

3.1. Tribologie, Reibung und Verschleiß (Grundlagen)

Tribologie, Reibung und Verschleiß (Grundlagen)

Frau Dr.-Ing. Ilka Lenke
CeramTec AG
Forschung und Entwicklung
Plochingen

1. Einleitung

Reibung, Verschleiß und Schmierung — zusammengefaßt unter dem Begriff Tribologie — waren für den Menschen schon von Anbeginn von Interesse (Tabelle1) [1] und besitzen eine wesentliche wirtschaftliche Bedeutung, denn sie bestimmen über die Standzeiten von Maschinen und Anlagen [2]. Unerwünschte Folgen von Reibung und Verschleiß, wie Geometrieänderungen, Verschleißteilchen, Wärme, Schwingungen oder Geräusche führen zum Verlust der Funktionsfähigkeit z.B. durch plötzlichen Ausfall oder fortschreitende Verschlechterung der Systemeigenschaften. Eine Optimierung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses tribologischer Systemen erfordert problemorientierte Lösungsansätze, die heutige Kenntnisse über Grundmechanismen, Tribowerkstoffe, Einflüsse von Oberflächenstrukturen und Kontaktverhältnisse sowie über Wechselwirkungen in Tribosystemen berücksichtigen. Durch den Wunsch zur ökologischen und ökonomischen Optimierung wurde in den letzten Jahrzehnten die Entwicklung von speziellen Tribowerkstoffen forciert. Hierzu gehören insbesondere auch die gezielt modifizierten Oxid- und Nichtoxidkeramiken, die in zunehmendem Maß Verwendung als verschleiß- und hochtemperaturbeständige Werkstoffe im Maschinenbau finden [3, 4, 14]. Dabei zeichnet sich die Keramik gegenüber den Stählen durch ihre geringe Dichte, gute chemische Beständigkeit sowie hohe Härte und Druckfestigkeit bis in hohe Temperaturbereiche aus.

Geschichte der Tribologie

3500 bis 30 v. Chr., Zeit der Sumerer und Ägypter

- Einfache Lager zur Entfaltung von Feuer und zur Herstellung von Bohrungen durch Drehbewegungen
- Töpferscheiben mit Holz und Steinlager
- Achslager mit Lederschlaufen für Rollen- und Räderfahrzeuge
- Einsatz von Schmiermitteln wie Öl, Fett, Wasser
- Konstruktion von Schlitten zum Transport schwerer Steine

1452-1519 Leonardo da Vinci

- Untersuchungen zur Reibung an horizontaler und schiefer Ebene
- Untersuchungen zum Verschleiß an Gleitlagern

1663-1705 Guillaume Amontons

- Untersuchungen auf dem Gebiet der Mischreibung
- Reibungskraft hängt von der Normalkraft ab
- Oberflächenrauheit als Ursache für Reibung

1683-1744 John Theophilus Desaguliers

- Modell zur Erklärung der Reibung
- Reibung auf Einfluss der Kohäsion / Adhäsion zurückgeführt

1707-1783 Leonhard Euler

- Untersuchung zur Reibung an schiefer Ebene
- Einführung des Reibkoeffizienten „ μ „

1736-1806 Charles Augustin Coulomb

- entwickelt grundlegende Gedanken Amontons weiter

Tabelle 1: Überblick über historische Anwendungen und Versuche zu Reibung und Verschleiß [1].

Durch das „keramische Konzept,, konnte bei Grund- und Regelscheiben zum Beispiel auf bewegliche Abdichtungen aus Gummi verzichtet werden, die durch Alterung und Verschleiß nur eine sehr begrenzte Lebensdauer aufwiesen. Im Bereich Textilmaschinen stiegen die Standzeiten der Verschleißteile erheblich an, seitdem Hartmetalle durch Aluminiumoxide oder Zirkoniumoxide substituiert wurden. Beim Drehen und Fräsen nahmen die Schnittgeschwindigkeiten und die Zerspanvolumen bei gleichzeitigem Verzicht auf Schmiermittel erheblich zu, seitdem keramische Schneidstoffe zum Einsatz kommen.

Im folgenden sind einige Beispiele tribologischer Anwendungen zusammengestellt:

- Dicht- und Regelscheiben für Sanitärarmaturen, Industriearmaturen, Espressomaschinen sowie Bauteile für Pumpen und Ventile (Bild1).
- Komponenten für Textilmaschinen wie Fadenführer, technische Schneiden, Ringspinnen, Rotorspinnen (Bild 2).
- Hochverschleißfeste Umformwerkzeuge, Keramikbeläge für die Papierindustrie, Transportrollen (Bild 3).
- Schneidstoffe und Werkzeuge für die Hochleistungszerspanung (Bild 4).
- Poröse Preforms für die Automobilindustrie (Bild 5).
- Endoprotetik [5] (Bild 6).
- Mahlkugeln, Auskleidungen für Mühlen.
- Exenterschnecken, Lager und Gleitringe für Pumpen.

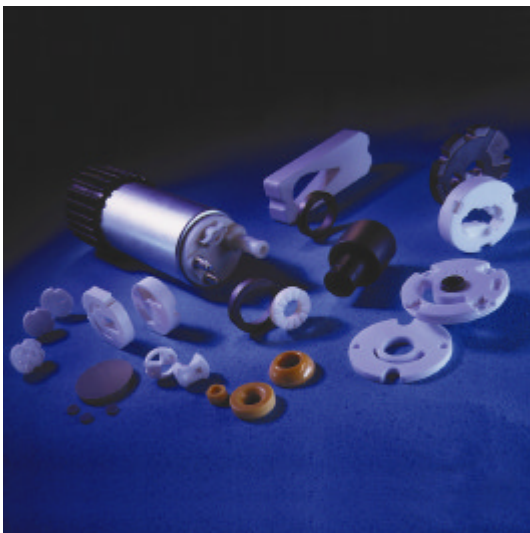


Bild 1: Dicht- und Regelscheiben



Bild 2: Komponenten für Textilmaschinen



Bild 3: Hochverschleißfeste Werkzeuge



Bild 4: Keramische Schneidstoffe

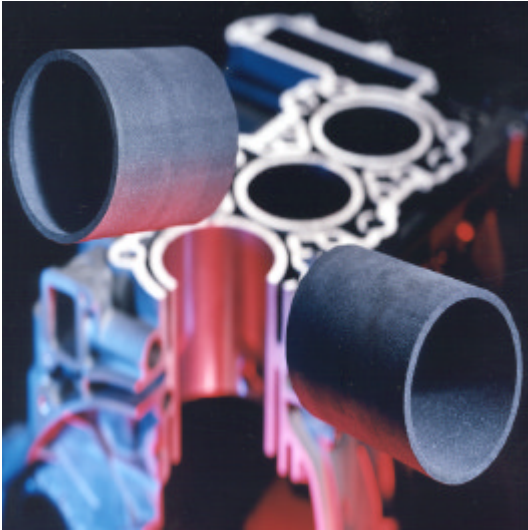


Bild 5: Poröse Preforms



Bild 6: Keramik in der Medizintechnik

2. Einflußfaktoren auf Reibung und Verschleiß

Reibung und Verschleiß sind keine reinen Werkstoffkennwerte. Beide Größen hängen von einer Fülle von Einflußfaktoren ab. Schon kleine Veränderungen können sich unter Umständen beträchtlich auf die Reibungszahl und den Verschleißbetrag auswirken. Nachfolgend sind hierzu Beispiele angeführt:

a) Geringfügige Geometrieänderungen bei Grund- und Gegenkörper:

Ein Kupferstift mit einem Durchmesser von 4 mm wurde gegen einen rotierenden Stahlring mit einem Durchmesser von 76 mm gedrückt. Dabei kam es zu adhäsivem Verschleiß und Kupfer wurde auf den Stahlring übertragen. Der Verschleißbetrag war nach einem definierten Weg relativ hoch. Durch Geometrieänderungen des Stiftes auf einen Durchmesser von 8 mm und der Scheibe auf 40 mm konnte der Verschleißbetrag erheblich gesenkt werden. Bedingt durch die Änderung der thermischen Verhältnisse trat nun Tribooxidation als Hauptverschleißmechanismus auf, wodurch sich eine verschleißmindernde Kupferoxidschicht bildete. [6].

b) Einfluss der Umgebung (Gegenläufiges Verhalten von Reibung und Verschleiß)

Bei der Paarung TiC-Stift gegen TiC-Scheibe kommt es in Luft (50% relativer Feuchte) zu relativ niedrigen Reibungszahlen ($f = F_N/F_T = 0,2$) bei stetig fortschreitendem Materialverlust

(Bild 7). Im Vakuum hingegen ist die Reibungszahl um mehr als doppelt so hoch und erreicht Werte von ca. 0,5. Der Verschleißbetrag hingegen ist — im Vergleich zu den Werten an Luft — relativ niedrig. Bedingt wird dieses Verhalten dadurch, daß sich an Luft schmierend wirkende Titanoxide im Reibkontakt bilden, die eine niedrige Scherfestigkeit besitzen. Diese wiederum bedingen eine niedrige Reibungszahl, aber auch den leichten Abrieb dieser Schichten und den hohen Verschleiß. Im Vakuum hingegen wird das abgeriebene Titanoxid nicht nachgebildet, im Reibkontakt entsteht keine reibungsmindernde Schicht, dafür bleibt die Abriebfestigkeit des TiCs erhalten und der Verschleißbetrag ist niedrig. [6].

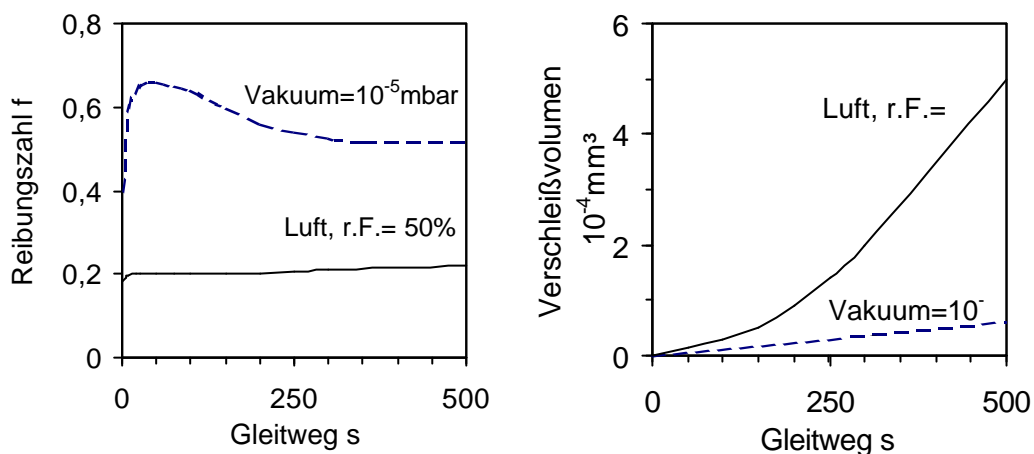


Bild 7: System: Stift/Scheibe: TiC/Tic (CVD auf Stahl)

c) Einfluss der Gleitgeschwindigkeit, Viskosität des Schmiermittels und Normalkraft

In geschmierten Systemen hängt die Reibungszahl von einer Kombination von Größen ab, insbesondere von der Viskosität des Schmiermittels, der Gleitgeschwindigkeit und der wirkenden Normalkraft [4, 6]. Die Abhängigkeit kann mit Hilfe der Stribeckkurve erläutert werden (Bild 8): Wird durch eine geeignete Parameterkombination aus Viskosität, Geschwindigkeit und Normalkraft ein hoher Wert erreicht, werden die Rauheitshügel von Grund- und Gegenkörper getrennt und es herrscht Flüssigkeitsreibung vor, die auch als hydrodynamische Schmierung bezeichnet wird. Die Reibung hängt demnach vor allem von der inneren Reibung im Schmierfilm ab. Verringert sich der Quotient soweit, daß die Schmierfilmdicke die Gesamtrautiefe von Grund- und Gegenkörper erreicht, so wird die Belastung teilweise auch durch den direkten Kontakt der Rauheitshügel auf den Grundkörper übertragen. Dieser Zustand wird als Mischreibung bezeichnet und durch den Festkörperkontakt mit beeinflußt. Kommt es zur weiteren Verringerung des Quotienten, verschwindet der hydrodynamische Traganteil des Schmierstoffes und der Festkörperkontakt bestimmt maßgeblich die Reibungszahl (Festkörperreibung).

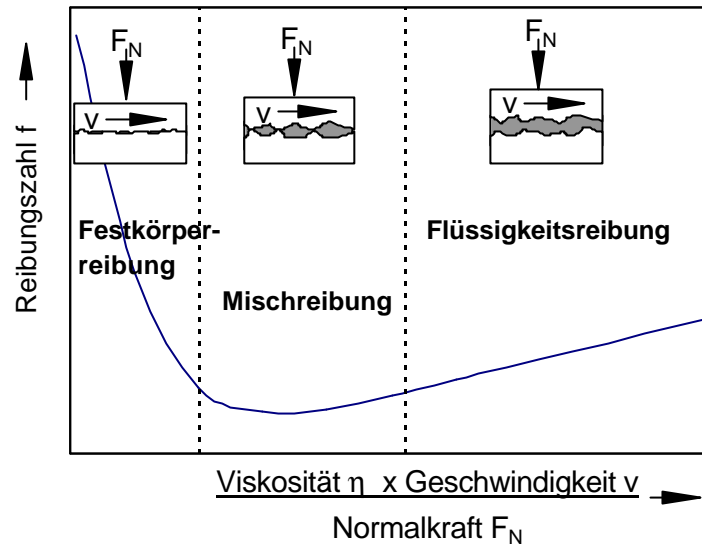


Bild 8: Stribeck-Kurve: Auswirkungen des Schmierfilms auf die Reibungszahl in Abhängigkeit von der Viskosität, Geschwindigkeit und Normalkraft

d) Einfluss der Werkstoffpaarungen und des Werkstoffes (Bild 9 bis 12)

In der Hüftgelenkprothetik können unterschiedliche Kugel/Pfanne-Paarungen zum Einsatz kommen (Bild 9, 10). Wie Bild 11 veranschaulicht, kann durch die Auswahl der Paarung der Verschleißbetrag erheblich gesenkt werden. So wurde der Abrieb durch den Einsatz der Paarung Biolox/Biolox (=Aluminiumoxid) gegenüber der Paarung Metall/Polyethylen um den Faktor 40 gesenkt!

Variiert der Gehalt von Zirkonoxid und Aluminiumoxid, so zeigen die Modellversuche im System Scheibe/Platte, daß die Verschleißbeträge in Abhängigkeit der Zusammensetzung variieren.

The BIOLOX[®] forte Concept



Bild 9: Tribosystem Hüftgelenk

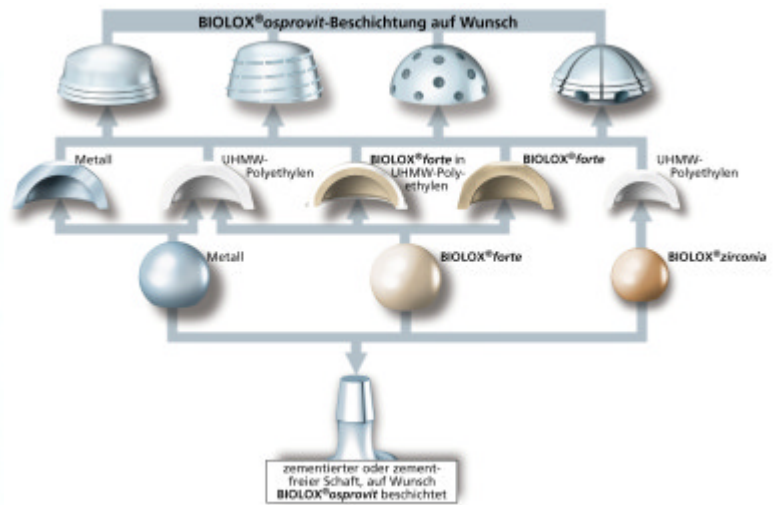


Bild 10: Mögliche Hüftgelenkpaarungen

Wear of ceramic components

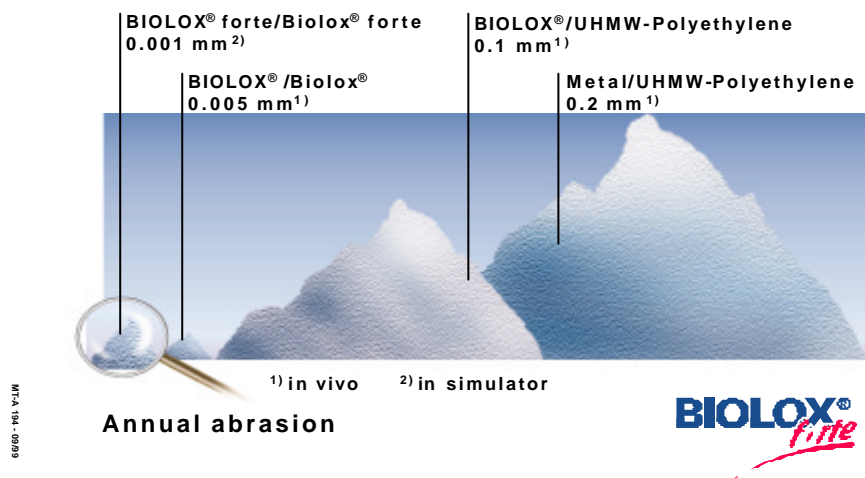


Bild 11: Verschleißbeträge in Abhängigkeit von der Materialpaarung

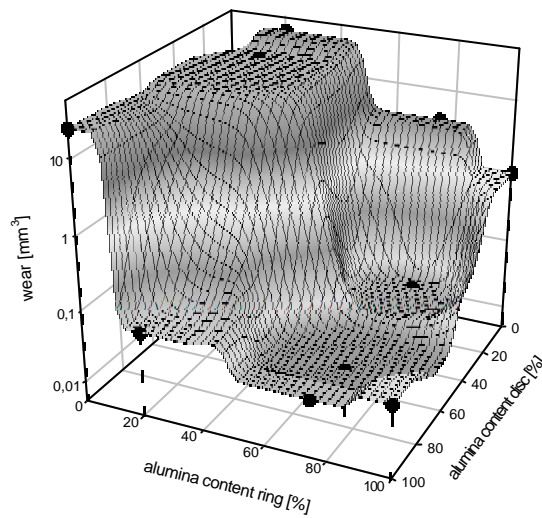


Bild 12: Verschleißbeträge in Abhängigkeit vom Zirkonoxid-Aluminiumoxidgehalt

Die Beispiele verdeutlichen, dass die Kontaktgeometrie, die Umgebungsbedingungen, der Zwischenstoff, die Materialpaarungen und Werkstoffzusammensetzungen die tribologischen Ergebnisse beeinflussen. Darüber hinaus wirken sich die Beanspruchungsparameter wie z.B. Geschwindigkeit, Flächenpressung, Temperatur und Umgebungsfeuchte aus. Außerdem gehen die Oberflächenbeschaffenheit und Gefügeparameter wie mittlere Korngröße in die Ergebnisse mit ein.

Reibung und Verschleiß sind demnach nicht als reine Materialeigenschaften anzusehen sondern als Systemeigenschaften. Um diesen komplexen Sachverhalt der Wechselwirkungen zu beschreiben, bedient man sich der Systemanalyse, wie sie schematisch in Tabelle 2 und Bild 13 dargestellt und im Kapitel 4 beschrieben ist.

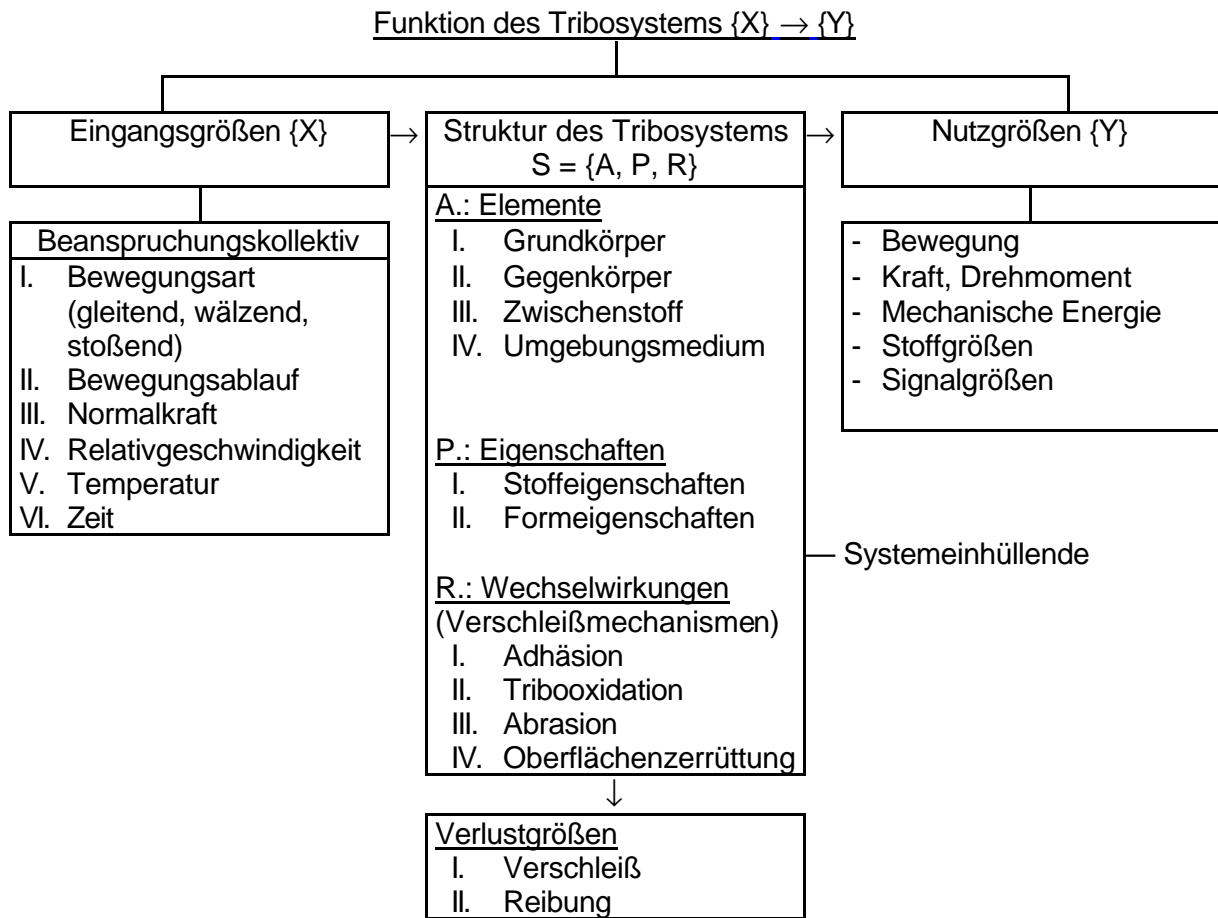


Tabelle 2: Analyse eines tribologischen Systems nach [6].

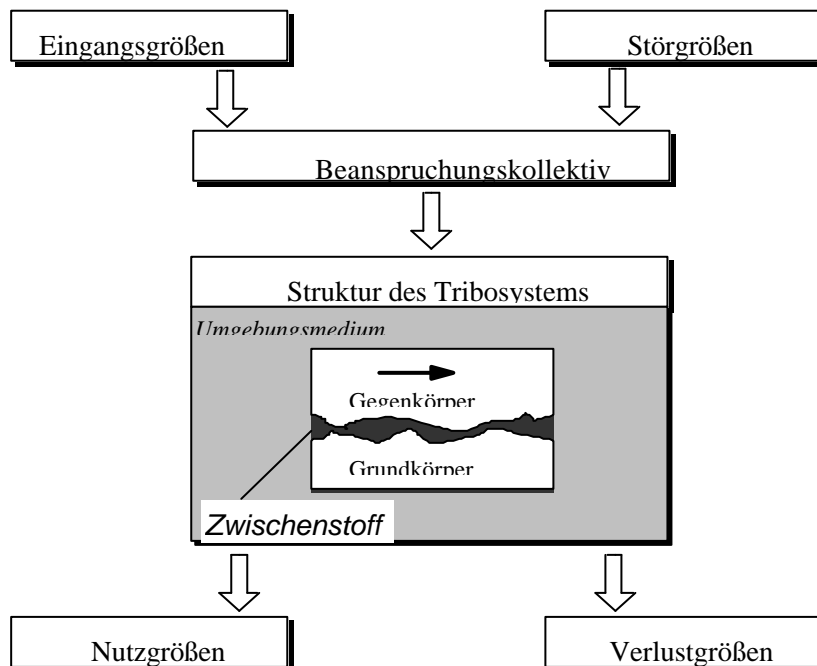


Bild 13: Schematische Darstellung eines tribologischen Systems [9]

3. Prüftechnik

In der Regel ist es aus Kosten- und zeitlichen Gründen nicht möglich, tribologische Untersuchungen von Bauteilen in einer Anlage direkt im Betrieb vor Ort durchzuführen. Deshalb werden tribologische Prüfungen in unterschiedlichen Kategorien durchgeführt:

- (1) Feldversuch (z. B. Auto in Teststeckenversuch → größter Aufwand, genaueste Aussage)
- (2) Prüfstandversuch (z. B. Auto auf einem Prüfstand)
- (3) Aggregatversuch (z. B. nur Motorblock auf einem Prüfstand)
- (4) Modellversuch am verkleinerten Aggregat (z. B. nur Kolben/Laufbuchse)
- (5) Modellversuch mit einfachen Bauteilen
- (6) Modellversuch mit einfachen Proben (z. B. Stift / Scheibe)

Dabei nimmt die Übertragbarkeit der Prüfergebnisse auf die Praxis von (1) nach (6) hin ab. Bestimmt wird die Prüfkategorie von der Zielsetzung. Die Lebensdauer einzelner Komponenten eines Systems lässt sich oftmals schon im Prüfstandversuch ermitteln, die Eignung einer Materialpaarung kann auch in einem geeigneten Modellversuch am verkleinerten Aggregat bestimmt werden. Eine Vorauswahl aus einer sehr großen Anzahl von möglichen Werkstoffpaarungen wird häufig mit Hilfe von Modellversuchen bei Verwendung einfacher Geometrien durchgeführt.

Allgemein unterscheidet man bei der Prüfung zwischen

- offenen Tribosystemen (Eigenschaften des Grundkörpers sind vom Interesse, z. B. bei Stückgutförderung)
- geschlossenen Tribosystemen (Verhalten beider Partner wird untersucht)

Ziele der Tribo-Prüfungen allgemein sind:

- Auslegung der Tribosysteme optimal zu gestalten
- Untersuchung der Funktionsfähigkeit
- Simulation von Tribosystemen bezüglich konstruktiven und fertigungstechnischen Auslegungen
- Erfassung von Schädigungsmechanismen.

4. Zusammenstellung „Grundbegriffe der Tribologie“

Tribologie (griechisch: tribein = reiben) 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 [7].

Die dynamische **Reibung** beschreibt die Kraft, die der Relativbewegung kontaktierender Körper entgegenwirkt und zum Verlust an mechanischer Energie führt. Dieser Energieverbrauch ist oftmals unerwünscht, andererseits kann die Reibung aber auch nützlich sein, wie zum Beispiel bei der Fortbewegung im System Reifen/Straße, beim Bremsen oder der Selbsthemmung von Schrauben. Als Kenngröße für translatorische Bewegungen wird die Reibungszahl μ bzw. f angegeben, die das Verhältnis der Reibungskraft F_T zur Normalkraft F_N darstellt (Bild 14).

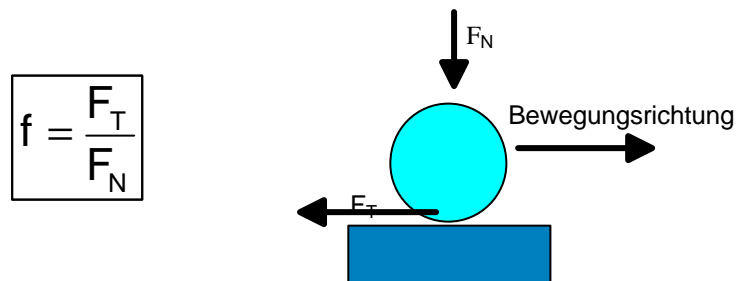


Bild 14: Verhältnis der Reibungskraft F_T zur Normalkraft F_N

Die Reibungsarten können in Abhängigkeit von der Relativbewegung in die Hauptgruppen Gleit-, Roll-, Wälz-, Bohr- und Stoßreibung unterteilt werden. Bei der Einteilung der Reibungsarten nach den Aggregatzuständen der beteiligten Stoffe wird zwischen Festkörper-, Flüssigkeits-, Gas- und Mischreibung unterschieden. [6, 8].

Verschleiß ist definiert als fortschreitender Materialverlust der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers. Er äußert sich im Auftreten von losgelösten kleinen Teilchen (Verschleißpartikeln) sowie in Stoff- und Formänderungen der tribologisch beanspruchten Oberfläche [9]. Zu den gebräuchlichen direkten Verschleißmeßgrößen gehören der lineare Verschleißbetrag sowie der planimetrische, volumetrische und massenmäßige Verschleißbetrag. Neben den direkten Meßgrößen gibt es bezogene Größen wie z. B. die Verschleißgeschwindigkeit oder indirekte Größen wie z. B. die verschleißbedingte Gebrauchsdauer [10]. Nach der Kinematik und Struktur des Tribosystems können die auftretenden Verschleißarten bei Festkörper-, Grenz- oder Mischreibung unter anderem in Gleit-, Wälz-, Stoß- und Schwingungverschleiß eingeteilt werden [9].

Allgemein werden Reibung und Verschleiß als Verlustgrößen **tribologischer Systeme** angesehen. Sie hängen nicht nur von den Materialeigenschaften ab, sondern auch von den auftretenden Wechselwirkungen und den Größen des Beanspruchungskollektivs.

Reibung und Verschleiß sind deshalb Systemeigenschaften und keine reinen Materialeigenschaften !!!

Eine möglichst genaue Erfassung des tribologischen Systems (Bild 13, Tabelle 2) mit der Charakterisierung des Beanspruchungskollektivs und der Struktur des Tribosystems ist deshalb neben der Erfassung der Reibungszahl und der Verschleißkenngrößen stets erforderlich. In Tabelle 2 ist die Funktion eines Tribosystems, bei dem die Eingangsgrößen über die Struktur des Systems in Verlustgrößen und Nutzgrößen umgewandelt werden, schematisch dargestellt. Zu den Aufgaben tribologischer Systeme gehört u.a. die Übertragung von Bewegung, Arbeit, Masse oder Information. Wichtige, sehr unterschiedliche Systeme sind z.B. Rad/Schiene, Autoreifen/Straße, Kolben/Zylinder, Lager/Welle, hydraulische Förderanlagen und Bagger [11]. Die Reibungs- und Verschleißmechanismen, von denen meist mehrere auf einmal wirksam sind, können wie in Tabelle 3 eingeteilt werden.

Reibungsmechanismen	Verschleißmechanismen	Verschleißerscheinungsformen
I. Adhäsion und Scheren adhäsiver Bindungen	I. Adhäsion	Z.B.: Fresser, Löcher, Kuppen, Schuppen, Materialübertrag
II. Plastische Deformation	II. Abrasion	Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen
III. Furchung	III. Oberflächenzerrüttung	Risse, Grübchen
IV. Elastische Hysterese und Dämpfung	IV. Tribochemische Reaktion	Reaktionsprodukte (Partikel, Schichten)

Tabelle 3: Reibungsmechanismen [6] und typische Verschleißerscheinungsformen [9].

Die **Reibungsmechanismen** beschreiben dabei die bewegungshemmenden, energie-dissipierenden Elementarprozesse in den Kontaktbereichen eines tribologischen Systems. Die adhäsive Komponente beruht auf der Bildung und Zerstörung von Adhäsionsbindungen. Bei der plastischen Kontaktdeformation der Mikrokontaktflächen treten weitere Energieverluste durch dissipative Prozesse auf. Dringt ein härterer Körper in einen weicheren ein, ergibt sich bei der Tangentialverschiebung eine Reibungskomponente als Resultat des Widerstandes des

Materials gegenüber der Furchung. Bei dem Mechanismus der elastischen Kontaktdeformation werden unter Mitwirkung von Rauheitshügeln in örtlich und zeitlich stochastischer Verteilung Spannungs- und damit Schwingungsfelder auf- und abgebaut. Dies führt zu einer Energieabsorption. Des weiteren tritt ein Energieverlust bei einer plastischen Kontaktdeformation auf, da an Versetzungen kontinuierlich Energie durch eine thermoelastische Dämpfung und Streuung von akustischen Wellen dissipiert wird [6].

Die beim Verschleißvorgang ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse werden als **Verschleißmechanismen** bezeichnet und den Mechanismen der Adhäsion, der Abrasion, der Oberflächenzerrüttung und der tribochemischen Reaktion zugeordnet.

Bei der **Adhäsion** kommt es zur Ausbildung von Grenzflächen-Haftverbindungen (Adhäsionsbindungen), die bei einer Relativbewegung der Festkörperoberflächen abgeschert werden. Die Trennung der Mikrokontakte erfolgt entweder in der Grenzfläche oder in den angrenzenden Oberflächenbereichen eines oder beider Körper, so daß es zu Materialübertrag und zur Ausbildung von Löchern kommen kann. Überwiegend tritt der Verschleiß durch Adhäsion bei metallischen Paarungen auf. Keramische Werkstoffe hingegen neigen aufgrund des kovalenten Bindungstyps weniger zum adhäsiven Verschleiß.

Das Eindringen eines härteren Körpers in einen weicheren Körper bei tangentialer Bewegung führt zu dem Verschleißmechanismus der **Abrasion**. Die Verschleißerscheinungsformen können nach der Art der Wechselwirkungen zwischen den abrasiven Teilchen und der verschleißenden Werkstoffoberfläche in Mikropflügen, Mikrospanen, Mikroermüden und Mikrobrechen unterteilt werden [12]. Beim Mikropflügen entstehen durch plastische Werkstoffverformungen Riefen und Materialaufwerfungen an den Furchungsrändern. Wird der Werkstoff wiederholt verformt und zu den Furchungsrändern verdrängt, versagt er schließlich durch Ermüden, und es kommt zum Materialabtrag. Materialabtrag durch Spanbildung liegt beim Mikrospanen vor. Bei spröden Werkstoffen tritt an Orten hoher Spannungskonzentration Mikrobrechen durch Rißbildung und Rißausbreitung auf.

Oberflächenzerrüttung wird hervorgerufen durch Ermüdung und Rißbildung in Oberflächenbereichen und ist eine Folge wechselnder mechanischer Spannungen. Wachsen die Risse und vereinen sie sich, werden Partikel abgetrennt, die Löcher oder Grübchen hinterlassen.

Partikel und Schichten auf oder zwischen den sich berührenden Oberflächen entstehen auch, wenn es durch die tribologische Beanspruchung zu **tribochemischen Reaktionen** zwischen den Elementen des Tribosystems kommt. Die chemischen Reaktionen werden durch

reibbedingte Temperaturerhöhung sowie entstandene Gitterfehler hervorgerufen und führen zu veränderten Festigkeitseigenschaften der betroffenen Oberflächenbereiche. Die gebildeten Reaktionsschichten können sich sowohl positiv als auch negativ auswirken. So schränken tribochemisch gebildete Oxidschichten auf Metallen die Adhäsion in den meisten Fällen ein. Bildet sich aber ein relativ hartes Oxid auf einem weichen Metall wie z. B. Al_2O_3 auf Al, wird der Verschleiß erhöht, wenn die Oxidschichten abplatzen und anschließend abrasiv wirken. Die Bildung von Oxiden mit geringer Scherfestigkeit (sogenannter „lubricious oxides,“) auf einem harten Substrat kann sich wiederum reibungs- und verschleißmindernd auswirken. Das harte Substrat gibt dabei die geringe Mikrokontaktfläche vor, und in dem weichen Oxid erfolgt die Scherung, was zu reduzierten Reibungskräften und Verschleißbeträgen führt [13]. Beispiele für schmierend wirkende Oxide sind $\text{TiO}_{1,93}$, WO_3 und Co_3O_4 .

5. Literatur:

- [1] D. Dowson: History of Tribology. Longman, London (1979).
- [2] W. Bunk, J. Hansen, M. Geyer: Tribologie: Reibung · Verschleiß · Schmierung. Springer Verlag Berlin 1981.
- [3] F. Thümmler: Keramische Werkstoffe für den Maschinenbau, in A. Weber (Hrsg.): Neue Werkstoffe. VDI Verlag, Düsseldorf (1989), S. 129-136.
- [4] O. Pigores: Werkstoffe in der Tribotechnik: Reibung, Schmierung und Verschleißbeständigkeit von Werkstoffen und Bauteilen. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie (1992).
- [5] G. Willmann: Biokeramik in der Orthopädie – Was haben wir aus 25 Jahren gelehrt ?. Med.Orth. Tech. 120 (2000) 10-16.
- [6] H. Czichos, K.-H. Habig: Tribologie-Handbuch, Reibung und Verschleiß; Systemanalyse, Prüftechnik, Werkstoffe und Konstruktionselemente. Vieweg-Verlag, Braunschweig, (1992).
- [7] DIN 50 323, Teil 1: Tribologie; Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, (1988).
- [8] DIN 50 323, Teil 3: Tribologie; Reibung; Begriffe, Arten, Zustände, Kenngrößen. Beuth Verlag, Berlin, (1993).
- [9] DIN 50 320: Verschleiß, Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth Verlag, Berlin, (1979).
- [10] DIN 50 321: Verschleiß-Meßgrößen. Beuth Verlag, Berlin, (1979).
- [11] K.-H. Zum Gahr: Tribologie: Reibung — Verschleiß — Schmierung. Naturwissenschaften, 72 (1985) 260-267.
- [12] K.-H. Zum Gahr: Grundlagen des Verschleißes. VDI Bericht Nr. 600.3, VDI Verlag, Düsseldorf, (1987) S. 29-59.
- [13] M. Woydt: Werkstoffkonzept für den Trockenlauf. Tribologie + Schmierungstechnik, 44 (1997) 14-19.
- [14] M. Woydt: Beschaffung innovativer Werkstoffe: Tribologie + Schmierungstechnik, 45 (1998) 37-41.