

# I. Grundlagen der Tribologie

## 1.1. Einführung

Der Begriff Tribologie wird erst seit 1966 (erstmalig in England) als Fachterminus verwendet. Es gibt zahlreiche Definitionen für die Tribologie. Drei sind hier angeführt.

### 1.1.1. Definition(en)

i) *Tribologie (griech: Reibungslehre) ist ein Teilgebiet des Maschinenbaus und wird interdisziplinär von Maschinenbauern, Werkstoffwissenschaftlern und Physikern betrieben. Sie befasst sich mit der wissenschaftlichen Beschreibung von **Reibung**, **Schmierung** und **Verschleiss** sowie der Entwicklung von Technologien zur Optimierung von Reibungsprozessen.*

ii) Nach der Deutschen Industrienorm DIN 50323:

„Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in **Relativbewegung**. Sie umfasst das Gesamtgebiet von **Reibung** und **Verschleiss**, einschliesslich **Schmierung**, und schliesst entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein.“

(Die Norm wurde vor einigen Jahren zurückgezogen.)

iii) Eine der besten Definitionen der Tribologie wurde 1966 von Peter Jost gegeben:  
„Tribologie ist die Wissenschaft und Technologie der aufeinander einwirkenden, in **Relativbewegung** befindlichen Oberflächen und der zusammenhängenden praktischen Vorgängen.“

### 1.1.2. Allgemeines

Reibung ist eines der ältesten Probleme der Physik und mit Sicherheit eines der relevantesten hinsichtlich der technologischen Bedeutung.

Die Aufgabe der Tribologie ist es reibungs- und verschleissbedingte Energie- und Stoffverluste in Hinsicht auf einen möglichst störungsfreien und energieeffizienten Betrieb von technischen Systemen zu minimieren. Durch die positive Veränderung der aufeinander einwirkenden

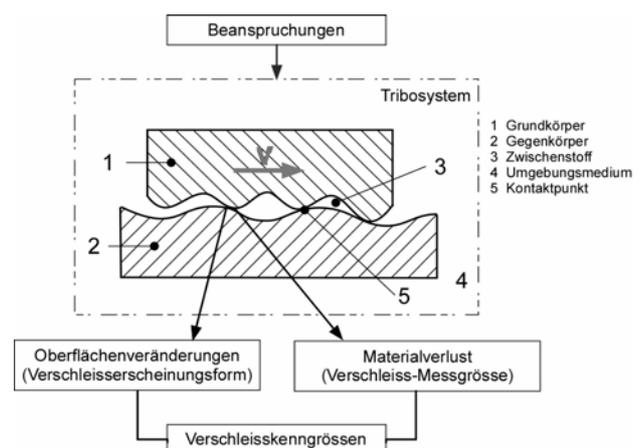
Oberflächen in Relativbewegung (tribologisches System) werden ein höherer Wirkungsgrad und Betriebsdauer und somit ein ökonomischer Betrieb erreicht.

Eine Schätzung ergab dass, alleine in den USA, aufgrund ungenügender Kenntnisse der Tribologie, jährliche Kosten in der Höhe von 6% des Brutto Inlandproduktes (ca. 420 Milliarden \$) entstehen.

Die technisch, wirtschaftlichen Aspekte die durch Optimierung der Tribologie positiv verändert werden, sind:

- Erhöhung der Leistung und des Wirkungsgrades
- Zuverlässigkeit und Betriebsdauer
- Energie- und Materialeinsparung
- Verminderung der Umweltbelastung

Tribologische Systeme finden sich in allen Anwendungen wo eine Relativbewegung zwischen zwei in Kontakt befindlichen Festkörpern auftritt. Als Beispiele seien Gleitlager, Reibung zwischen der Welle und der Lagerschale; Wälz- und Kugellager, Reibung zwischen den Wälzkörpern resp. Kugeln und den Halteringen sowie dem Käfig; oder Zahnräder, Reibung zwischen den Zahnflanken von Ritzel und Rad, genannt. Diese Maschinenelemente finden sich in allen Maschinen, wie Motoren, Getrieben, Kompressoren, Hydrauliken usw.



**Abbildung 1**  
Tribologisches System nach Czichos

Aber auch bei spanabhebenden Werkstoffbearbeitungen (Drehen, Fräsen, Bohren, etc.) tritt zwischen Werkzeug und Werkstück Reibung auf. Ohne höchste Reibung zwischen Brems-

backen und Bremsscheibe liesse sich kein Fahrzeug effizient zum Stillstand bringen.



**Abbildung 2**

Die Reibungsenergie beim Bremsen bringt die Bremsscheibe des Rennwagens zum Glühen.

### 1.1.3. Optimierung tribologischer Systeme

Die Optimierung tribologischer Systems kann über drei Ansätze erfolgen:

1. *Vermeidung des tribologischen Kontaktes.* Dies sind Massnahmen mit dem Ziel, die gewünschte Funktion ohne jeden tribologischen Kontakt zu realisieren. Zum Beispiel: Magnetschwebebahn.
2. *Beeinflussung der Beanspruchung.* Dies sind Massnahmen, zur Verringerung der Beanspruchung des Tribosystems ohne Beeinträchtigung der gewünschten Funktion. Zum Beispiel: Ersetzen eines Gleitlagers durch ein Kugellager.
3. *Beeinflussung der Systemstruktur.*
  - a) durch konstruktive Massnahmen, d.h. Gestaltung und Auslegung der Reibungspartner unter tribologischen Gesichtspunkten.
  - b) durch schmierungstechnische Massnahmen, d.h. Auswahl und Anwendung eines geeigneten Schmierstoffes. Der Schmierstoff trennt entweder die relativ zueinander bewegten Oberflächen oder verändert diese durch chemische und physikalische Reaktionen.
  - c) durch werkstofftechnischer Massnahmen, d.h. Auswahl optimaler Werkstoffpaarungen oder aufbringen einer tribologisch optimierter Oberflächenschicht.



**Abbildung 3**

Die Magnetschwebebahn „Transrapid“, hier bei der Einweihung in Shanghai, wird dank komplizierter Magnetfelder berührungslos im Schienenstrang stabilisiert. Dadurch tritt während der Fahrt keine mechanische Reibung auf, was Reisegeschwindigkeiten von über 500 km/h erlaubt.

### 1.2. Reibung

Im Gegensatz zum Terminus „Tribologie“ der eindeutig dem Maschinenbau, oder genauer dem Verhalten mechanischer Systeme zugeordnet ist die Reibung ein Begriff der Physik der viel allgemeiner gefasst ist und nicht nur auf die Mechanik beschränkt ist. Zum Beispiel Flüssigkeiten: Die Kräfte zwischen den sich bewegenden Moleküle einer Flüssigkeit bestimmen deren Fließverhalten. Man spricht dabei von der inneren Reibung der Flüssigkeit. Die Materialkonstante welche die innere Reibung der Flüssigkeit charakterisiert wird Viskosität oder dynamische Zähigkeit genannt. Dabei bedeutet eine hohe Viskosität, also grosse innere Reibung, dass die Flüssigkeit zähflüssig ist. Reibung gibt es aber auch unter den sich bewegenden Elektronen in einem elektrischen Leiter und ist Ursache des elektrischen Widerstandes. Eine allgemeine Definition der Reibung lautet somit:

*„Reibung tritt immer dann auf, wenn physikalische Objekte mit gegenseitiger Wechselwirkung (Kräfte) sich relativ zueinander bewegen.“*

Die Art der Objekte und Wechselwirkungskräfte ist in dieser Definition noch vollkommen offen. Objekte können sein: Elektronen, Moleküle, Partikel, Festkörper, Sterne, etc. Als Wechselwirkungskräfte sind neben Anderen elektrische, magnetische und mechanische möglich.

Die mechanische Reibung definiert sich wie folgt:

„Reibung äussert sich als Kraft, der eine Relativbewegung kontaktierender Körper verhindert (Haftreibung), oder einer Relativbewegung entgegenwirkt und zum Verlust mechanischer Energie führt.“

Der Verlust an mechanischer Energie offenbart sich in der Erwärmung der beteiligten Elemente (Oberfläche der Reibpartner, Schmierstoff, des ganzen Systems).

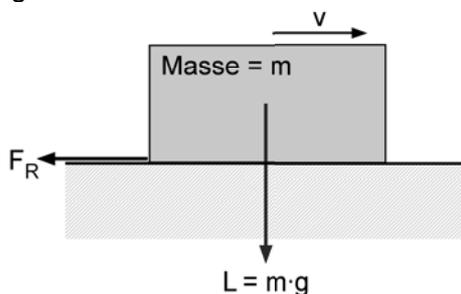
Reibung assoziiert man im Allgemeinen als unerwünschte Erscheinung, jedoch gibt es mindestens ebenso viele Anwendungen wo die Reibung unerlässlich ist. Zum Beispiel: Bremsen, jegliche Art der Fortbewegung, oder spielen von Streichinstrumenten.



**Abbildung 4**

Die Reibung zwischen Bogen und Saite ist der Ursprung des Klanges einer Geige.

Mathematisch lässt sich die mechanische Reibungskraft zwischen zwei in Kontakt befindlicher und relativ zueinander bewegter Körper wie folgt beschreiben:

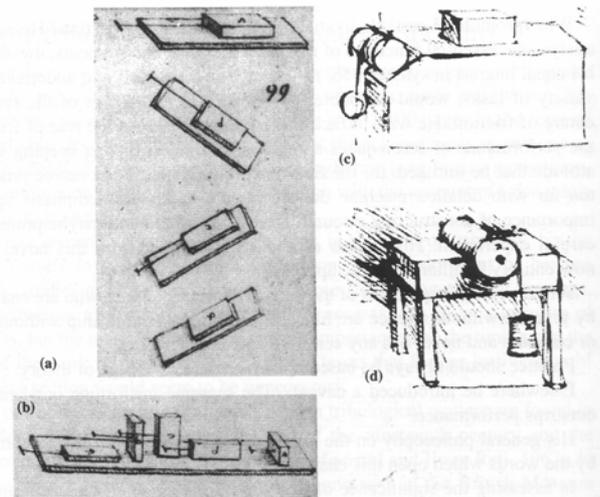


$F_R$ : Reibungskraft  
 $\mu$ : Reibungskoeffizient  
 $L$ : Last oder Auflagekraft  
 $m$ : Masse  
 $g$ : Gravitationskonstante ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )  
 $v$ : Geschwindigkeit

$$F_R = \mu \cdot L \quad (1)$$

### 1.2.1. Historisches

Das Phänomen der Reibung hat immer wieder die brilliantesten Köpfe ihrer Zeit, wie z.B. Leonardo da Vinci (1452 – 1519), Leonard Euler (1707 – 1783) oder C. Coulomb (1736 – 1806) bewogen sich dem Thema wissenschaftlich zu widmen. Die ersten wissenschaftlichen Arbeiten zur Reibung wurden von Leonardo da Vinci durchgeführt.



**Abbildung 5**

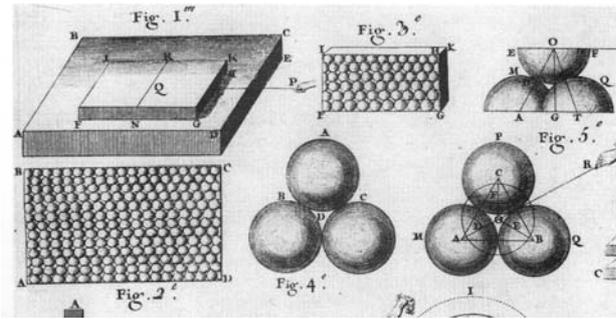
Skizzen von Leonardo da Vinci (1452 – 1519) zum Studium der Reibung

Aufgrund seiner Studien formulierte er zwei Gesetze der zur mechanischen Reibung:

- i) **Die Reibung eines Körpers ist unabhängig von seiner Grösse der Auflagefläche (siehe Abb. 5b).**
- ii) **Die Reibungskraft verdoppelt sich, wenn die Gewichtskraft verdoppelt wird.**

Die beiden Aussagen *da Vinci's* finden sich in dem, 250 Jahre später, durch *Charles Augustin Coulomb* (1736 – 1806) formulierten Reibungsgesetz (Gl. (1)) wieder. Dieses besagt, dass die Reibungskraft proportional zur Gewichtskraft (Last) ist und die Auflagefläche keine Rolle spielt (kommt in der Gl. (1) nicht vor).

Einen interessanten mathematischen Ansatz zur Beschreibung der Reibung beschrieb *Bernhard Forrest de Bélidor* (1697 – 1761) indem er annahm, dass Festkörper aus kleinen Kugeln zusammengesetzt und deren Oberflächen somit aus Kugelsegmenten bestehen. Damit erkannte er als Erster, dass die mikroskopische Rauigkeit der Oberfläche einen Einfluss auf die Reibung haben muss. Nach



**Abbildung 6**

Skizzen von Bernhard F. de Bélidor (1697 – 1761) zur Modellierung einer rauen Oberfläche mittels sphärischer Kugeln.

Bélidor entsteht die Reibung durch die Kraft die aufgewendet werden muss um die Kugeln übereinander zu bewegen. Die Reibungskraft lässt sich sogar sehr einfach berechnen indem man nur die Kraftkomponente der Auflagekraft in Bewegungsrichtung ausrechnet. Dies ist eine einfache geometrische Aufgabe und man erhält als Reibungskoeffizienten  $\mu$ :

$$\mu = 1/2\sqrt{2} = 0.35 \quad (2)$$

Die Arbeiten von Bélidor sind in zweierlei Hinsicht interessant.

- i) Der Reibungskoeffizient ist unabhängig von der größe der Kugeln und der Auflagefläche. Dies ist in Einklang mit den rund 250 Jahre zuvor gemachten Beobachtungen Leonardo da Vinci's.
- ii) Der theoretische Wert von 0.35 für den Reibungskoeffizienten  $\mu$  entspricht recht genau dem Wert den man experimentell am häufigsten für die trockene Reibung, also ohne Schmiermittel findet.

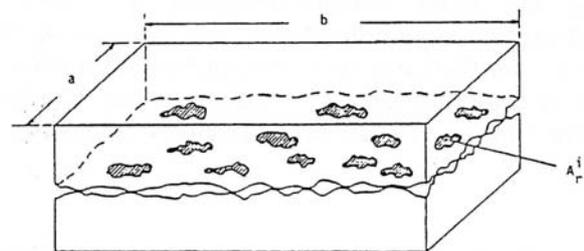
Obwohl das Modell von Bélidor physikalisch vollkommen falsch ist wird es, aufgrund seiner bestechenden Resultate, seit 1737 immer wieder für die theoretische Beschreibung der Reibung herangezogen.

Einen weiteren wichtigen Schritt im Verständnis der physikalischen Beschreibung der Reibung erbrachte Charles Augustin Coulomb (1736 – 1806) indem er untersuchte wieso die Haftreibung stets grösser als die Gleitreibung ist. Unter der Haftreibung versteht man die Widerstandskraft die aufgewendet werden muss um zwei in Kontakt und Ruhe befindliche Kör-

per relativ zueinander zu bewegen. C. Coulomb fand, dass die Haftkraft zweier in Kontakt und Ruhe befindlicher Körper mit der Dauer ihrer Kontaktzeit zunimmt. Er erklärte sich das Verhalten indem er annahm, dass die Oberflächen der Holzkörper mit denen er die Experimente durchführte aus lauter kleinen elastischen Fasern bestehen und diese mit zunehmender Dauer des statischen Kontaktes stärker ineinander verhaken und somit eine höhere Haftreibung ergeben. (Coulomb verwendete Holz, weil im 18. Jahrhundert die meisten Maschinen noch Holzkonstruktionen waren.) Die experimentellen Arbeiten und Interpretationen von Coulomb sind die Grundlagen der heutigen modernen mikroskopischen Beschreibung der Reibung.

### 1.2.2. Moderne Beschreibung der Reibung

Der Schlüssel zum Verständnis der mechanischen Reibung ist die Beschreibung der realen Kontaktfläche der in Kontakt befindlichen Körper. Seit den Arbeiten da Vinci's ist bekannt, dass die Reibung im Allgemeinen von der Kontaktfläche unabhängig ist (Abb. 5b). Dies ist physikalisch nicht verständlich ändert sich doch mit der Kontaktfläche der Auflagekraft (Gewichtskraft/Flächeneinheit) des Körpers, was intuitiv die Reibung beeinflussen sollte. Der Grund für diese scheinbare Unverträglichkeit liegt in der Beschreibung der realen Fläche auf welcher sich die beiden in Kontakt befindlichen Körper berühren. Diese sogenannte reale Kontaktfläche entspricht nicht der geometrischen Auflagefläche der Körper.



**Abbildung 7**

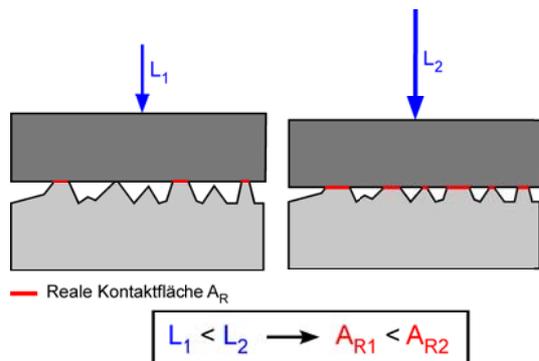
Schematische Darstellung der scheinbaren (geometrischen) und realen Berührungsfläche

Für harte Reibungspartner ist die reale Kontaktfläche viel kleiner als die geometrische Auflagefläche. Ist aber einer der beiden in Kontakt befindlichen Körper weich (z.B. Gummi) ist die reale Kontaktfläche viel grösser als die geometrische Kontaktfläche. Der Grund

hierfür liegt in der Rauheit der Oberflächen. Sind beide in Kontakt befindlichen Körper hart, so ist die reale Kontaktfläche nur durch einige wenige Berührungspunkte gegeben (Abb. 7). Die reale Kontaktfläche  $A_R$  ist dabei wie folgt gegeben:

$$A_R = \frac{\text{Auflagekraft}}{\text{Eindringhärte}} \quad (3)$$

Dies bedeutet, dass die reale Kontaktfläche  $A_R$  jene Fläche ist welche durch die Auflagekraft flach auf der rauen Oberfläche flachgedrückt wird (Abb. 8).



**Abbildung 8**

Schematische Darstellung der realen Kontaktfläche  $A_R$  in Abhängigkeit der Auflagekraft, für den Fall ähnlich harter Reibungskörper.

Wie bereits erwähnt ist die reale Kontaktfläche  $A_R$  für harte Materialien immer sehr viel kleiner als die scheinbare Kontaktfläche  $A$ . Als Beispiel wollen hier die reale Kontaktfläche  $A_R$  für einen Stahlquader (Dichte:  $\rho = 8 \text{ kg/dm}^3$ ) mit den Dimensionen  $V = 10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  und einer Eindringhärte  $\sigma = 10^9 \text{ N/m}^2$  auf einer Platte gleichen Materials berechnen. (Gravitationskonstante:  $g \sim 10 \text{ N/ms}^2$ ):

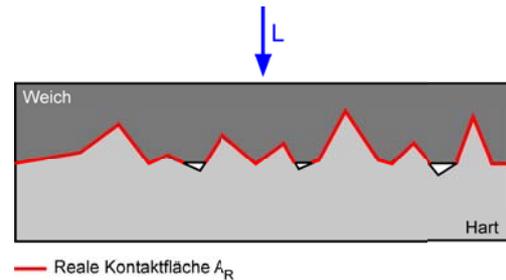
$$A_R = \frac{L}{\sigma} = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{\sigma} = 0.08 \text{ cm}^2$$

Im Vergleich zu der scheinbaren Kontaktfläche  $A = 100 \text{ cm}^2$  ist in diesem Fall die reale Kontaktfläche 100'000x kleiner.

Dies erklärt nun, wieso die Reibung nicht von der scheinbaren Auflagefläche  $A$  abhängt. Die für die Reibung relevante reale Kontaktfläche  $A_R$  ist nämlich unabhängig von der scheinbaren Auflagefläche  $A$  und nur eine Funktion der Auflagekraft und der Härte der Reibungspartner. Mit zunehmender Auflagekraft nimmt die reale Kontaktfläche  $A_R$  (Reibungsfläche) und damit die Reibungskraft zu. Der Reibungskoeffizient

$\mu$  als Verhältnis Reibungskraft/Auflagekraft bleibt aber konstant.

Ganz anders präsentiert sich die Situation, wenn einer der beiden Reibungspartner weich (z.B. Gummi) im Verhältnis zum andern ist. In diesem Fall ist die reale Kontaktfläche viel grösser als die scheinbare Kontaktfläche. Das weiche Material kann je nach Auflagedruck in die feinsten Ritzen und Nuten des harten Reibungspartners eindringen und so die reale Kontaktfläche  $A_R$  dramatisch vergrössern.



**Abbildung 9**

Schematische Darstellung der realen Kontaktfläche  $A_R$  für den Fall, dass einer der Reibungskörper viel weicher ist.

In diesem Fall hängt die Reibung auch von der scheinbaren Kontaktfläche  $A$  ab, denn sie bestimmt mit welchem Flächendruck das weiche Material in die Konturen des harten Materials eindringen kann. Als anschauliches Beispiel seien hier die Autoreifen für den Rennsport genannt. Diese vermitteln mehr Haftung (Reibung) je weicher die Gummimischung ist. Je weicher der Gummi ist desto besser kann er in die Poren des Asphalt eindringen und somit die Haftung erhöhen.



**Abbildung 10**

Die grosse Haftung (Reibung) verdanken Rennreifen einer extrem weichen Gummimischung. Diese erhöht die reale Kontaktfläche  $A_R$  zwischen Reifen und Asphalt.

### 1.3. Verschleiss

Jede Abnützung gewollt oder ungewollt, die zu einer Veränderung der Oberfläche der Reibungspartner führt, wird als Verschleiss definiert. Verschleiss durch Gleit-, Roll- oder Wälzreibung wird als mechanischer Abrieb bezeichnet. Als Strömungsabrieb bezeichnet man jenen Verschleiss der durch feste Fremdkörper (z.B. mechanische Abriebpartikel) im strömenden Medium hervorgerufen wird.



**Abbildung 11**

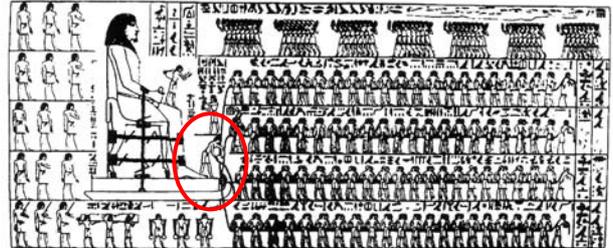
*Photo eines Motorkolbens mit deutlich erkennbaren Verschleisspuren an der Kolbenwand.*

Abrasiver Verschleiss entsteht, wenn die Rauheiten der härteren Oberfläche jener der weichen Oberfläche „abradieren“, das heisst flach- oder wegreiben. Fressverschleiss entsteht, wenn durch die Reibungswärme die Kontaktstellen zunächst verschweissen und anschliessend durch die Relativbewegung wieder auseinander gerissen werden.

Wichtige Verschleissformen sind somit die Abtragung und damit Glättung der Oberflächen (Einlaufen) in ihrer milderen Form oder die zerfurchende Zerstörung der Oberflächen in ihrer starken Form. Eine andere wichtige, stets unerwünschte Verschleissform ist der Fressverschleiss der in seiner schlimmsten Form bis zur Blockieren der Bewegung führen kann. Beide Verschleissformen können durch einen geeigneten Schmierstoff stark gemildert resp. verhindert werden.

### 1.4. Schmierung

Bereits im Alten Ägypten vor mehr als 4000 Jahren nutzte man die Schmierung zur Verminderung der Reibung. Um den Kraftaufwand für den Transport von grossen Steinblöcken und Skulpturen auf Holzschlitten zu minimieren verwendeten die Ägypter bereits Schmierstoffe.



**Abbildung 12**

*Erste schriftliche Überlieferung der Verwendung von Schmierstoffen. Malerei aus dem Grab von Tehuti-Hetep, El-Bershed (1880 v. Chr.)*

Physikalisch gesehen gibt es nur 3 Faktoren welche Reibung und Verschleiss beeinflussen:

i) *Mechanischer Abrieb:*

Ein grosser Härteunterschied zwischen den Reibungskörpern führt zur Abrasion des weicheren durch das härtere Material.

Massnahme: Die Oberfläche des härteren Körpers sollte deshalb immer möglichst glatt sein.

ii) *Interatomare Kräfte:*

An den Kontaktflächen sind die Atome der Reibungspartner so dicht zusammen, dass zwischen ihnen attraktive Kräfte wirken. Diese Kräfte sind zwischen Metall/Metall grösser als zwischen Metall/Nichtmetall- und Nichtmetall/Nichtmetall-Oberflächen. Dies ist der Grund weshalb die Reibung Metall gegen Keramik im Allgemeinen kleiner ist als jene Metall gegen Metall.

Massnahme: Reibung von Metall gegen Metall möglichst vermeiden.

iii) *Legierungsfähigkeit* der Materialien:

Je grösser die Affinität der Materialien der Reibungspartner zur Legierungsbildung ist desto eher kommt es zu Verschweissung der Kontaktflächen. Die Tendenz zur Legierungsbildung nimmt zu je „ähnlicher“ die

Materialien der beiden Reibungskörper sind.

Massnahme: Reibung zwischen gleichen Materialien möglichst vermeiden.

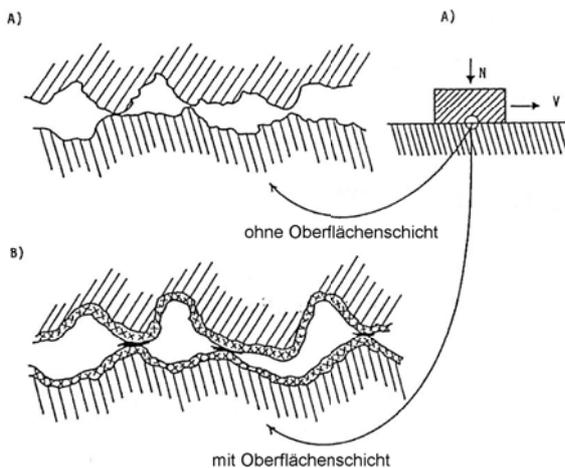
Durch geeignete Schmierung lassen sich alle drei Faktoren positiv, d.h. kleinere Reibung und niedriger Verschleiss, beeinflussen.

Im Wesentlichen lassen sich drei Reibungszustände definieren:

- 1) Trockenreibung
- 2) Mischreibung (Grenzflächenschmierung)
- 3) Hydrodynamische Reibung (Schmierung)

#### 1.4.1. Trockenreibung

Reibung ohne flüssige Schmiermittel. Die Reibungskörper sind in direktem Kontakt. Bei Metall-Metall Reibung kann es an den Kontaktstellen zu Kaltverschweissungen kommen. Die Reibung und Verschleiss sind allgemein sehr gross. Einige Metalle bilden an Luft eine dünne (~ 5 Nanometer) stabile Oxydschicht an der Oberfläche. Diese vermindert die Tendenz zur Kaltverschweissung, so dass Reibung und Verschleiss niedriger sind.



**Abbildung 13**

Schematische Darstellung der Reibungsverhältnisse bei Trockenreibung

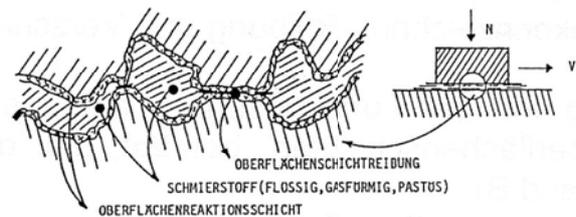
- a) ohne Oberflächenschicht
- b) mit Oberflächenschicht

Der Effekt kann verstärkt werden indem man die Metalloberflächen mit einer keramischen Hartstoffbeschichtung (z.B. Titanitrid (TiN), oder Titankarbid (TiC)) verseht. Als ver-

schleissmindernde Schichten bieten sich auch so genannte Festschmierstoffe an. Festschmierstoffe sind Stoffe die sich leicht verreiben lassen und ähnlich wie ein Fett als Schmiermittel dienen. Die bekanntesten Festschmierstoffe sind Graphit (reiner Kohlen: C) und Molybdändisulfid ( $\text{MoS}_2$ ). Trockenschmierstoffe setzen Reibung und Verschleiss noch weiter herab.

#### 1.4.2. Mischreibung

Mischreibung liegt dann vor, wenn ein flüssiger Schmierstoff mit entsprechenden Additiven die Oberflächen mit Molekülen beschichtet, so dass in den Kontaktstellen die Festkörperoberflächen stets durch die Molekülschicht getrennt bleiben. Bei Mischreibung ist der Reibungskoeffizient  $\mu$  10 – 100x kleiner als bei der Trockenreibung.

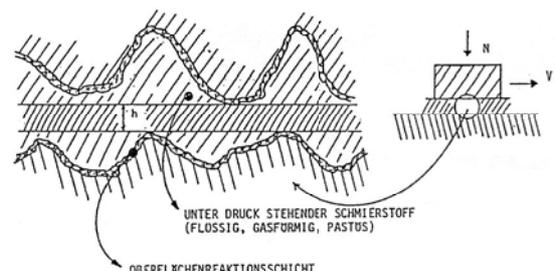


**Abbildung 14**

Schematische Darstellung der Verhältnisse bei Mischreibung

#### 1.4.3. Hydrodynamische Reibung

Bei der hydrodynamischen Reibung trennt ein unter Druck stehender Schmierfilm die Oberflächen und es tritt keine direkte Berührung der Reibkörper mehr ein. Als Reibung tritt ausschliesslich Flüssigkeitsreibung auf. Diese hängt nur von der Viskosität des Schmierstoffs ab. Da die Festkörperflächen sich nicht berühren ist der Verschleiss theoretisch gleich Null.



**Abbildung 15**

Schematische Darstellung der Reibungsverhältnisse bei hydrodynamischer Schmierung.