg}$ auf ebener Fahrbahn (trockener Asphalt)

$$F_N = F_G = m \cdot g \approx 10.000 \text{ N}^9$$

unmöglich! Die Gleitreibung ist sehr viel höher als die Rollreibung.

Bei der Eisenbahn verformt sich das Rad freilich fast nicht. Die Rollreibung ist dort viel geringer.

Allerdings gibt das Schotterbett nach. Wenn du das nächste Mal am Bahnsteig einen einfahrenden Zug (noch besser: einen vorbeifahrenden schweren Güterzug) siehst, schau auf die Gleise: Die geben erstaunlich viel nach! Im Video [youtube.com/watch?v=OvZ_x3JMoHM](https://www.youtube.com/watch?v=OvZ_x3JMoHM) kurz nach 47:48.

4 Erweitere den Versuch:

- Schiebe das Buch schneller: Du wirst merken, dass das nicht mehr Mühe kostet.
- Lege zwei gleiche Bücher übereinander oder beschwere das Buch mit einer Wasserflasche etc.: Du wirst merken, dass sich die Reibungskraft verdoppelt – sowohl Haft- als auch Gleitreibung.
- Wenn möglich, stelle das Buch auf und probiere es nochmals. Die Reibungskräfte werden nicht größer/kleiner.

5 Gott sei Dank gibt es Haftreibung! Sonst könnten wir nicht bremsen. Manchmal ist es ja wirklich so: auf Glatteis gibt es (fast) keine Haftreibung. Die Bremskraft ist also eine Haftreibungskraft und damit unabhängig von der Geschwindigkeit.

6 Erinnere dich an die Normalkraft, die wir bei der schiefen Ebene im Kapitel „Gleichgewicht von Kräften“ vor einigen Stunden gelernt haben. Nachsehen!

Allerdings machen wir es uns hier einfach: Wir werden uns fast immer in der Ebene bewegen. Und da ist die Normalkraft gleich die Gewichtskraft, also $F_N = F_G = m \cdot g$.

[Man soll aber nicht vergessen: Geht's bergab, ist F_N kleiner als F_G , und damit ist die Haftreibung, also die Bremskraft kleiner. Bergab ungünstig!]

7 Das Material haben wir noch gar nicht angesprochen. Probier's selbst aus: Leg das Buch auf eine andere Oberfläche oder nimm einen gleich schweren Gegenstand mit anderer Oberfläche. Du merkst sofort, dass sich die Reibungskräfte meist deutlich ändern.

8 H/G/R bedeuten Haft-/Gleit-/Rollreibung.

Das sind alles ungefähre Werte, weil es ja ganz vom konkreten Material abhängt. Du musst sie nicht auswendig wissen. Schau sie aber trotzdem an: Du siehst, dass die Rollreibung immer viel kleiner als die Haftreibung ist, die Gleitreibung nur ein wenig. Außerdem siehst du, dass Stahl auf Stahl (Eisenbahn!) nur eine ganz geringe Rollreibung hat, aber auch eine geringere Haftreibung, was beim Bremsen schlecht ist.

9 Wir erinnern uns: Wenn es eben ist, ist die Gewichtskraft F_G auch die Kraft, mit der ein Fahrzeug auf den Boden gedrückt wird (Normalkraft F_N). (Bei einer schiefen Ebene ist die Normalkraft geringer, aber das betrachten wir jetzt nicht.)

Bei der Reibung rechnen wir immer mit $g \approx 10 \text{ m/s}^2$, weil schon allein die μ -Werte ziemlich ungenau sind.

Rollreibung: $\mu_R = 0,03 \Rightarrow F_{R,R} = 0,03 \cdot F_N = 0,03 \cdot 10.000 = \underline{300 \text{ N}}$

Diese Kraft bewirkt – neben dem im Allgemeinen viel größeren Luftwiderstand – dass ein Fahrzeug ohne Antrieb irgendwann stehen bleibt.

Gleitreibung: $\mu_G = 0,8 \Rightarrow F_{R,G} = 0,8 \cdot F_N = 0,8 \cdot 10.000 = \underline{8000 \text{ N}}$

Gleitreibung gibt es bei blockierenden Rädern, also wenn man zu stark bremst.

Haftreibung: $\mu_H = 0,85 \Rightarrow F_{R,H} = 0,85 \cdot F_N = 0,85 \cdot 10.000 = \underline{8500 \text{ N}}$

maximal mögliche Haftreibung zum Beschleunigen und Bremsen
Man kann also mit dem Fahrzeug mit max. 8500 N beschleunigen oder bremsen.¹⁰

Mit dem 2. Newtonschen Gesetz ergibt sich:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{8500}{1000} = 8,5 \text{ m/s}^2 \approx \underline{31 \text{ km/h/s}}^{11}$$

Bei blockierenden und rutschenden Rädern stehen nur 8000 N (die Gleitreibung) zur Verfügung; außerdem ist der PKW nicht mehr steuerbar. → ABS¹²

Bsp.: blockierende Räder auf Glatteis, sonst wie oben.

$F_R = 0,05 \cdot 10.000 = 500 \text{ N}$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{500}{1000} = 0,5 \text{ m/s}^2 = \underline{1,8 \text{ km/h/s}}^{13}$$

Überlegung: Wozu ist „Allrad“ gut?

Beim PKW/LKW: Bremsen gehen immer auf alle Räder, angetrieben sind im allgemeinen nur 2 (PKW: meist vorne, LKW: meist hinten). Sind alle angetrieben, hat man mehr Haftreibung und man kann besser beschleunigen, vor allem aber auf rutschiger Straße (geringes μ_H) bergauf fahren.

¹⁰ Stell dir das jetzt so vor: Die Haftreibung brauchen wir nur zum Bremsen und Beschleunigen (und zum Kurvenfahren, aber das nur nebenbei). Beim Dahinrollen brauchen wir sie nicht. Auf eisglatter Fahrbahn – praktisch ohne Haftreibung – kann man ohne weiteres dahinrollen, aber eben nicht beschleunigen oder bremsen (oder lenken). Die Reifen sind nichts anderes als die Gummisohlen deiner Schuhe: Wenn du gehen willst, musst du Haftreibung haben. Man „nutzt“ diese im Allgemeinen nicht bis zur Grenze aus, außer auf glattem Schnee oder schlammigem Boden. Wenn man an die Grenze geht, rutscht man immer wieder weg, was unangenehm ist.

¹¹ Mehr kann man nicht bremsen oder beschleunigen. Wenn jemand meint, dass es mehr geht, passiert ihm beim Bremsen: Reifenblockade (ABS greift ein) / beim Beschleunigen: Räder drehen frei durch. ([youtube.com/watch?v=glcVFmz_Bq0](https://www.youtube.com/watch?v=glcVFmz_Bq0))

¹² Schau dir den alten, aber guten 3-min-Film [youtube.com/watch?v=9IgSeBsV9rM](https://www.youtube.com/watch?v=9IgSeBsV9rM) an!

¹³ Wir nehmen also an, ein Fahrzeug bremst auf Glatteis, die Räder blockieren. Man wird pro Sekunde um lediglich 1,8 km/h langsamer. Der Bremsweg wird sehr lang! (Übrigens: Selbst das ABS hilft da nur noch wenig; es gibt ja fast keine Haftung mehr.)