

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

## **BEITRAG AUS DER REIHE:**

Werner B. Schneider (Hrsg.)

# Wege in der Physikdidaktik

Band 1

Sammlung aktueller Beiträge aus der  
physikdidaktischen Forschung

ISBN 3 - 7896 - 0090 - 3

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1989

### Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.  
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle  
genutzt werden. Auf der Homepage

[www.solstice.de](http://www.solstice.de)

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Walter Bube

## Altes und Neues aus der Reibungsphysik

### 1. Vorwort

Reibungsprozesse sind eine alltägliche Erscheinung: An manchen Stellen sind sie unerwünschte Energieverbraucher. In der Schule wird das Kapitel "Reibung" rein empirisch gesehen, und jeder Lehrer hat dabei ein unbefriedigendes Gefühl: Es wirkt altmodisch, und die üblichen Erklärungsversuche (Häkchenmodell) dürfte man eigentlich gar nicht glauben. Diese Studie will einige neuere Aspekte zur Haft- und Gleitreibung ausbreiten und damit auch eine allmähliche Modifizierung dieses Kapitels der Schulphysik anregen.

### 2. Historischer Rückblick

Obwohl schon den alten Ägyptern das Problem der Reibung bekannt war (siehe Abb.1, wo ein Sklave ständig eine Schmierflüssigkeit vor den Gleitschlitten gießt), befaßte sich erst das Universalgenie Leonardo da Vinci (1452-1519) mit dem Reibungsproblem in wissenschaftlicher Weise (Abb.2 zeigt Skizzen von seinen Experi-

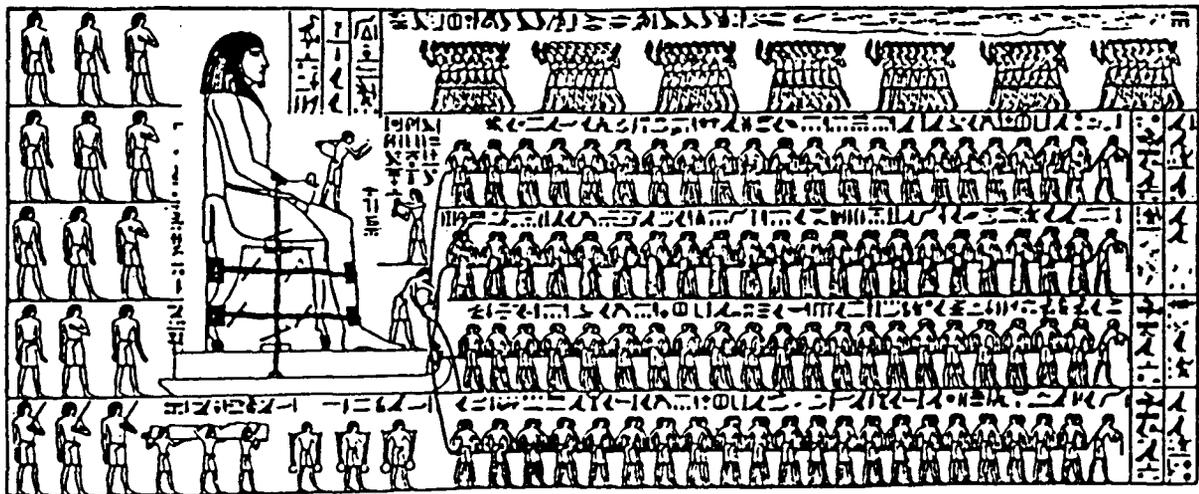


Abb. 1 Dieses altägyptische Relief (1900 v.Chr.) zeigt, daß man auch damals schon über die Reibung nachgedacht hat. (Wenn man für die zu transportierende Statue ein Gewicht von  $6 \cdot 10^5 \text{ N}$  abschätzt und jedem der 172 Sklaven die Zugkraft 800 N zuschreibt dann ergibt sich hieraus ein Reibungskoeffizient von etwa 0,2).

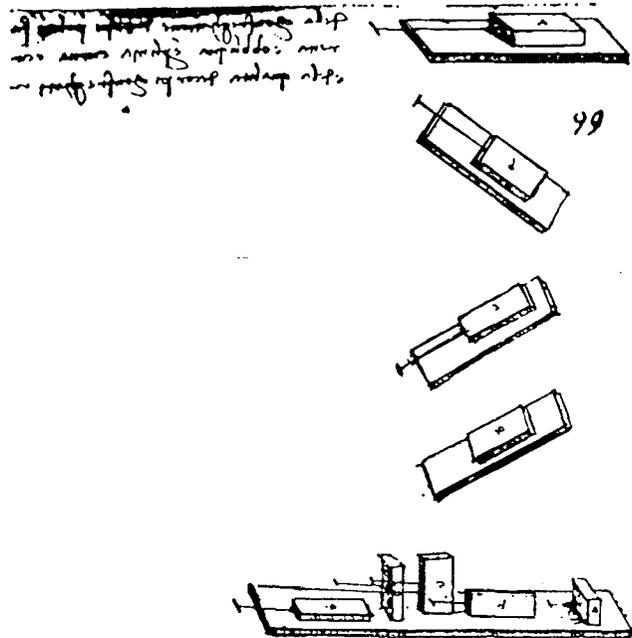


Abb. 2 Klassisches Reibungsexperiment aus dem Skizzenbuch von Leonardo da Vinci. Unsere heutigen Schulexperimente sind prinzipiell noch die gleichen.

menten mit Holzquadern). Er formulierte die Gesetze der trockenen Gleitreibung, noch 200 Jahre bevor Newton den Kraftbegriff definierte [1,6]: "Reibung verursacht die doppelte Anstrengung, wenn die Last verdoppelt wird"; er beobachtet auch, daß die Größe der Gleitfläche keinen Einfluß hat und gab auch einen Zahlenwert für den Reibungskoeffizienten  $\mu$  an: "Jeder Körper besitzt einen Reibungswiderstand von einem Viertel seines Gewichts" (Eine gute Näherung für nicht allzu saubere Oberflächen!). Die Versuche von Leonardo gerieten in Vergessenheit, erst Amontons (Gasgesetz!) legte 1699 eine Neuarbeitung dieser alten Erkenntnisse vor.

Einen neuen Aspekt brachte Desaguliers (1683-1744) vor: Er fand, daß bei besser polierten Oberflächen eine höhere Reibungskraft auftritt, und zeigte auch, daß zwei gut polierte und fest zusammengedrückte Bleikörper nur durch eine überraschend große Kraft wieder getrennt werden konnten: Er erkannte somit die Bedeutung der Adhäsion bzw. Kohäsion für den Reibungsprozeß, konnte seine Idee aber nicht mit den quantitativen Reibungsgesetzen in Einklang bringen.

Ähnlich muß es Coulomb (1736-1806) ergangen sein, der die Adhäsion als Ursache der Reibung wegen der Flächenunabhängigkeit verwarf. Statt dessen setzte er auf die Vorstellung "Oberflächenrauhigkeit", und konstruierte dazu folgendes Denkmmodell (Abb.3): Er faßte die Unebenheiten der Oberfläche als schiefe Ebenen mit dem mittleren Neigungswinkel  $\theta$  auf. Ein weiterer Körper mit der Gewichtskraft  $F_N$ , der mit seiner gleichermaßen rauhen Oberfläche über die Unterlage gleiten soll, muß demnach über die schiefen Ebenen geschoben werden; das Gesamtgewicht  $F_N$  verteilt sich auf die einzelnen Erhebungen. Für jede einzelne Erhebung gilt für den

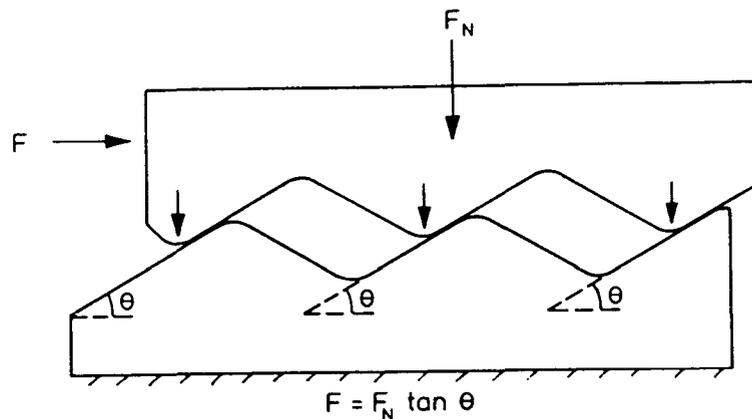


Abb. 3 Coulombs „Rauheitsmodell“ der Reibung. Die Normalkraft  $F_N$  verteilt sich auf die Erhebungen mit gleichem Neigungswinkel.

Zusammenhang zwischen horizontal aufzuwendender Kraft  $F_1$  und dem Gewichtsanteil  $F_{N1}$  somit  $F_1 = F_{N1} \tan \theta$ . Die Gesamtkraft  $F$  ergibt sich bei einem mittleren Neigungswinkel  $\theta$  zu  $F_N \tan \theta$ . Nach Coulombs Modell hängt also der Reibungskoeffizient einer solchen Fläche  $\mu = F_N = \tan \theta$  nicht von der Belastung ab, d.h. die Reibungskraft  $F$  ist proportional zum Gewicht  $F_N$ . Die Reibung ist ferner flächenunabhängig, da  $\mu$  nur eine Funktion des mittleren Neigungswinkels der Rauigkeiten ist. Je glatter die Oberfläche, desto kleiner sollte der Reibungskoeffizient sein; eine Konsequenz, die den damaligen Vorstellungen entsprach und Coulombs Modell zur Anerkennung verhalf. Das Coulombsche Modell hat aber einen entscheidenden Fehler: Es weist keine dissipative Komponenten auf. Die beim Hinaufschleichen der schiefen Ebenen aufzuwendende Energie muß wieder herauskommen, wenn die schiefen Ebenen auf der anderen Seite herabgleiten; also ist die Gleitreibung nach Coulomb kein energieverzehrender Prozeß.

Dieser Einwand wurde schon von J. Leslie im Jahre 1804 vorgebracht; aber auch Leslie sprach sich gegen die Adhäsion als Ursache der Reibung aus, weil eine Kraft senkrecht zur Oberfläche keine Komponente parallel zur Oberfläche haben kann! Er übersah aber dabei, daß adhäsive Bindungen durch Scherkräfte aufgebrochen werden

können und somit eine Horizontalkomponente entsteht.

Der Stand der Reibungsphysik in der Schule braucht wohl nicht näher kommentiert zu werden: Obwohl es einzelne Bestrebungen gibt, besonders die experimentelle Seite zu verbessern (siehe z.B.[2]), entspricht das Verständnis der zugrundeliegenden Vorgänge dem Stand früherer Jahrhunderte. Es gibt aber moderne Forschungen und Ergebnisse ("Tribologie"), woraus im folgenden einige leicht durchschaubare Aspekte dargestellt werden [1,3,4,5].

### 3. Das Adhäsionsmodell

Wir wollen uns im folgenden nicht mit Sonderfällen befassen (z.B. Pflugspur einer Stahlspitze über eine Kupferoberfläche), sondern mit der Reibung zwischen makroskopisch glatten, trockenen metallischen Oberflächen. Makroskopisch glatt heißt: Unebenheiten von ca. 50  $\mu\text{m}$  bei geschmirgelten, von 10  $\mu\text{m}$  bei polierten Oberflächen, von 1  $\mu\text{m}$  bei geläppten Oberflächen (z.B. Endmaße). Selbst hochglanzpolierte Flächen zeigen meist eine ca 2  $\mu\text{m}$  dicke Oxidschicht und sind bis zur Tiefe von ca. 0,1  $\mu\text{m}$  mit adsorbiertem Gas durchsetzt; bis zur Tiefe von etwa 100  $\mu\text{m}$  findet man Zonen, die durch die beim Schmiergeln entstehenden lokalen hohen Temperaturen geschmolzen und rekristallisiert sind. Reibungsprozesse zwischen solchen Flächen sind primär durch Adhäsion bestimmt. Zieht man z.B. einen polierten Kupfer-(oder Blei-) Gleiter über eine polierte Stahloberfläche, so verbleiben Abriebspuren (z.B. autoradiografisch nachzuweisen) auf der Stahloberfläche: Offenbar haftet das Kupfer an manchen Stellen so fest an der Stahloberfläche, daß während der Bewegung ein Teil des weichen Materials abgeschert wird. Es liegt also nahe anzunehmen, daß die makroskopische Gleitreibungskraft entsteht durch die mikroskopischen Scherkräfte, die nötig sind, um adhäsive Brücken abzutrennen.

Das sog. Adhäsionsmodell erklärt die makroskopischen Reibungsgesetze auf der Basis dieser Befunde: Stellen wir uns zwei raue Oberflächen vor, die aufeinanderge-

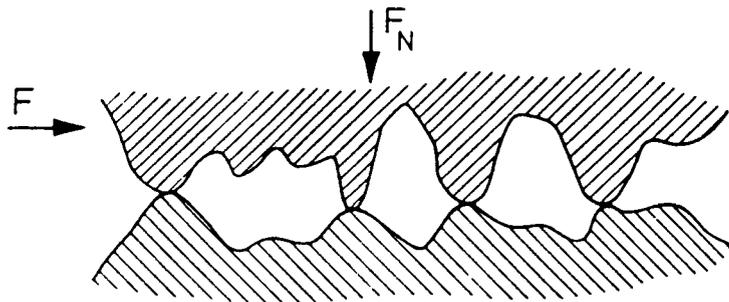


Abb. 4 Zwei mikroskopisch raue Metallflächen berühren sich nur an einigen Kontaktstellen. An diesen plastisch deformierten Stellen haften die Körper adhäsiv. Die Reibungskraft schert diese Brücken ab.

legt werden (z.B. das Gebirgsland Österreich, und umgedreht darauf das Gebirgsland Schweiz): Es gibt nur ganz wenige Berührungsstellen; jedenfalls ist die gesamte Berührungsfläche viel kleiner als die makroskopische Oberfläche (Abb.4). Entscheidend ist nun zu sehen, wie sich die wenigen mikroskopischen Kontaktstellen unter der zu tragenden Gesamtlast verhalten. Bei kleinster Belastung werden sich die Kontaktstellen elastisch deformieren. Da aber die Kontaktstellen mikroskopisch klein sind, wird schon durch das Eigengewicht des aufliegenden Körpers ein Druck erreicht, der weit über der Elastizitätsgrenze liegt: Das Material beginnt in der Umgebung der mikroskopischen Kontaktstellen plastisch zu werden und zu fließen. Der Fließdruck  $p^*$ , eine Materialkonstante, markiert die Größenordnung für den Übergang zwischen elastischem und plastischem Bereich. Wirkt auf die Berührungsfläche die Normalkraft  $F_N$ , so wird das Material an den Kontaktstellen so lange fließen, bis sich die Kontaktfläche  $A$  genügend vergrößert hat:

$$A = \frac{F}{p^*} \quad (1)$$

Einige typische Werte für  $p^*$  sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

Blei	2 000 N/cm <sup>2</sup>
Kupfer	30 000 N/cm <sup>2</sup>
Messing	45 000 N/cm <sup>2</sup>
Weicher Stahl	45 000 N/cm <sup>2</sup>
Gehärteter Stahl	150 000 N/cm <sup>2</sup>

Die mikroskopische Berührungsfläche zweier Metalle wächst mit zunehmender Belastung; im Normalfall ist diese tatsächliche Berührungsfläche nur ein kleiner Bruchteil der makroskopischen Fläche. Ein Zahlenbeispiel macht das sehr deutlich: Ein Stahlkörper, der mit einer makroskopischen Fläche von 1 cm<sup>2</sup> auf einem Messingblock aufliegt, müßte eine Masse von 4500 kg besitzen, damit sich die beiden Blöcke auf der gesamten makroskopischen Fläche berühren. Umgekehrt kann man bei gegebenem Gewicht die Größenordnung der mikroskopischen Berührungsfläche angeben (z.B. ein Stahlwürfel der Kantenlänge 1 cm auf Messing hat eine mikroskopische Berührungsfläche von ca. 10<sup>-3</sup> mm<sup>2</sup>). Das erste entscheidende Ergebnis dieses Modells ist: In erster Näherung ist die wahre Kontaktfläche nur von der Normalkraft abhängig; die makroskopische Fläche spielt keine Rolle.

Die plastische Deformation führt zu einem adhäsiven Haften (Kaltverschweißen) der beiden Körper an den Kontaktstellen mit der mikroskopischen Gesamtfläche  $A$ . Diese Kontaktstellen müssen beim Gleiten aufgebrochen werden, was auch die Abriebspu-

ren erklärt. Ein Maß für die an einer Kontaktstelle aufzuwendende Gesamtkraft  $F$  ist die Scherfestigkeit  $\tau^*$  des weicheren Metalls. (Die Scherfestigkeit ist die kritische Scherspannung  $\tau$ , bei der die Metallbrücken abgeschert werden, analog wie der Fließdruck  $p^*$  der kritische Druck ist, bei dem Metall zu fließen beginnt). Die tangential aufzuwendende Kraft  $F$  ist proportional zur gesamten mikroskopischen Berührungsfläche  $A$ :

$$F = A \cdot \tau^* \quad (2)$$

Zusammen mit (1) ergibt sich die flächenunabhängige Reibungskraft:

$$F = \frac{F_N}{p^*} \cdot \tau^* \quad (3)$$

Der Reibungskoeffizient  $\mu$  ist nach diesem Modell das Verhältnis zweier Materialkonstanten:

$$\mu = \frac{\tau^*}{p^*} \quad (4)$$

Für die meisten Metalle gilt etwa  $p^* \sim 5\tau^*$ , so daß man  $\mu \sim 0,2$  erwarten sollte. Bei Metallen ohne Oxidschicht liegt der Gleitreibungskoeffizient jedoch oft in der Größenordnung von 1. Der wesentliche Grund hierfür liegt in einer Vergrößerung der mikroskopischen Kontaktfläche: Durch die tangential wirkende Kraft  $F$  werden die Kontaktstellen in Bewegungsrichtung vergrößert (siehe hierzu c). Der Vollständigkeit halber sei noch hinzugefügt, daß in der näheren Umgebung der plastisch verformten Zonen auch noch elastisch deformierte Zonen vorliegen; ein unmittelbares Abheben zweier adhäsiv haftender Körper wird dadurch erleichtert. Bei weichen Metallen macht sich dieser Effekt nicht so stark bemerkbar wie bei harten. Weichmetalle (Indium, Blei; siehe Desagulier-Experiment) haften deshalb stärker kohäsiv zusammen als hochelastische.

Das Adhäsionsmodell erklärt also die Unabhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der makroskopischen Fläche, es liefert ein ungefähres Maß für  $\mu$  aus zwei Materialkonstanten (Scherfestigkeit  $\tau^*$  und Fließdruck  $p^*$ ) und zeigt, wie beim Reibungsprozeß mechanische Energie durch plastische Deformation und Abscheren irreversibel umgesetzt wird. Im folgenden sollen noch einige praktische Konsequenzen dieses Modells diskutiert werden.

#### a) Einfluß der Metallhärte auf den Reibungskoeffizienten:

Die Härte eines Metalls hat einen geringen Einfluß auf den Reibungskoeffizienten. Stahl ist etwa 100mal härter als Zinn, der Reibungskoeffizient von Zinn auf Stahl ist jedoch nur 3mal größer als der von Stahl auf Stahl. Das Adhäsionsmodell erklärt diesen Effekt zwanglos: Berühren sich ein weiches Metall und ein hartes, so

wird sich eine relative große mikroskopische Kontaktfläche ausbilden. Dafür ist auch die Scherfestigkeit der Metallbrücken, die beim Gleiten aufgebrochen werden, gering. Berühren sich dagegen zwei harte Metalle, so ist die mikroskopische Kontaktfläche geringer als im vorigen Fall, die Scherfestigkeit ist jedoch größer. Die Reibungskraft  $F = A\tau^*$  wird sich deshalb bei gleicher Belastung kaum unterscheiden (Abb. 5 a,b). Ein weiteres Zahlenbeispiel ist in diesem Zusammenhang, aber besonders im Hinblick auf den nächsten Abschnitt interessant: Stahl auf Stahl  $\mu = 0,8$  und Stahl auf Indium  $\mu = 1,6$ .

**b) Verminderung der Reibungskraft:**

Das Adhäsionsmodell zeigt auch, wie man die Reibungskraft geschickt vermindern kann. Überzieht man eines von zwei reibenden Hartmetallen mit einer dünnen Weichmetallschicht, so wird die Last im wesentlichen vom Hartmetall getragen. Die mikroskopische Kontaktfläche ist klein, aber gleichzeitig ist auch die Scherfestigkeit klein (Abb.5c): Solange die Belastung nicht zu einer Zerstörung der Weichmetallschicht führt, finden die Schervorgänge im Weichmetall statt. Der durch den Indiumfilm erreichte Reibungskoeffizient ist jetzt nicht mehr wie oben 1,6 sondern nur noch 0,1! Technische Verwendung finden solche Weichmetalle in Kugellagern, wo normale Schmiersysteme verdampfen. Obwohl sich solche

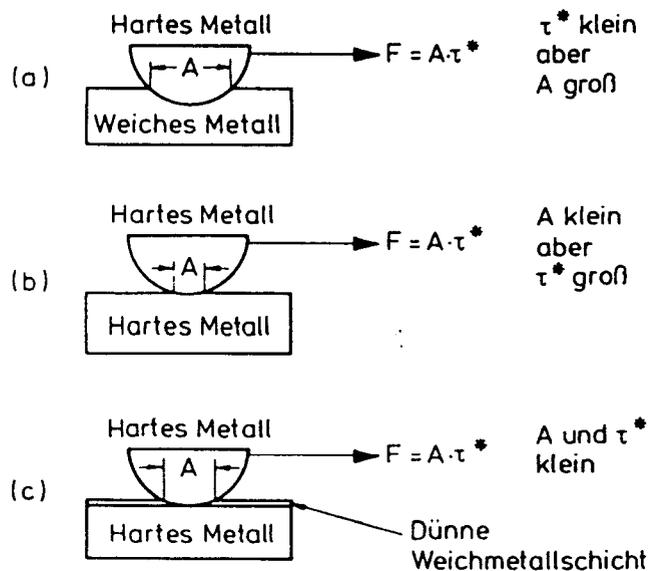


Abb. 5 Einfluß der Metallhärte auf den Reibungsprozeß (a, b). Verminderung der Reibungskraft durch einen dünnen Weichmetallfilm (c).

Filme nicht regenerieren können, haben sie eine erstaunlich lange Lebensdauer. Im Flugzeugbau verwendet man eine Cu-Pb Lagerlegierung. Sie besteht aus einem harten Kupfergrundmaterial, in das feinverteiltes Blei eingebaut ist. Beim Reibungs-

vorgang überzieht sich die Oberfläche mit einem weichen Bleifilm, der den Reibungskoeffizienten entscheidend herabsetzt [1].

Auch die Einflüsse von Verunreinigungen auf das Reibungsverhalten werden aus dem Reibungsmodell verständlich. So liegt z.B. der Reibungskoeffizient bei Metallen in Abwesenheit von Sauerstoff deutlich höher, weil sich keine Oxidschichten bilden können. Zwischenschichten verhindern direkte Metall-Metallkontakte; die nötigen Scherkräften sind daher kleiner. Das nutzt man aus bei der "gezielten Verunreinigung" durch Schmierstoffe. Zwischenschichten aus Polymeren wie PTFE (Teflonpfanne!) oder selbst monomolekulare Fettsäureschichten (Öle!) schwächen die kurzreichweitigen Adhäsionskräfte beträchtlich. Die Wirkungsweise der verschiedenen Schmierstoffe kann in diesem Rahmen nicht genauer betrachtet werden (näheres siehe z.B. [1]).

### c) Haftreibung und Gleitreibung:

Will man einen Metallblock gegen eine Metallunterlage in Bewegung setzen, so braucht man zum Starten eine größere Kraft als zum nachfolgenden Gleiten. Aus dem Adhäsionsmodell wird nicht ohne weiteres klar, warum die Haftreibungskraft größer als die Gleitreibungskraft ist. Bei den bisher entwickelten Vorstellungen wurde aber nicht berücksichtigt, daß die Kontaktfläche der beiden Metalle sich vergrößern kann, auch wenn die Normalkraft gleich bleibt. Dieses wird im wesentlichen durch die folgenden Vorgänge bewirkt: Bleiben zwei Metallflächen für einige Zeit in Kontakt, so findet ein vorübergehender "Kriechvorgang" statt, der die Kontaktflächen allseitig vergrößert. Bei Metallen ist dieser Vorgang bereits nach einigen Sekunden beendet.

Der zweite flächenvergrößernde Effekt setzt ein, wenn man versucht, den Block gegen die Unterlage zu bewegen. Die dazugehörige Tangentialkraft  $F$  vergrößert die Flächen in Zugrichtung, was sich z.B. interferometrisch oder durch Messung des Oberflächenwiderstandes nachweisen läßt [3]. Man beobachtet, daß bei konstanter Normalkraft die Kontaktfläche mit der Kontaktzeit, und auch mit der Kraft  $F$  anwächst. Bevor makroskopisch der Gleitvorgang beginnt, erreicht die Kontaktfläche und damit die Tangentialkraft ihren Maximalwert; dies ist die Haftreibungskraft.

Dieser "Anfahrvorgang" ist in Abbildung 6 dargestellt. Sobald die Tangentialkraft genügend groß geworden ist, reißen die Brücken ab (während sich schon wieder neue zu bilden beginnen):  $\mu$  fällt auf den Gleitreibungswert ab.

Grade elastisch ist. Der Anfangspunkt B der Feder soll mit gleichförmiger Geschwindigkeit gezogen werden. Zur Zeit  $t=0$  ist die Feder entspannt. Erst wenn die Federkraft so groß ist wie die Haftreibungskraft, setzt sich der Block A in Bewegung. Auf den Block wirkt jetzt aber eine Kraft, die größer ist als die zum Gleiten notwendige Gleitreibungskraft, d.h. er wird beschleunigt und die Feder wird dabei wieder kürzer. Nun kann der Fall eintreten, daß die Feder zu wenig Kraft auf A überträgt, so daß der Block wieder hängen bleibt. Der Vorgang beginnt dann von neuem: Die Feder wird länger usw. Diesen periodischen Ablauf kann man sehr anschaulich im Weg-Zeit-Diagramm beschreiben (Abb.8). Reibungsschwingungen sind umso stärker ausgeprägt je mehr sich  $\mu_{\text{Haft}}$  und  $\mu_{\text{Gleit}}$  unterscheiden.

#### 4. Schlußbemerkungen

Das Adhäsionsmodell läßt sich auch auf Nichtmetalle übertragen [1,5]. Die Reibungskraft ist auch dort die Kraft, die aufgewendet werden muß, um die adhäsiv haftende mikroskopische Fläche abzuscheren (Gl.2); nur ist dort die mikroskopische Fläche nicht mehr

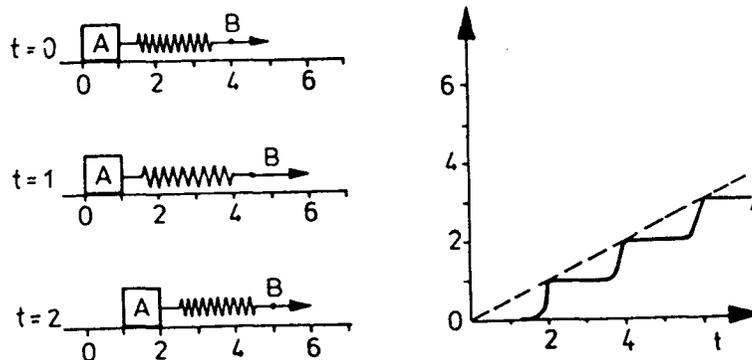


Abb. 8 Einfaches Modell zur Erklärung von Reibungsschwingungen. Wird das Ende B der Feder mit gleichförmiger Geschwindigkeit gezogen, folgt der Metallblock A auf der Metallunterlage ruckweise. Im Weg-Zeit-Diagramm ergibt sich für A näherungsweise eine Treppenfunktion.

direkt proportional zur Normalkraft <sup>1</sup>. Für elastische Stoffe (Gummi) oder viskoelastische Stoffe (Polymere) ist der Reibungskoeffizient somit von der Normalkraft abhängig, d.h. die einfachen Reibungsgesetze gelten hier nicht.

Für Holz mit seiner komplexen Struktur von Zellulosefibern ist der Reibungskoeffizient nur in einem beschränkten Bereich konstant und hängt stark von der Oberflächenbeschaffenheit ab (z.B. vom Wassergehalt).

Es gibt in der modernen Tribologie auf der Basis des Adhäsionsmodells ausgearbeitete Vorstellungen für das Reibungsverhalten von Gummi, Polymeren, Schmiermittel u.a. (1,3,4,5). Trotz ihrer technischen Bedeutung wurden sie absichtlich außer acht gelassen, um den Blick nicht zu verstellen für die wesentlichen Aspekte dieser

<sup>1</sup> Die Elastizitätstheorie (Hertz'sche Rechnungen) liefert für elastische Stoffe  $A \sim F_N^{2/3}$  und für visko-elastische Stoffe  $A \sim F_N^{3/4}$  [1, 5].

**d) Abhängigkeit des Gleitreibungskoeffizienten von der Geschwindigkeit:**

Auch bei kleinen Gleitgeschwindigkeiten machen sich die vorher beschriebenen flächenvergrößernden Effekte bemerkbar. Es ist daher nicht verwunderlich, daß der Gleitreibungskoeffizient mit der Geschwindigkeit (geringe Kontaktzeit) abnimmt. Die durch die Energiedissipation entstehende Temperaturerhöhung wirkt in die gleiche Richtung. Das Material erweicht und damit wird das Abscheren umso leichter, je höher die Geschwindigkeit ist. Der Gleitreibungskoeffizient fällt infolgedessen bei allen Metallen mit zunehmender Geschwindigkeit auf einen asymptotischen Wert (Abb.7); je niedriger der Schmelzpunkt liegt, desto früher wird der asymptotische Wert erreicht. Bei aerodynamischen Tests von Flugzeugbauteilen auf Raketenschlitten ( $>3000$  km/h) macht sich dieser Abfall von  $\mu$  mit der Geschwindigkeit deutlich bemerkbar. Ähnlich wie der Rodelschlitten auf einer geschmolzenen Eisschicht gleitet der Raketenschlitten auf geschmolzenem Metall.

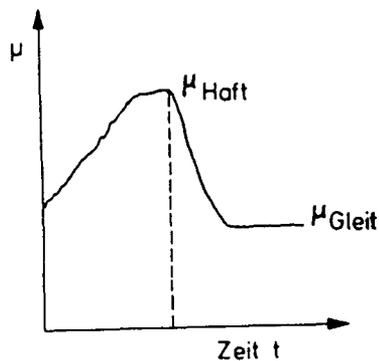


Abb. 6 Die zeitliche Änderung des Reibungskoeffizienten zwischen zwei Metallflächen während des Anfahrvorgangs.

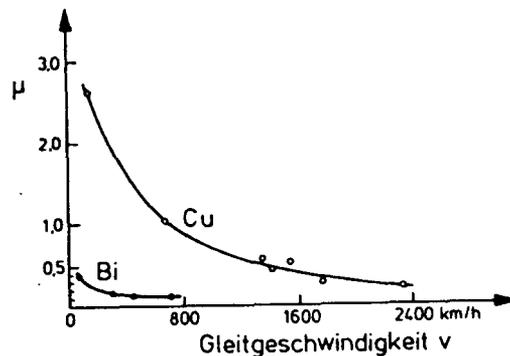


Abb. 7 Abnahme des Gleitreibungskoeffizienten mit der Gleitgeschwindigkeit für zwei Metallpaarungen. Cu: Stahl auf Kupfer; Bi: Stahl auf Wismut.

**e) Reibungsschwingungen:**

Immer, wenn die Gleitreibungskraft deutlich kleiner als die Haftreibungskraft ist, können ruckartige Bewegungen auftreten. Das Rucken bei niedrigen Geschwindigkeiten kommt durch das Wechselspiel von Haften und Lösen an den Kontaktstellen zustande. Das zeigt auch die Abriebspur eines weichen Metallblocks, der auf einer harten Metallunterlage gleitet. Statt eines gleichmäßigen Belages erkennt man eine regelmäßige Fleckenspur von abgeriebenen weichen Metall. Solche Reibungsschwingungen mit Frequenzen im akustischen Bereich sind auch die Ursache für das Quietschen von Bremsen und das Quietschen der Kreide auf der Tafel. (Auch hier hinterläßt die Kreide eine diskrete Fleckenspur.)

An einem vereinfachten Modell (Abb.8) soll das Zustandekommen der Reibungsschwingungen erklärt werden: Ein Metallblock A wird an einer Feder über eine feste Metallunterlage gezogen. Die Kraftübertragung geschieht in diesem Modell durch eine Feder, weil jede Übertragungsart (Stange, Seil etc.) bis zu einem gewissen

Studie: Aufzuräumen mit den altmodischen und falschen, zumindest jedoch peinlich defizienten Vorstellungen der "Schulreibungsphysik".

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. K. Luchner danken für den Anstoß und die wertvollen Anregungen zu dieser Studie.

#### Literatur

- [1] Bowden, F.P., Tabor, D.: Friction, An Introduction to Tribology, New York: Press 1973.
- [2] Dittmann, H.: Experimente mit der Reibung. in: PhuD 1(1978) S.17.
- [3] Sakar, A.D.: Friction and Wear. London, New York: Academic Press 1980.
- [4] Kirsche, K.: DFG Forschungsbericht Tribologie. Wiesbaden: Steiner 1971.
- [5] Moore, D.F.: Principles and Application of Tribology. Oxford: Pergamon Press 1975.
- [6] Dowson, D.: History of Tribology. London, New York: Longmann 1979.