

3. Maschinenbau

3.1 Keramische Gleitpaarungen und Tribologie

- Dr. Ilka Lenke und Elke Vitzthum
CeramTec AG
Plochingen und Lauf a.d. Pegnitz

Die Folien finden Sie ab Seite 206.

3.1.1. Einleitung

Reibung, Verschleiß und Schmierung — zusammengefasst unter dem Begriff Tribologie — besitzen eine wesentliche wirtschaftliche Bedeutung, denn sie bestimmen über die Standzeiten von Maschinen und Anlagen. 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 Systeme 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. 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.

Einige Beispiele tribologischer Anwendungen sind:

- Dicht- und Regelscheiben für Sanitärarmaturen, Industriearmaturen, Espressomaschinen sowie Bauteile für Pumpen und Ventile
- Komponenten für Textilmaschinen wie Fadenführer, technische Schneiden, Ringspinnen, Rotorspinnen
- Hochverschleißfeste Umformwerkzeuge, Keramikbeläge für die Papierindustrie, Transportrollen
- Schneidstoffe und Werkzeuge für die Hochleistungszerspannung
- Poröse Preforms für die Automobilindustrie
- Lager und Gleitringe für Pumpen

3.1.2. Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß

Reibung und Verschleiß sind keine reinen Werkstoffkennwerte, sondern hängen von einer Fülle von Einflussfaktoren ab. Schon kleine Veränderungen können sich auf die Reibungszahl und den Verschleißbetrag auswirken. Hierzu einige Beispiele:

1. 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.

2. 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 ($f = 0,2$) bei stetig fortschreitendem Materialverlust. Im Vakuum hingegen ist die Reibungszahl um mehr als doppelt so hoch und erreicht Werte von ca. 0,5. Der Verschleißbetrag 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 schnelleren 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.

3. Einfluss der Gleitgeschwindigkeit, Viskosität des Schmiermittels und Normalkraft

In geschmierten Systemen hängt die Reibungszahl f von v' , einer Kombination von Größen ab, insbesondere von der Viskosität des Schmiermittels, der Gleitgeschwindigkeit und der wirkenden Normalkraft. Die Abhängigkeit kann mit Hilfe der Stribeckkurve erläutert werden: 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 v' 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 von v' , verschwindet der hydrodynamische Traganteil des Schmierstoffes und der Festkörperkontakt bestimmt maßgeblich die Reibungszahl (Festkörperreibung).

4. Einfluss der Werkstoffpaarungen und des Werkstoffes

Anhand der 3 folgenden Beispiele kann der Einfluss der Werkstoffpaarungen gut dargestellt werden:

1. In der Medizintechnik können unterschiedliche Kugel / Pfanne-Paarungen beim Hüftgelenk zum Einsatz kommen. Die Auswahl der Paarung kann den Verschleißbetrag erheblich senken. So wurde der Abrieb durch den Einsatz der Paarung Biolog / Biolog (=Aluminiumoxid) gegenüber der Paarung Metall / Polyethylen um den Faktor 40 gesenkt!
2. Die Keramik-Verbund – Bremsscheibe zeigt eine deutlich höhere Lebensdauer. Durch den Werkstoff Keramik gibt es keine Korrosion und einen deutlich reduzierten Verschleiß. Der konstante Reibwert erhöht die Sicherheit und durch das reduzierte Gewicht der Bremse verbessert sich zusätzlich die Fahrdynamik und der Fahrkomfort.
3. Bei keramischen Gleitpaarungen wird das tribologische Verhalten insbesondere durch die physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe — wie zum Beispiel der Wärmeleitfähigkeit / Wärmekapazität und Wärmeausdehnung — beeinflusst. Es wird zwischen hart / weich und hart / hart Paarungen unterschieden.
Dichtungen, die über längere Zeit ohne Flüssigkeits-schmierung betreiben werden, werden zum Beispiel als hart / weich Paarung in SiC / Kohlegraphit ausgeführt, da Kohlegraphit hervorragende Trockenlaufeigenschaften besitzt. So können niedrige Reibungszahlen und ein gutes Gleiten sowie ein möglichst geringer Verschleiß bei diesen Bedingungen gewährleistet werden.
Als hervorragende tribologische Lösung bei Kreiselpumpen zum Fördern von Natronlauge oder Salzsäure haben sich hart / hart Paarungen aus Siliciumcarbid bewährt. Die Standzeit solch einer Paarung beträgt ca. 2 bis 3 Jahre, Alternativen halten oft nur 3 Monate. Zum Tragen kommt hier die gute Wärmeleitfähigkeit von SiC, die die entstehende Reibungswärme aus dem Dichtspalt leitet. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für niedrige Reibungszahlen und geringe Verschleißbeträge in dieser Anwendung. Darüber hinaus ist die Festigkeit von SiC hoch genug, um den hohen mechanischen Belastungen bei kurzem Trockenlauf standzuhalten. Eine weitere wichtige Eigenschaft des SiCs ist die hohe Härte, die das Eindringen von Feststoffpartikeln in die Oberfläche bzw. den abrasiven Verschleiß verhindert.

Werkstoffoberfläche und Dichtspaltgeometrie ändern sich somit relativ langsam und tragen ebenfalls zur langen Lebensdauer der Paarung bei.

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 keine reinen Materialeigenschaften, sondern Systemeigenschaften. Um diesen komplexen Sachverhalt der Wechselwirkungen zu beschreiben, bedient man sich der Systemanalyse. 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 mit der Charakterisierung des Beanspruchungskollektivs und der Struktur des Tribosystems ist deshalb neben der Erfassung der Reibungszahl und der Verschleißkenngrößen stets erforderlich. 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 oder hydraulische Förderanlagen.

Die **Reibungsmechanismen** beschreiben dabei die bewegungshemmenden, energiedissipierenden 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.

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 kovalent-ionischen 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 Mikrospänen, Mikroermüden und Mikrobrechen unterteilt werden. Beim Mikrospänen 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 Mikrospänen 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 Bean-

spruchung 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 Mikrokontakfläche vor, und in dem weichen Oxid erfolgt die Scherung, was zu reduzierten Reibungskräften und Verschleißbeträgen führt. Beispiele für schmierend wirkende Oxide sind $\text{TiO}_{1,93}$, WO_3 und Co_3O_4 .

3.1.2. 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.

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.

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-, Flüssig-

keits-, Gas- und Mischreibung unterschieden. **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. 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. 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.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 19) finden sich auf den folgenden Seiten.

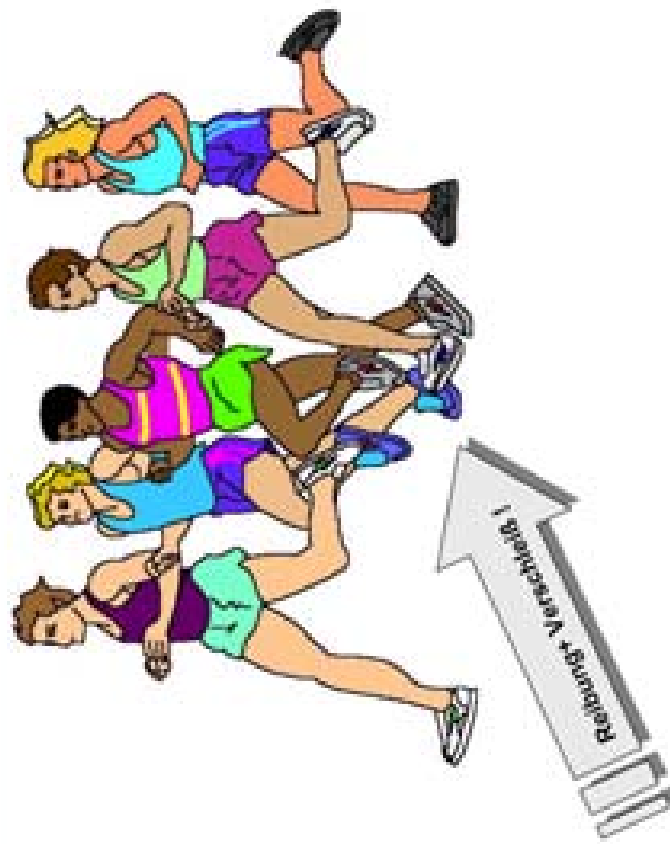
Maschinenbau


Keramische Gleitpaarungen und Tribologie

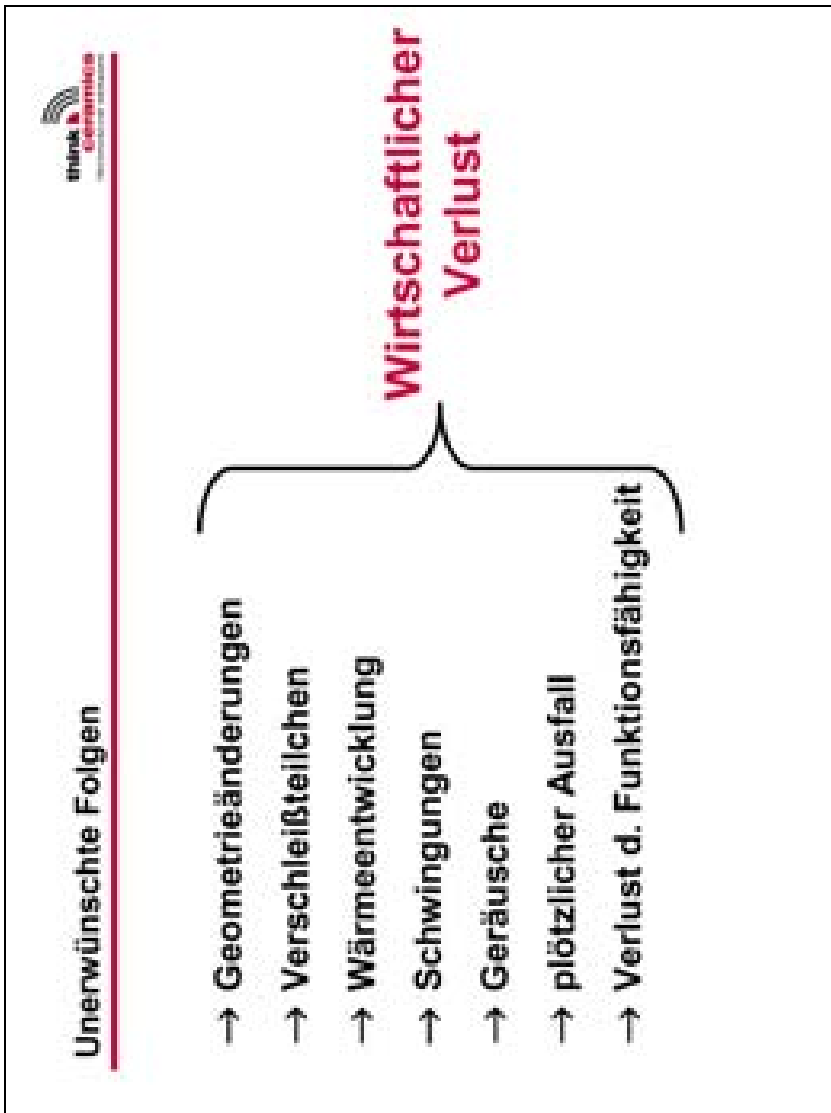
Dr. Ilka Lenke + Elke Vitzthum
CeramTec AG
Plochingen und Lauf a.d. Pegnitz



Wo begegnet uns Tribologie



think  ceramics
TECHNISCHE KERAMIK



Optimierung

- Steigerung von Wirkungsgraden
- Reduzierung des Energieverbrauchs durch verringerte Reibung
- Erhöhung der Zuverlässigkeit
- Erhöhung der Lebensdauer / Standzeiten
- Senkung der Wartungs- und Instandhaltungskosten



forcierte Entwicklung von Tribwerkstoffen



Definitionen

TRIBOLOGIE (DIN 50 323)

- ⇒ **Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung**
- ⇒ **umfasst das Gesamtgebiet von Reibung, Verschleiß und Schmierung**

REIBUNG (DIN 50 323)

- ⇒ **beschreibt die Kraft, die der Relativbewegung kontaktierender Körper entgegenwirkt**

VERSCHLEISS (DIN 50 320)

- ⇒ **fortschreitender Materialverlust der Oberfläche eines festen Körpers**

Definitionen



direkte Messgrößen:

- ⇒ linearer Verschleißbetrag W_l
- ⇒ planimetrischer Verschleißbetrag W_q
- ⇒ volumetrischer Verschleißbetrag W_v
- ⇒ massenmäßiger Verschleißbetrag W_m
- ⇒ Verschleißwiderstand = $1/W$



bezogene Messgrößen:

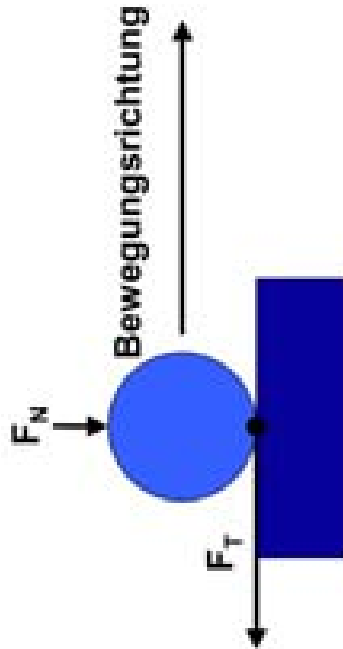
- ⇒ Verschleißgeschwindigkeit
- ⇒ Verschleiß-Weg-Verhältnis
- ⇒ Verschleiß-Durchsatz-Verhältnis



Definitionen

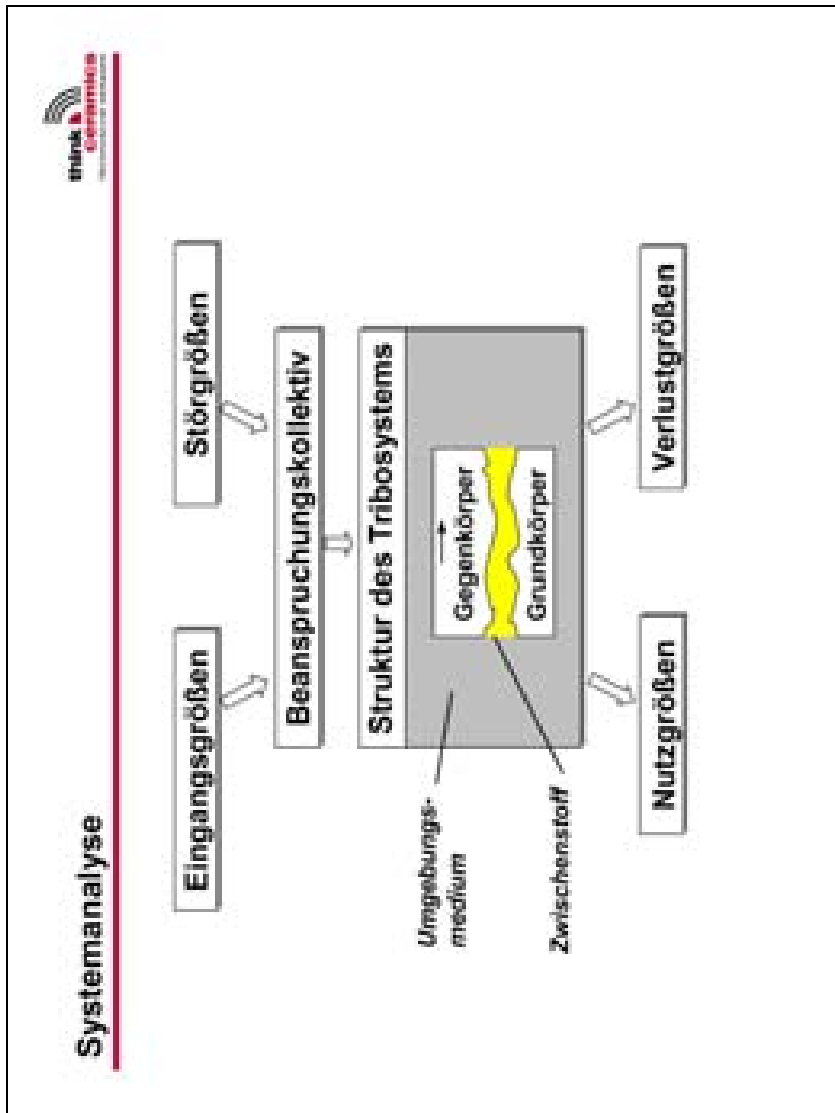
Reibungszahl f bzw. μ

$$\mu = \frac{F_T}{F_N}$$

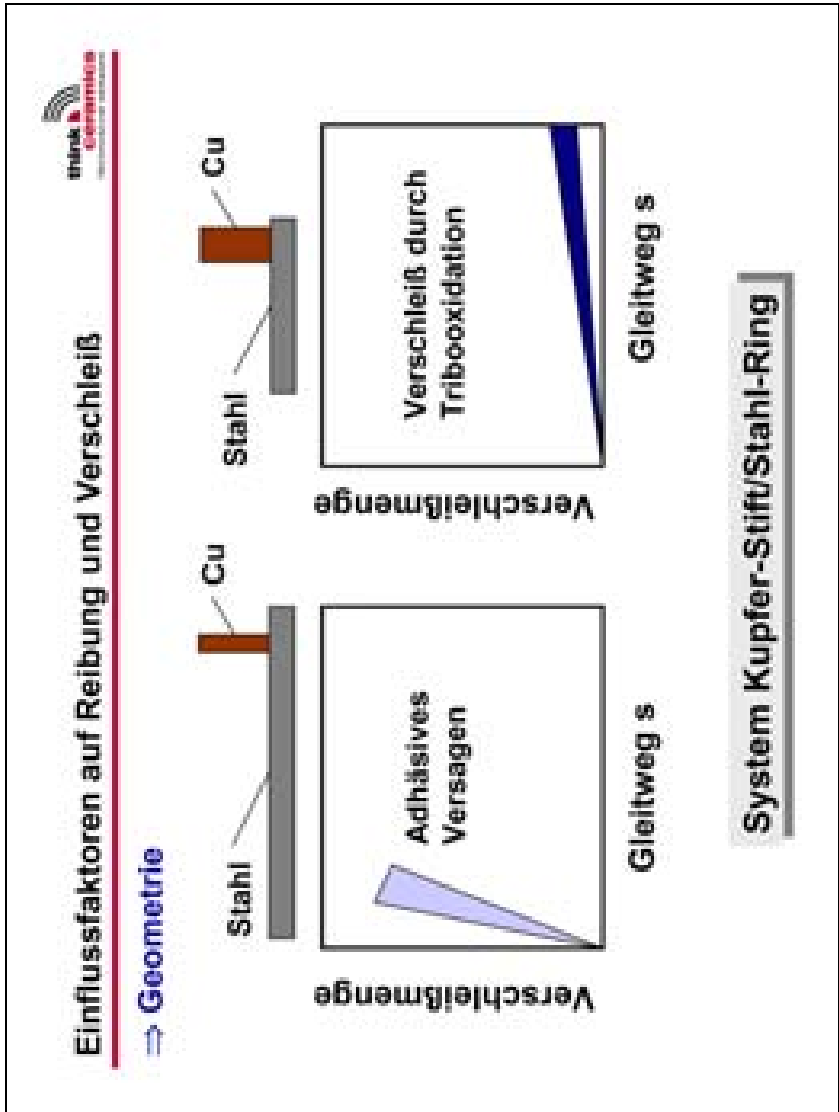




Reibung und Verschleiß
sind keine reinen
Werkstoffeigenschaften
sondern **Systemeigenschaften !**



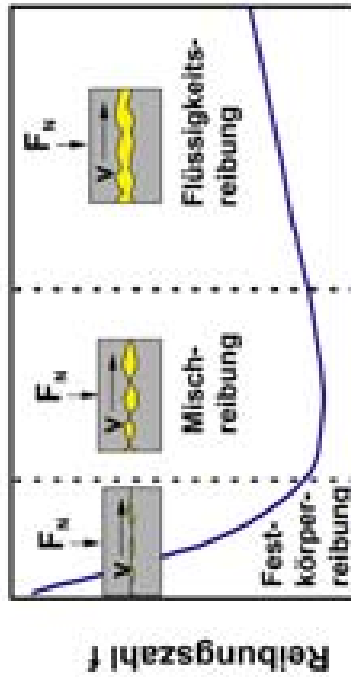
3.1 Folie 9





Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß

⇒ **Geschwindigkeit, Viskosität, Normalkraft**

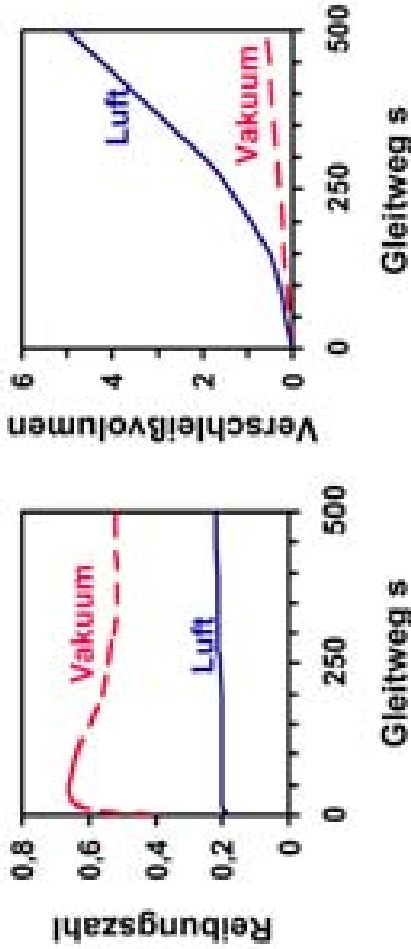


Viskosität x Geschwindigkeit v
Normalkraft

Stribeck-Kurve

Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß

⇒ **Gegenläufiges Verhalten von R + V**



System Stift/Scheibe: TiC/TiC



Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß

- **Kontaktgeometrie**
- **Umgebungsmedium**
- **Zwischenstoff**
- **Beanspruchungsparameter**
- **Werkstoffpaarungen**
- **Werkstoffzusammensetzung**

Keramisches Konzept



Oxid- und Nichtoxidkeramik als Tribowerkstoffe

- + extreme Temperaturbeständigkeit
 - + geringe Dichte
 - + gute chemische Beständigkeit
 - + hohe Härte
 - + hohe Druckfestigkeit
- Bis in hohe
Temperatur-
Bereiche !!!

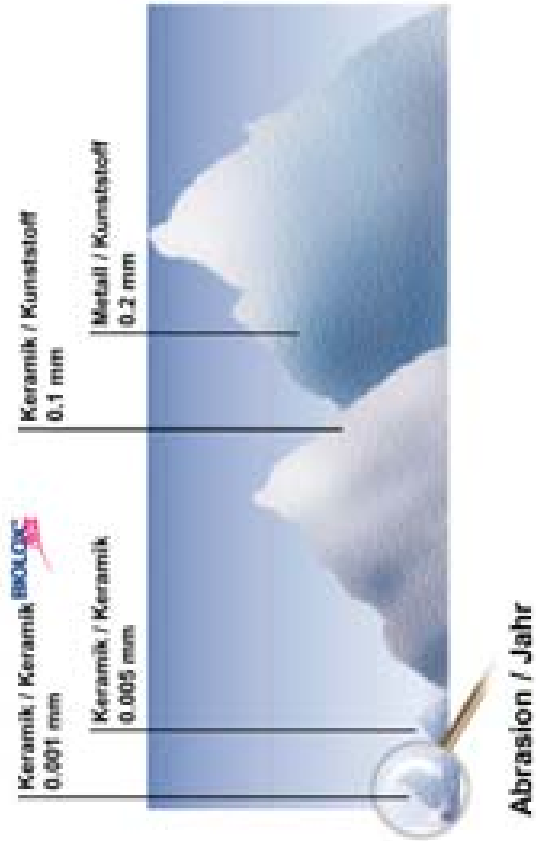
Beispiel: Keramisches Hüftgelenk

The diagram illustrates the manufacturing process of a ceramic hip joint. It is divided into two main stages: **Initial-CPG-Produktion (Beschleunigung auf 100000 U/min)** and **Final-CPG-Produktion (Beschleunigung auf 10000 U/min)**. The initial stage includes **CPG-Produktion** (CPG production) and **CPG-Prüfung** (CPG inspection). The final stage includes **CPG-Produktion** (CPG production) and **CPG-Prüfung** (CPG inspection). The final product is a **Keramisches Hüftgelenk** (Ceramic hip joint). A 3D model of the hip joint is shown on the right, with a **CPG-Produktion** label. A small box at the bottom right contains the text: **CPG-Produktion (Beschleunigung auf 10000 U/min)**.

Logo of the Institute for Machine Design and Production Technology (IMPT) at the University of Applied Sciences (FH) Osnabrück.

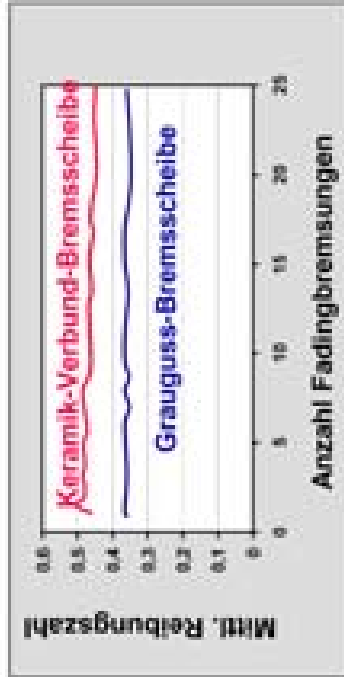
Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß

⇒ Werkstoffpaarung Hüftgelenk





Beispiel: Werkstoffpaarung Keramikbremse



⇒ Bei erhöhter Lebensdauer der Keramik-Verbund-Bremse!

Beispiel: Keramische Gleitpaarung



- | | |
|------------------------|--|
| 1) Hart / Weich | im tribologisch schwierigen Umfeld |
| | AIO / Kohle
Standardwerkstoffpaarung |
| | SiSiC / Kohle
Standardwerkstoffpaarung |
| | SSiC / Kohle
Heißwasseranwendungen |
| 2) Hart / Hart | bei flüssigkeits- / gasgeschmiertem Dichtspalt |
| | SiSiC / SiSiC
feststoffbeladene Flüssigkeiten |
| | SSiC / SSiC
feststoffbeladene Flüssigkeiten mit pH > 10 |



Reibung und Verschleiß

sind keine reinen

Werkstoffeigenschaften

sondern Systemeigenschaften !