

## 4 Tribologische Beanspruchung von Oberflächen

- 4.1 Einleitung
- 4.2 Grundlagen
- 4.3 Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß
- 4.4 Prüftechnik (Praktikum)
- 4.5 Verschleißschützende Maßnahmen

## 5 Chemische Korrosion und Korrosionsschutz

- 5.1 Elektrolytische Korrosion
- 5.2 Heißgaskorrosion
- 5.3 Wechselverformung

## 6 Prinzipielle Möglichkeiten der Oberflächenbehandlung

- 5.1 Abtragen
  - 5.1.1 Mechanische Abtragen
  - 5.1.2 Physikalische Abtragen: Verdampfen und Zerstäuben (Praktikum)
  - 5.1.3 Reaktive (chemisch/elektrochemisch) Abtragen (Praktikum)
- 5.2 Auftragen
  - 5.2.1 Großvolumige Teile
  - 5.2.2 Schmelze/Suspension/Lösung
  - 5.2.3 Tröpfchen
  - 5.2.4 Atome/Ionen

## 4 Tribologische Beanspruchung von Oberflächen

### 4.1 Einleitung

### 4.2 Grundlagen

### 4.3 Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß

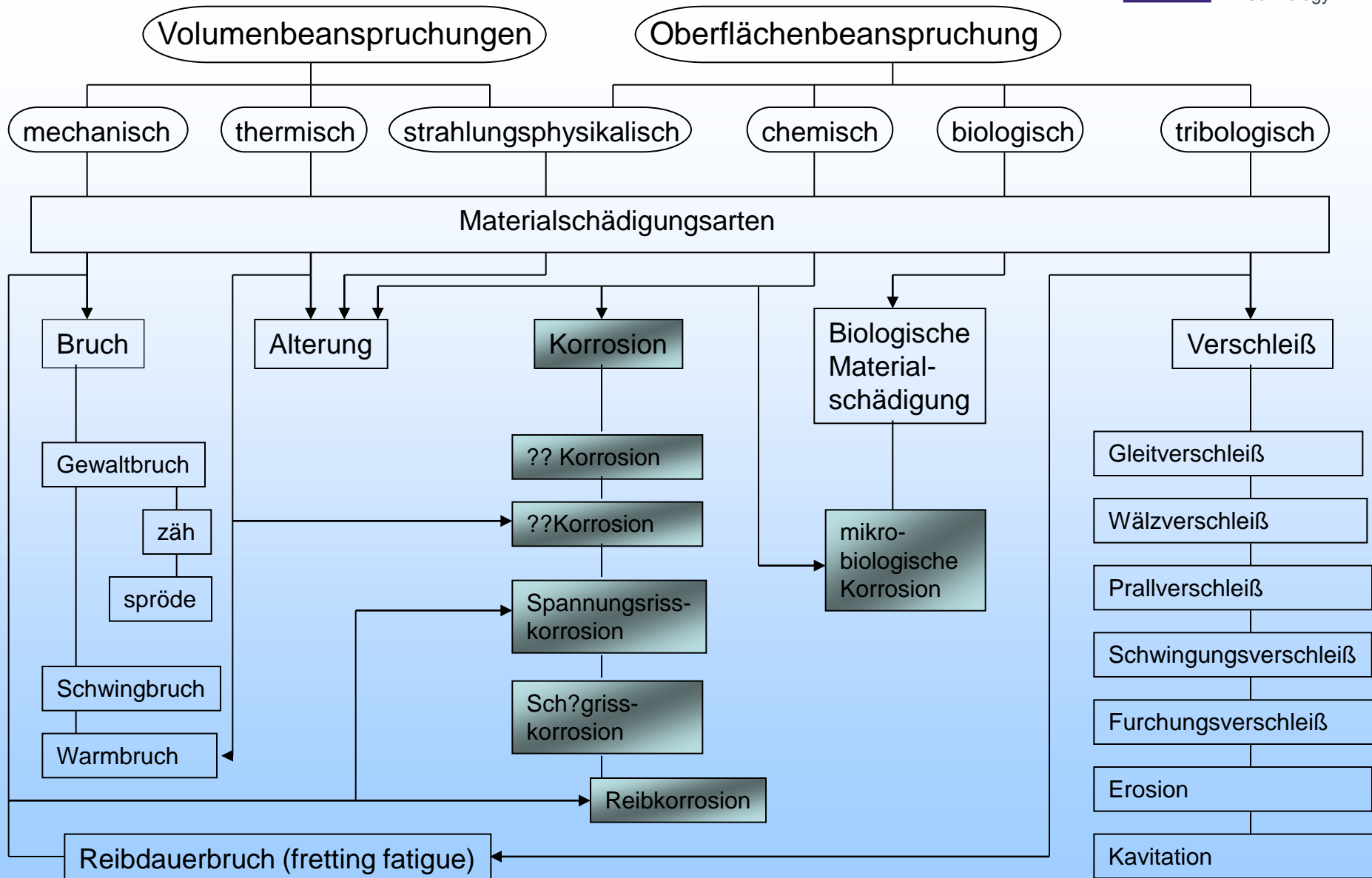
### 4.4 Prüftechnik

### 4.5 Verschleißschützende Maßnahmen

Tribologie, abgeleitet von dem  
griechischen Wort „Tribos“

=

Reibung + Verschleiß + Schmierung



## Materialschädigungsarten: Übersicht

## Beeinflussung der Betriebsfestigkeit durch den Oberflächenzustand

Die Rissinitiation erfolgt in der Regel an der Oberfläche an Fehlstellen, die eine Konzentration der Spannung bewirken

- Bearbeitungsriefen
- Einschlüsse
- Härungsrisse
- Ausscheidungen
- Phasen geringerer Schwingfestigkeit (z.B. entkohlte Randzonen)
- Überwalzungen
- Überschmiedungen
- Kerben
- Übergängen mit kleinen Radien
- eingedrückte Fremdkörper
- allgemein Ungängen

### Abhilfe:

- Fehlererkennung
- erhöhter Bearbeitungsaufwand
- Einbringung von Druckspannungen
  - + Kugelstrahlen
  - + Festwalzen
- Aufbringung von Beschichtungen
- Randschichtmodifikation

# Geschichte der Tribologie

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

- Einfache Lager zur Entfachung 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

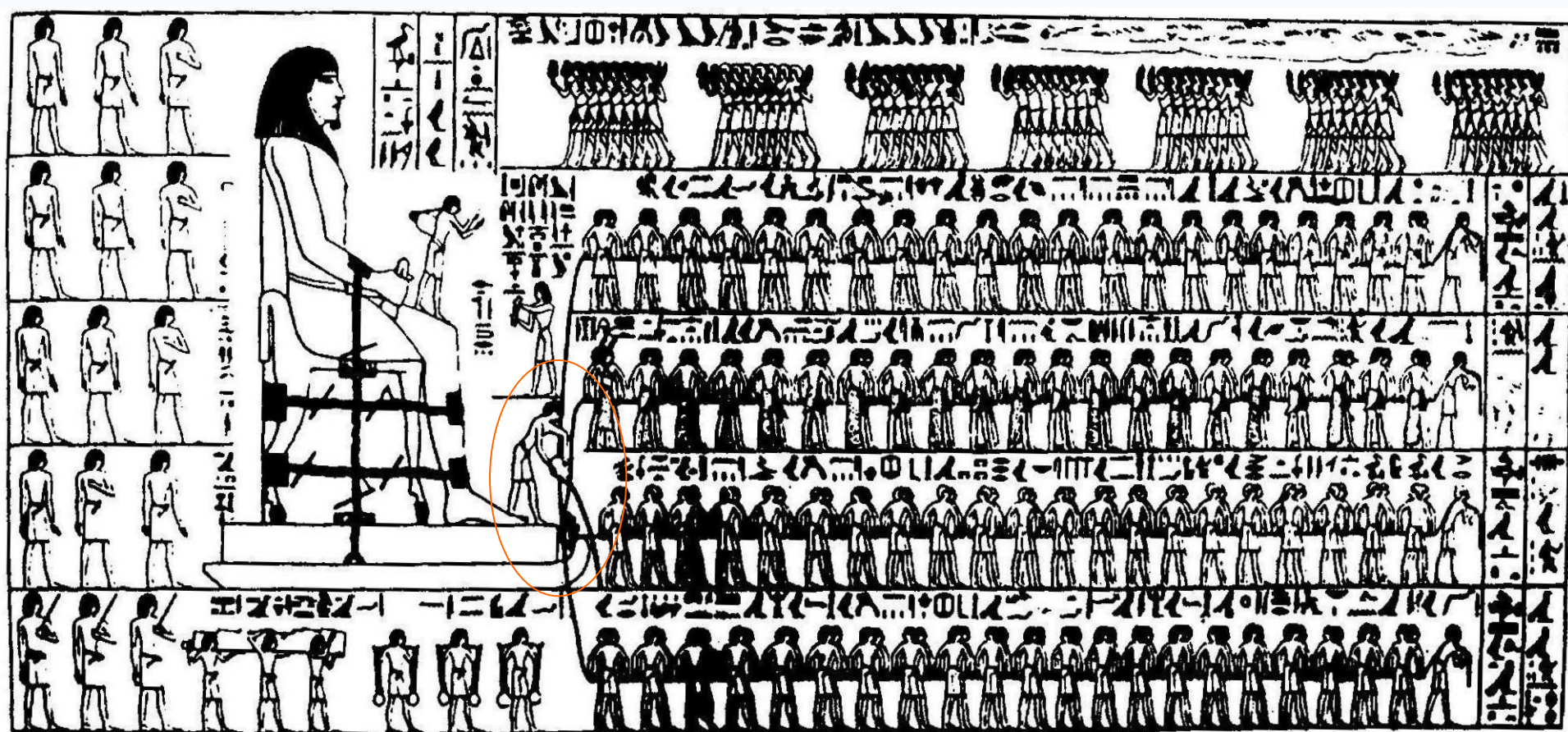
## **1707-1783 Leonhard Euler**

- Untersuchung zur Reibung an schiefer Ebene
- Einführung des Reibkoeffizienten „ $\mu$ „

## **1736-1806 Charles Augustin Coulomb**

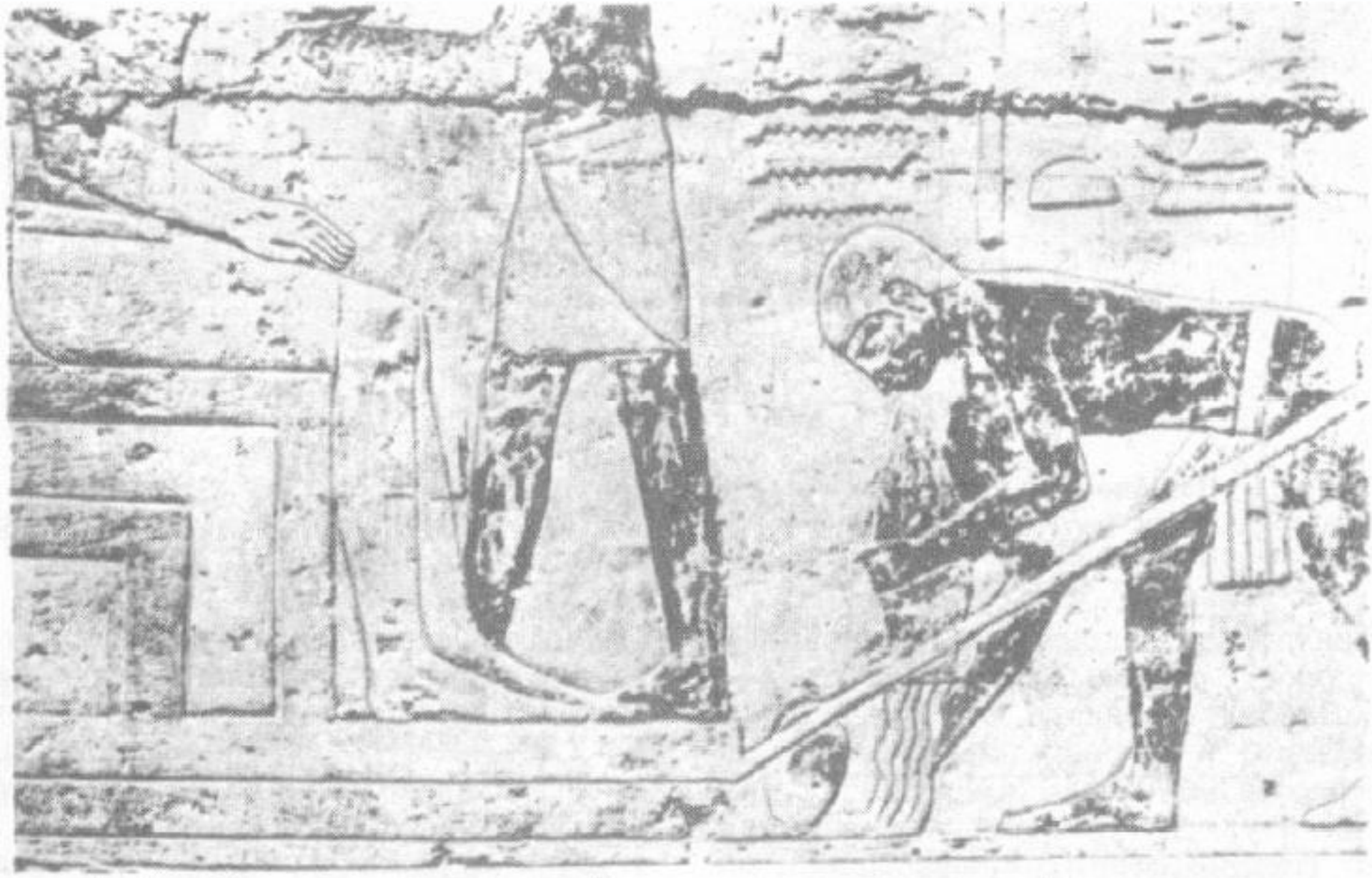
- entwickelt grundlegende Gedanken Amontons weiter

# Egyptians using lubricant to aid movement of Colossus, El-Bersheh, circa 1800 BC



Layard, 1853, 172 slaves, Statue weighing about 600 kN,  
total effort =  $172 \times 800 \text{ N}$ ,  $\mu = 0.23$





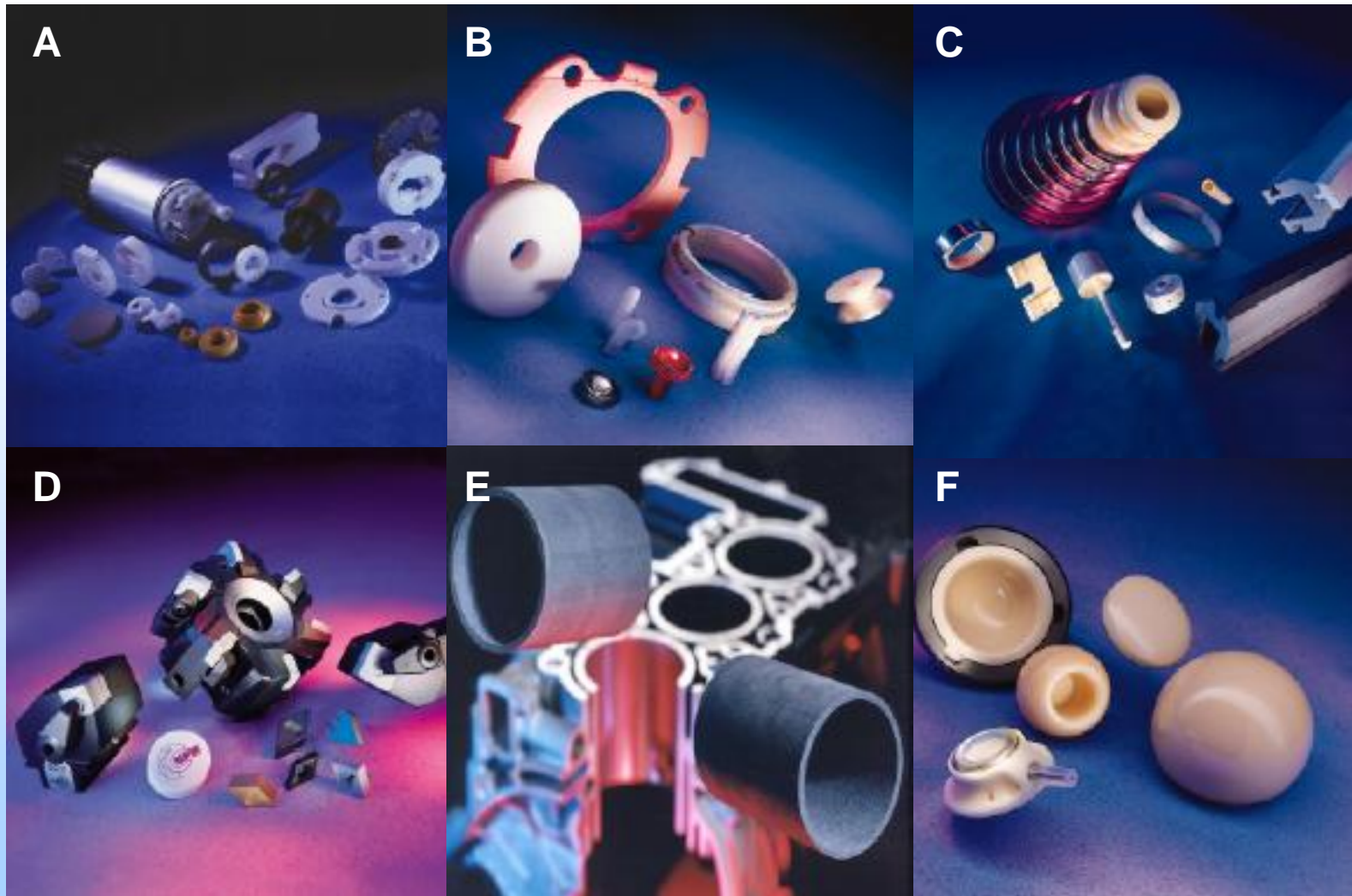
## Unerwünschte Folgen von Reibung und Verschleiß in der Maschinentechnik:

- Geometrieänderungen,
- Verschleißteilchen,
- Wärme,
- Schwingungen oder Geräusche

führen zu Verlust der Funktionsfähigkeit z.B. durch plötzlichen Ausfall oder fortschreitende Verschlechterung der Systemeigenschaften.

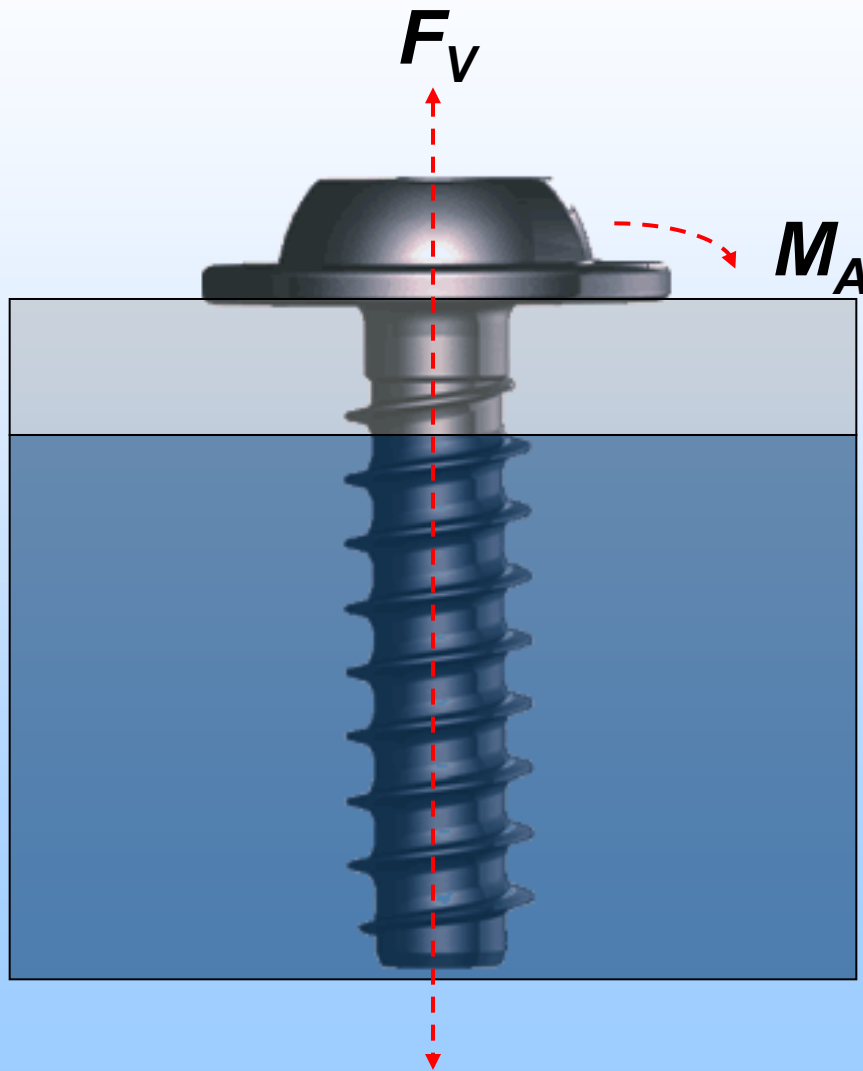
In den letzten Jahrzehnten wurde die Entwicklung von speziellen Tribowerkstoffen forciert (Keramik)





Tribologische Anwendungen. (A) Dicht- und Regelscheiben; (B) Komponenten für Textilmaschinen; (C) Hochverschleißfeste Werkzeuge; (D) Keramische Schneidstoffe; (E) Poröse Preforms; (F) Endoprotetik

# Gewindefurchende Schrauben von EJOT



# Theoretische Zusammenhang

$$M_A = \left[ \left( \frac{P}{2\pi} \right) + \frac{d}{2} * \mu_G + \frac{d_K}{2} * \mu_K \right] * F_V$$

$M_A$  = Anzieh-Drehmoment

$F_V$  = Axialer Vorspannkraft

$d$  = Gewindedurchmesser

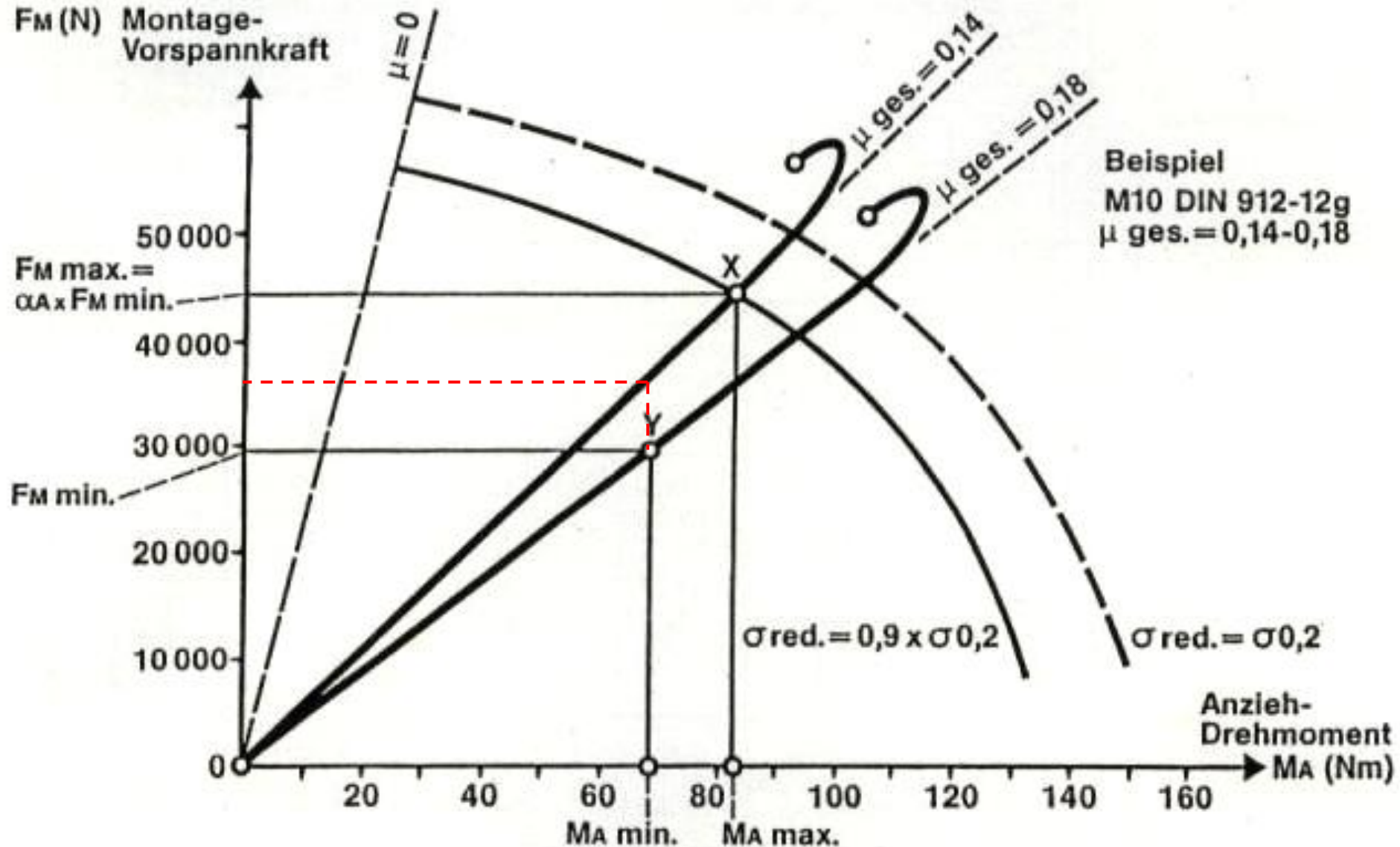
$d_k$  = „Mittlerer“ Kopfdurchmesser

$P$  = Gewindesteigung

$\mu_G$  = Reibungszahl für Gewinde

$\mu_K$  = Reibungszahl für Unterkopf

## Prof. Dr. P. Scharf



## Prof. Dr. P. Scharf

Schrauben: M 10 X 80 DIN 931 – 10.9, zinkphosphatiert, geölt mit Ensis-Fluid  
Mutter: M 10 DIN 934, geschwärzt

auf Gegenlage		mit Reibungszahl im Gewinde $\mu_G = 0,15 \pm 14 \%$					
Gegenwerkstoff	Oberfläche	Reibungszahl unter Kopf	Vorspannkraftstreuung $\pm \%$ für Streuung des Anziehdrehmomentes				
			$\pm 0 \%$	$\pm 3 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 10 \%$	$\pm 20 \%$
St 37 K $\sigma_B 520 \text{ N/mm}^2$	mit Zapfenfräser bearbeitet $R_t 10 \mu\text{m}$	$0,16 \pm 28 \%$	19,6	19,8	20,2	22,0	28,0
St 37 K $\sigma_B 520 \text{ N/mm}^2$	gezogen, verkadmet $6 \mu\text{m}$ $R_t 4,5 \mu\text{m}$	$0,12 \pm 36 \%$	21,9	22,1	22,5	24,1	29,7
Ck 65 $\sigma_B 950 \text{ N/mm}^2$	geschliffen $R_t 4 \mu\text{m}$	$0,20 \pm 23 \%$	17,7	18,0	18,4	20,3	26,7
GG	gehobelt $R_t > 25 \mu\text{m}$	$0,14 \pm 14 \%$	12,3	12,7	13,3	15,9	23,5
Al Mg Si 0,5 HB 76	blank gezogen	$0,12 \pm 48 \%$	27,2	27,4	27,7	29,0	33,8



## 4 Tribologische Beanspruchung von Oberflächen

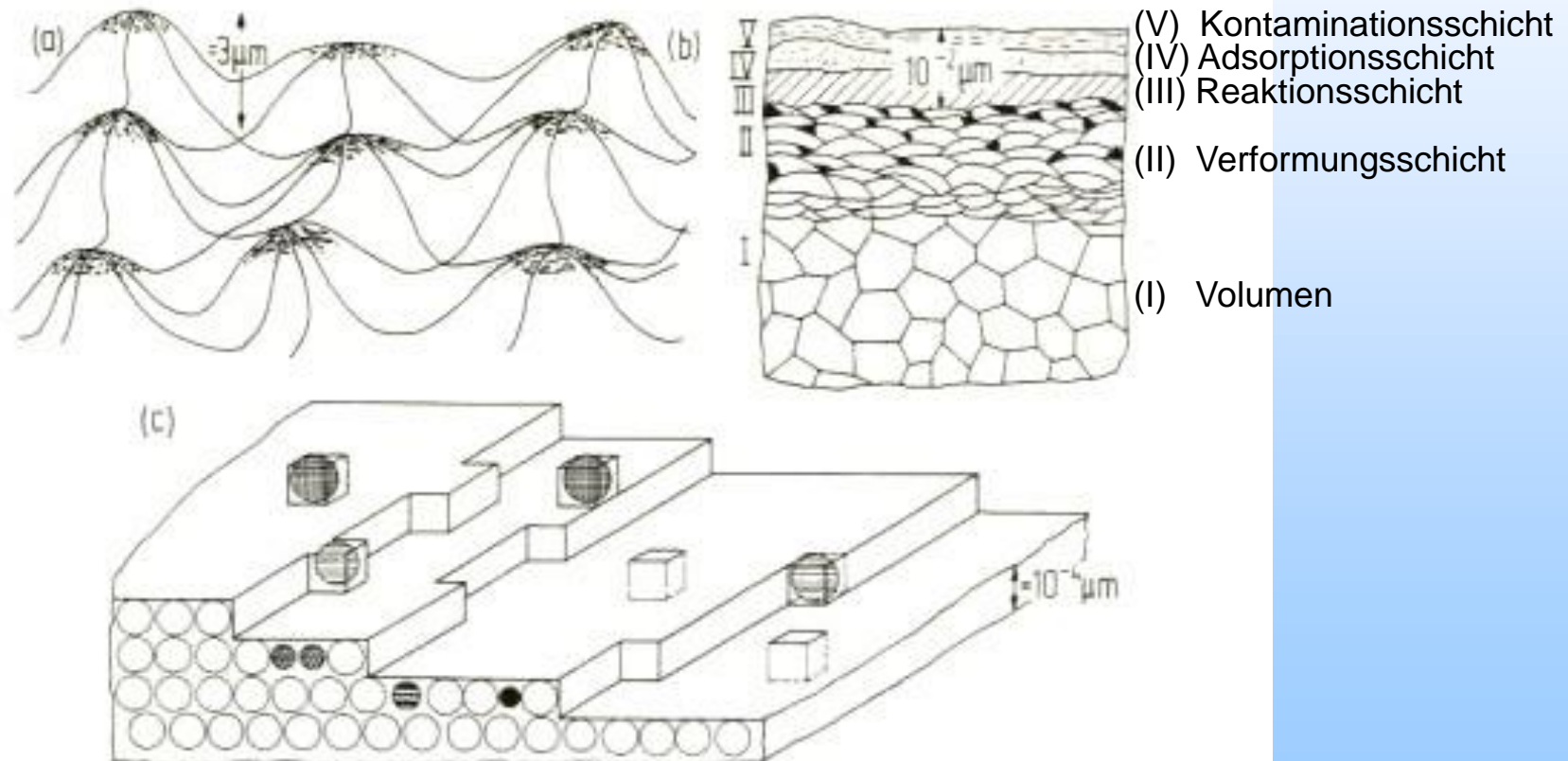
### 4.1 Einleitung

### 4.2 Grundlagen

### 4.3 Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß

### 4.4 Prüftechnik

### 4.5 Verschleißschützende Maßnahmen



Atomare Oberflächentopographie

## Reibung:

Verlust an mechanischer Energie bei Beginn, Ablauf oder Beenden einer Relativbewegung sich berührender Stoffbereiche

- Nutz: Zur Fortbewegung und Bremsen eines Fahrzeuges; Zur Selbsthemmung von Schrauben
- Unerwünscht: Energieverlust

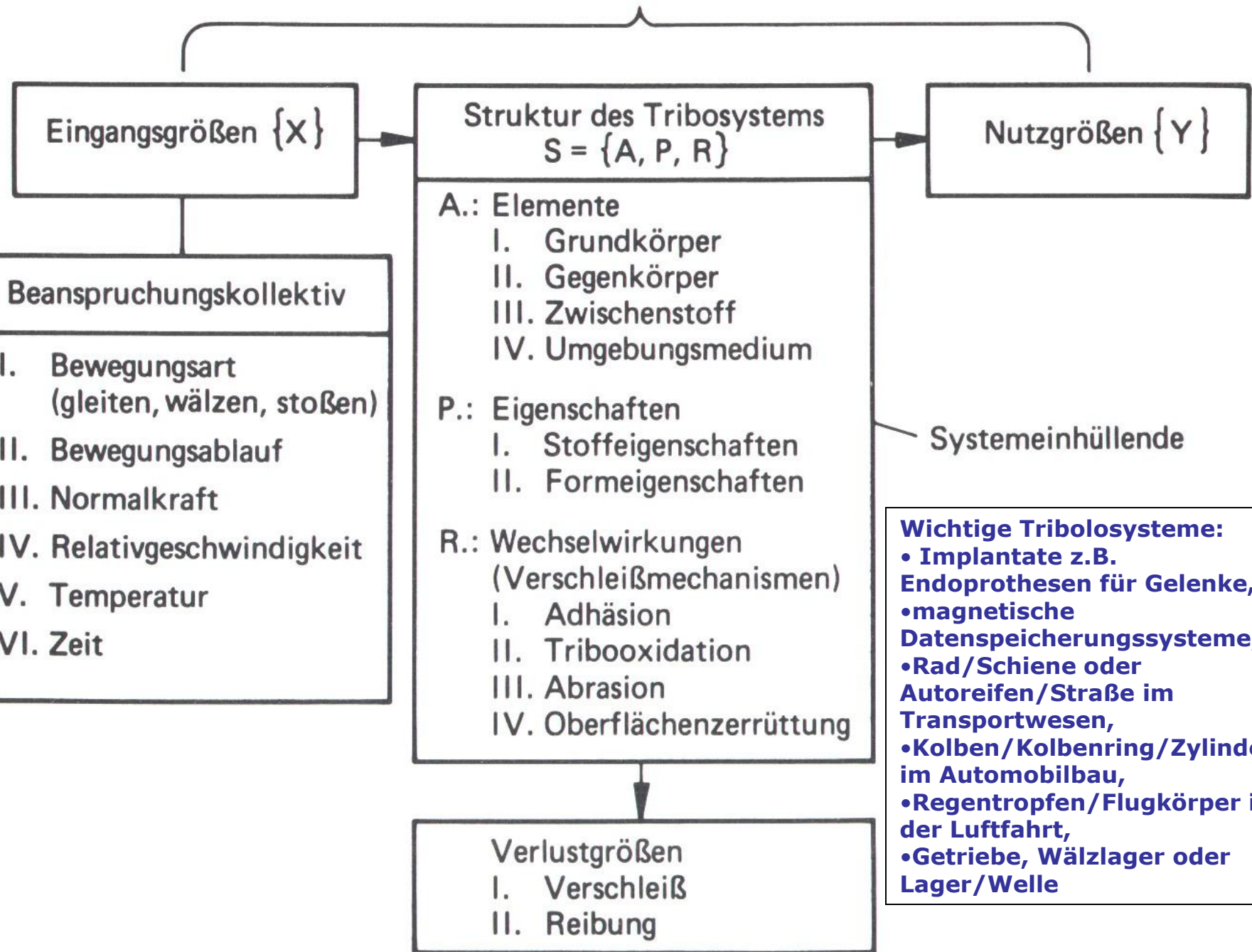
## Verschleiß:

Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen

- Materialabtrag; lose Verschleißteilchen

**Reibung und Verschleiß sind Systemeigenschaften und keine reinen Materialeigenschaften**

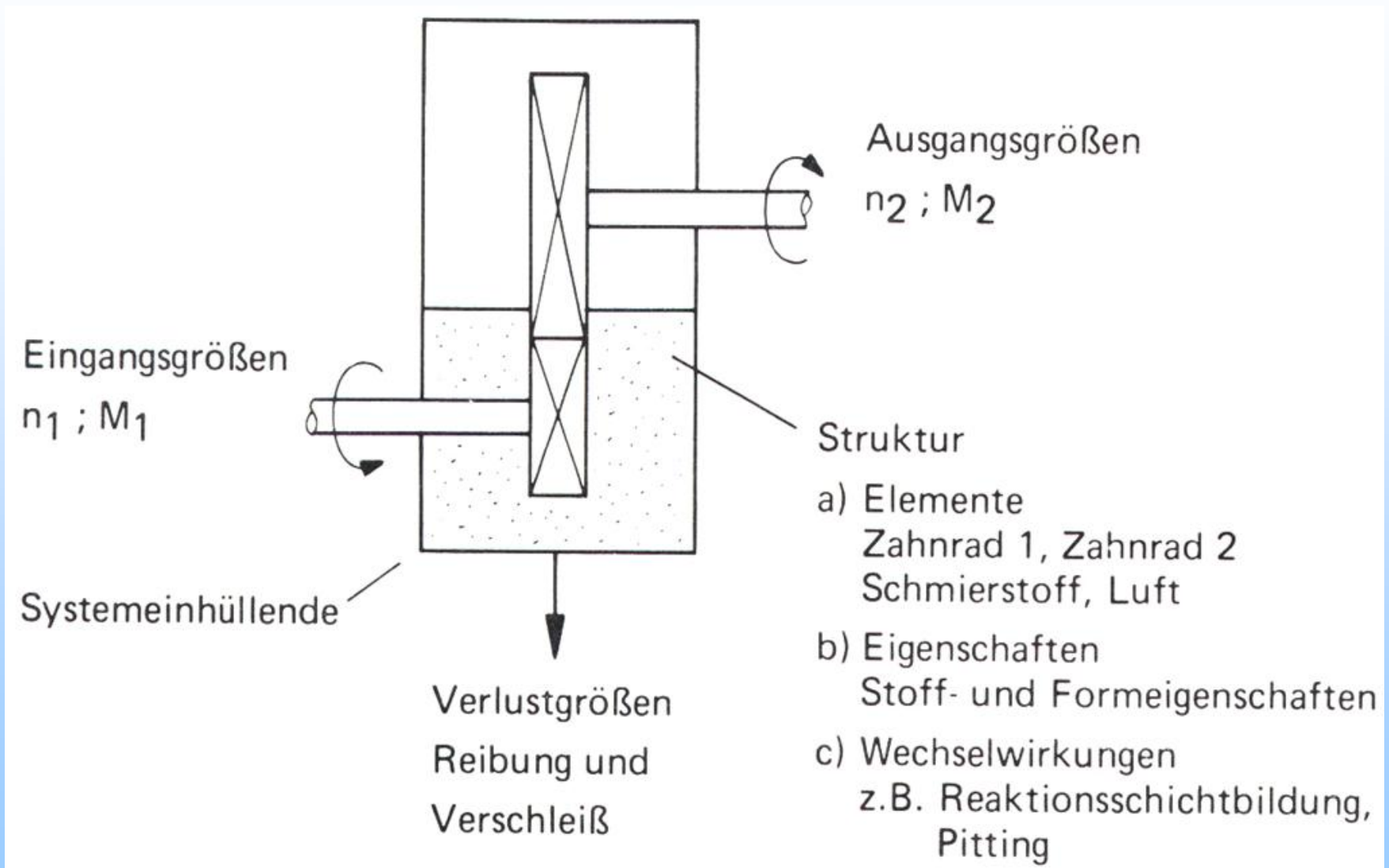
# Funktion des Tribosystems $\{X\} \rightarrow \{Y\}$



## Wichtige Tribosysteme:

- Implantate z.B. Endoprothesen für Gelenke,
- magnetische Datenspeicherungssysteme,
- Rad/Schiene oder Autoreifen/Straße im Transportwesen,
- Kolben/Kolbenring/Zylinder/ im Automobilbau,
- Regentropfen/Flugkörper in der Luftfahrt,
- Getriebe, Wälzlager oder Lager/Welle

# Schematische Darstellung eines tribologischen Systems



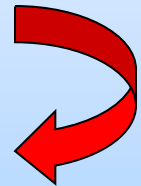
## **Wichtige Rolle:**

**Relativbewegungen zwischen Grund- und Gegenkörper**

## **Bewegungsarten:**

**Gleiten, Rollen, Wälzen und Oszillieren**

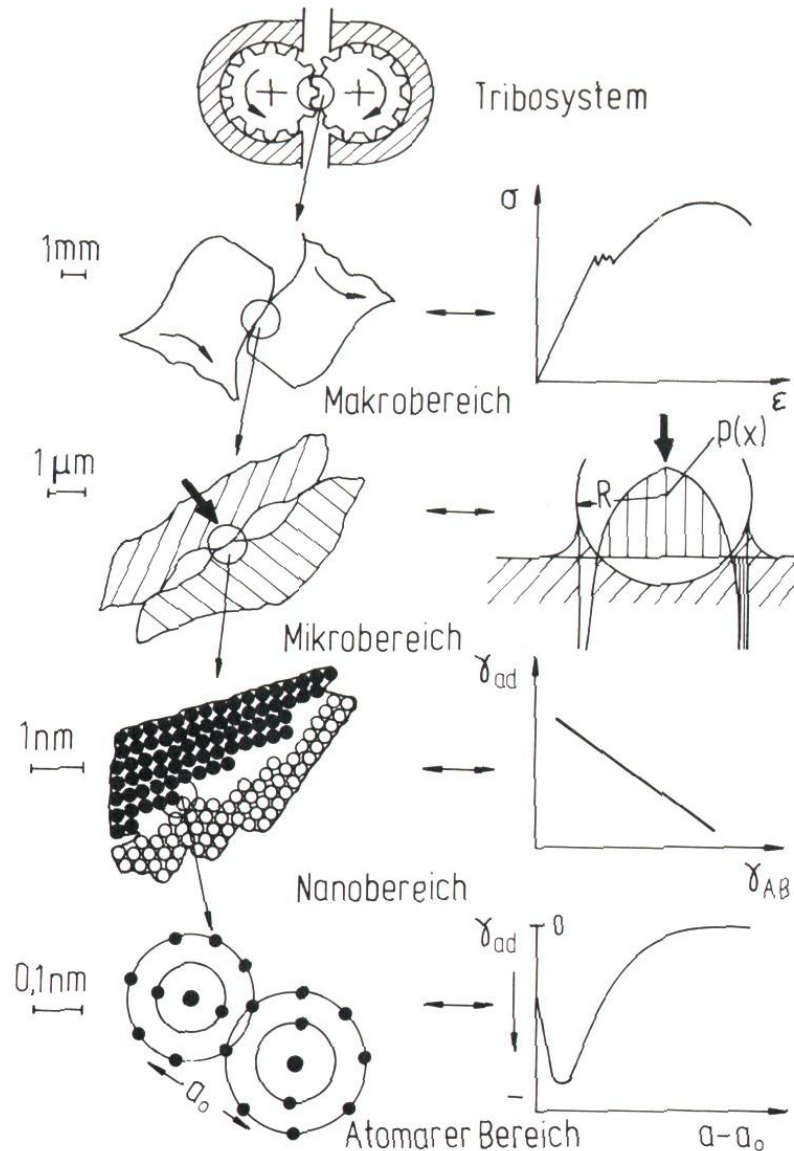
**Gleitverschleiß, Wälzverschleiß,  
Schwingungverschleiß, Spülverschleiß,  
Schrägstrahlverschleiß oder  
Furchungverschleiß**





# Tribologische Kontakte und Einflussgrößen

( $\sigma$ : Spannung,  $\varepsilon$ : Verzerrung,  $\gamma_{ad}$ : Adhäsionsenergie,  $\gamma_{ad}$ : Grenzflächenenergie)



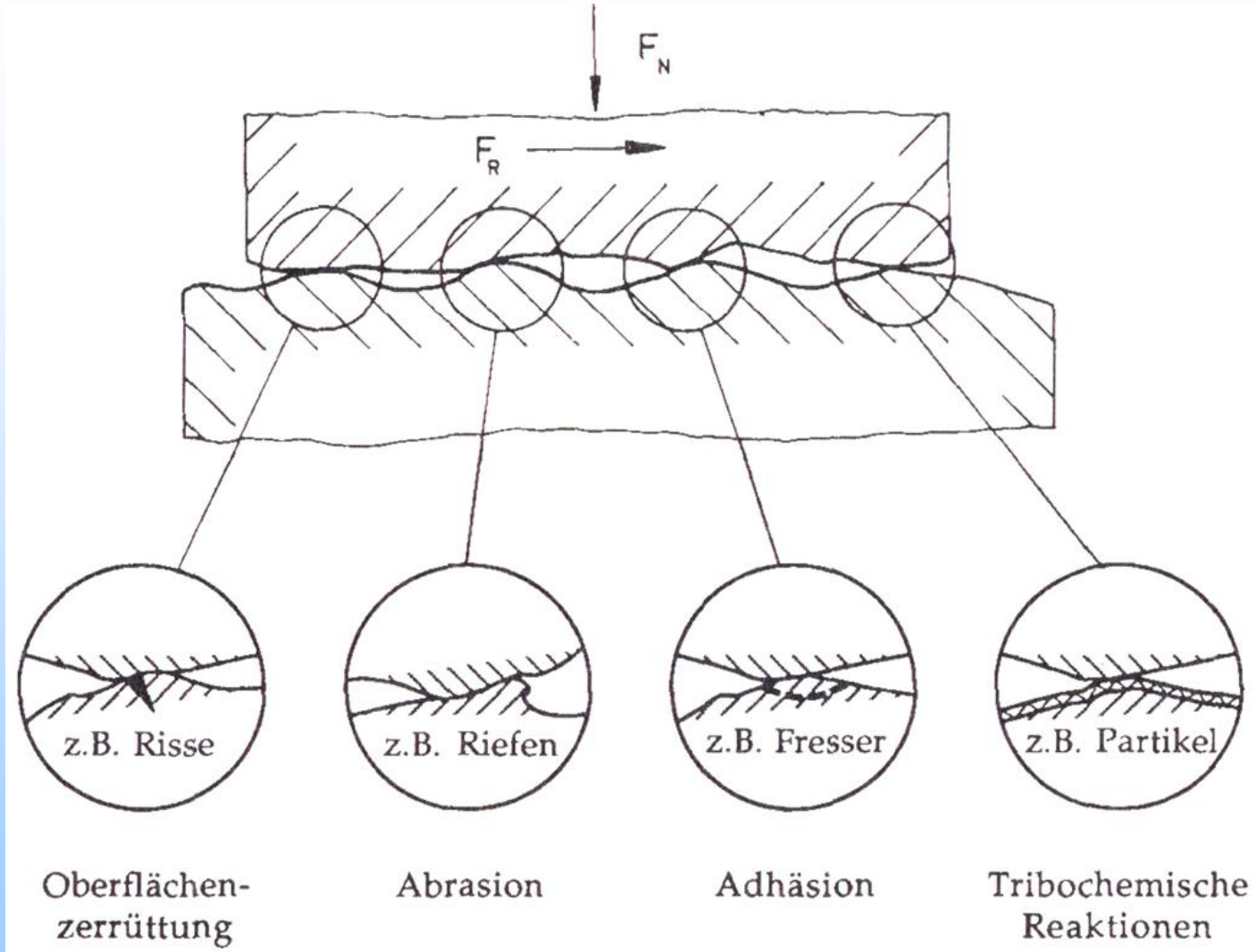
Harte, Druck, Young-Modul...

Rauheit, Verformung, Bildung von Riß und Reaktionsschicht, Mikrofurchung...

Gitterbaufehler, Grenzflächendiffusion, adhäsive Wechselwirkungen mit Materialübertrag, locales Aufschmelzen...

Sekundär- (van der Waals) oder Primärbindungen

# Vier Hauptverschleißmechanismen



**Häufig tritt in der Praxis nicht ein einzelner Verschleißmechanismus auf, sondern eine Kombination mehrerer!**

Gleitverschleiß mit Materialübertrag  
Stahl/Stahl



$\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$



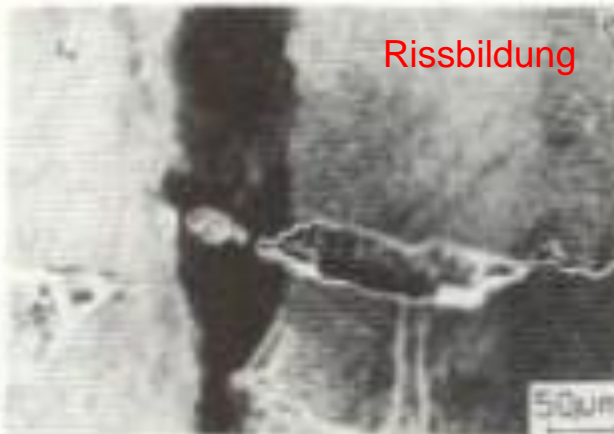
Furchungverschleiß  
Stahl



Furchungverschleiß  
Glas



Rissbildung



Grübchen durch Rissausbreitung



Ablösen der Reaktionsschicht



Reaktionsschicht nach Wälzbeanspruchung



## **4 Tribologische Beanspruchung von Oberflächen**

4.1 Einleitung

4.2 Grundlagen

**4.3 Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß**

4.4 Prüftechnik

4.5 Verschleißschützende Maßnahmen

# Einflussfaktoren

## **Geometrische Struktur der Körper**

Geometrie der Reibpartner (Kugel-Fläche, Fläche-Fläche,...)

Geometrie der Oberflächen (Rauheit, Partikelradien,...)

## **Äußere Bedingungen**

Testverfahren (Lastbereich, Art der Bewegung,...)

Luftfeuchtigkeit

Temperatur

Schmierung

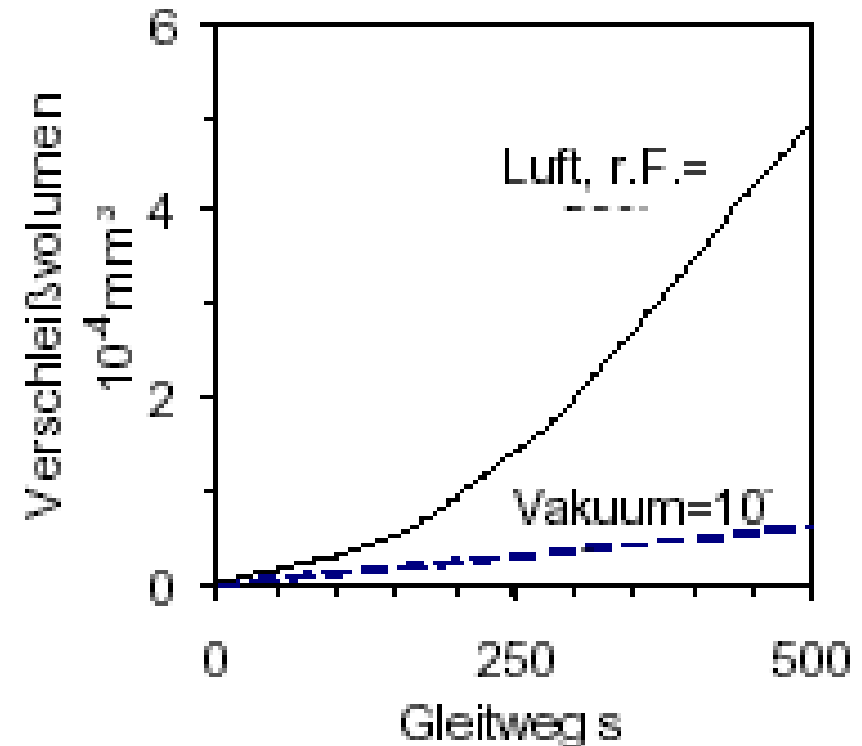
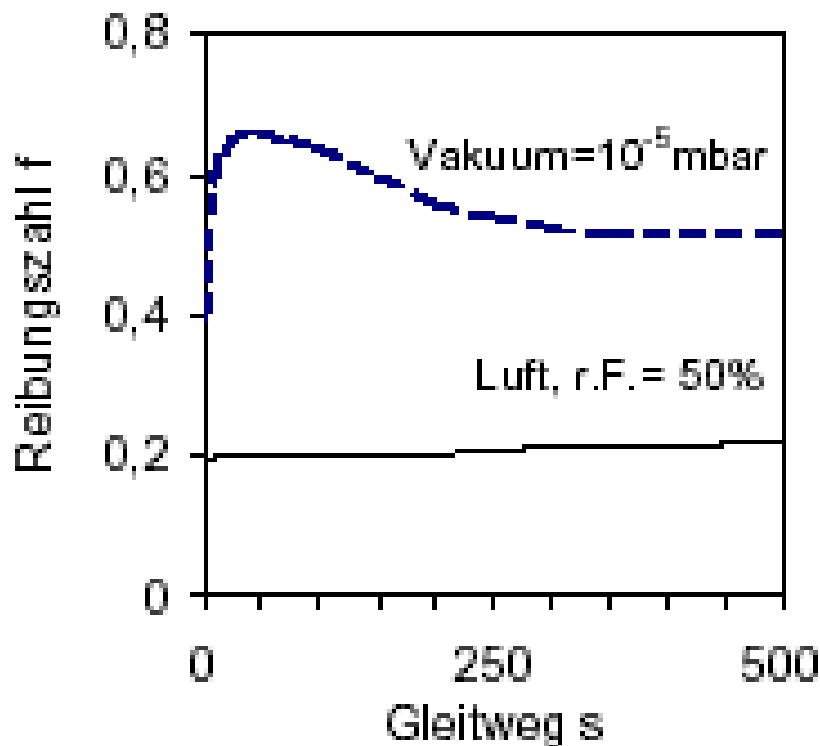
## **Materialeigenschaften der Reibpartner**

Mechanische Eigenschaften (E-Modul, Härte,...)

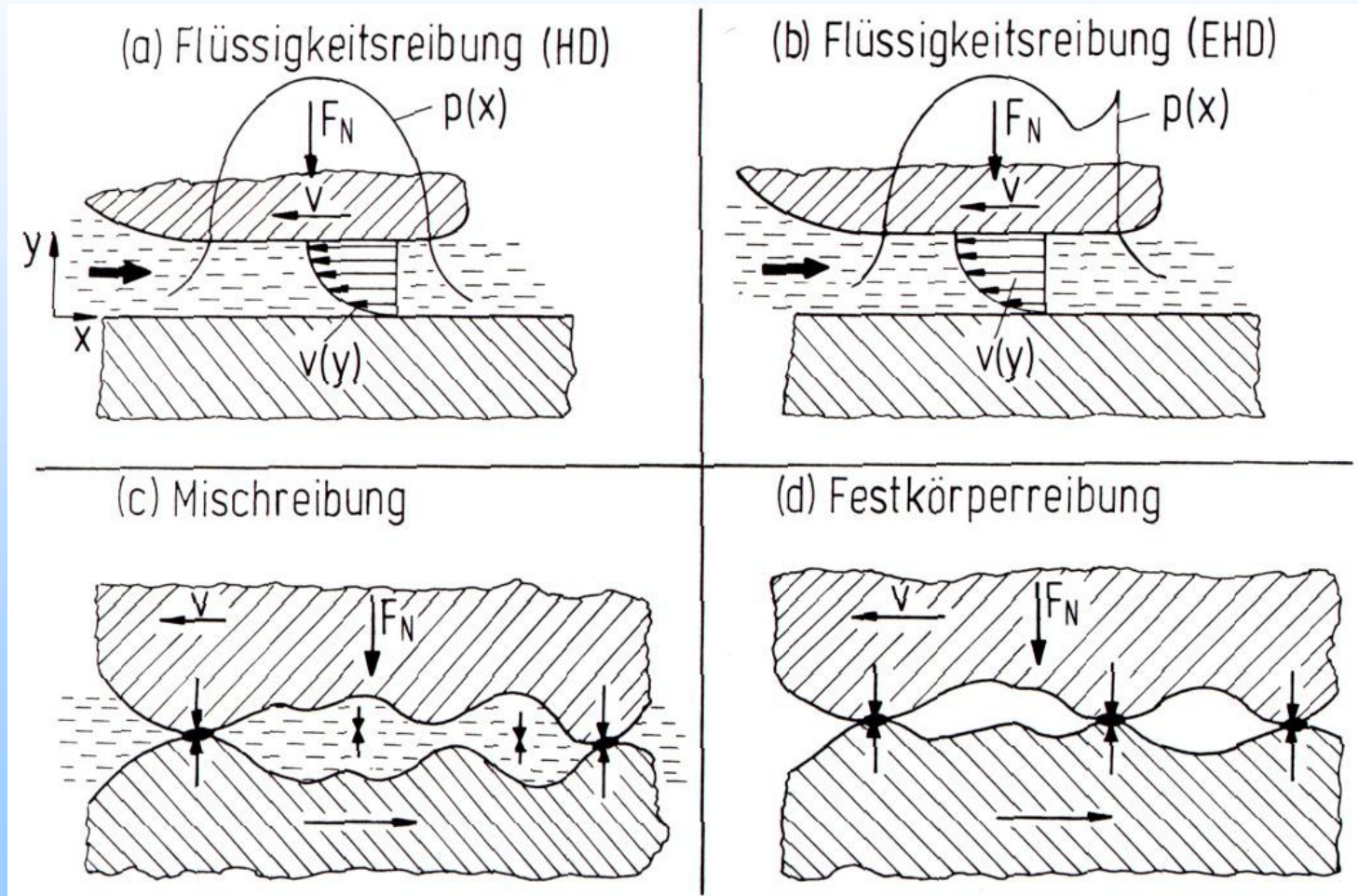
Chemische Eigenschaften



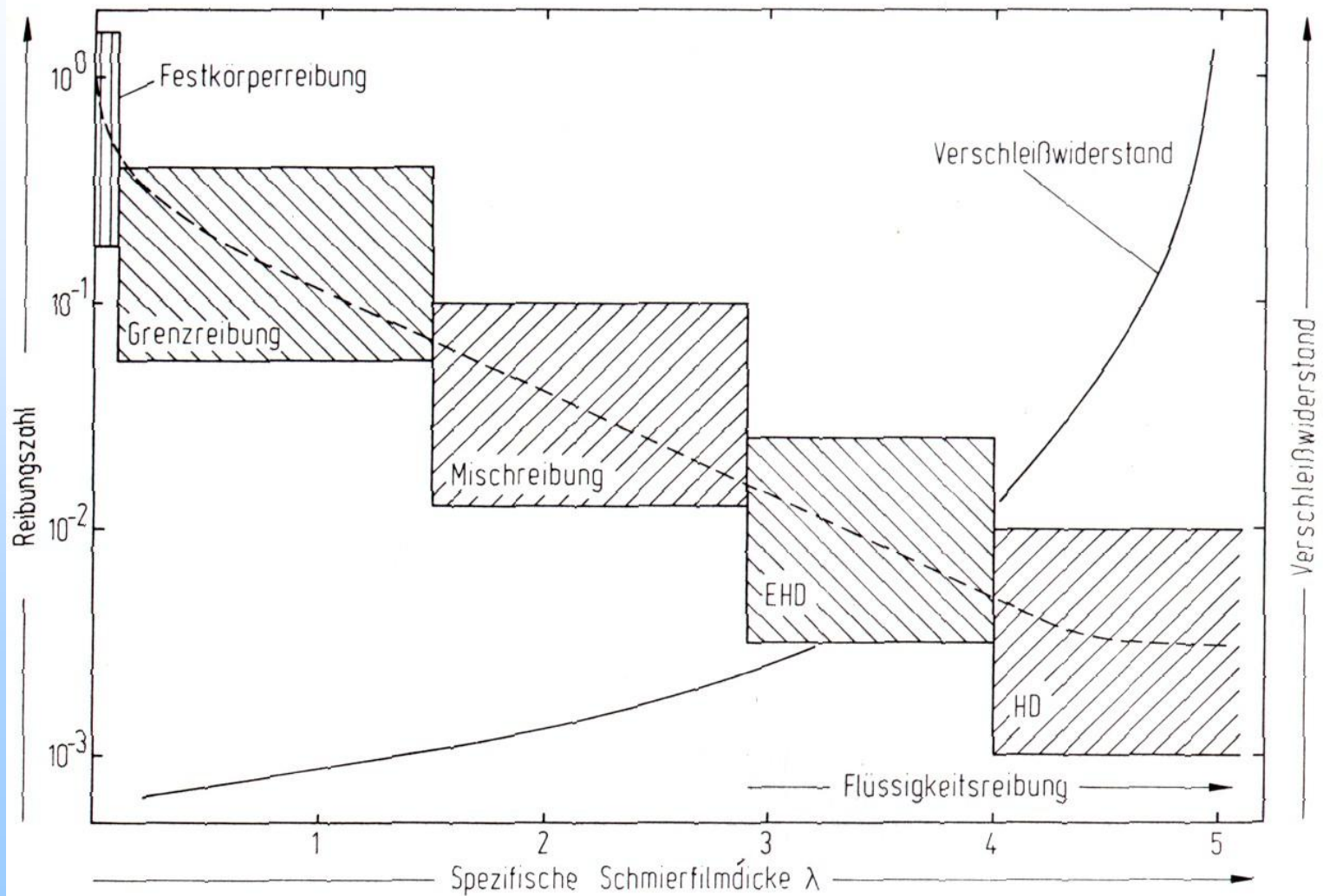
# Umgebung: System=Stift/Scheibe TiC/TiC (CVD auf Stahl)



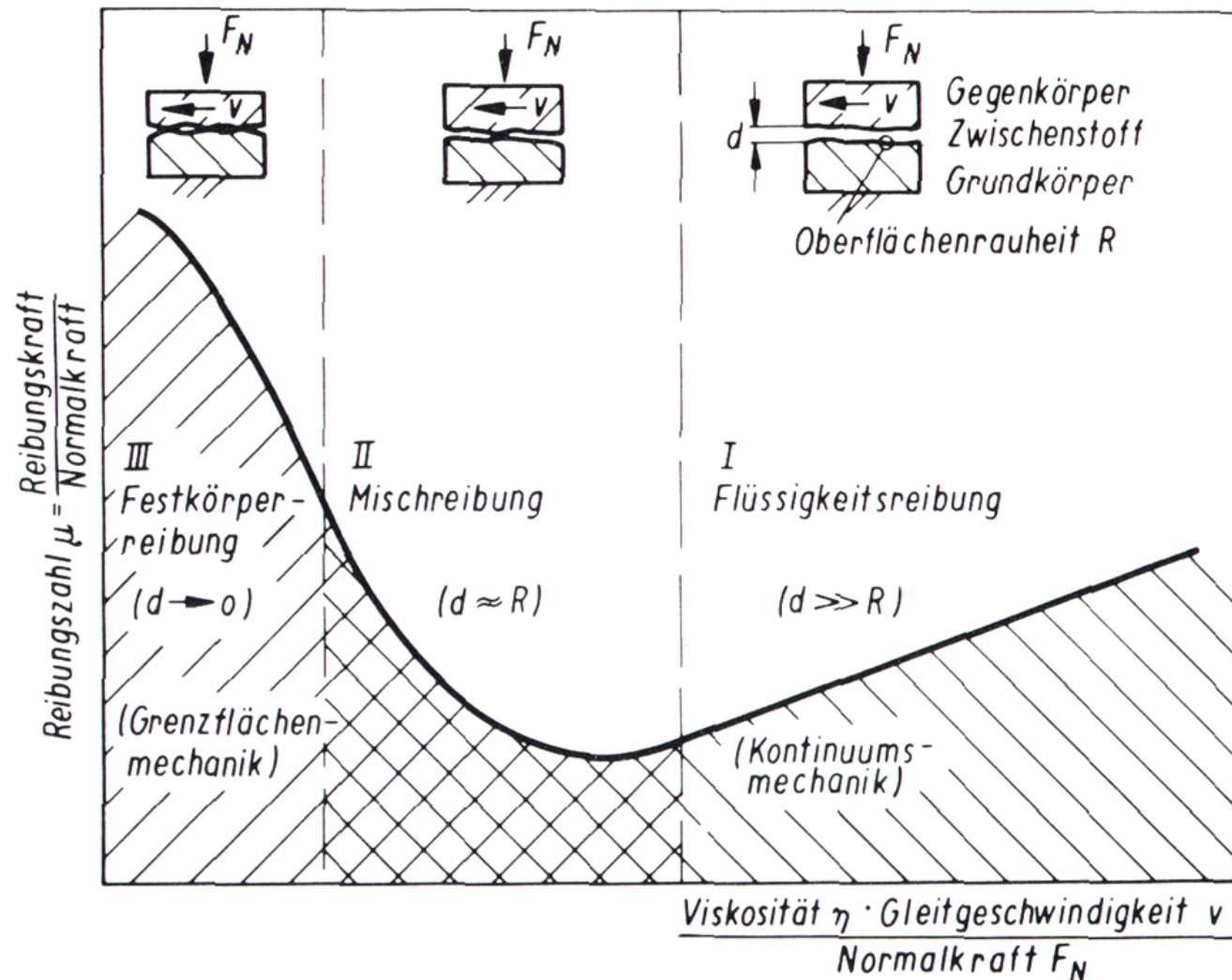
# Gleitkontakt unter Flüssigkeitsreibung (Schmierung)



# Reibungszahl und Verschleißwiderstandes im Gleitkontakt in Abhängigkeit von der spezifischen Schmierfilmdicke



# Schmierung: Auswirkungen des Schmierfilms auf die Reibungszahl



# Reibungszahl bei Gleitbewegung

Stahl/Stahl-Kombination	0,80
Mit Standardschmierstoffe	0,2
Mit einer Tribosystem-Schicht im trockenen Zustand	0,01 – 0,05

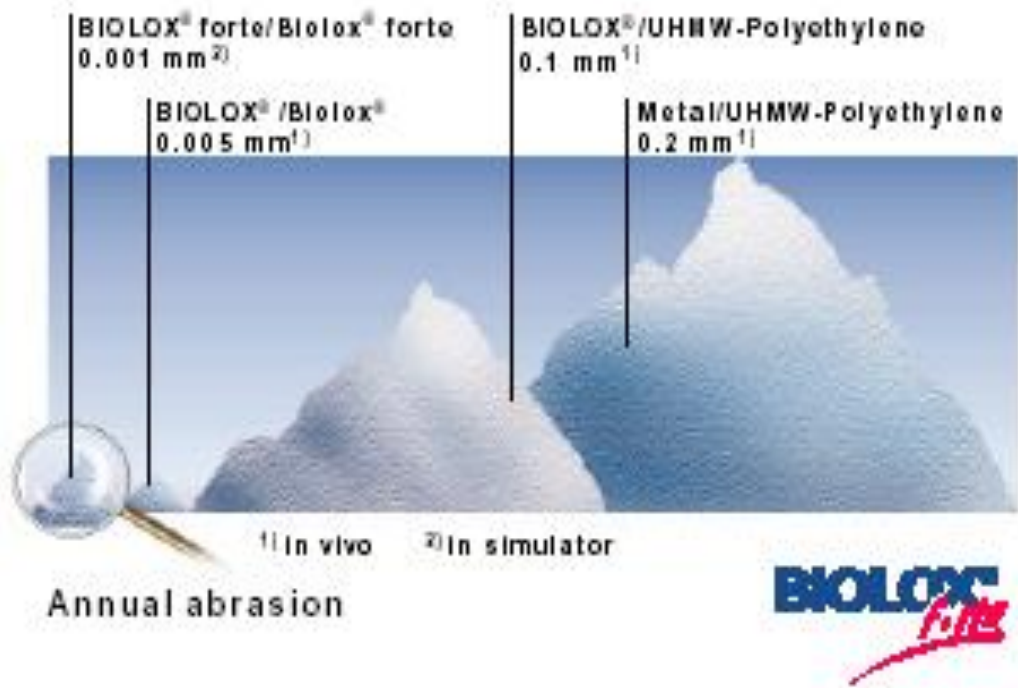


# Werkstoffe: Tribosystem Hüftgelenk und Verschleißbeträge in Abhängigkeit von der Materialpaarung

## The BIOLOX<sup>®</sup> forte Concept



## Wear of ceramic components



## **4 Tribologische Beanspruchung von Oberflächen**

4.1 Einleitung

4.2 Grundlagen

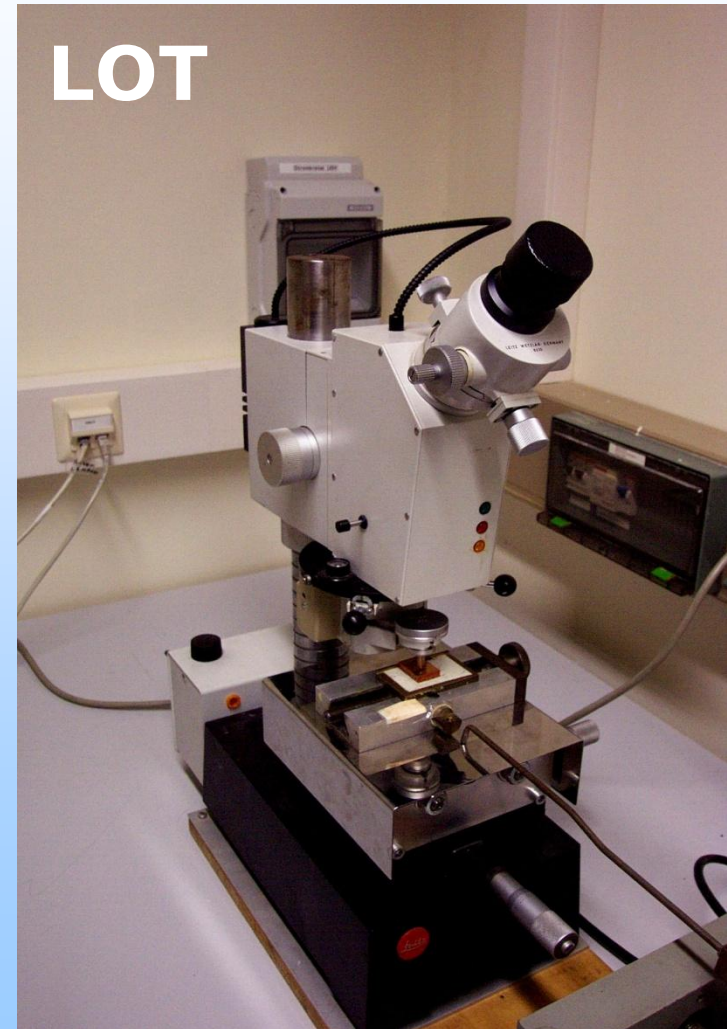
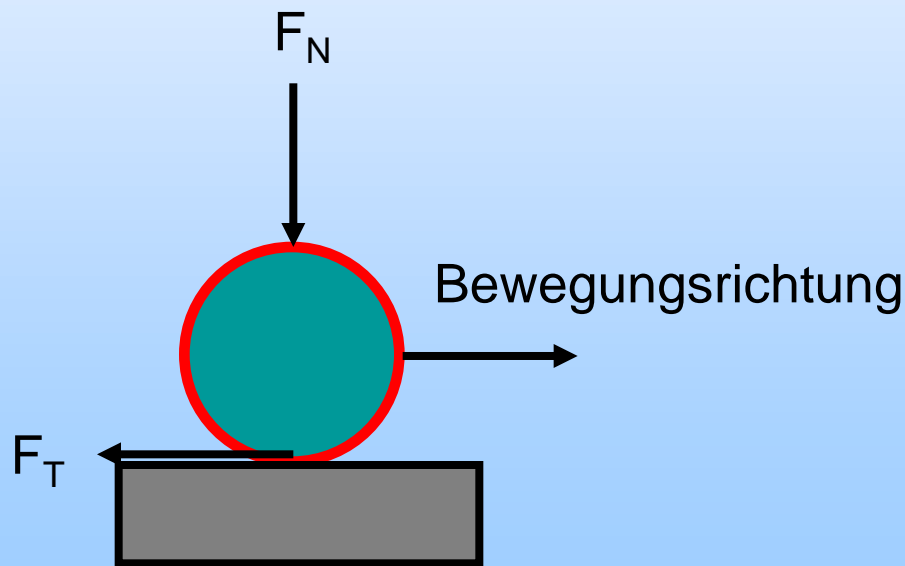
4.3 Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß

**4.4 Prüftechnik**

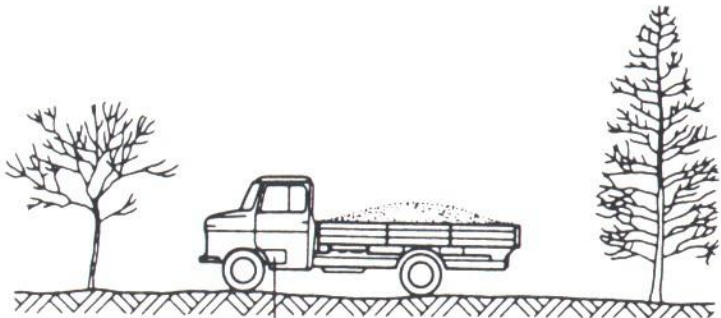
4.5 Verschleißschützende Maßnahmen

# Verhältnis der Reibungskraft $F_T$ zur Normalkraft $F_N$

$$\mu = F_T / F_N$$



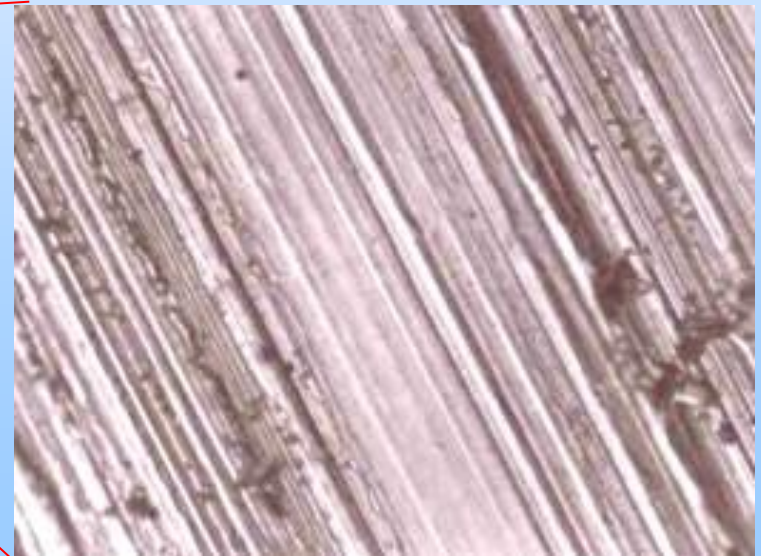
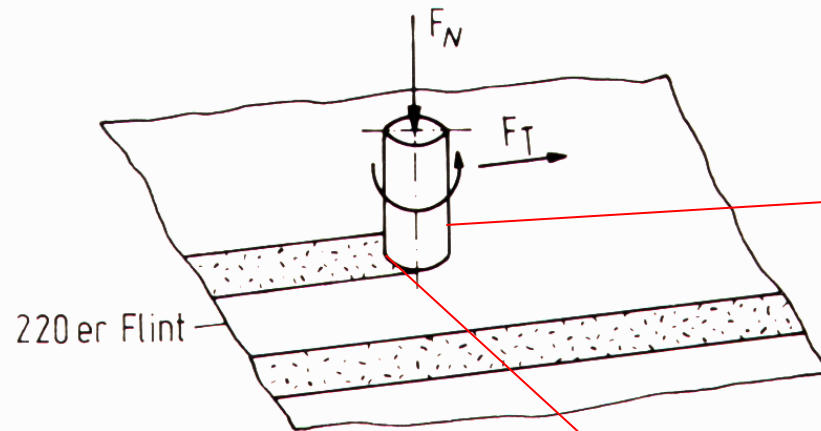
# Verschleißprüfungen

Kategorien	Art des Versuches		Symbol
I	Betriebs- bzw. betriebsähnliche Versuche	Betriebsversuch (Feldversuch)	
II		Prüfstandsversuch	
III		Prüfstandsversuch mit Aggregat oder Baugruppe	
IV	Versuche mit Modellsystem	Versuch mit unverändertem Bauteil oder verkleinertem Aggregat	
V		Beanspruchungsähnlicher Versuch mit Probekörpern	
VI		Modellversuch mit einfachen Probekörpern	



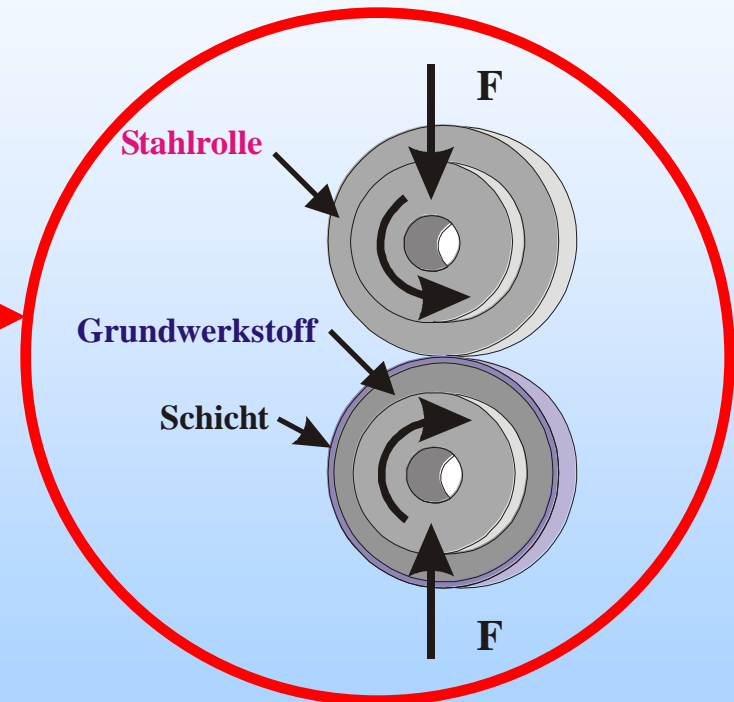
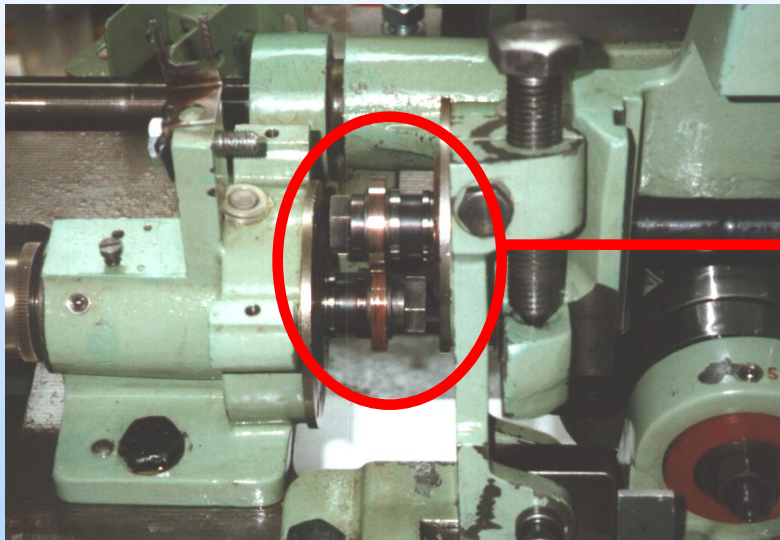
# Schleifpapierverfahren (LOT)

b) Schleifpapierverfahren



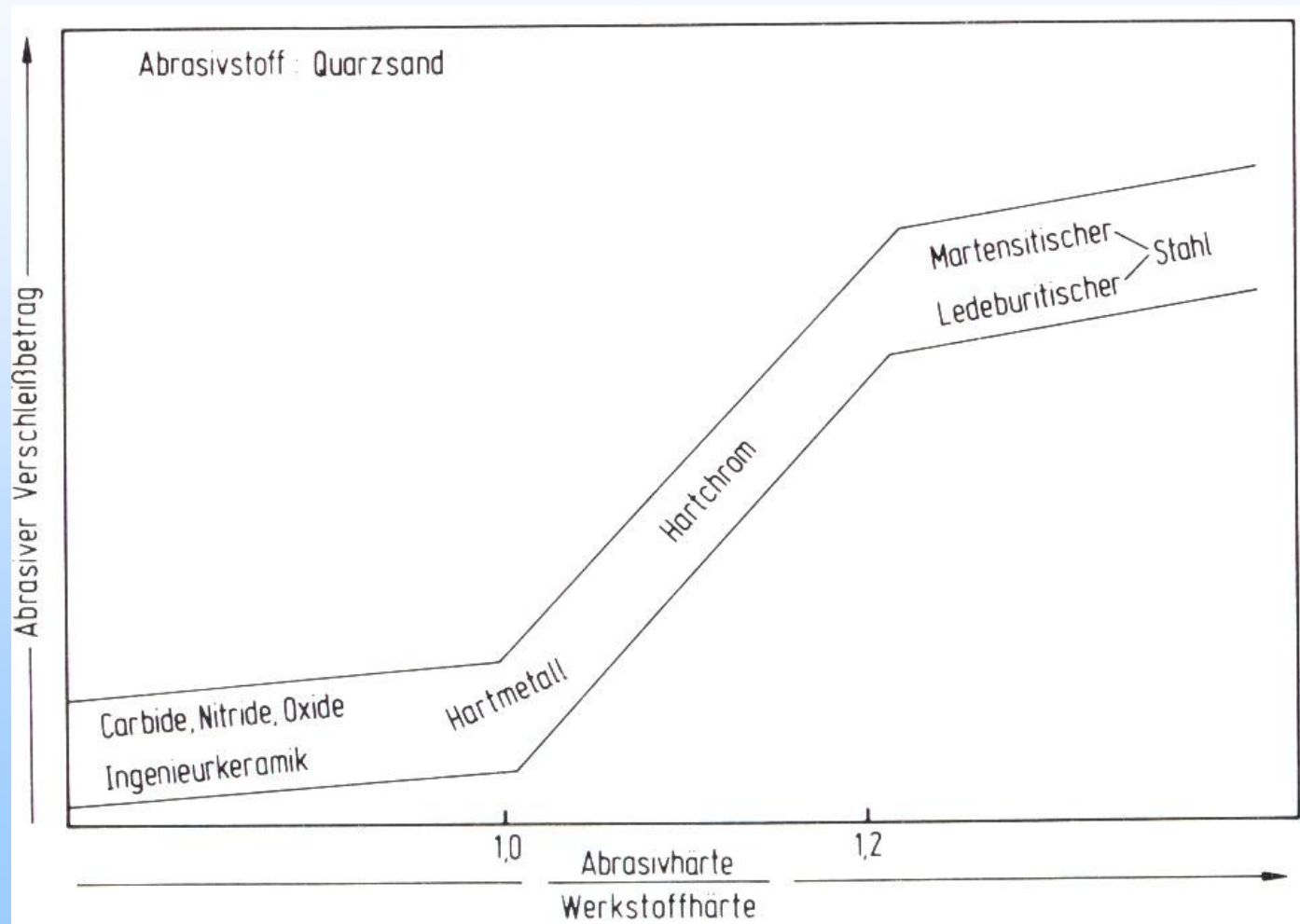


# Wälzverschleißuntersuchungen (LOT)



Tribometer zur Modellierung des  
Wälzverschleißes

# Verschleißbetrag verschiedener keramischer und metallischer Werkstoffe



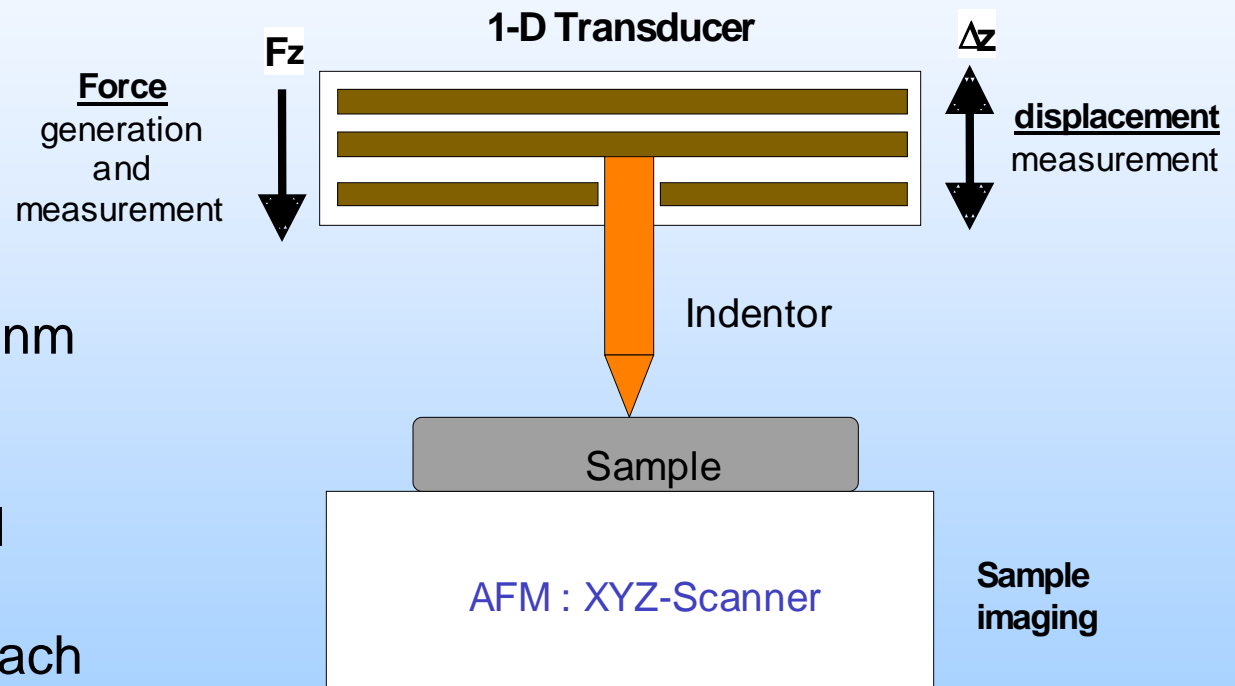
# Kombination AFM & Nanoindentierung (Hysitron)

Lastbereich:  
 $1\mu\text{N} - 25\text{mN}$

Auflösung:  
 $\Delta F \sim 100\text{nN}$ ,  $\Delta z \sim 0,2\text{nm}$

Auswertung:  
Oliver&Pharr - Modell

AFM-Abbildung vor/nach  
Indentierung



# Reibungs- und Verschleißmessungen mit dem Hysitron Triboscope

**Experiment:** oszillierender Reib-  
und Verschleißtest

konischer Tip ( $1\mu\text{m}$ ,  $90^\circ$ )

**Vorgaben:**

Last = 0.2 - 5mN

25 Reibzyklen

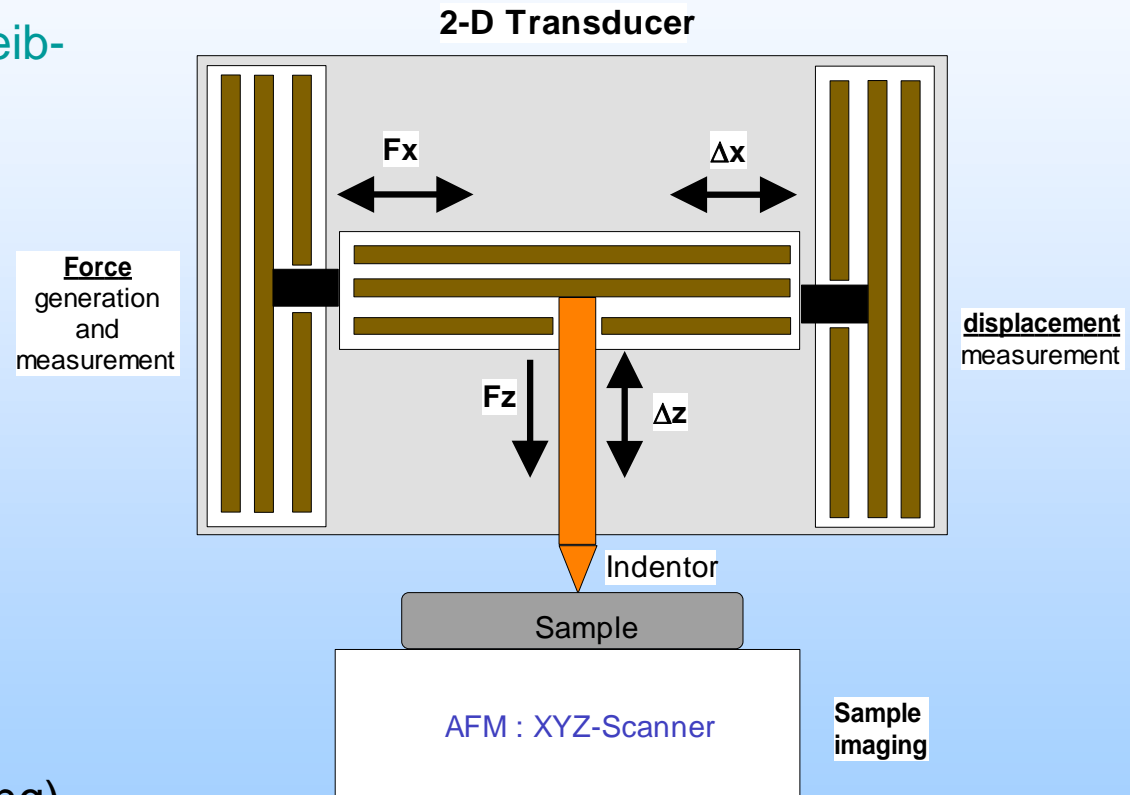
Weg  $4\mu\text{m}$ , Speed =  $4\mu\text{/s}$

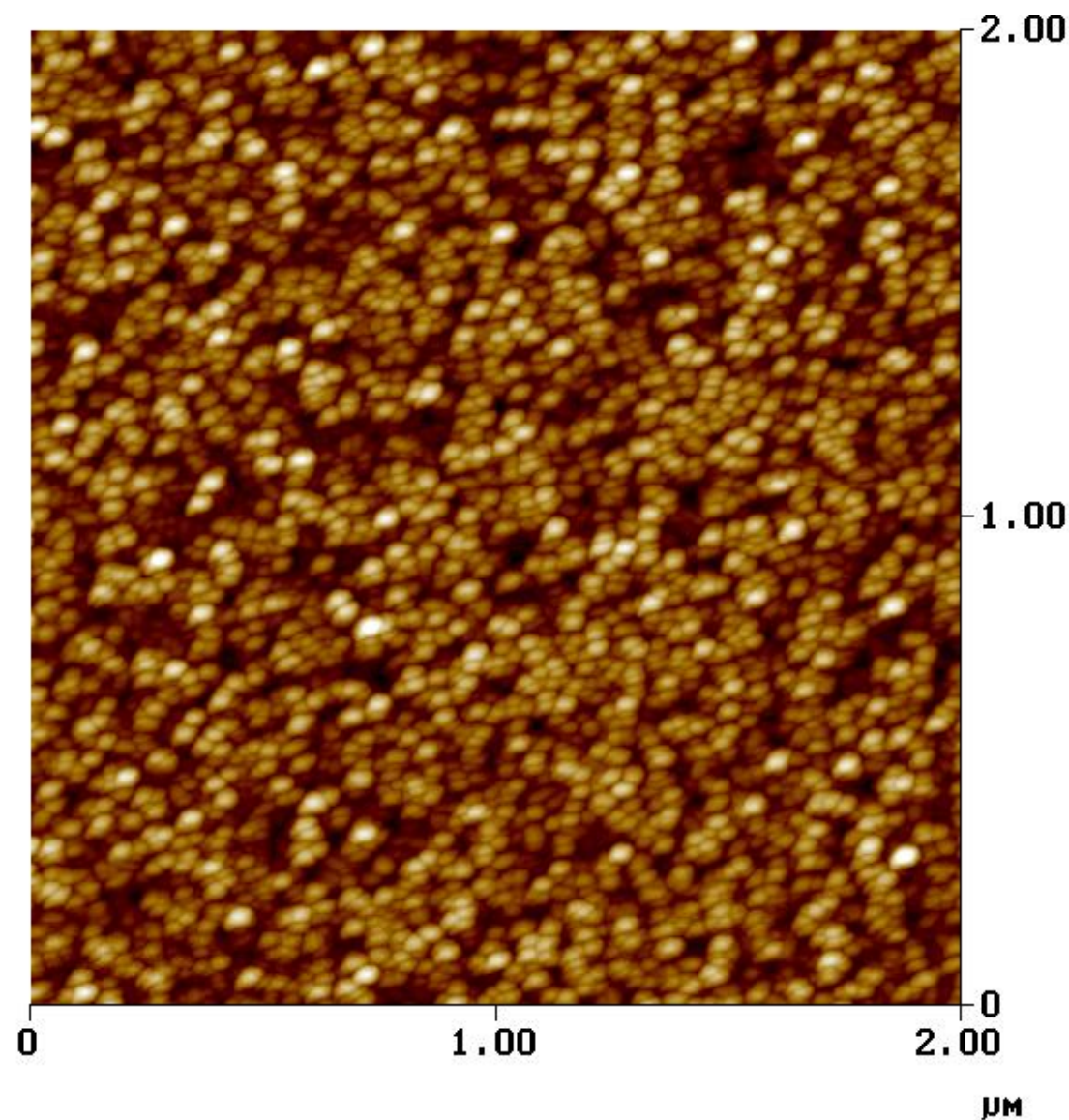
**Meßgrößen:**

Reibungskraft  $F_x(t)$

Eindringtiefe  $z(t)$  unter Last

Tiefe der Spur (nach Entlastung)

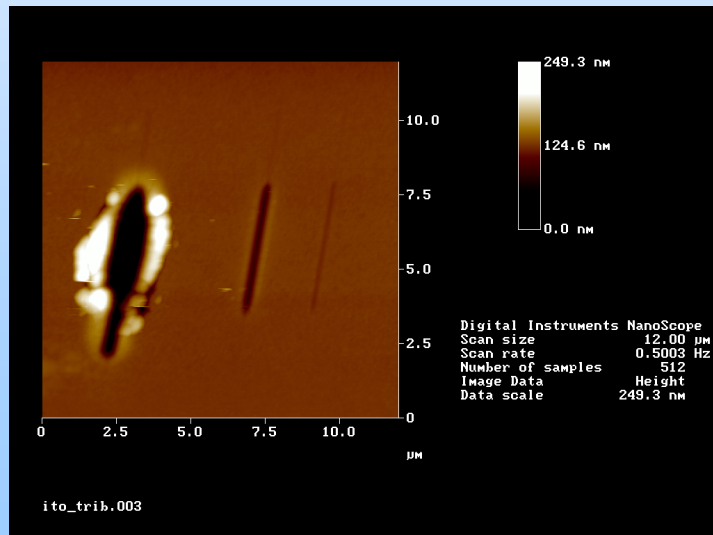
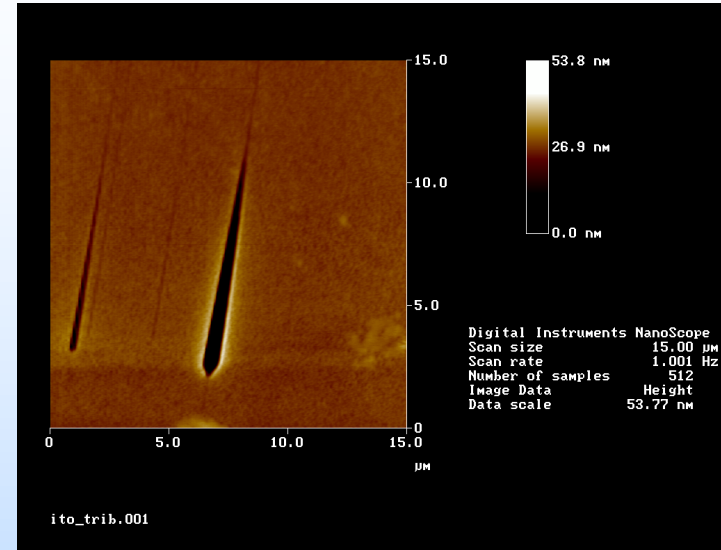
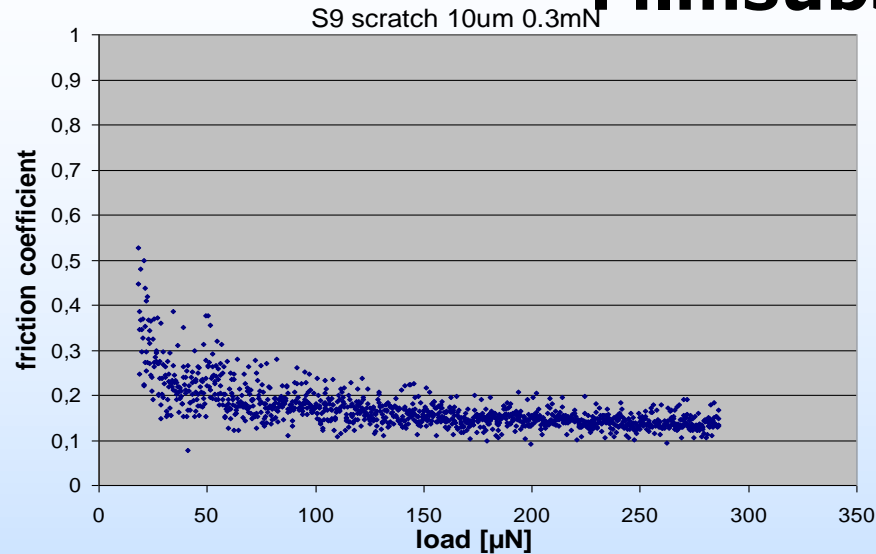




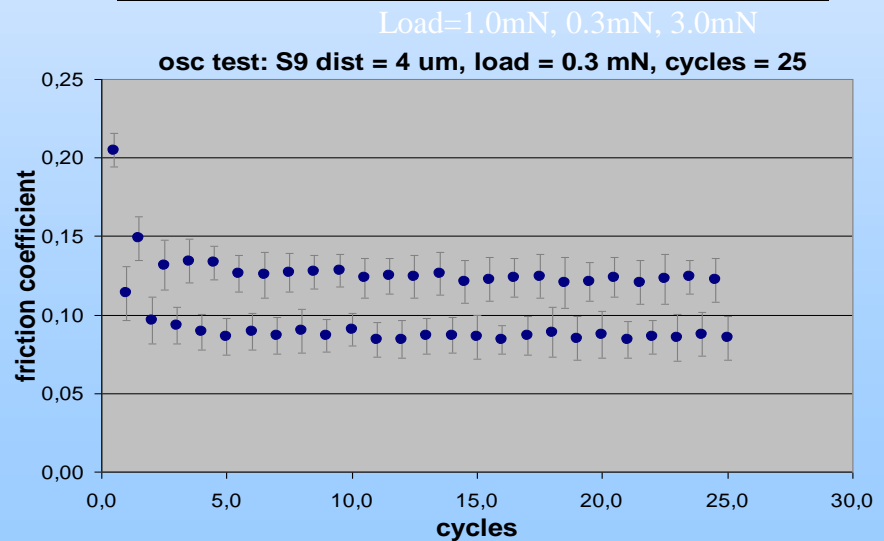
Digital Instruments NanoScope  
Scan size 2.000 μm  
Scan rate 1.001 Hz  
Number of samples 512  
Image Data Height  
Data scale 15.00 nm



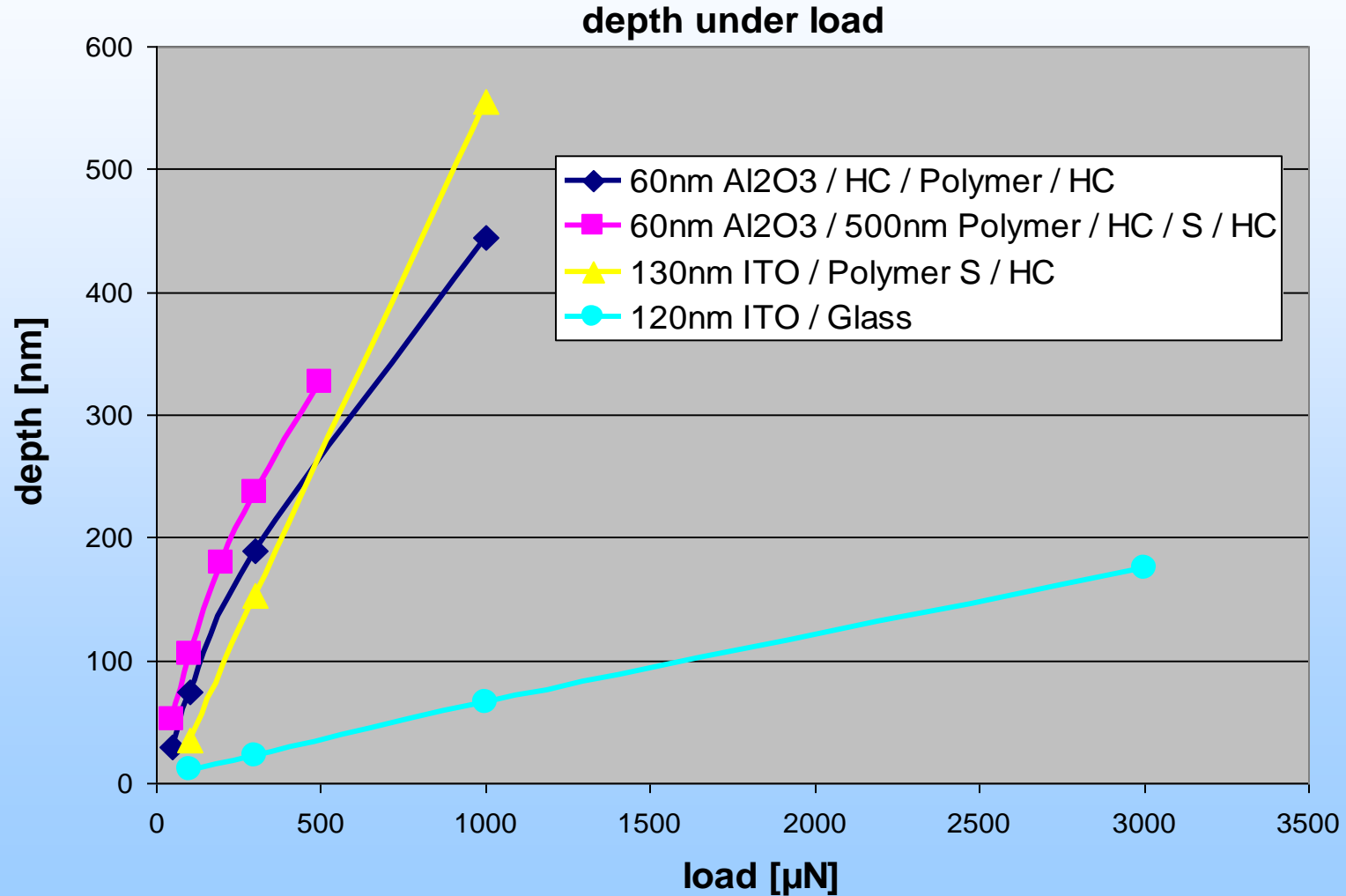
# Eigenschaften einer ITO-Schichten auf Glas-Filmsubstrate



Load=3.0mN, 1.0mN, 0.3mN



# The Scratch Test Results of $\text{Al}_2\text{O}_3$ and ITO on Different Substrates

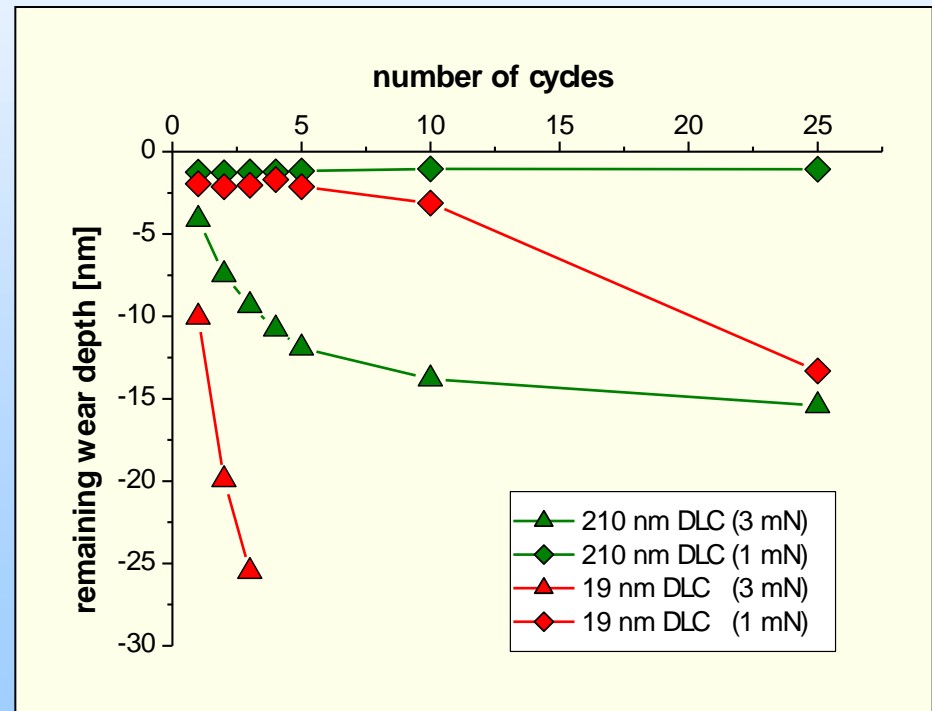


# Oszillationsteste (Einfluss der Filmdicke)

Beispiele: dünne und dicke DLC

Filmen

Möglicher Mechanismus:  
Materialermüdung



## **4 Tribologische Beanspruchung von Oberflächen**

4.1 Einleitung

4.2 Grundlagen

4.3 Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß

4.4 Prüftechnik

**4.5 Verschleißschützende Maßnahmen**

# Tribologische Schichten → Reduzierung von Reibung und Verschleiss

## Deposition

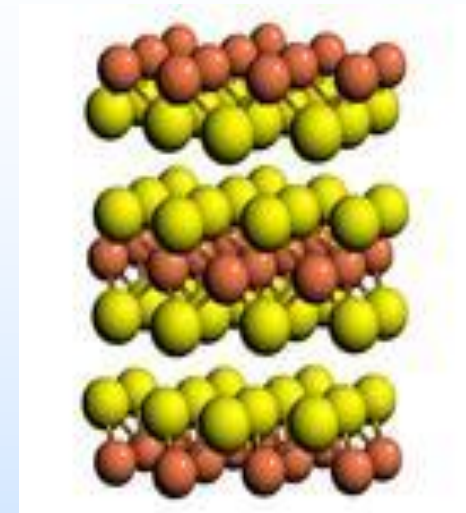
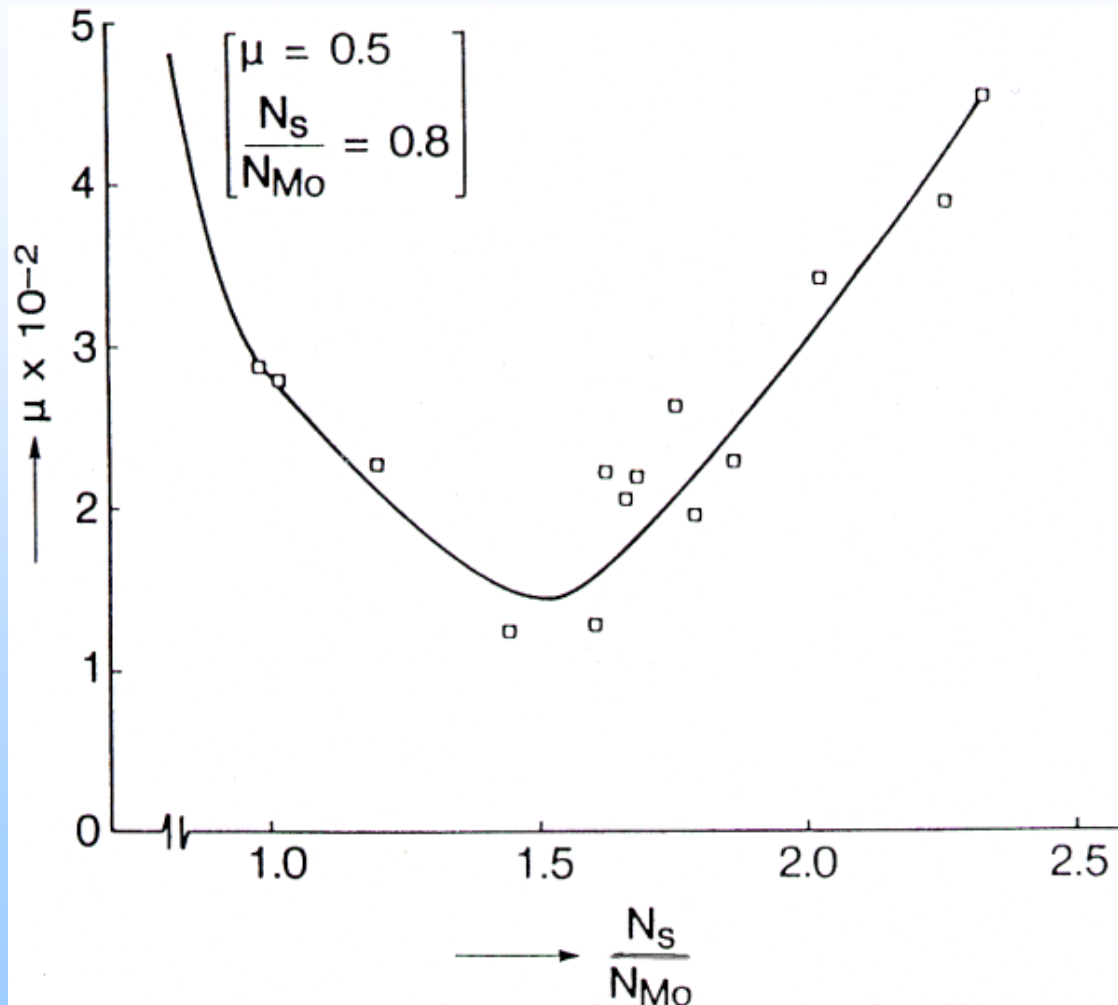
- **PVD** / **Sputtern**, Ionenplattieren
- **PACVD** / RF, MF, Pulsplasma (up to 1 m<sup>3</sup>)
- **Hot-Filament CVD**, **Mikrowellen-Plasma CVD**
- **Plasma-Diffusion**
- **Elektroplattieren**

## Schichtmaterialien

- **Me-DLC**, Nitride, Karbide, Sulfide
- **DLC/a-C:H**, modifizierte DLC (Si-DLC, SICON)
- **Polykristalline Diamantschichten**
- **Oxide** (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>), DLC, TiN
- Nitrieren, Bonieren, Karburisieren
- **Nanokomposite**, Metalle



# Gleitreibungskoeffizient



Gleitreibungskoeffizient  
von  $MoS_x$ -Filmen in  
Abhängigkeit von der  
Zusammensetzung.

# Trockenschmierfilme

## Werkzeuge für Trockenverarbeitung

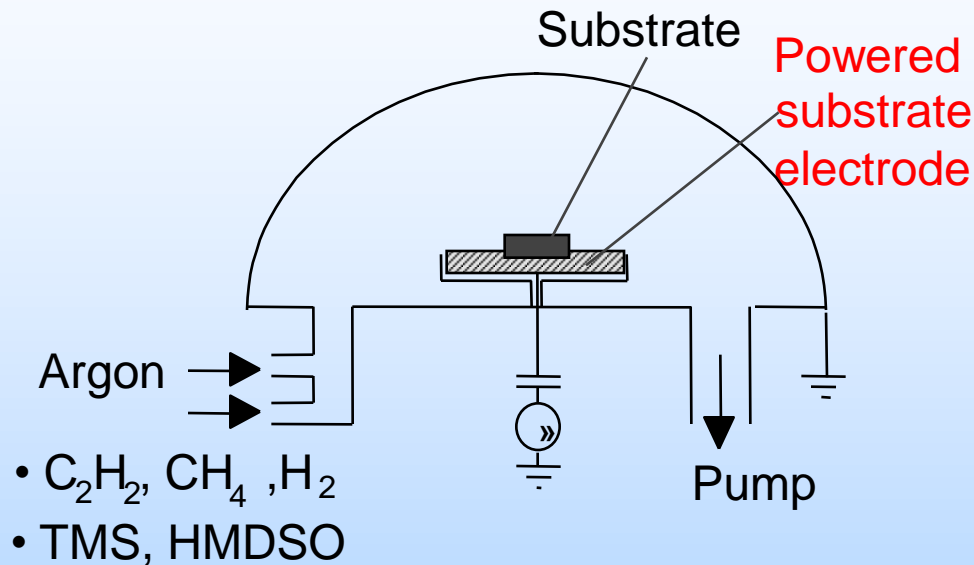


New dry lubricant coating	Operation	Work piece material
WS <sub>2</sub> /Ti	Drilling	AlSi9Cu3
MoSe <sub>2</sub> /Ti	Thread forming	Steel Ck35 and ST 2
MoSe <sub>2</sub> /Ti	Drilling	Steel X90CrMoV18
B-C-N	Milling	AlSi9Cu3
B-C-N	Thread forming	Steel Ck 35
Ti-B-N	Punching	Iron

# Deposition und Eigenschaften von DLC-Filmen

Process	RF PACVD 13.56 MHz	MF PACVD 50 kHz		MF PACVD 75 kHz
Hydrocarbon gas	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>
Working pressure / Pa	1.5 Pa	1.5 Pa	1.5 Pa	200 Pa
Hardness/ GPa	30	26	21	30
Young's modulus/ GPa (E/H)	290 (9.7)	155 (6.0)	120 (5.8)	187 (6.2)
Abrasive wear / 10 <sup>-15</sup> m <sup>3</sup> / Nm	0.9	0.8	1	0.9
Friction coefficient (against steel)	0.2	0.2	0.2	0.2
Roughness R <sub>RMS</sub> / Å	≈ 20	1	1	5
Roughness R <sub>z</sub> / Å	170 - 180	10	6	40

# Deposition von DLC- und modifizierten DLC-Schichten

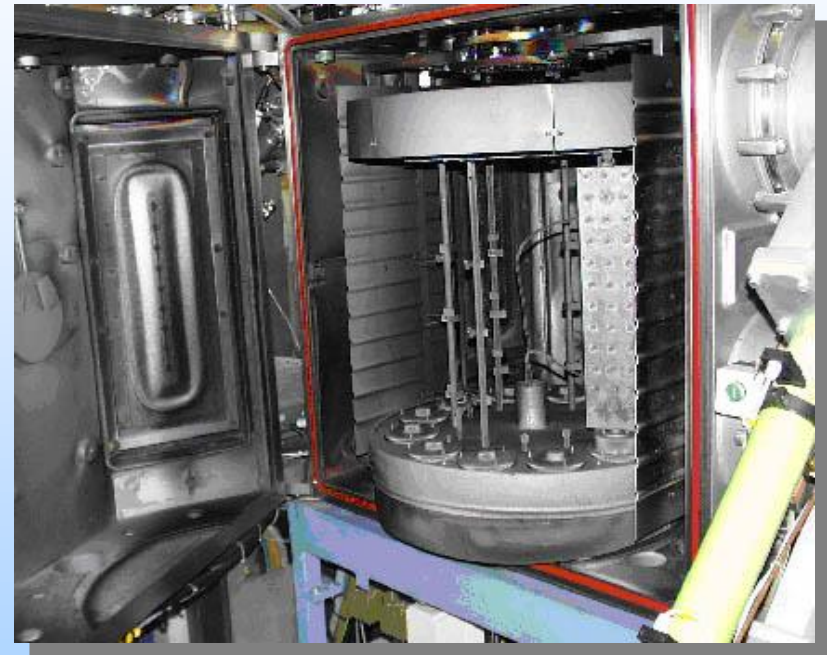
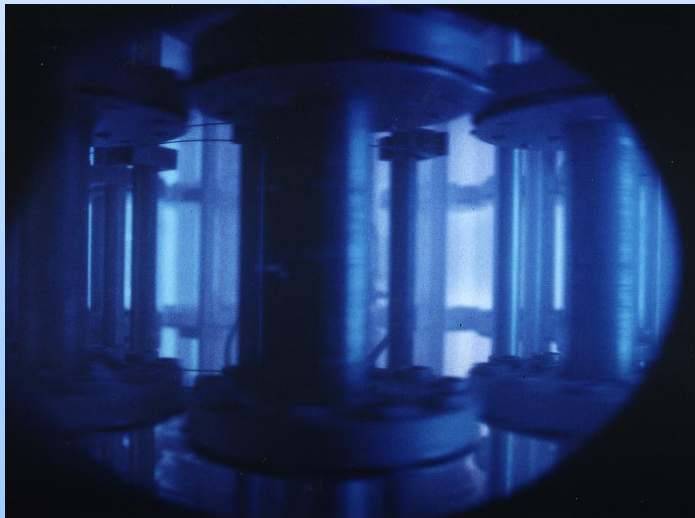
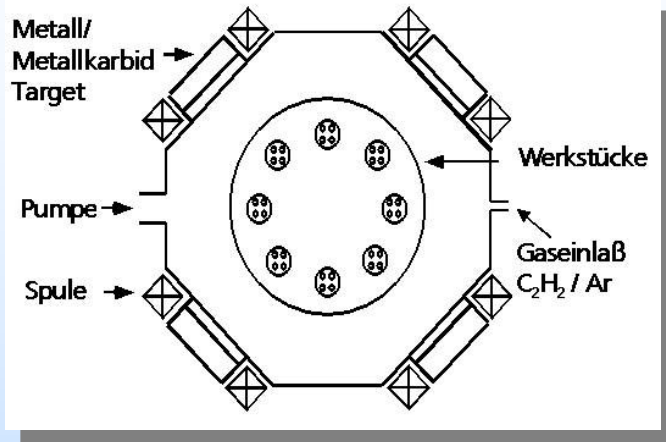


- **Substrateelectrode**
  - RF (13.56 MHz) (+ blocking capacitor)
  - MF harmonic (30 - 100 kHz)
  - DC puls (100 – 300 kHz)
- Power density  $0.1 \dots 0.5 \text{ W cm}^{-2}$
- Process pressure: 1 to 100 Pa
- Deposition rate:  $1 \dots 2 \text{ } \mu\text{m h}^{-1}$
- High stress ( $\sim$ GPa)  $\rightarrow$  adhesion ?

RF: problems with up scaling, high costs for equipment  $\rightarrow$

Medium frequency (MF) technique

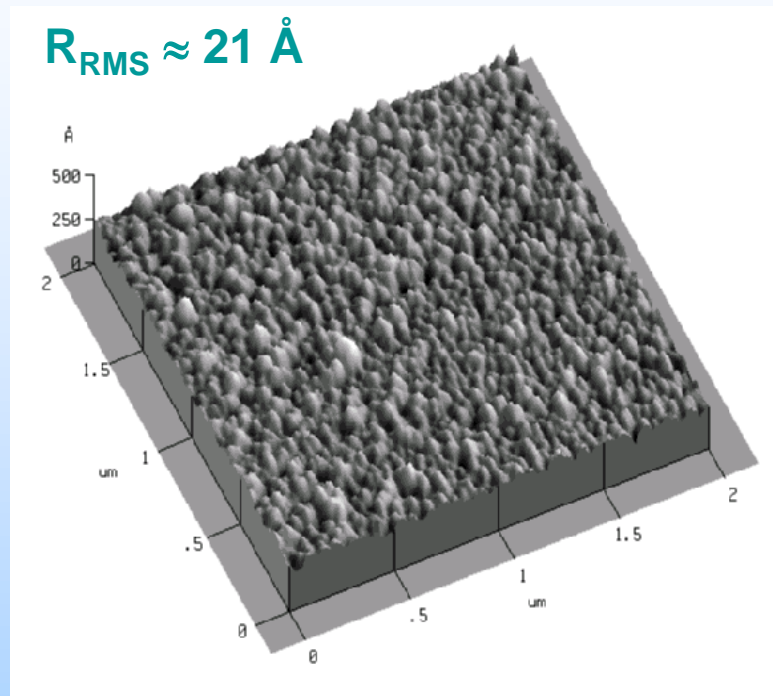
# Prinzipieller Aufbau der HTC 1000 Magnetron-Sputteranlage



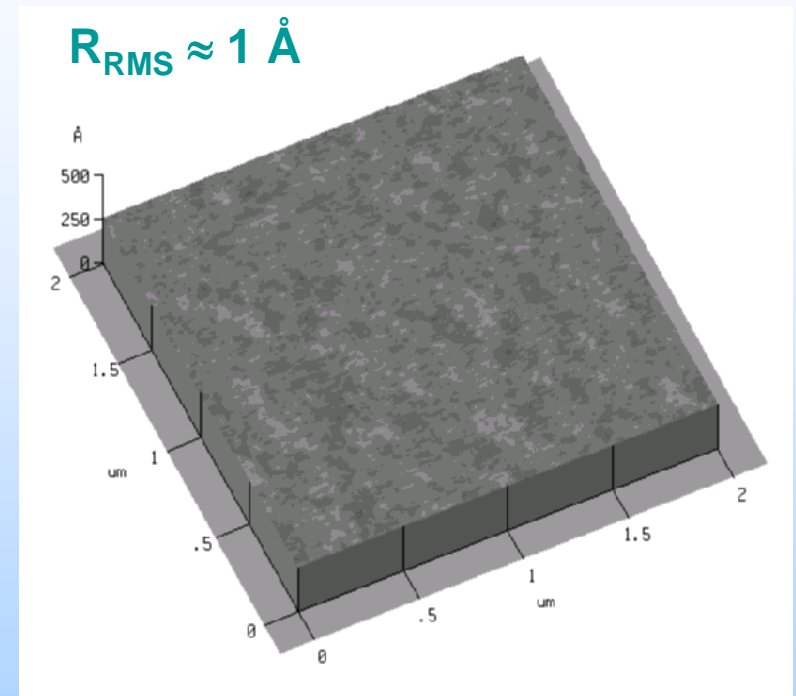
Durch Variation des  $C_2H_2$ -Gehaltes ist eine gradierte Schichtherstellung möglich



# DLC-Filme mit extrem niedrigen Rauheiten

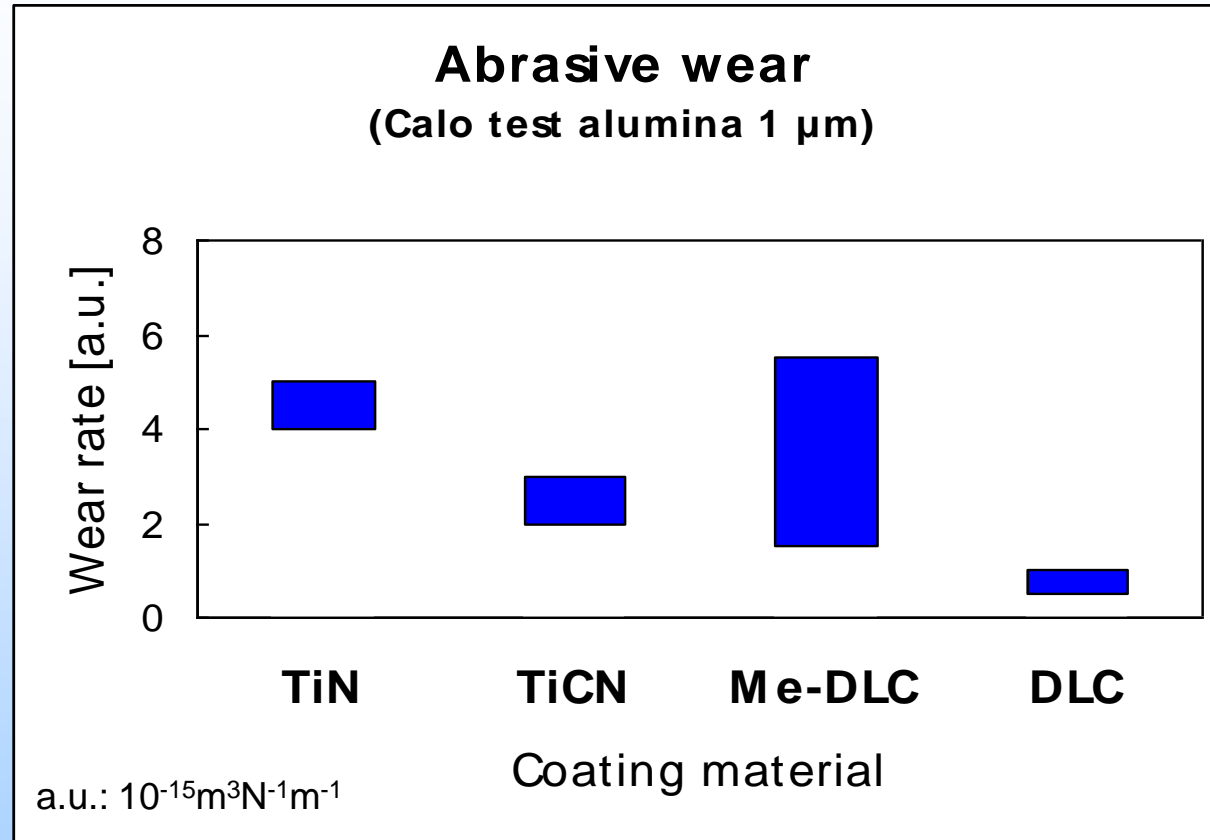


**RF-DLC (13.56 MHz)**  
 **$p = 1.5 \text{ Pa} / \text{C}_2\text{H}_2$**



**MF-DLC (50 kHz)**  
 **$p = 1.5 \text{ Pa} / \text{C}_2\text{H}_2 \text{ or } \text{CH}_4$**

# Vergleich der DLC mit Hartstoffschichten



## Me-DLC

- Me: **Ti, Nb, Cr, W**
- Lowest wear: **W-DLC**

# Me-DLC-beschichtete Bauteilen - Zahnräder



Reduzierte Reibung und Verschleiß →  
erhöhte Lebensdauer,  
erhöhte Belastungsvermögen

# Me-DLC-beschichtetes Ventil

Ball-Ventil mit Durchmesser bis 600 mm



Niedrige Reibung → reduziertes Verschleiß → erhöhte Lebensdauer

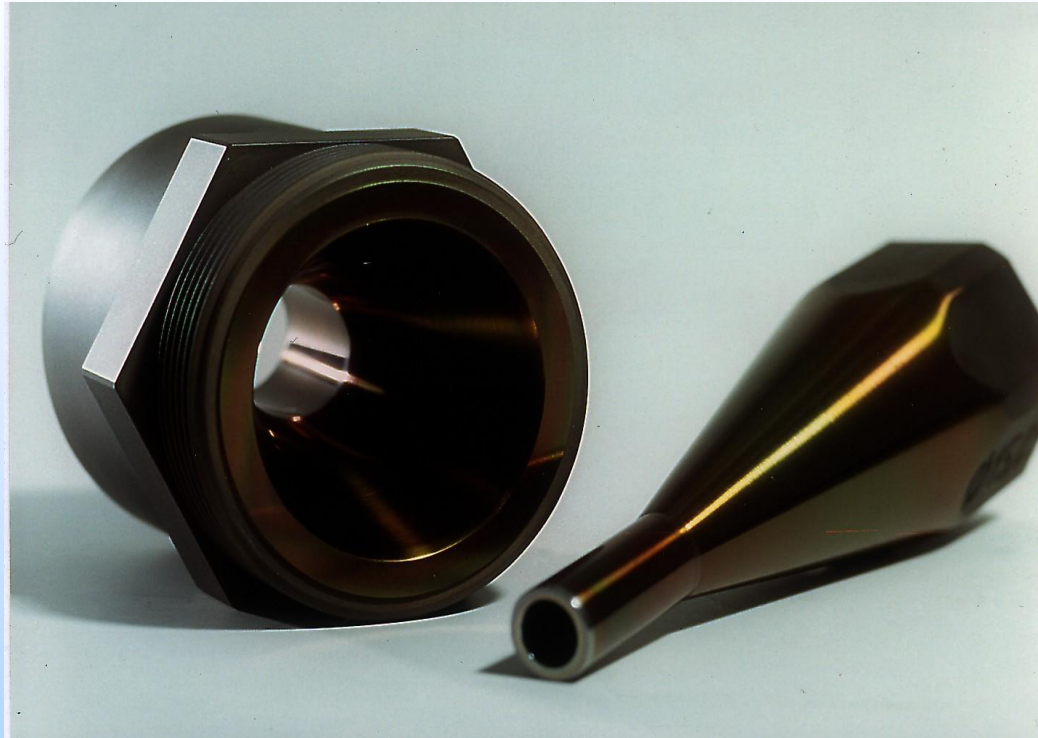
# DLC-beschichtete Umformwerkzeuge

Tiefziehwerkzeuge





# Extrusionswerkzeuge beschichtet mit a-C:H:X



- Reduzierte Haftung → leicht zu reinigen
- Verschleißschutz → erhöhte Lebensdauer



# Anwendungen von Kohlenstoffschichten



Antriebselemente - Kurbelwelle für  
Verbrennungsmotoren:  
-Reibungs- und Verschleißreduzierung  
→ höhere Beschleunigung

Tablettierwerkzeug –  
Stempel  
zum Pressen von  
Tabletten:  
-Vermeidung des  
Anhaftens  
am Werkzeug



In der Medizintechnik - Hüftgelenkprothese  
Schutz des unbeschichteten Gegenkörpers-  
kein Abrieb an der PE-Pfanne-

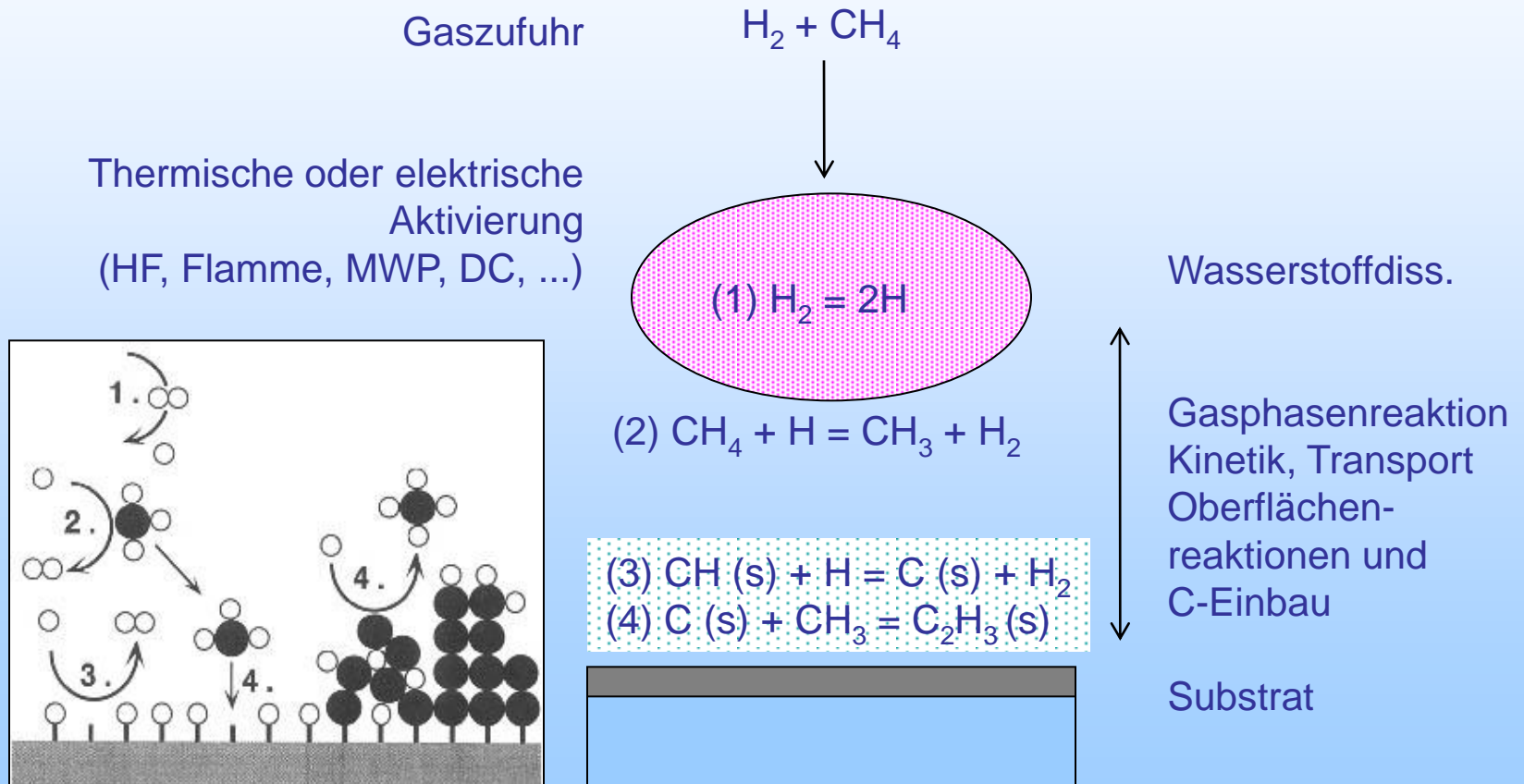


# Intrinsische Eigenschaften von Diamant und Anwendungen

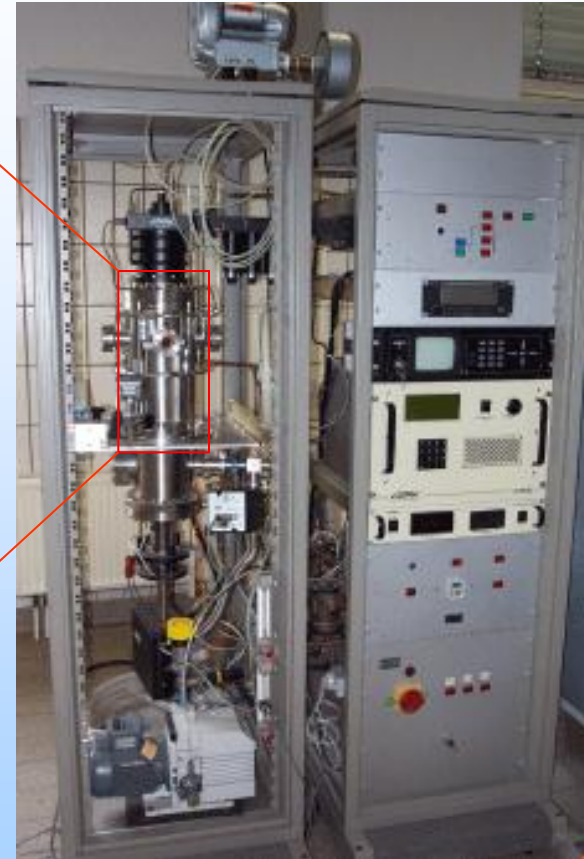
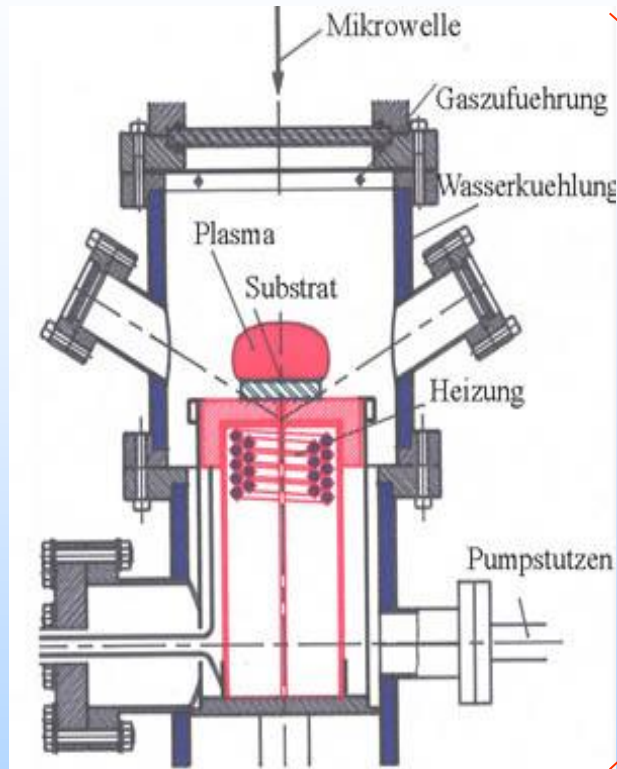
Härte (Hv)	ca. 100 GPa	Werkzeug- und Bauteilbeschichtung
Chemische Resistenz	Gegen allen Chemikalien	Elektrode für die chemische Industrie
Thermische Leitfähigkeit I	20 W/cmK	Isolierende Wärmesenke für Laserdiode
Durchbruchfeldstärke $E_s$	$10^7$ V/cm	
Transparenz	UV-, VIS u. IR	
Brechungsindex n	2,42	Optische Fenster für UV- bis – IR Bereich
Absorptionskante	200 nm	
Bandlücke $E_g$	5,45 eV	
Ladungsträgerbeweglichkeit $\mu$ , <i>Elektr.</i>	2200 cm <sup>2</sup> /Vs	
<i>Löcher</i>	1600 cm <sup>2</sup> /Vs	Hochtemperaturhalbleiter und – sensormaterial (bis 600 °C, für Si 120 °C)

# CVD-Diamantabscheidung

(M. Frenklach et al., 1991)



# Mikrowellen-Plasma-CVD



$T_s = 500 - 1100 \text{ } ^\circ\text{C}$

$\text{CH}_4/\text{H}_2 = 0,5 - 2,0\%$

$p = 10 - 40 \text{ mbar}$

$P = 500 - 1000 \text{ W}$

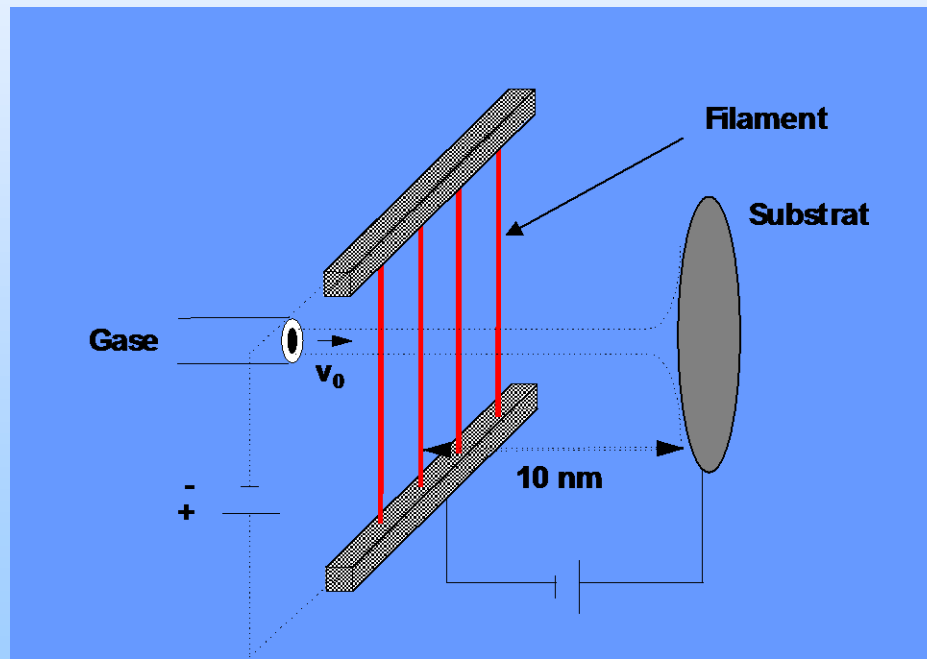
# Hot-Filament-CVD

$$T_F = 2200\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_S = 500 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$$

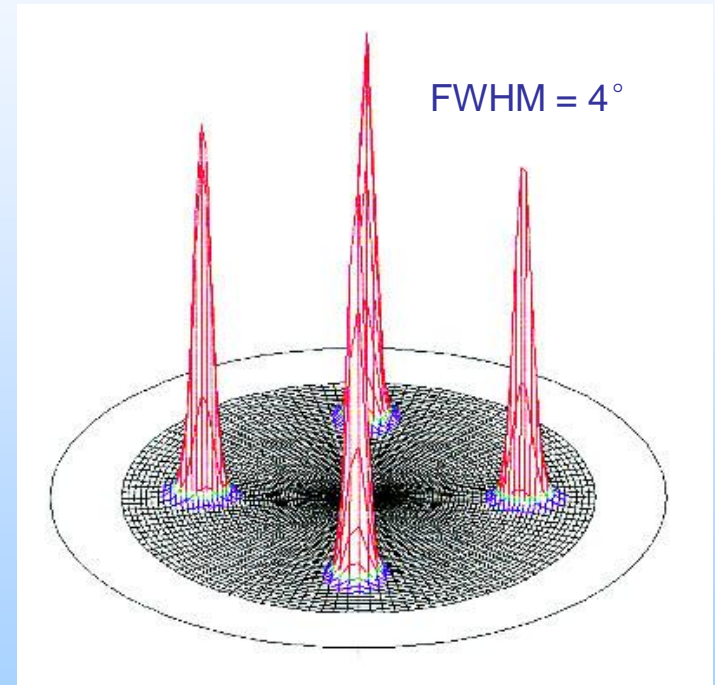
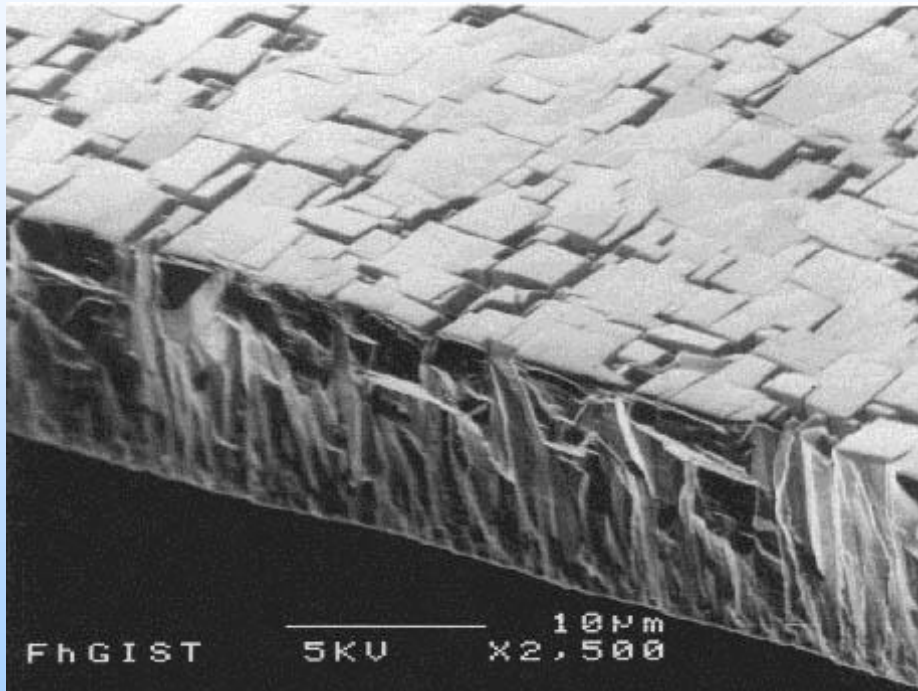
$$\text{CH}_4/\text{H}_2 = 0,5 - 2,0\text{ }\%$$

$$\text{Druck} = 10 - 40\text{ mbar}$$





# Heteroepitaktische Diamantschichten auf Si(001)



{111}-Röntgen-Polfigur

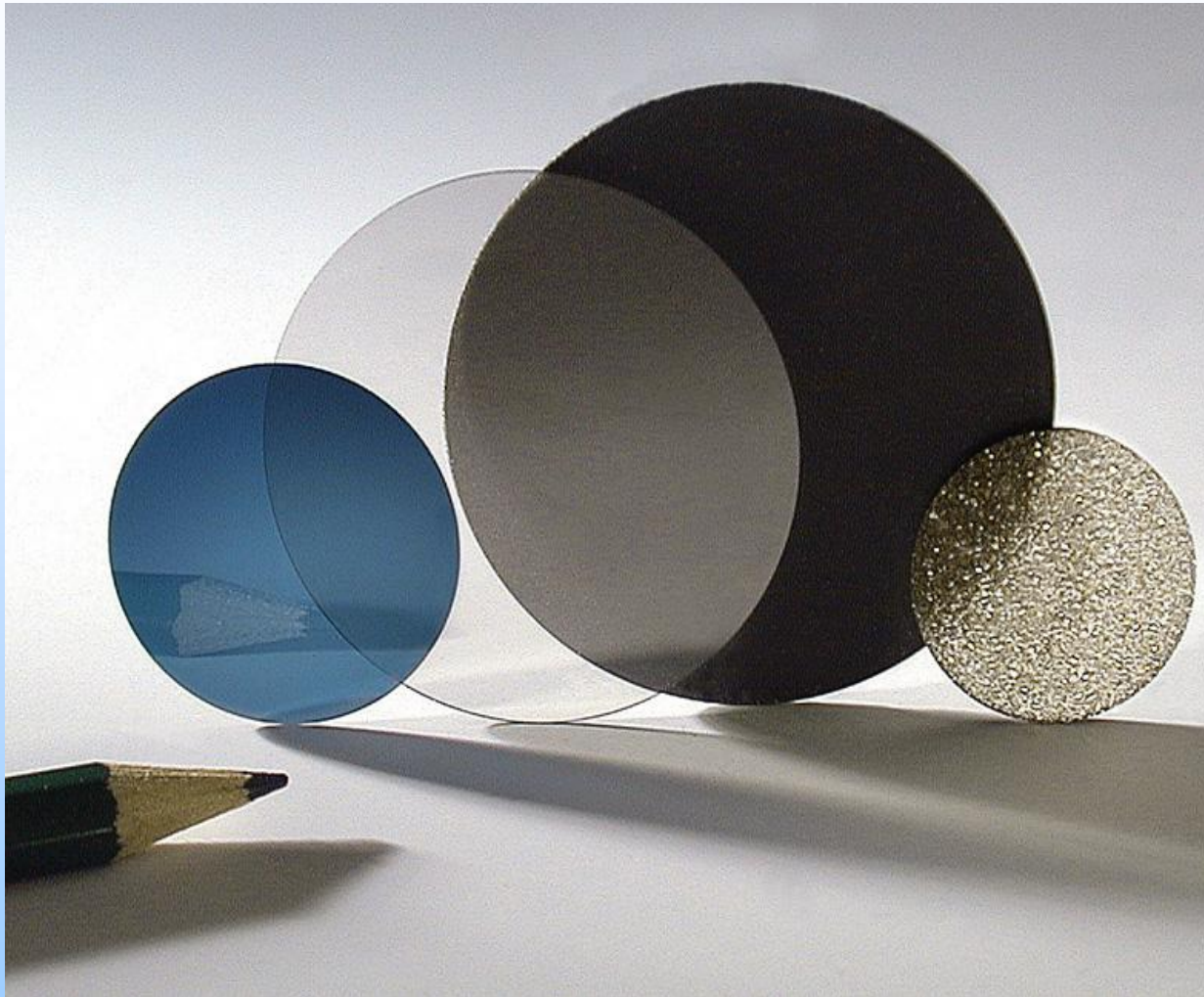
$(001)_{\text{Diamant}} // (001)_{\text{Si}}$

$[110]_{\text{Diamant}} // [110]_{\text{Si}}$

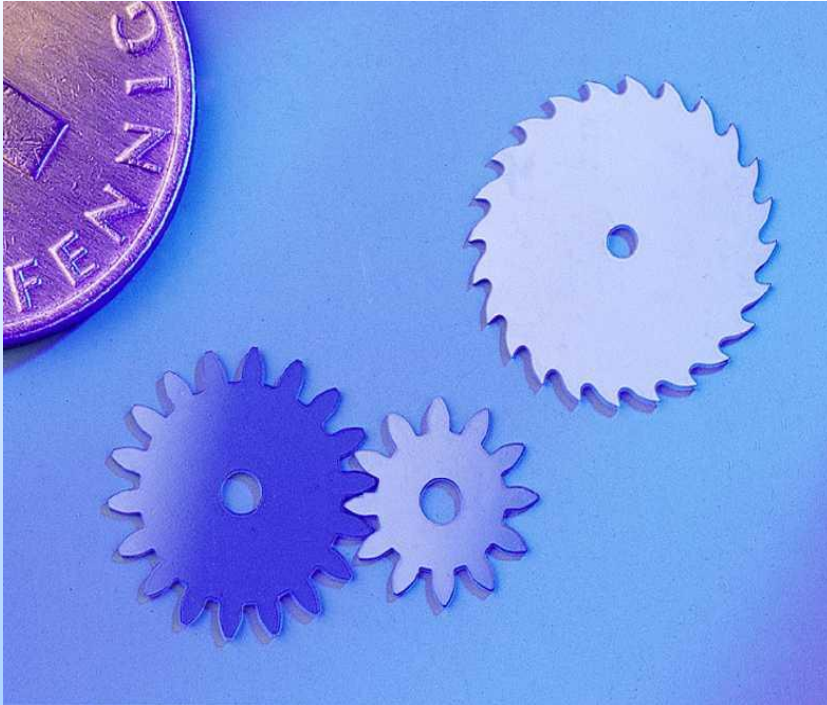
J. Appl. Phys. 83, 2511 (1998)



# CVD-Diamant-Wafers

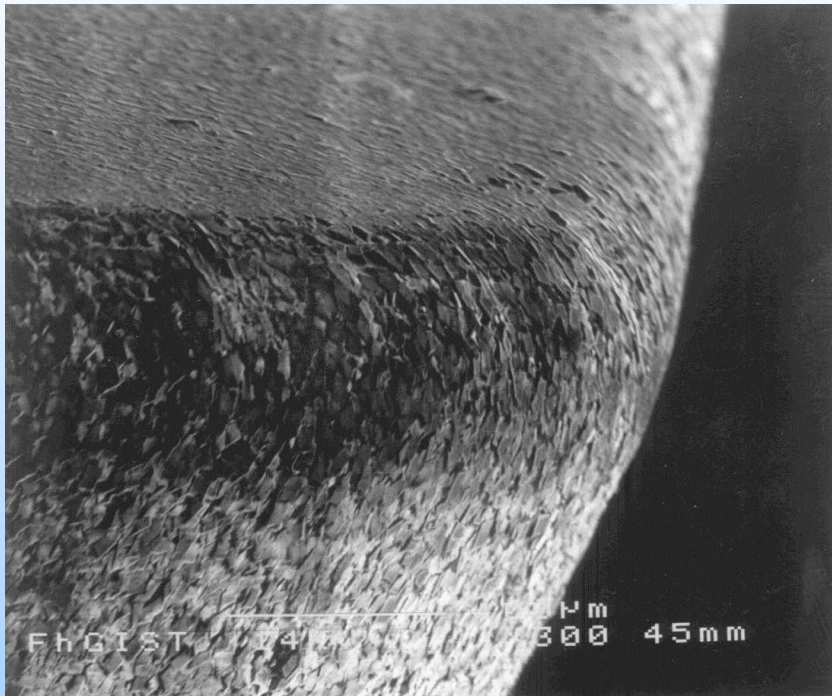


# Bauteilen für die Mikromechanik

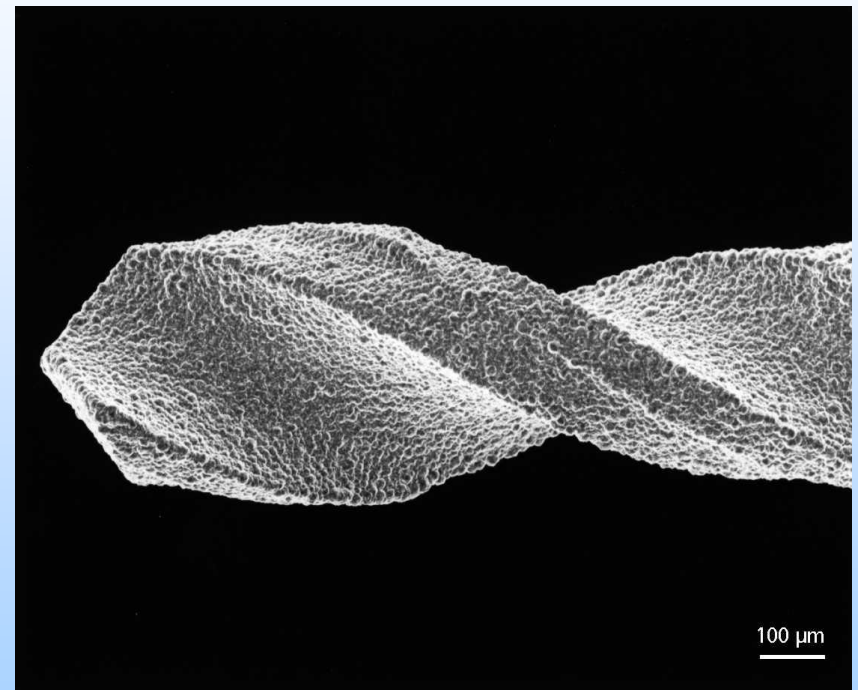


Rechnergesteuertes Laserschneiden (Nd:YAG)

# Beschichtung von Schneidwerkzeugen



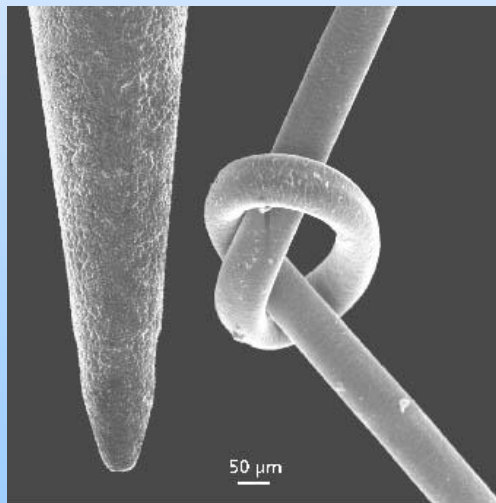
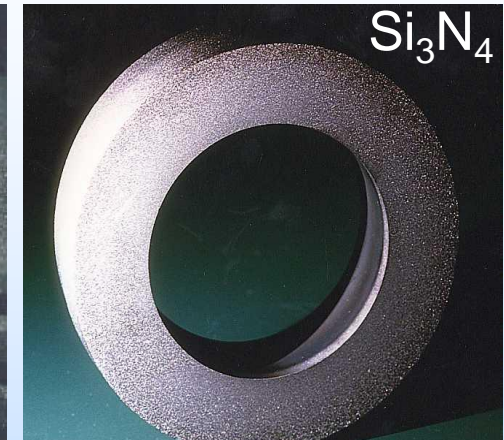
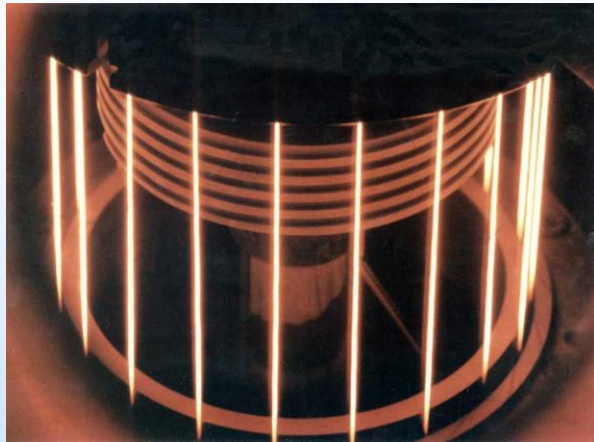
Ecke einer Wendschneidplatte  
mit (100)-Diamantschicht



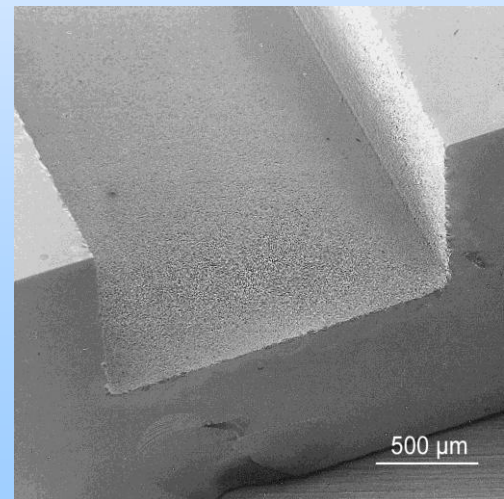
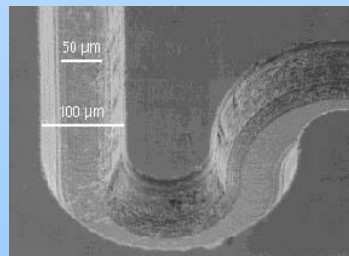
Mikrobohrer  $D = 0,15$  mm  
zum Bearbeiten von Leiterplatten



# Beschichtung von abrasiven Schleifwerkzeugen



geschliffene Nut in  
Silizium



kleinster Schleifstift der Welt, D = 50 μm