

## Reibung unter Zugzwang

Die Geometrie ineinander geschlagener Buchseiten verstärkt Reibungskräfte bei Zugbelastung.

#) Das Video findet sich unter [bit.ly/20VsERo](http://bit.ly/20VsERo)

+)  
www.discovery.com/  
tv-shows/mythbusters/  
videos/phone-book-fric-  
tion

Reibung zwischen Festkörpern hält die Welt um uns herum zusammen. Sie sorgt dafür, dass wir laufen können, dass Schraubverbindungen halten und dass Dünen nicht in sich zusammen fallen. Eine Reibungskraft  $F_R$  entsteht, wenn zwei Körper mit einer endlichen Normalkraft  $F_N$  gegeneinander drücken. Die Normalkraft heißt auch Last und hat unterschiedliche Ursprünge: Bei Schraubverbindungen wandelt die wendelförmige Geometrie die Kraft beim Verschrauben in Normal- und Axialkraft um. Bei trockenen Dünen entsteht die Normalkraft zwischen den Sandkörnern durch das Gewicht der weiter oben liegenden Körner. Wenn wir am Strand eine Burg aus feuchtem Sand bauen, bilden sich Kapillarbrücken zwischen den Körnern aus, die anziehend und daher wie Normalkräfte wirken.

Erste systematische Studien der Reibung hat bereits Leonardo da Vinci vor mehr als fünfhundert Jahren durchgeführt [1]. Etwa zweihundert Jahre später formulierte Amontons die mathematische Formel  $F_R = \mu \cdot F_N$ . Reibungskraft  $F_R$  und Normalkraft  $F_N$  sind über den Reibungskoeffizienten  $\mu$  miteinander verknüpft – diese Formel begegnet uns bereits in der Schule. Das Erstaunliche am Amontonschen Gesetz ist, dass die Reibungskraft nicht von der scheinbar kontaktierenden Fläche abhängt. Heute wissen wir, dass dies auf mikroskopische Oberflächenrauigkeit zurückzuführen ist [2]: Lediglich ein paar Rauheitsspitzen der kontaktie-

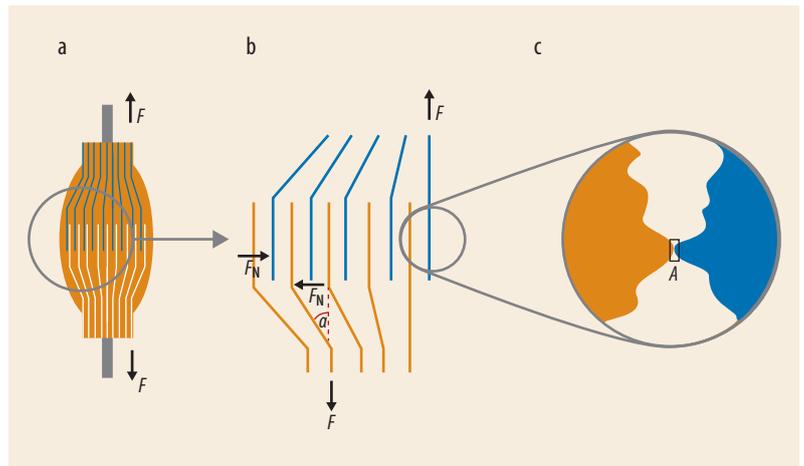


Abb. 1 Legt man die Seiten zweier Bücher ineinander, sind diese dicker als jeder Einband (a). Die Buchseiten liegen dann nicht parallel aufeinander, sondern in einem nach außen größer werdenden

renden Flächen sind in atomarem Kontakt, als ob zwei Berglandschaften kopfüber aneinander drücken würden (Abb. 1). Nimmt die Last  $F_N$  zu, wird die Oberfläche elastisch deformiert: Die Rauheitsspitzen nehmen ab, und die Fläche  $A$ , an der sich die Körper tatsächlich berühren, steigt proportional zu  $F_N$  an [3]. Wenn eine konstante mechanische Spannung  $\tau$  nötig ist, um zwei sich berührende Festkörper gegeneinander zu bewegen, ergibt sich eine Reibungskraft  $F_R = \tau \cdot A$ . Weil die Fläche  $A$  proportional zur Last  $F_N$  ist, folgt wiederum das Amontonsche Gesetz.

Ohne eine Normalkraft oder Last gibt es daher keine oder nur geringe Reibungskräfte. Legt man die Seiten zweier Telefonbücher nach und nach ineinander und versucht dann, die Bücher an ihren

Winkel  $\alpha$ . Eine Zugkraft  $F$  spaltet geometrisch in zwei Komponenten auf (b). Der Kontakt der Seiten erfolgt nur über die Spitzen der rauhen Oberfläche und ist auf die Fläche  $A$  beschränkt (c).

Buchrücken auseinanderzuziehen, ist dafür aufgrund der Reibung eine endliche Kraft nötig. Nicht nur ihre eigene Gewichtskraft presst die einzelnen Seiten dabei unter Zug zusammen, denn diese vermeintlich lose Verbindung hält enormen Kräften stand: In Fernsehsendungen wie den französischen Cobayes<sup>#)</sup> und den amerikanischen Mythbusters<sup>+)</sup> halten zwei Telefonbücher beispielsweise das Gewicht eines Autos (Abb. 2). Hector Alarcón und Kollegen zeigten nun in systematischen Studien, dass Bücher mit fünfzig bis hundert Seiten Kräfte halten können, die weit größer als Kilonewton sind [4].

Die enormen Kräfte entstehen durch die Geometrie des Versuchs und lassen sich durch das Amontonsche Gesetz erklären. Zwei Bücher, deren Seiten ineinander verzahnt sind, sind dicker als ihr jeweiliger Einband (Abb. 1). Zieht man nun an den Buchrücken, werden die einzelnen Seiten nicht parallel zu dieser Kraft, sondern unter einem Winkel  $\alpha$  aus dem Verbund gezogen. Damit spaltet sich die aufgebrachte Kraft – ähnlich der schiefen Ebene oder der Schraubverbindung – geometrisch zu einer Tangentialkraft und einer Normalkraft auf (Abb. 1). Die Geometrie des Buchs macht also einen

Abb. 2 In der französischen Fernsehserie „On n'est pas que des cobayes!“ hängt ein Auto an der vermeintlich losen Verbindung zweier Telefonbücher.



Teil der Zugkraft  $F$  zu einer Last  $F_N$ , welche die einzelnen Buchseiten sogar zusammenpresst. Dabei pressen die außenliegenden Seiten die inneren Seiten stärker zusammen, sodass die inneren Seiten einen größeren Teil der anliegenden Zugkraft tragen. Je stärker die Zugkraft, desto stärker drücken die Seiten aufeinander. Damit wächst die Normalkraft an und nach dem Amontonschen Gesetz auch die Reibungskraft, die nun zu überwinden ist – die Kraft verstärkt sich selbst. Alarcón und Kollegen zeigten, dass die Geometrie tatsächlich entscheidend ist: Liegen die Buchseiten genau parallel zum Buchrücken, sind die auftretenden Kräfte verschwindend klein.

Nach dem Amontonschen Gesetz ergibt sich keine Reibungskraft, wenn die Normalkraft verschwindet. Damit der selbstverstärkende Mechanismus funktioniert, muss auch bei verschwindend kleiner Normalkraft  $F_N$  noch eine endliche Reibungskraft  $F_{R,0}$  zwischen zwei Buchseiten wirken – sonst gleiten die Seiten immer reibungsfrei aneinander vorbei. Alarcón und Kollegen präsentieren eine mathematische Lösung des Problems, in der die endliche Reibungskraft  $F_{R,0}$  als Randbedingung auftaucht. In ihrer Analyse ist wichtig, dass die Geometrie der ineinander geschobenen Bücher die Randbedingung verstärkt. Weil innen- und außenliegende Seiten unterschiedlich beitragen, hängt der Verstärkungsfaktor näherungsweise exponentiell vom Reibungskoeffizienten  $\mu$  und der Anzahl der Buchseiten im Quadrat ab. So verstärken hundert Buchseiten eine minimale Kraft  $F_{R,0}$  von einem Hundertstel Newton um mehrere Größenordnungen bis zu Kilonewton.

Die Autoren spekulieren, dass sich die minimale Kraft  $F_{R,0}$  daraus ergibt, wie die einzelnen Buchseiten auf ihr Verbiegen elastisch reagieren. Sie folgern, dass dadurch sehr kleine Zugkräfte eine kleine, aber nicht verschwindende Last zur Folge haben. Kräfte in dieser Größenordnung können aber auch anderen Ursprungs sein: Beispielsweise wirkt Adhäsion wie eine zusätzliche

Normalkraft und führt damit zu endlicher Reibung auch ohne Normalkraft. Der Zusammenhalt durch Adhäsion ist für viele Materialien nicht vernachlässigbar.

Mechanismen der Kraftverstärkung finden sich auch in Seilwinden oder -spillen: Die Leine lässt sich durch kleine Kräfte aufwickeln. Um sie rutschend von Winde oder Spill zu ziehen, sind aber enorm große Kräfte nötig. Mit ihrem Experiment ist es Alarcón und Kollegen gelungen, mittlere Reibungskoeffizienten zu messen. Für Papier zeigt sich dabei, dass die Proportionalität des Amontonschen Gesetzes nicht exakt gilt: Werden die Lasten immer kleiner, ergeben sich höhere Reibungskoeffizienten. Diese Beobachtung ist konsistent mit

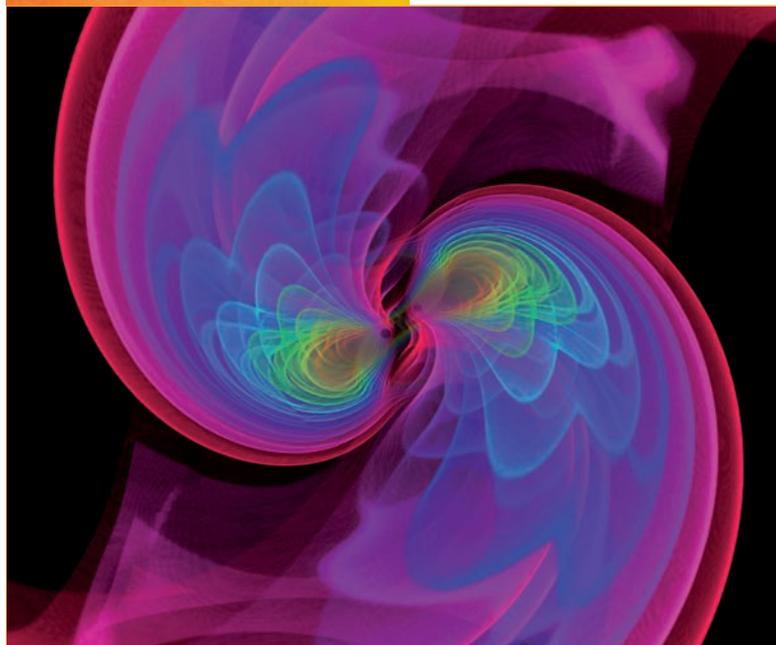
einem Reibungsgesetz der Form  $F_R = F_{R,0} + \mu \cdot F_N$ . Hier divergiert der Reibungskoeffizient  $\mu = F_R / F_N$  bei kleinen  $F_N$ , sodass Reibung auch ohne Last möglich ist. Reibungsgesetze diese Art gelten auch für andere Materialien wie z. B. Metalle. Die gewagte Spielerei, ein Auto an zwei Telefonbüchern in die Luft zu ziehen, lässt sich mit der Physik der Reibung recht einfach erklären.

Lars Pastewka

- [1] A. A. Piteris, D. Dowson und W. G. Sawyer, *Tribol. Lett.* **56**, 509 (2014)
- [2] F. P. Bowden und D. Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids*, Oxford University Press (1950)
- [3] B. N. J. Persson et al., *J. Phys. Condens. Matter* **17**, R1 (2005)
- [4] H. Alarcón et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 015502 (2016)

Dr. Lars Pastewka,  
Institut für Ange-  
wandte Materialien,  
Karlsruher Institut  
für Technologie,  
Engelbert-Arnold-  
Str. 4, 76131 Karlsruhe

## NACHWEIS NACH 100 JAHREN



Num.-rel. Simulation: S. Ossokine, A. Buonanno (MPI für Gravitationsphysik),  
Wiss. Visualisierung: W. Bengler (Airborne Hydro Mapping GmbH)

Genau hundert Jahre, nachdem Albert Einstein die Existenz von Gravitationswellen vorhergesagt hat, ist es mit den beiden LIGO-Detektoren in den USA gelungen, sie erstmals direkt nachzuweisen. Dies gab die LIGO-Kollaboration am 11. Februar 2016 in einer Pressekonferenz bekannt. Das beobachtete Signal hat eine statistische Signifikanz von 5,1 Standardabweichungen. Es stammt von zwei Schwarzen Löchern mit 29 bzw. 36 Sonnenmassen, die vor 1,3 Milliarden Jahren zu einem einzigen Schwarzen Loch verschmolzen sind. Die Masse des neuen Schwarzen Lochs beträgt etwa 62 Sonnenmassen. Demnach ist im Bruchteil einer Sekunde die Energie von etwa drei Sonnenmassen

in Form von Gravitationswellen abgestrahlt worden.

Der Weg zum Nachweis war weit: Bereits in den 1980er-Jahren schlugen Rainer Weiss, Kip Thorne und Ronald Drever LIGO als Detektor für Gravitationswellen vor. Heute gehören mehr als tausend Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 15 Ländern zu der Kollaboration, darunter viele deutsche Forscher, ohne deren technologische Entwicklungen dieser Nachweis nicht möglich gewesen wäre.

Ein ausführlicher Artikel folgt in der Aprilausgabe des *Physik Journal*. (MP) B. P. Abbott et al. (LIGO Sci. Coll. und Virgo Coll.), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016)