

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

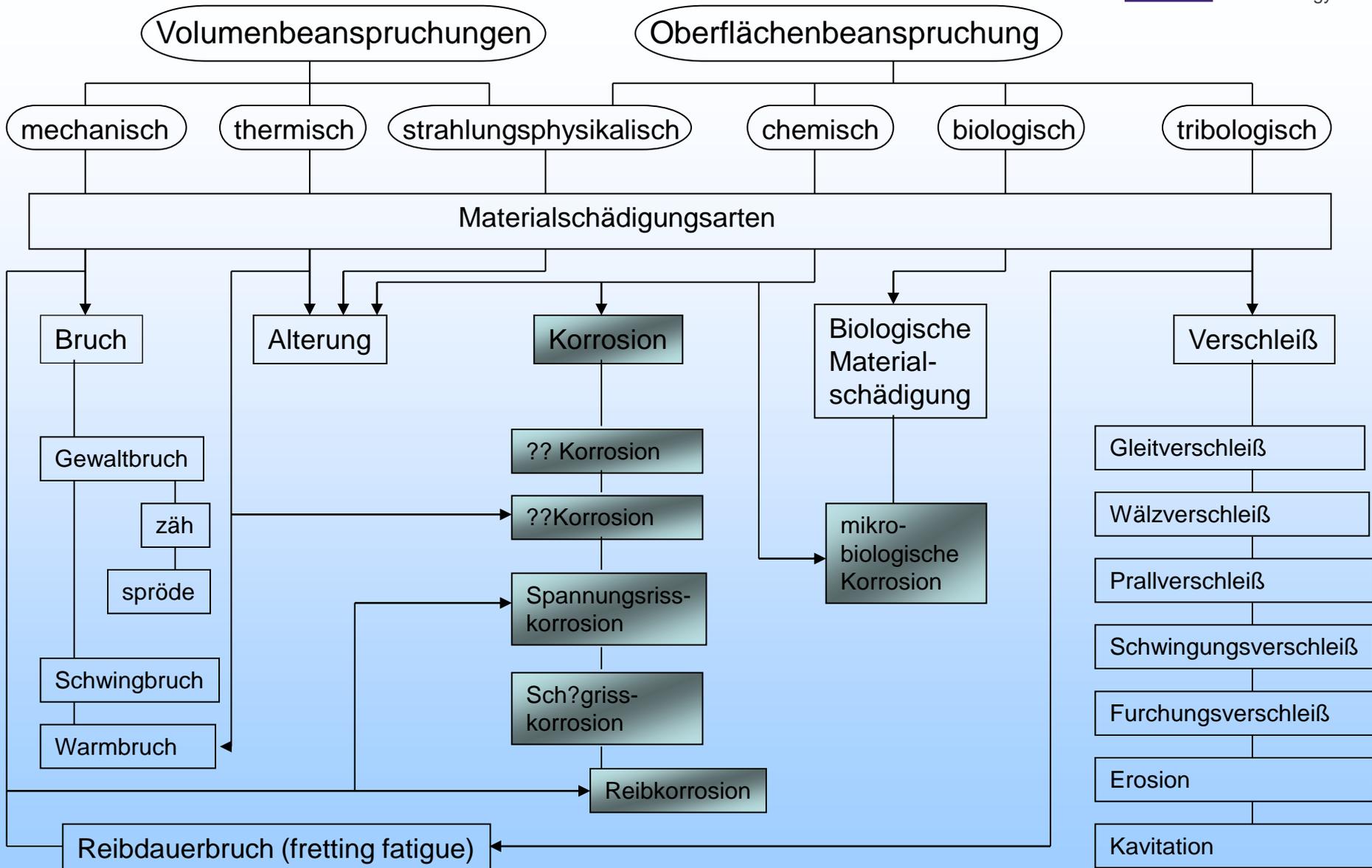
4.4 Prüftechnik

4.5 Verschleißschützende Maßnahmen

Tribologie, abgeleitet von dem
griechischen Wort „Tribos“

=

Reibung + Verschleiß + Schmierung



Materialerschädigungsarten: 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
- Härtingsrisse
- Ausscheidungen
- Phasen geringerer Schwingfestigkeit (z.B. entkohlte Randzonen)
- Überwalzungen
- Überschmiedungen
- Kerben
- Übergängen mit kleinen Radien
- eingedrückte Fremdkörper
- allgemein Ungänzen

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

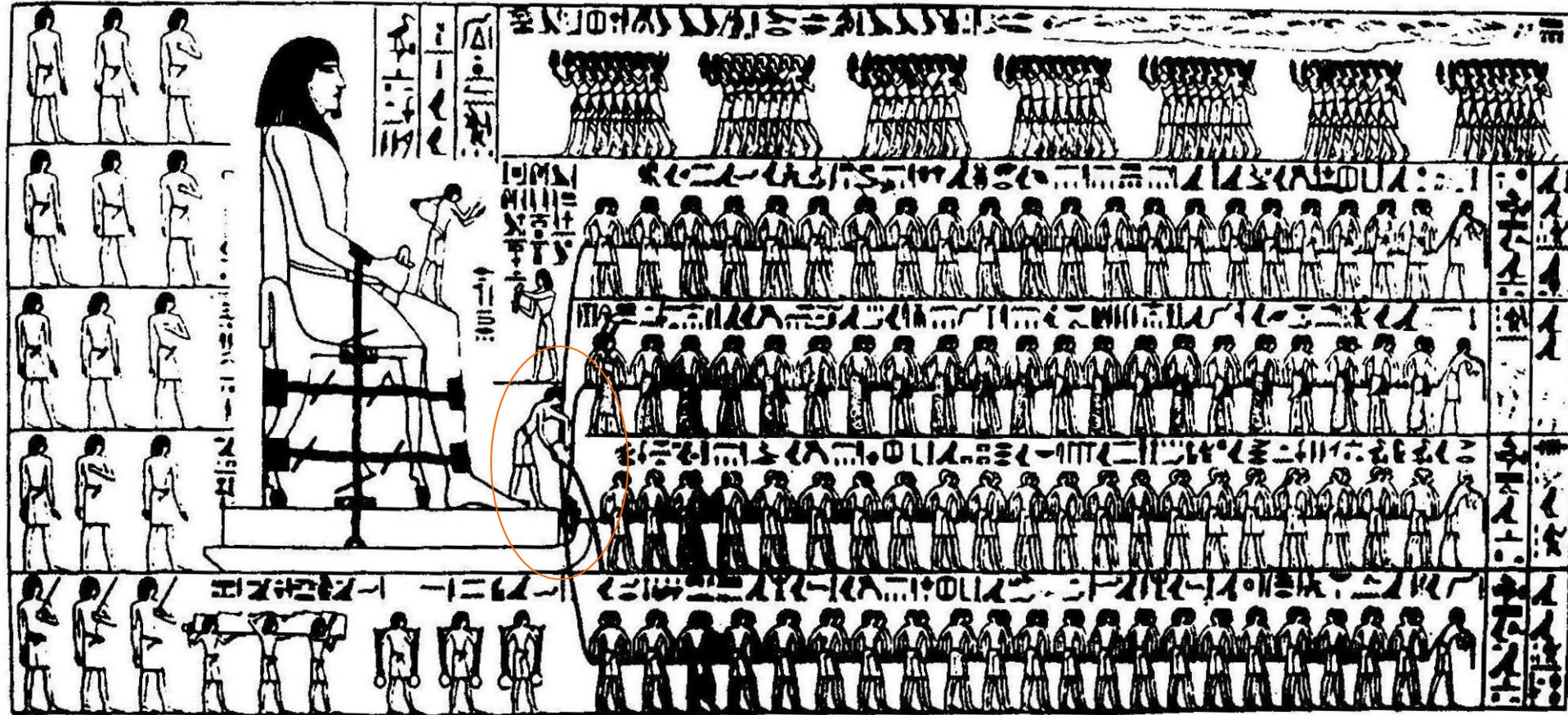
1707-1783 Leonhard Euler

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

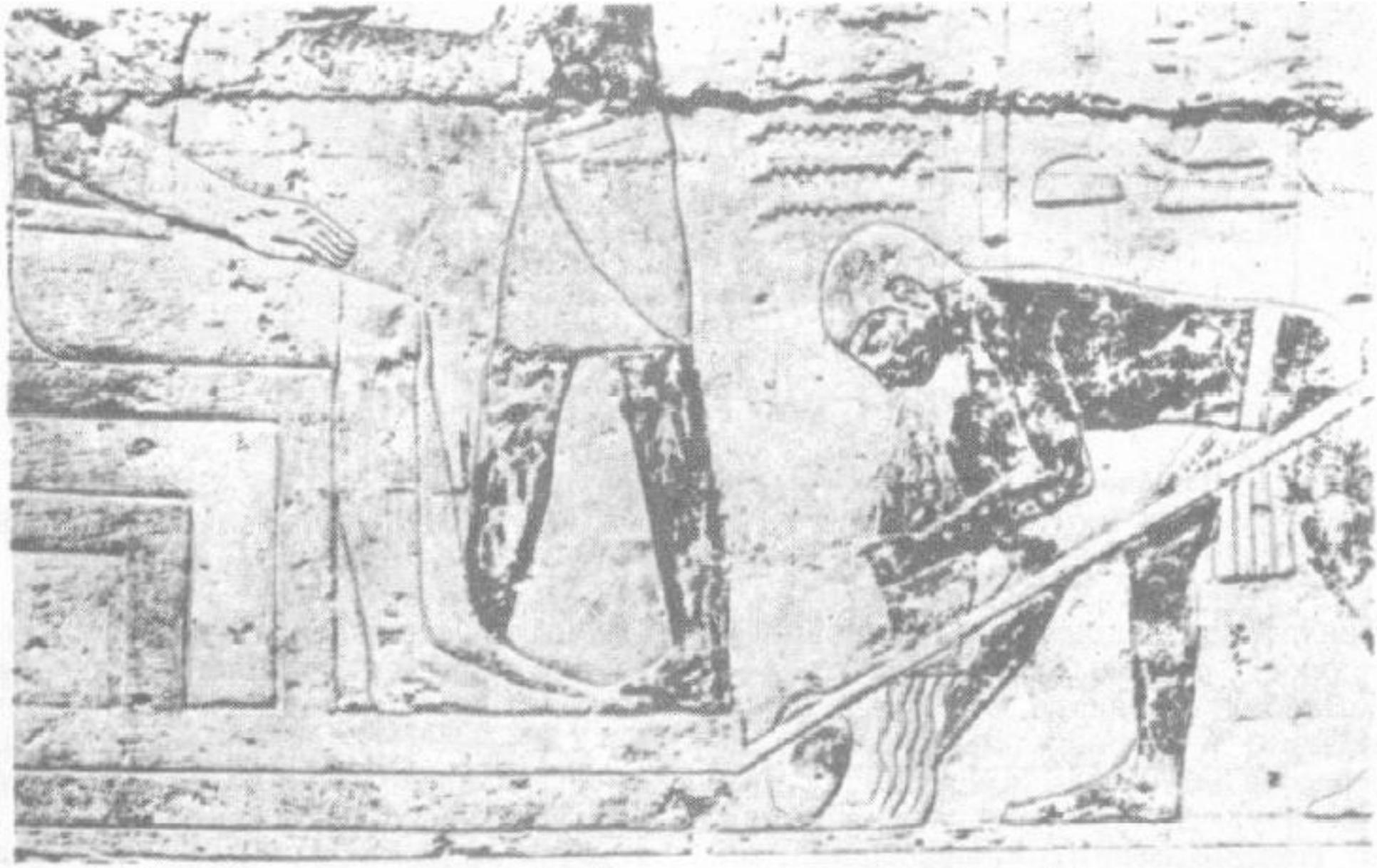
1736-1806 Charles Augustin Coulomb

- 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 = $172 \times 800 \text{ N}$, $\mu = 0.23$

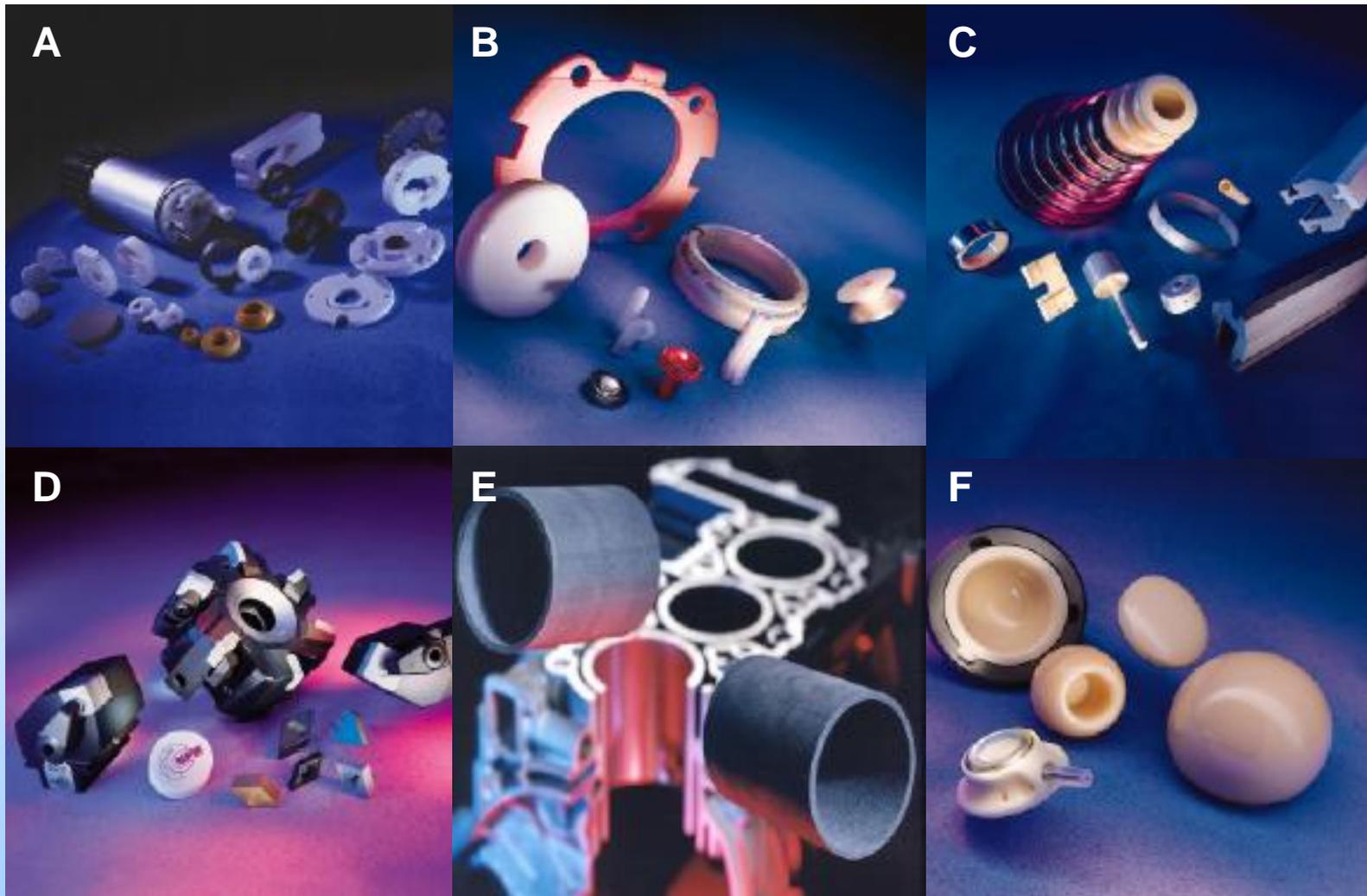


Unerwünschte Folgen von Reibung und Verschleiß in der Maschinentechnik:

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

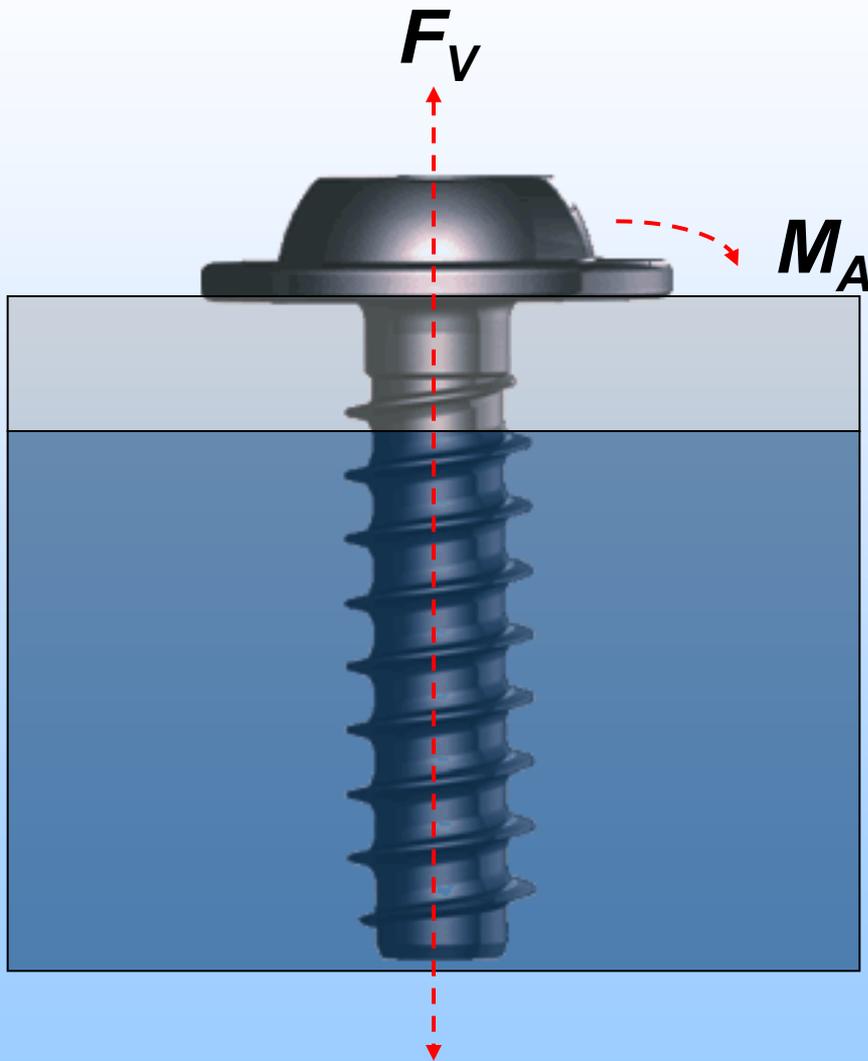
führen zu Verlust der Funktionsfähigkeit z.B. durch plötzlichen Ausfall oder fortschreitende Verschlechterung der Systemeigenschaften.

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

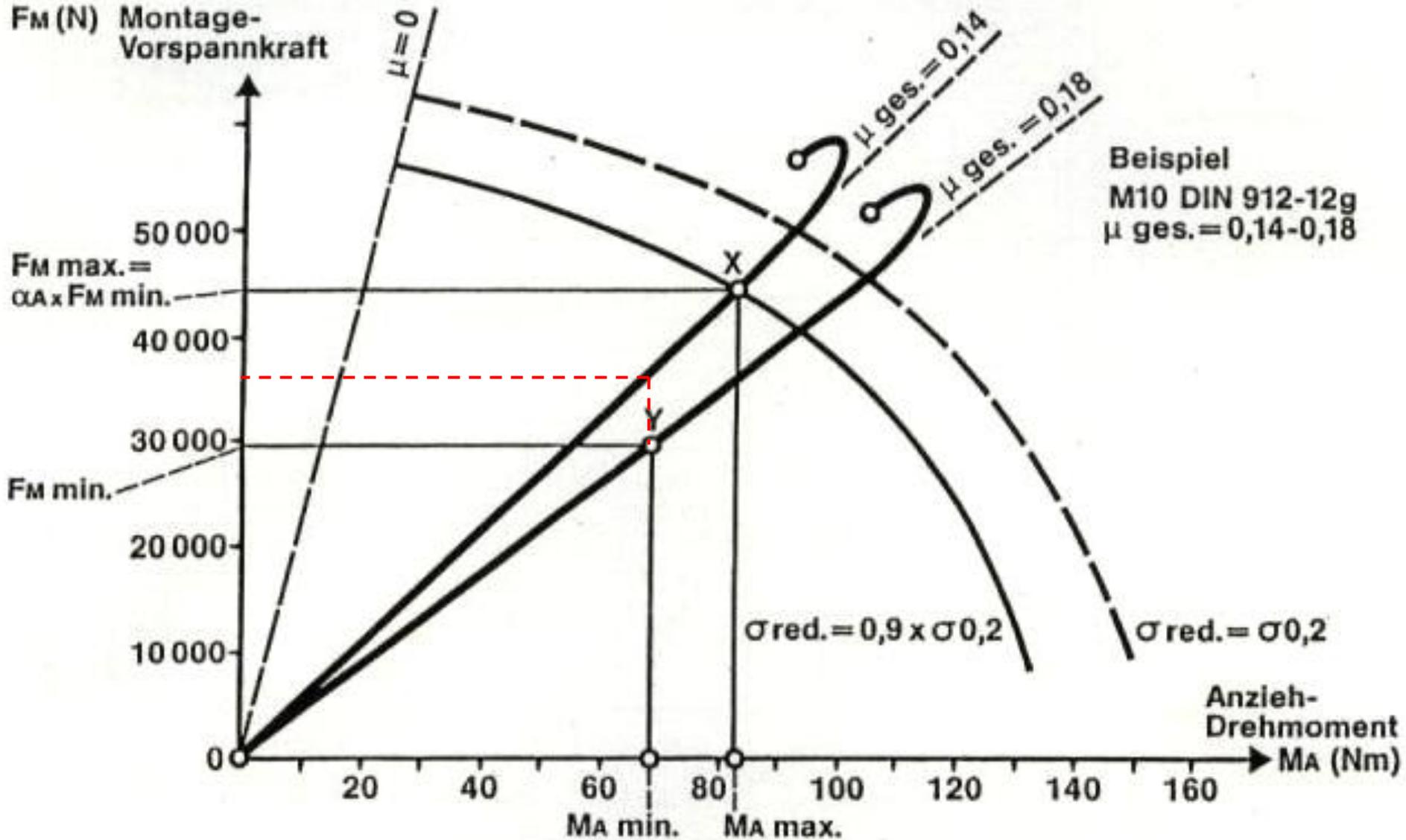
d_k = „Mittlerer“ Kopfdurchmesser

P = Gewindesteigung

μ_G = Reibungszahl für Gewinde

μ_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
 Muttern: 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

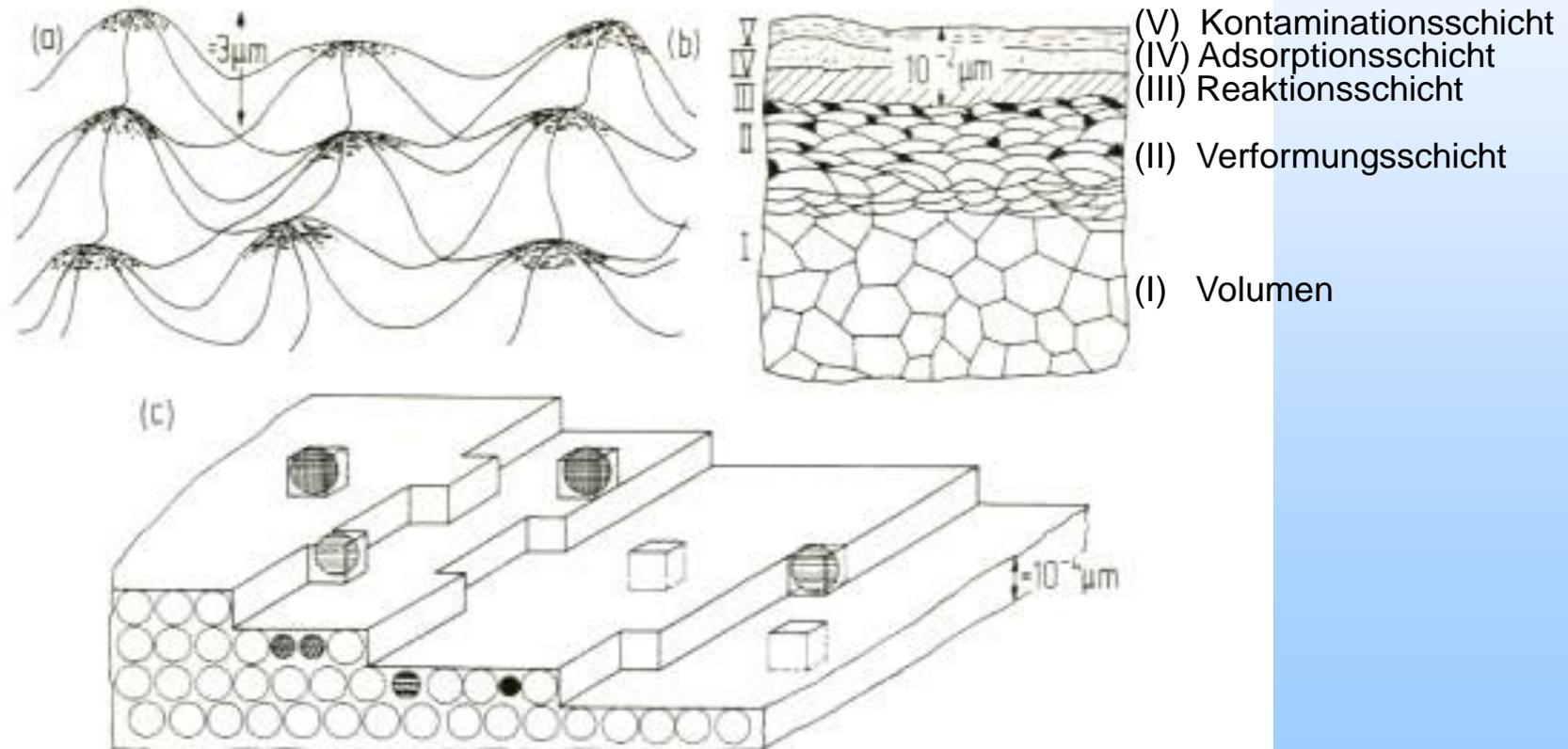
4.1 Einleitung

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

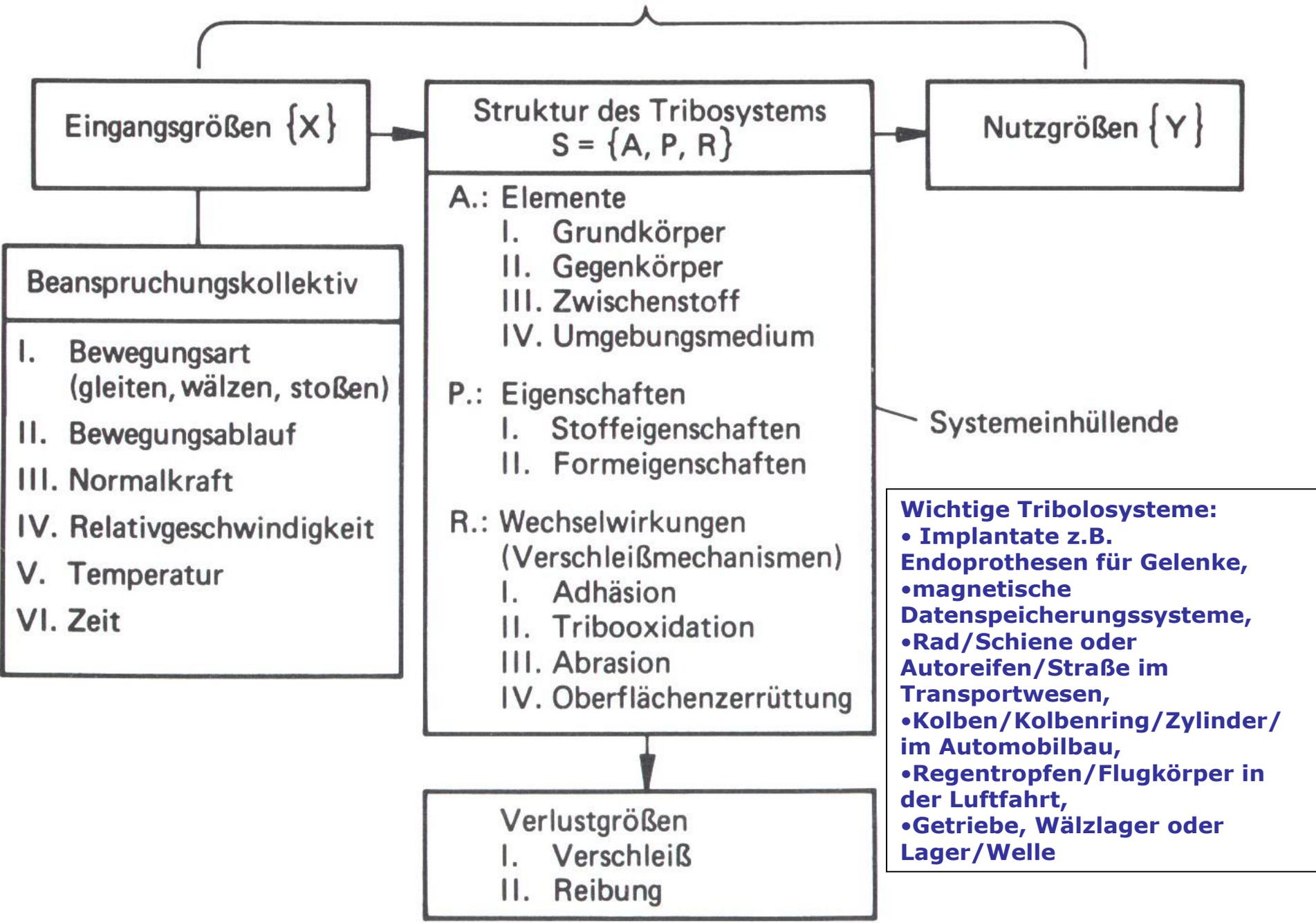
Verschleiß:

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

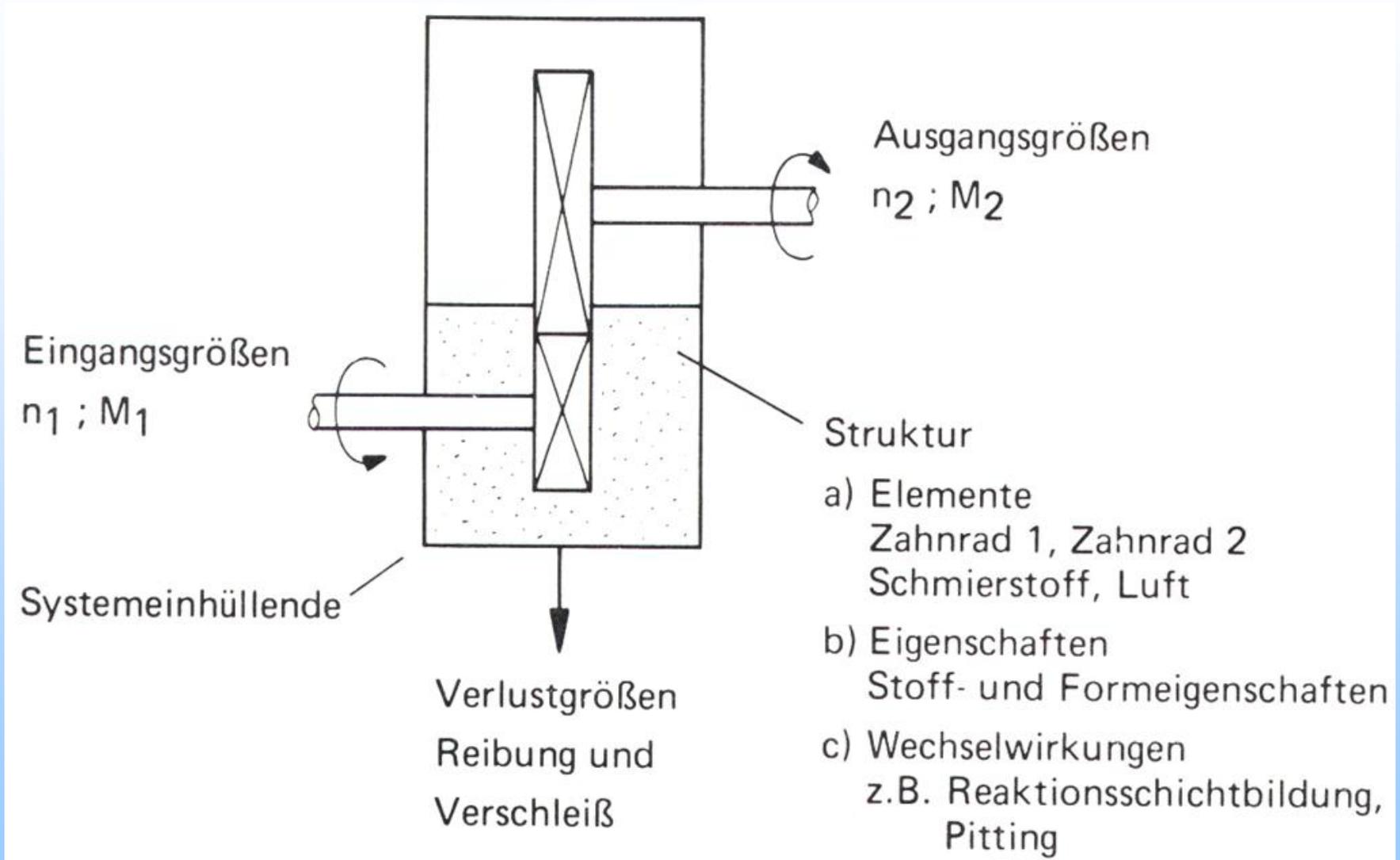
- Materialabtrag; lose Verschleißteilchen

Reibung und Verschleiß sind Systemeigenschaften und keine reinen Materialeigenschaften

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



Schematische Darstellung eines tribologischen Systems



Wichtige Rolle:

**Relativbewegungen zwischen Grund- und
Gegenkörper**

Bewegungsarten:

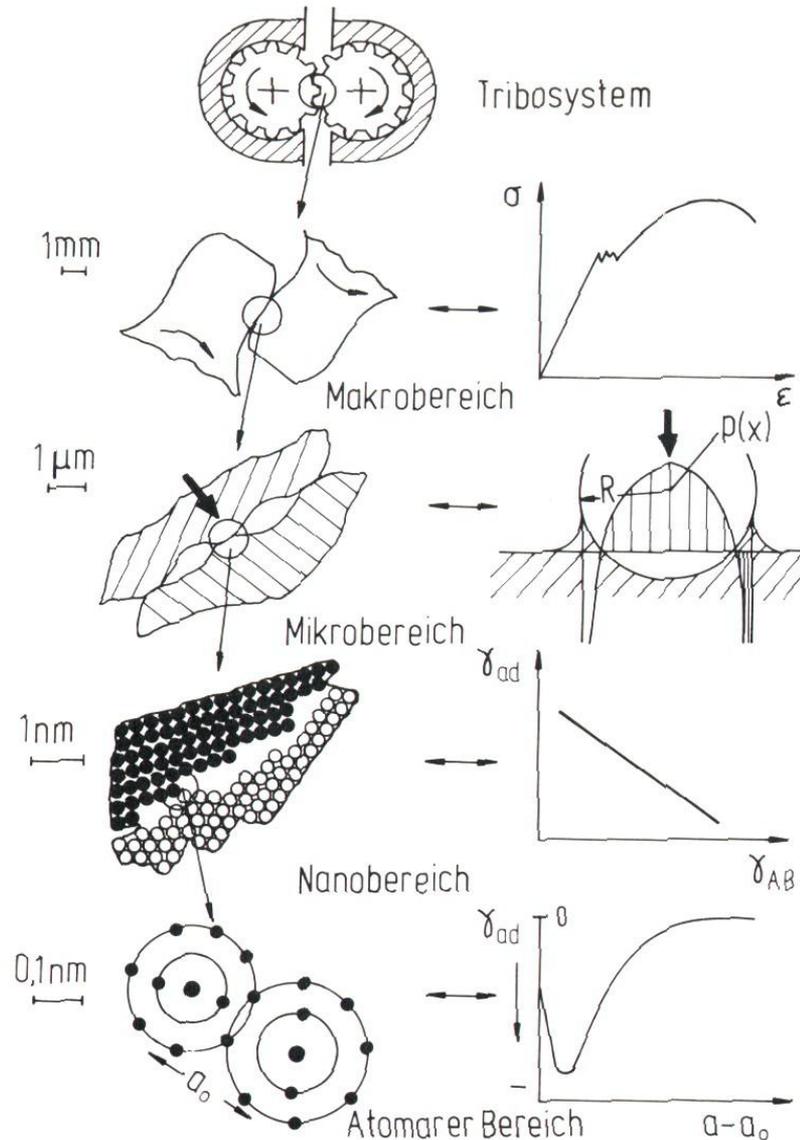
Gleiten, Rollen, Wälzen und Oszillieren

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



Tribologische Kontakte und Einflussgrößen

(σ : Spannung, ε : Verzerrung, γ_{ad} : Adhäsionsenergie, γ_{AB} : Grenzflächenenergie)



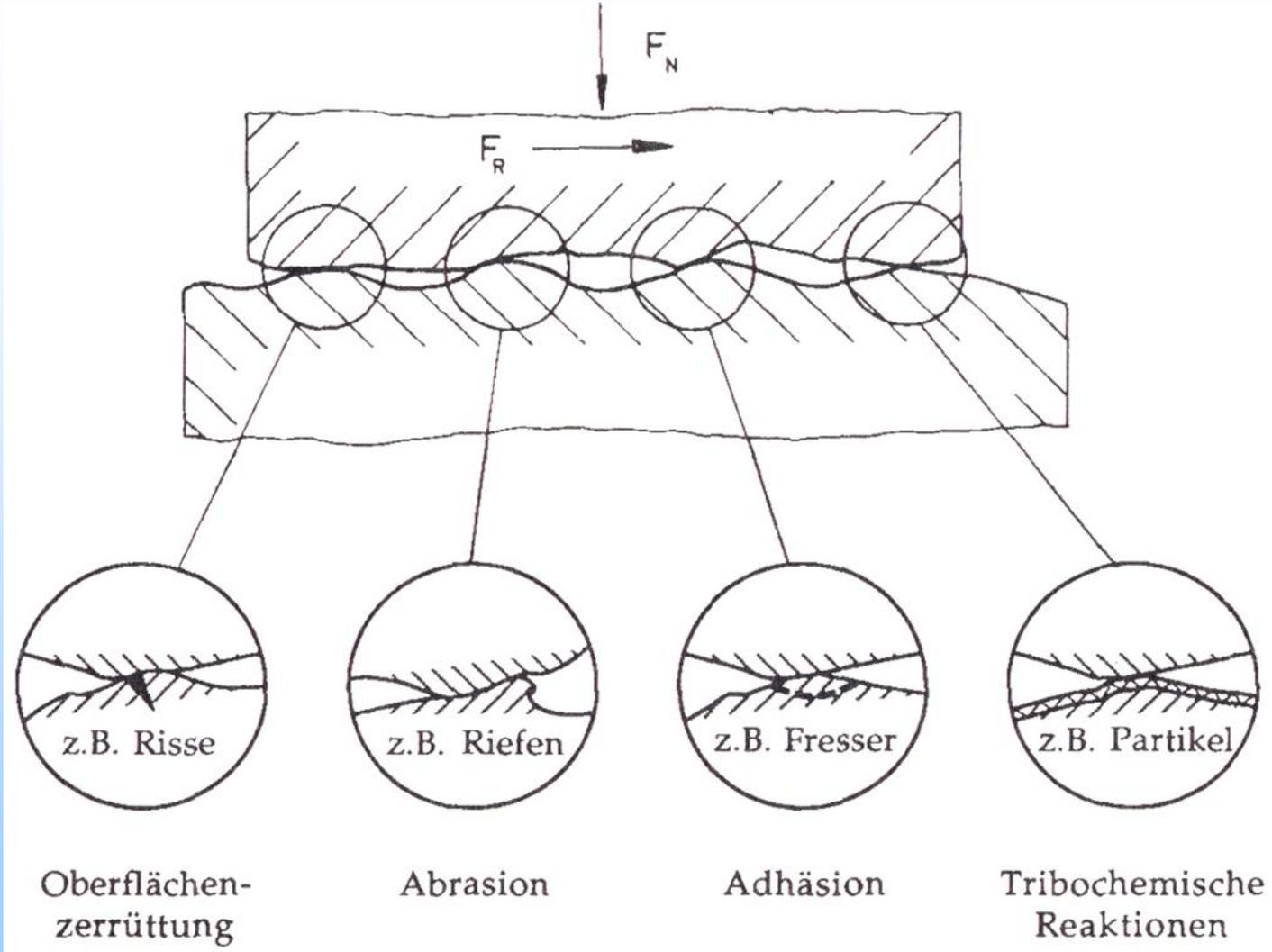
Harte, Druck, Young-Modul...

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



Cu/Al₂O₃



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

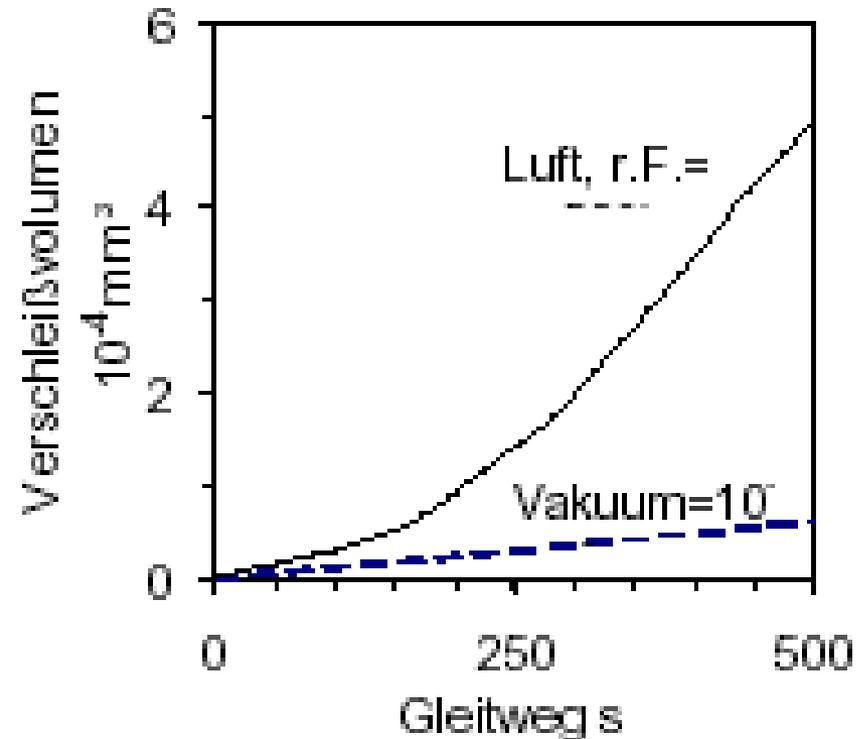
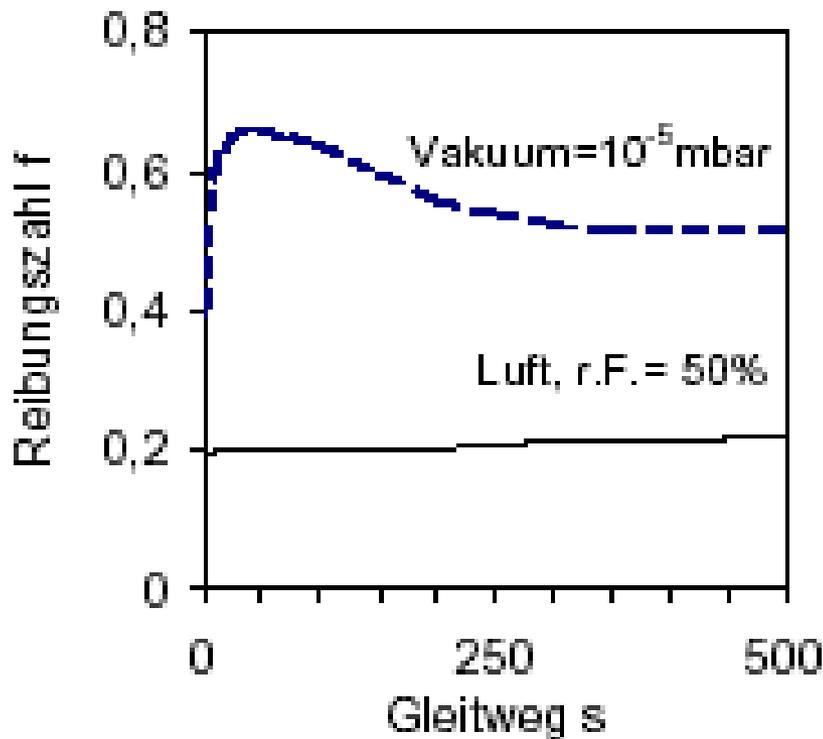
Schmierung

Materialeigenschaften der Reibpartner

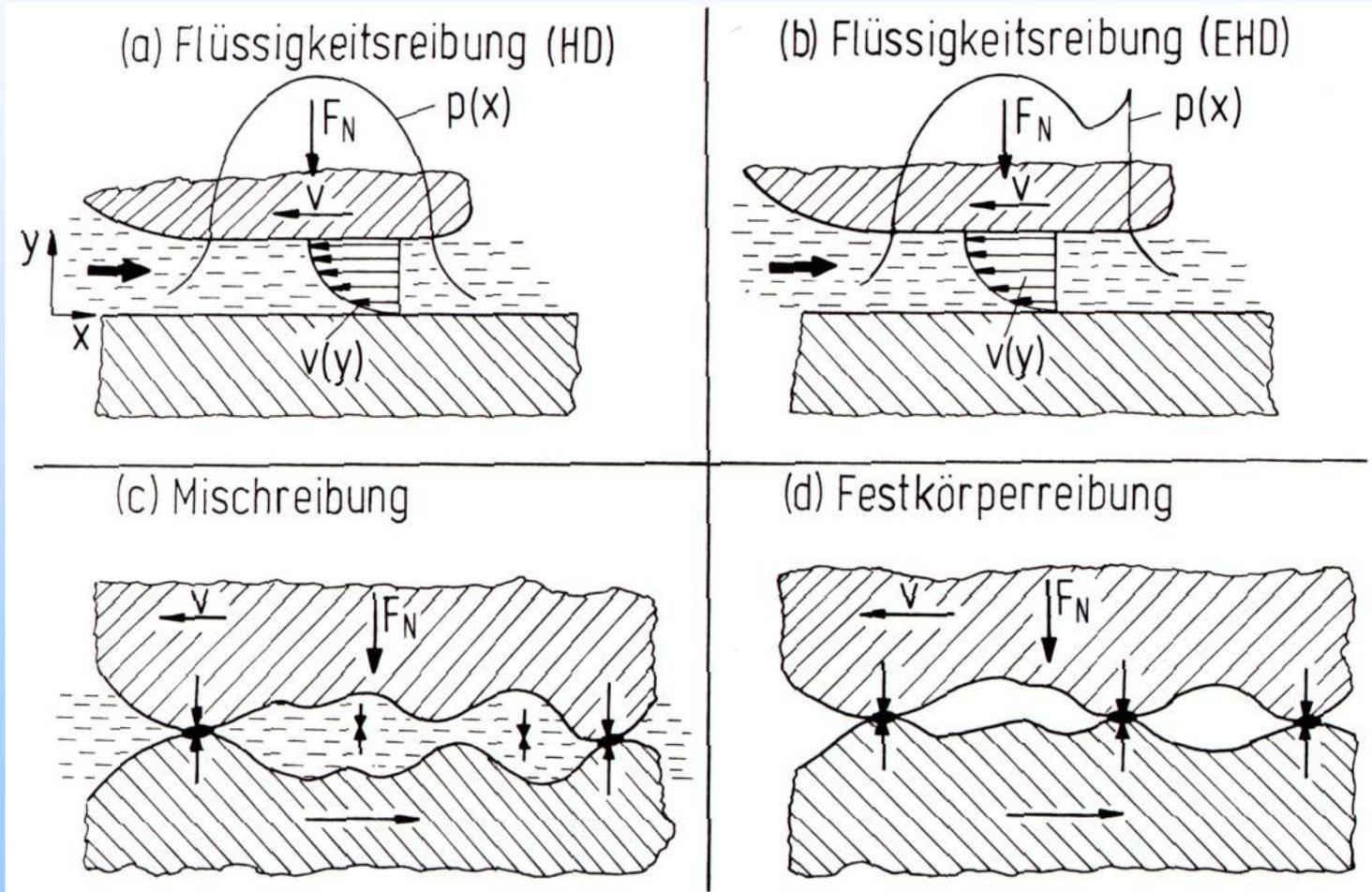
Mechanische Eigenschaften (E-Modul, Härte,...)

Chemische Eigenschaften

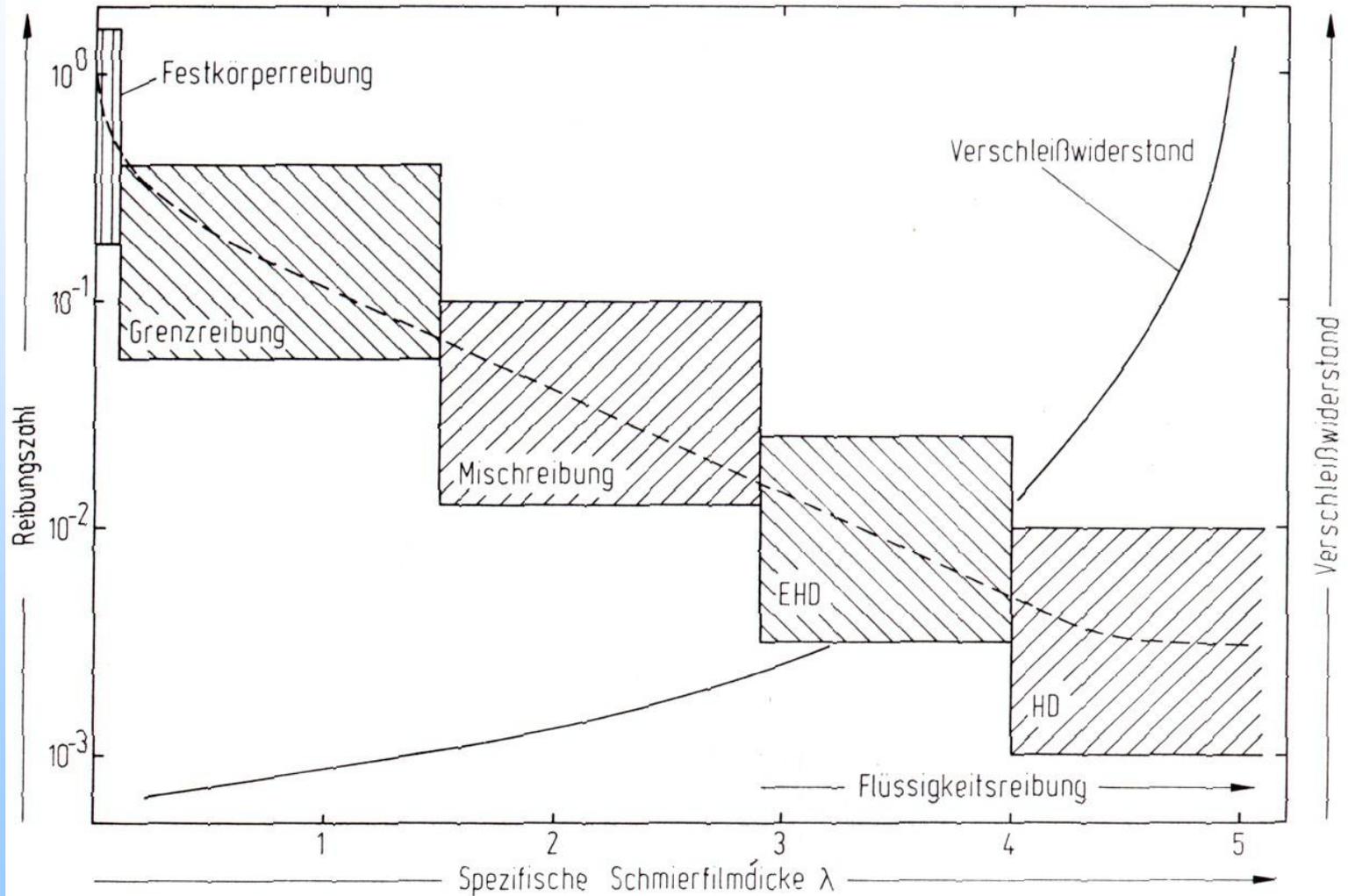
Umgebung: System=Stift/Scheibe TiC/TiC (CVD auf Stahl)



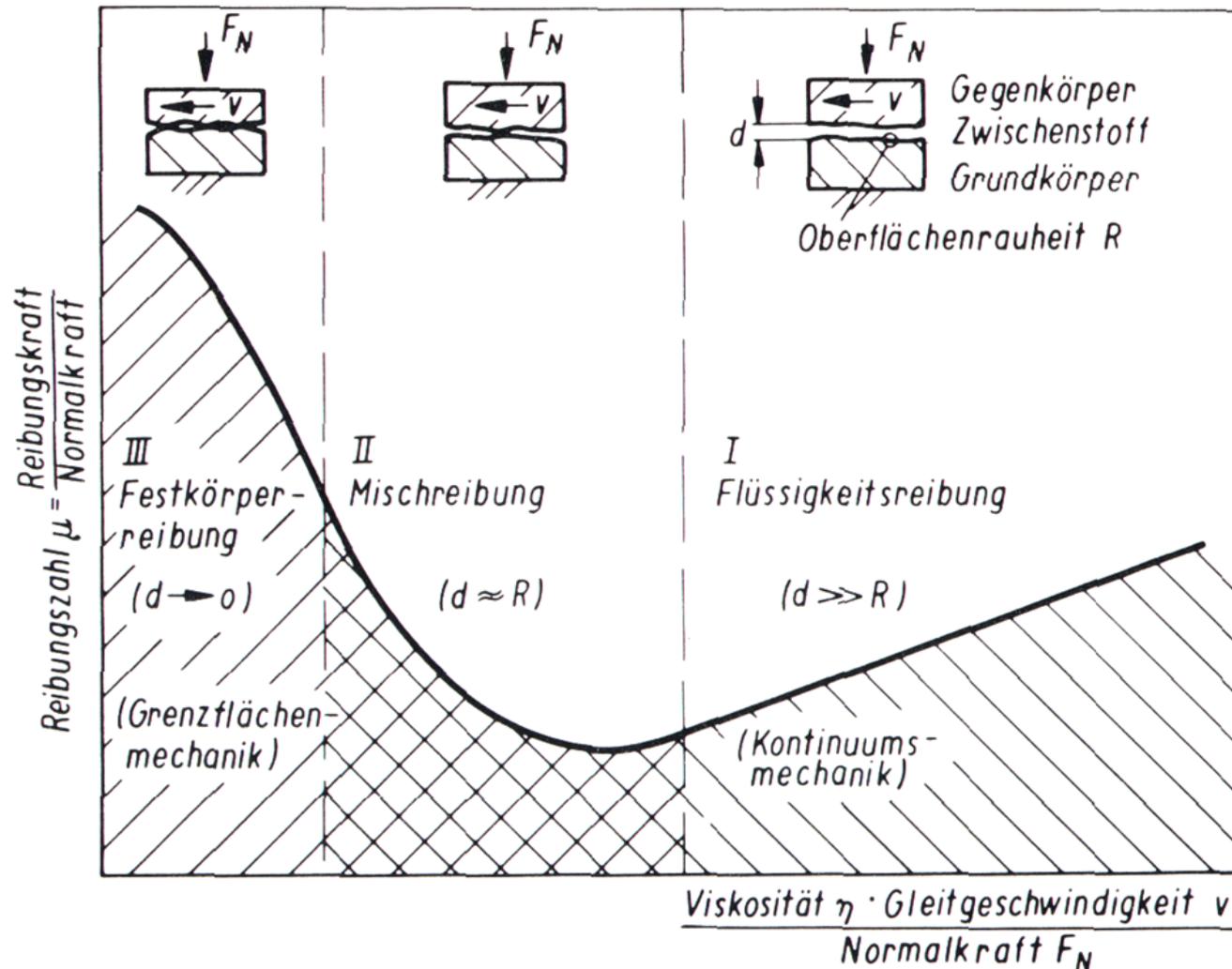
Gleitkontakt unter Flüssigkeitsreibung (Schmierung)



Reibungszahl und Verschleisswiderstandes im Gleitkontakt in Abhängigkeit von der spezifischen Schmierfilmdicke



Schmierung: Auswirkungen des Schmierfilms auf die Reibungszahl



Reibungszahl bei Gleitbewegung

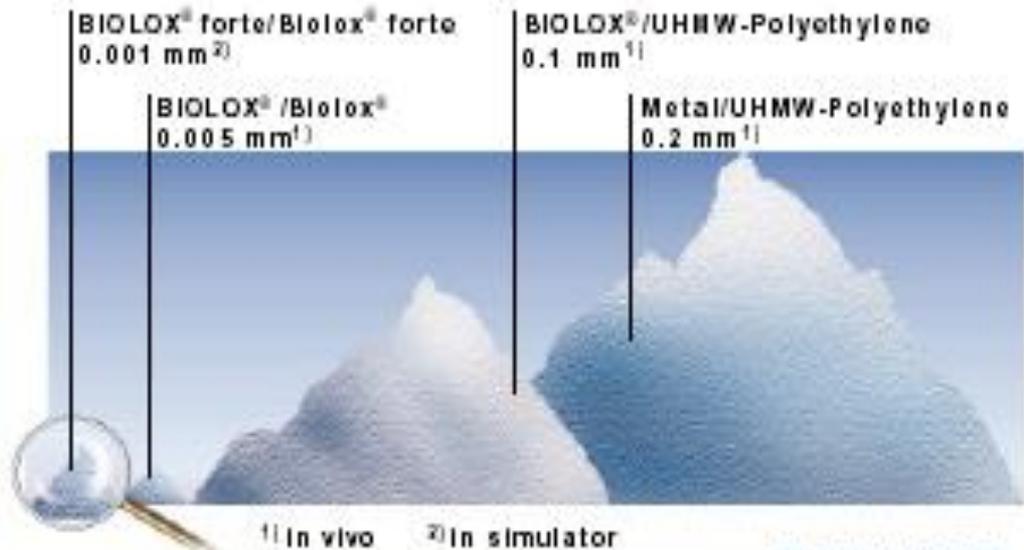
Stahl/Stahl-Kombination	0,80
Mit Standardschmierstoffe	0,2
Mit einer Tribosystem-Schicht im trockenen Zustand	0,01 – 0,05

Werkstoffe: Tribosystem Hüftgelenk und Verschleißbeträge in Abhängigkeit von der Materialpaarung

The BIOLOX[®] forte Concept



Wear of ceramic components



Annual abrasion



4 Tribologische Beanspruchung von Oberflächen

4.1 Einleitung

4.2 Grundlagen

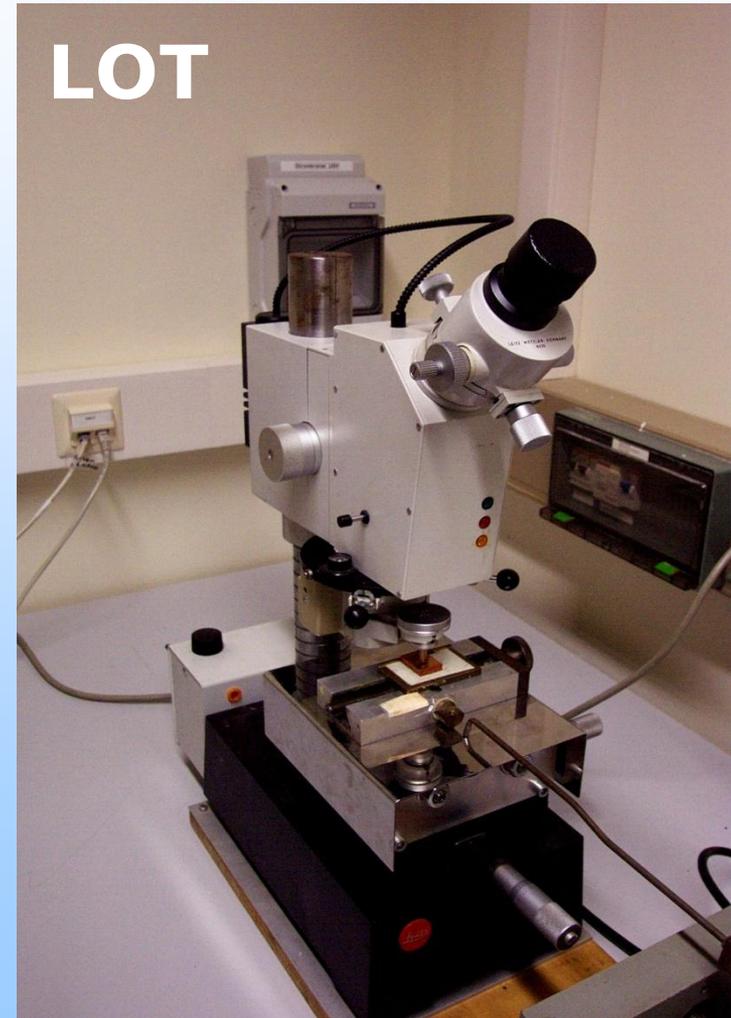
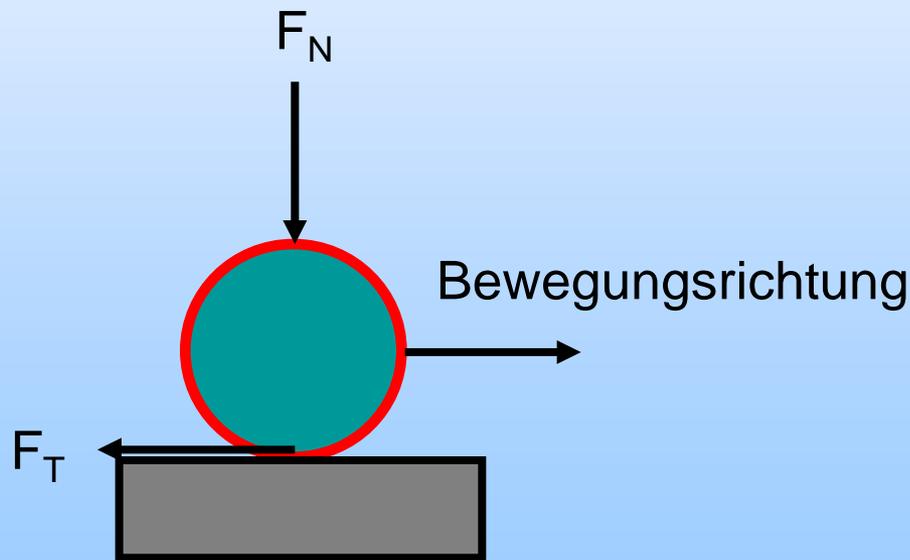
4.3 Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß

4.4 Prüftechnik

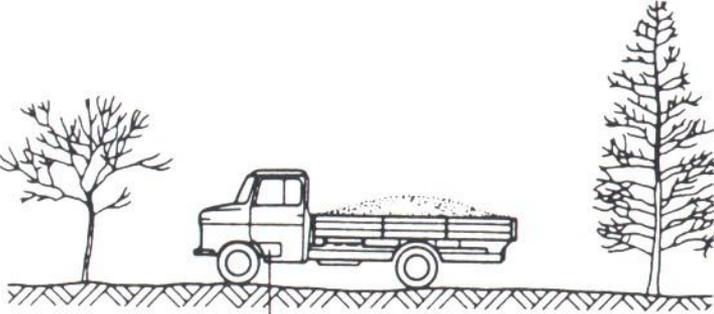
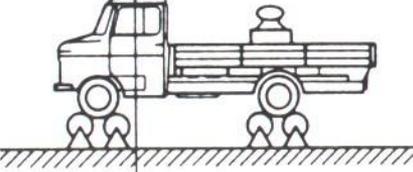
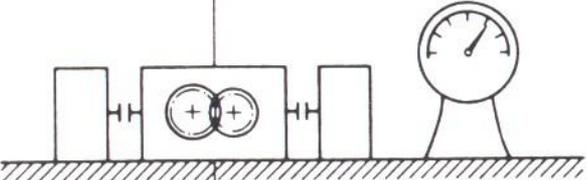
4.5 Verschleißschützende Maßnahmen

Verhältnis der Reibungskraft F_T zur Normalkraft F_N

$$\mu = F_T / F_N$$

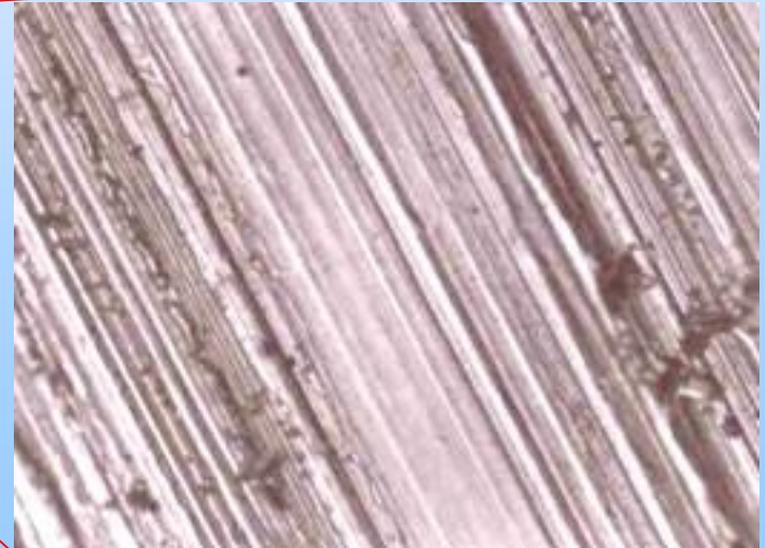
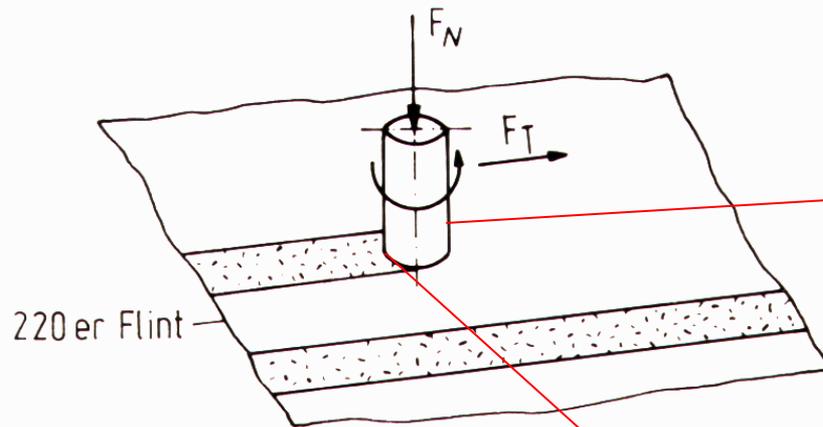


Verschleißprüfungen

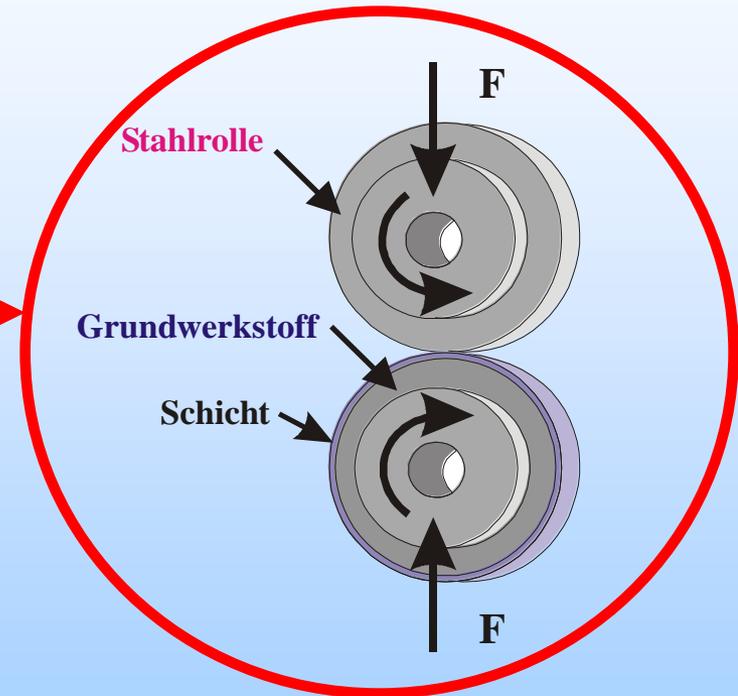
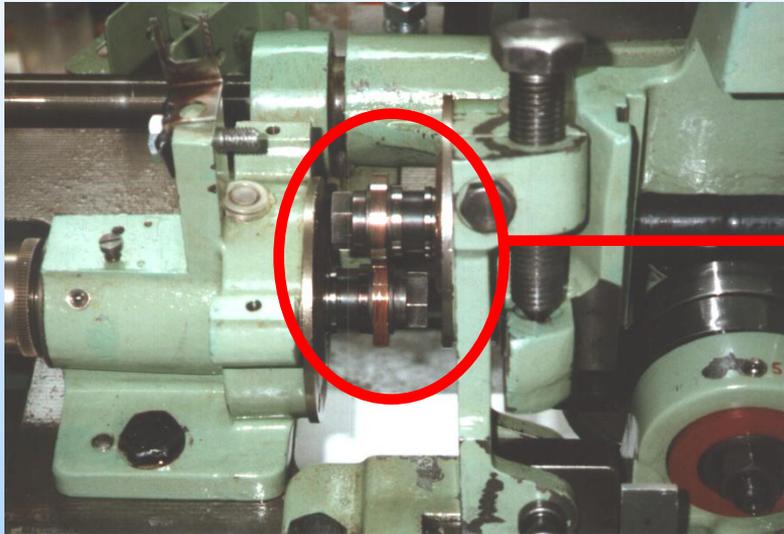
Kategorien	Art des Versuches		Symbol
I	Betriebs- bzw. betriebsähnliche Versuche	Betriebsversuch (Feldversuch)	
II		Prüfstandsversuch	
III	Versuche mit Modellsystem	Prüfstandsversuch mit Aggregat oder Baugruppe	
IV		Versuch mit unverändertem Bauteil oder verkleinertem Aggregat	
V		Beanspruchungsähnlicher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

Schleifpapierverfahren (LOT)

b) Schleifpapierverfahren

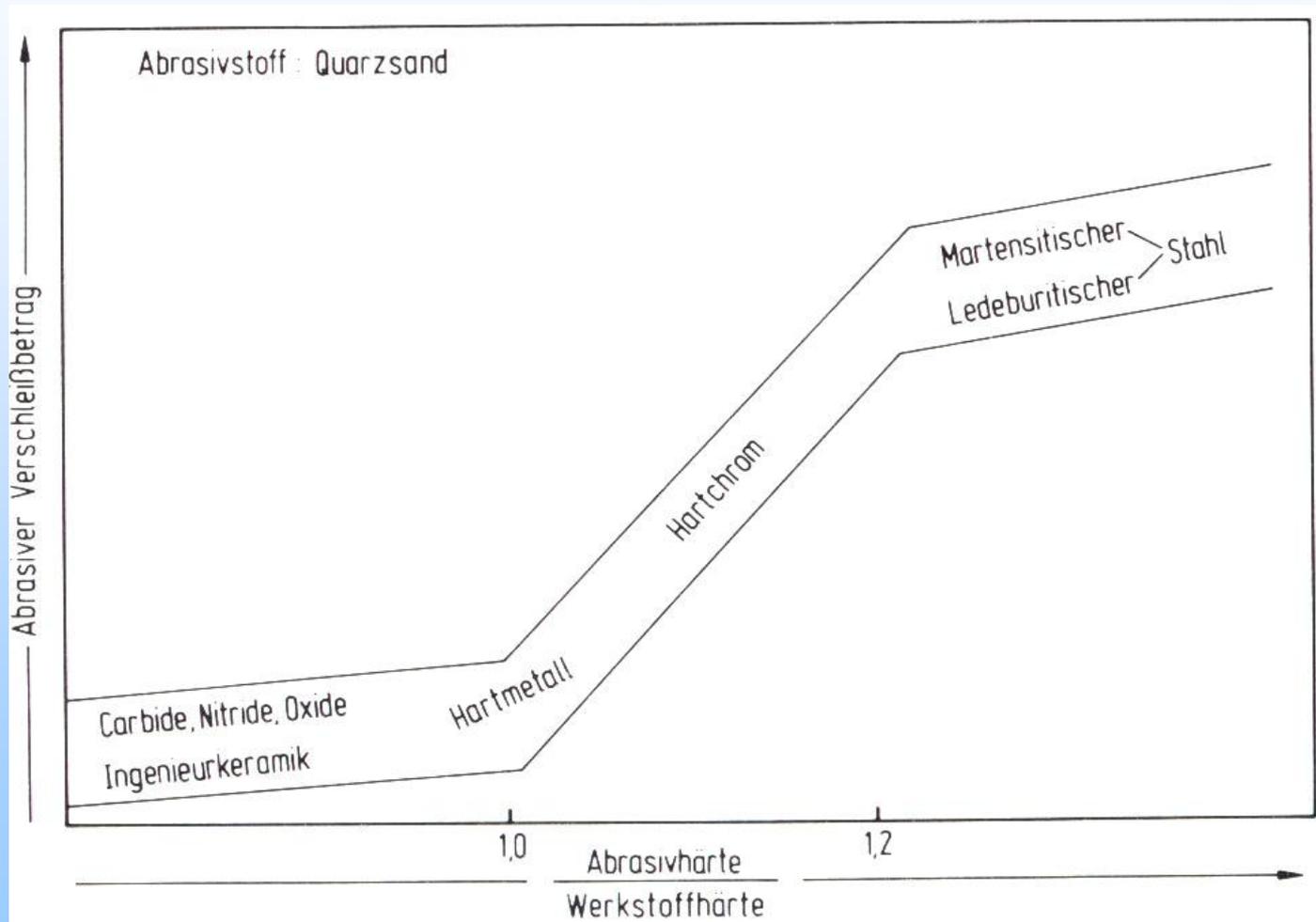


Wälzverschleißuntersuchungen (LOT)



Tribometer zur Modellierung des
Wälzverschleißes

Verschleißbetrag verschiedener keramischer und metallischer Werkstoffe



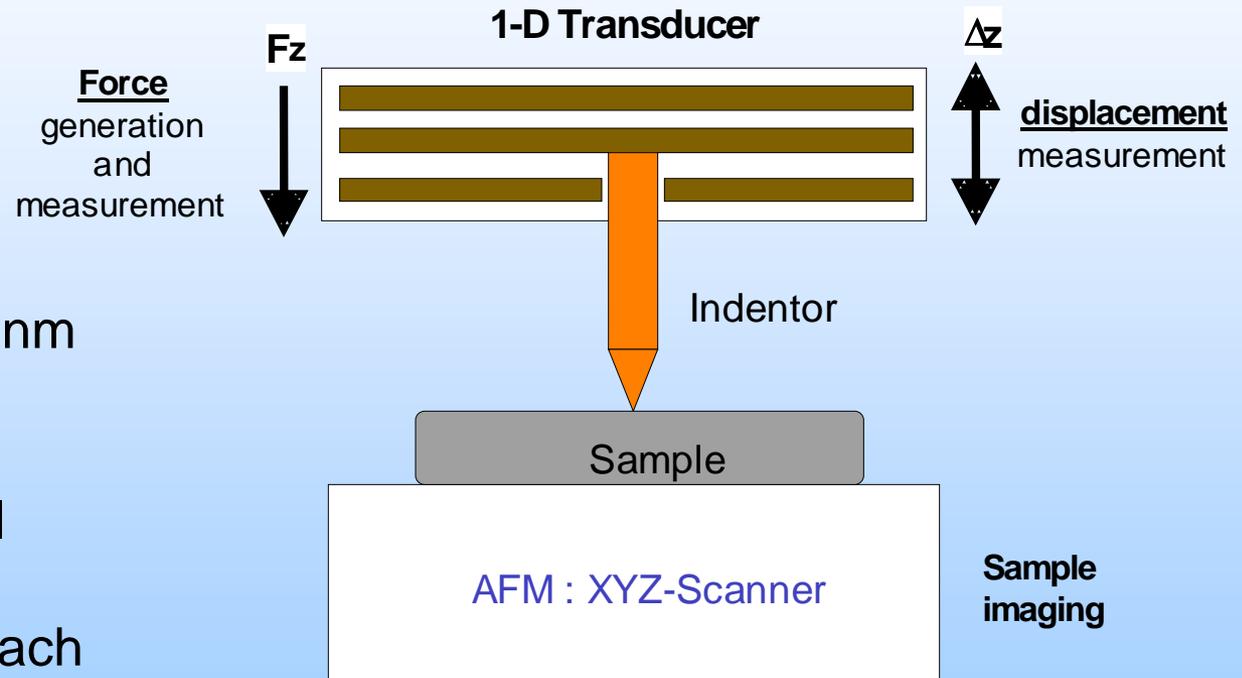
Kombination AFM & Nanoindentierung (Hysitron)

Lastbereich:
1 μ N - 25mN

Auflösung:
 $\Delta F \sim 100$ nN, $\Delta z \sim 0,2$ 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°)

Vorgaben:

Last = 0.2 - 5mN

25 Reibzyklen

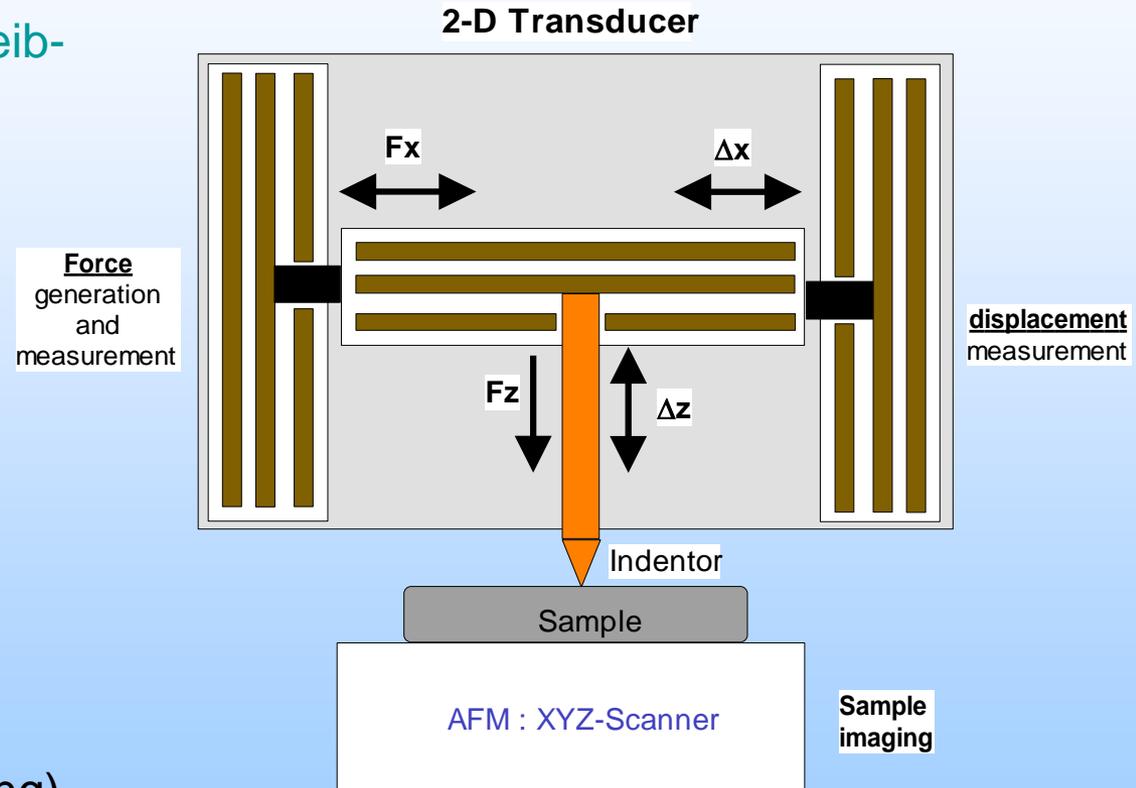
Weg $4\mu\text{m}$, Speed = $4\mu\text{/s}$

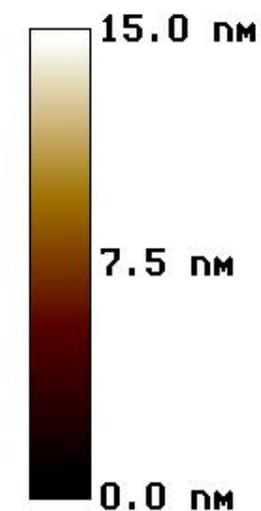
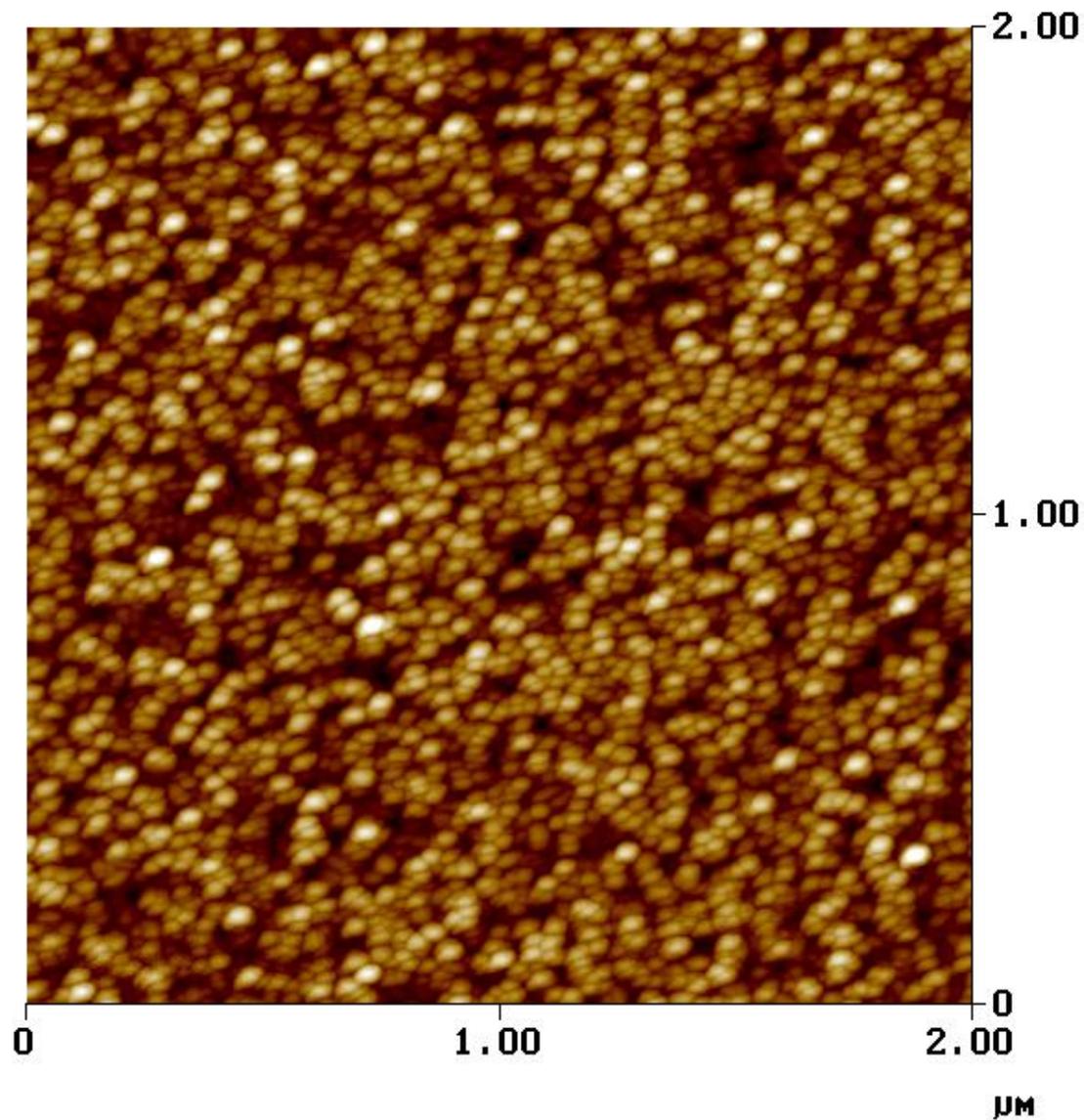
Meßgrößen:

Reibungskraft $F_x(t)$

Eindringtiefe $z(t)$ unter Last

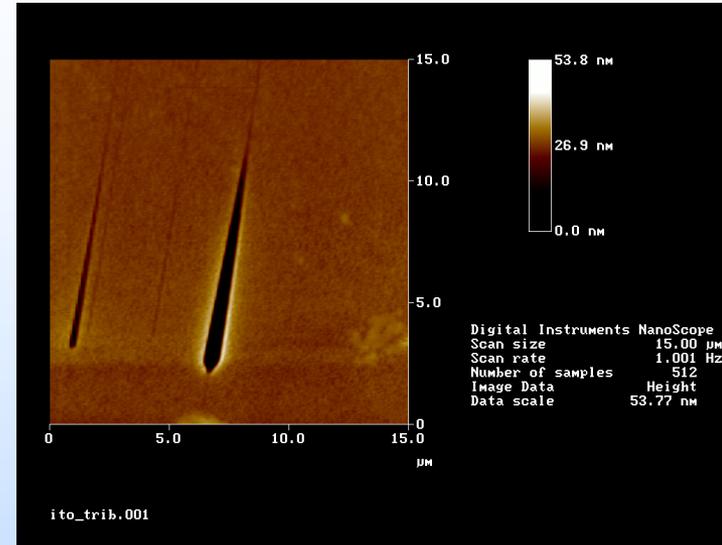
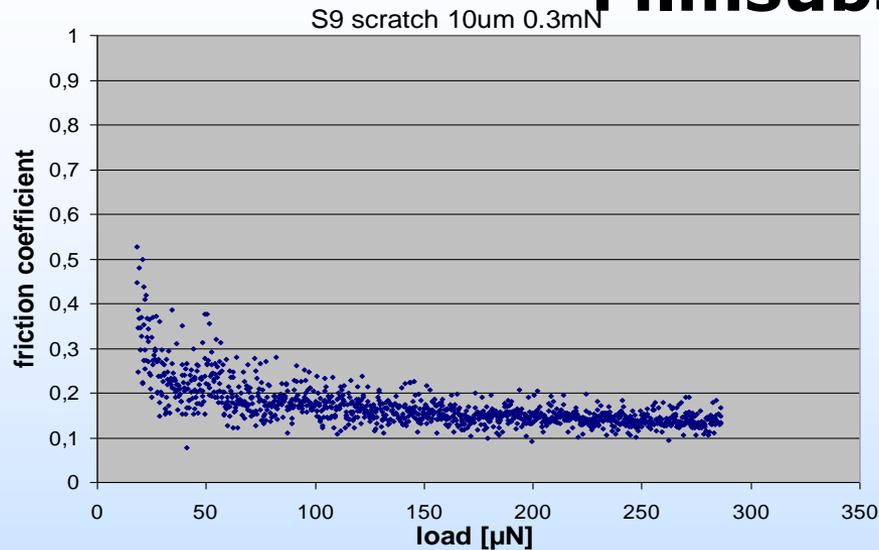
Tiefe der Spur (nach Entlastung)



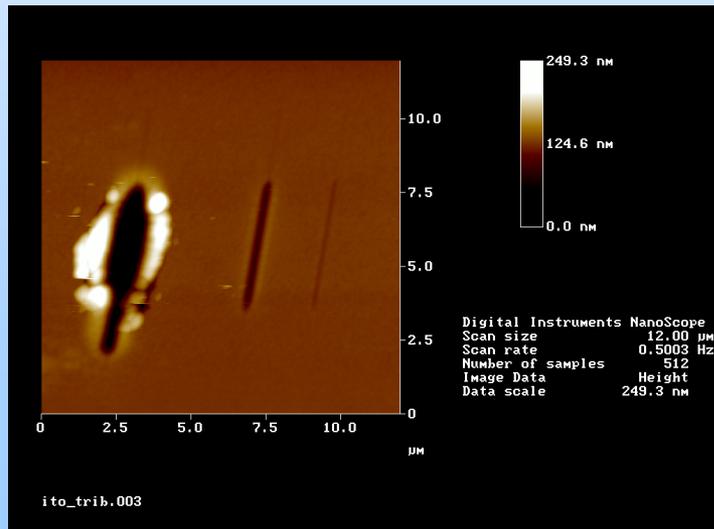


Digital Instruments NanoScope
Scan size 2.000 μm
Scan rate 1.001 Hz
Number of samples 512
Image Data Height
Data scale 15.00 nm

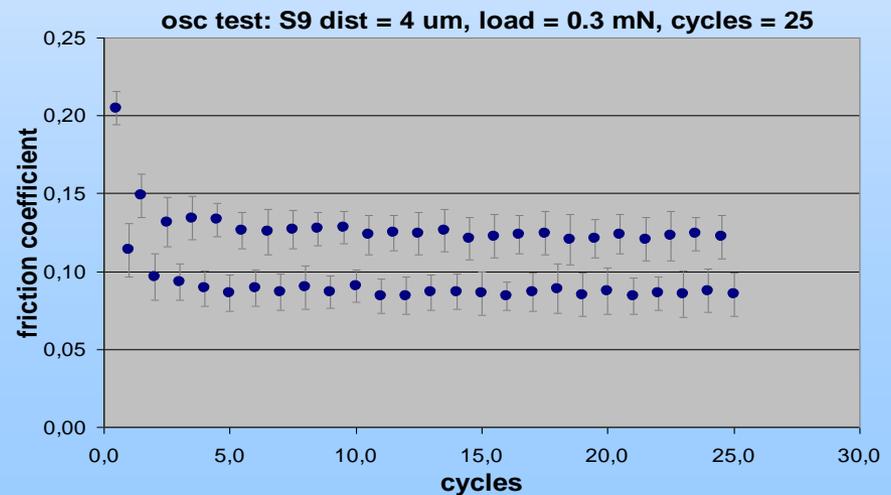
Eigenschaften einer ITO-Schichten auf Glas-Filmsubstrate



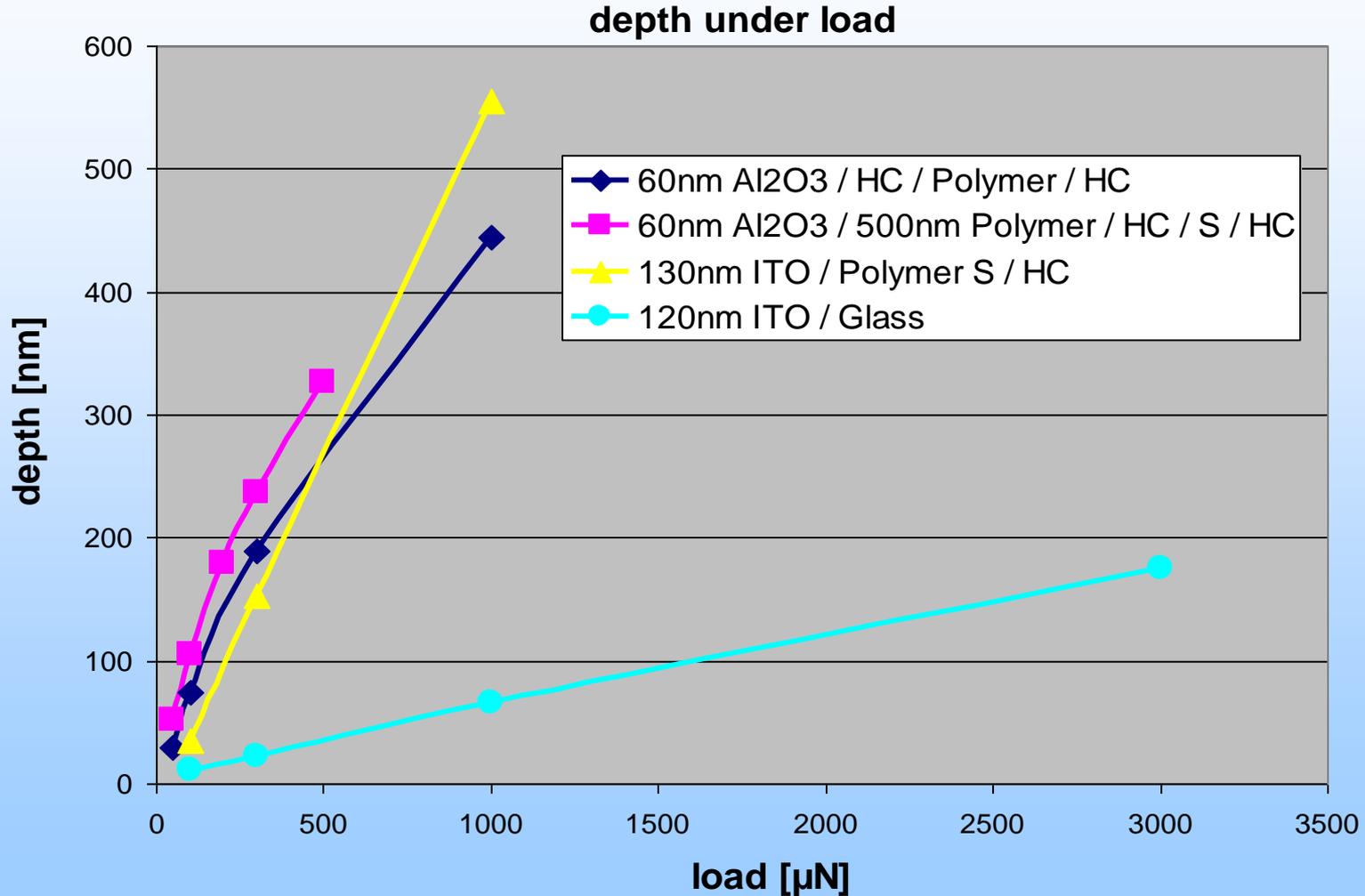
Load=1.0mN, 0.3mN, 3.0mN



Load=3.0mN, 1.0mN, 0.3mN



The Scratch Test Results of Al₂O₃ and ITO on Different Substrates

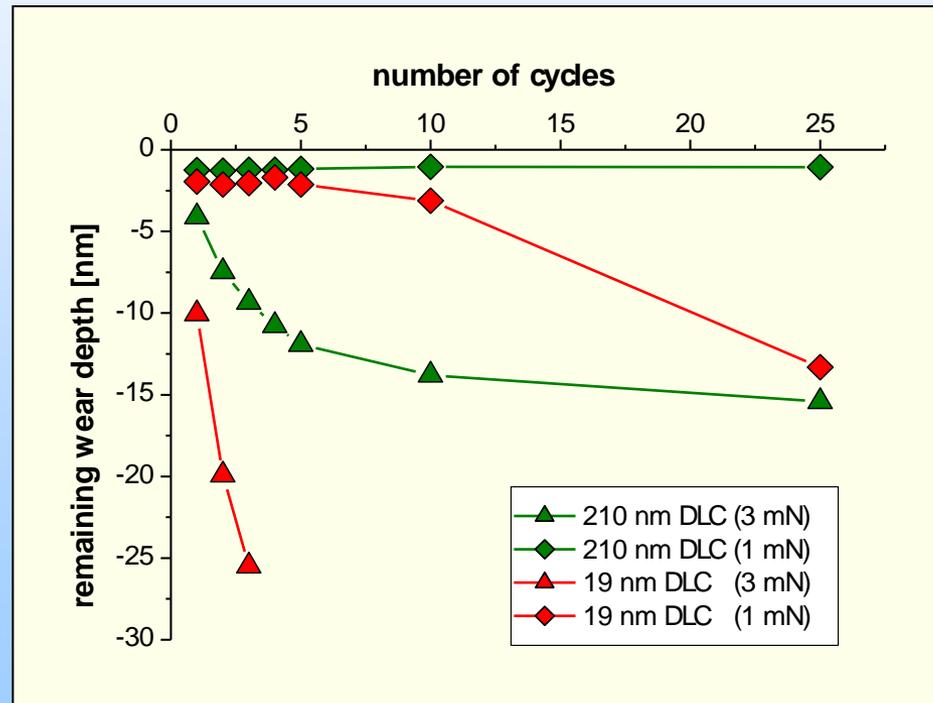


Oszillationsteste (Einfluss der Filmdicke)

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

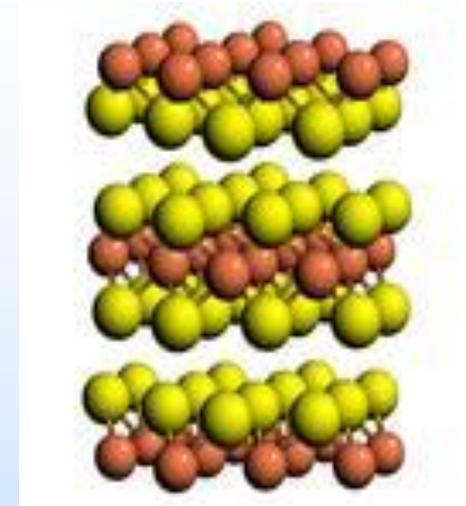
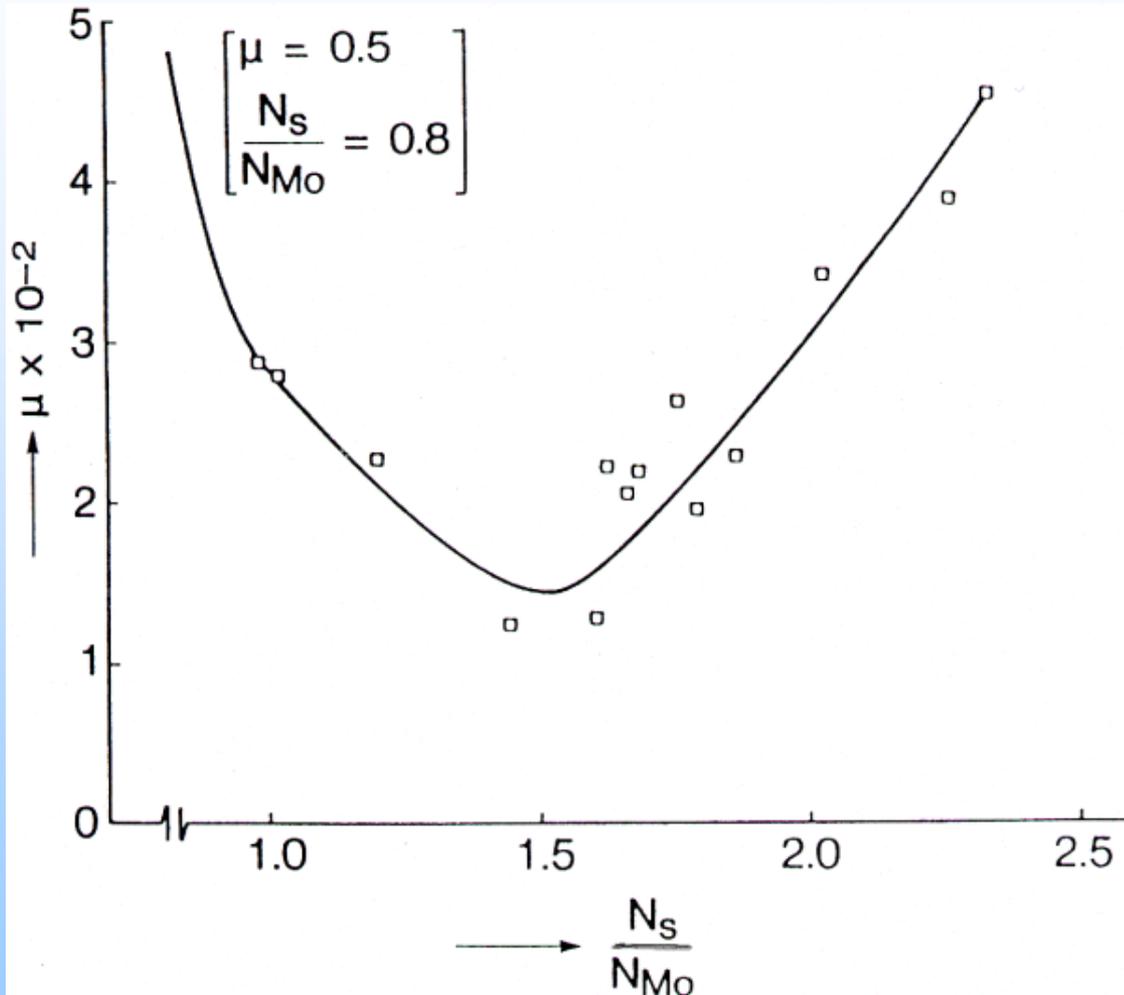
Deposition

- **PVD / Sputtern**, Ionenplattieren
- **PACVD** / RF, MF, Pulsplasma (up to 1 m³)
- **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** (Al₂O₃, ZrO₂), DLC, TiN
- Nitrieren, Bonieren, Karburisieren
- **Nanokomposite**, Metalle

Gleitreibungskoeffizient



Gleitreibungskoeffizient von MoS_x -Filmen in Abhängigkeit von der Zusammensetzung.

Trockenschmierfilme

Werkzeuge für Trockenverarbeitung

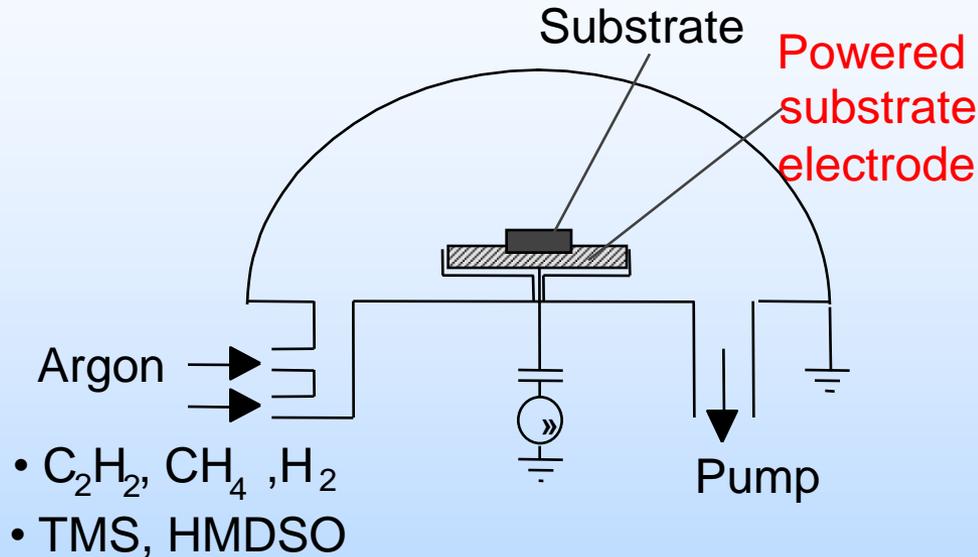


New dry lubricant coating	Operation	Work piece material
WS_2/Ti	Drilling	AlSi9Cu3
$MoSe_2/Ti$	Thread forming	Steel Ck35 and ST 2
$MoSe_2/Ti$	Drilling	Steel X90CrMoV18
B-C-N	Milling	AlSi9Cu3
B-C-N	Thread forming	Steel Ck 35
Ti-B-N	Punching	Iron

Deposition und Eigenschaften von DLC-Filmen

Process	RF PACVD 13.56 MHz	MF PACVD 50 kHz		MF PACVD 75 kHz
Hydrocarbon gas	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂	CH ₄	CH ₄
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 ⁻¹⁵ m ³ / Nm	0.9	0.8	1	0.9
Friction coefficient (against steel)	0.2	0.2	0.2	0.2
Roughness R _{RMS} / Å	≈ 20	1	1	5
Roughness R _Z / Å	170 - 180	10	6	40

Deposition von DLC- und modifizierten DLC-Schichten

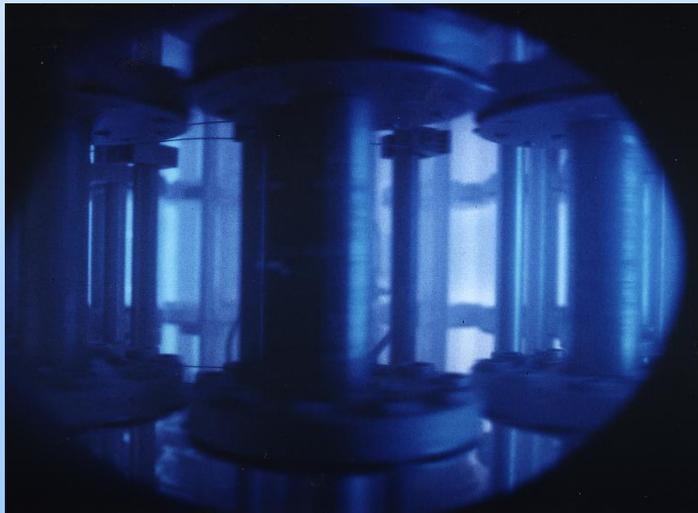
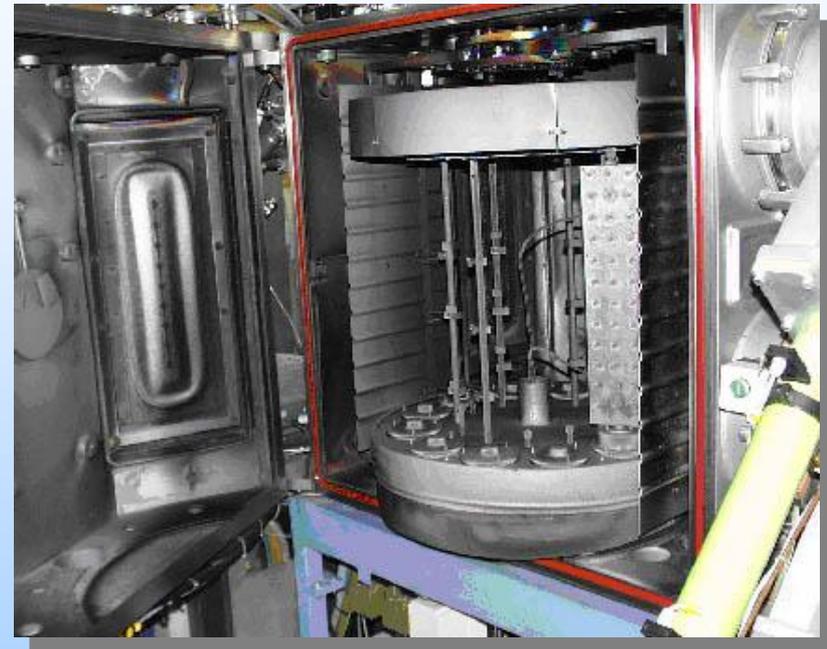
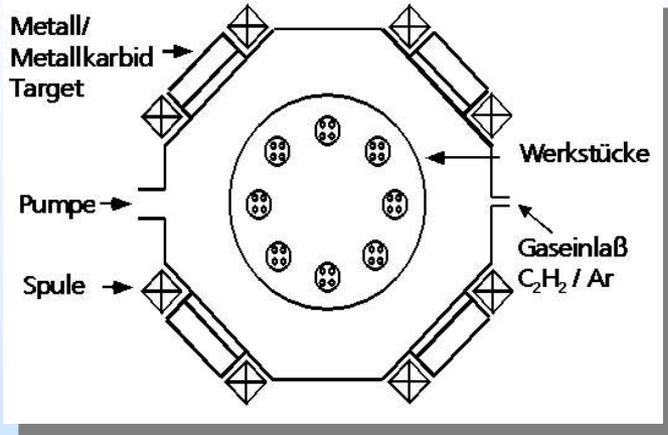


- **Substrateelectrode**
 - RF (13.56 MHz) (+ blocking capacitor)
 - MF harmonic (30 - 100 kHz)
 - DC puls (100 – 300 kHz)
- Power density $0.1 \dots 0.5 \text{ W cm}^{-2}$
- Process pressure: 1 to 100 Pa
- Deposition rate: $1 \dots 2 \mu\text{m h}^{-1}$
- High stress (\sim GPa) \rightarrow adhesion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

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

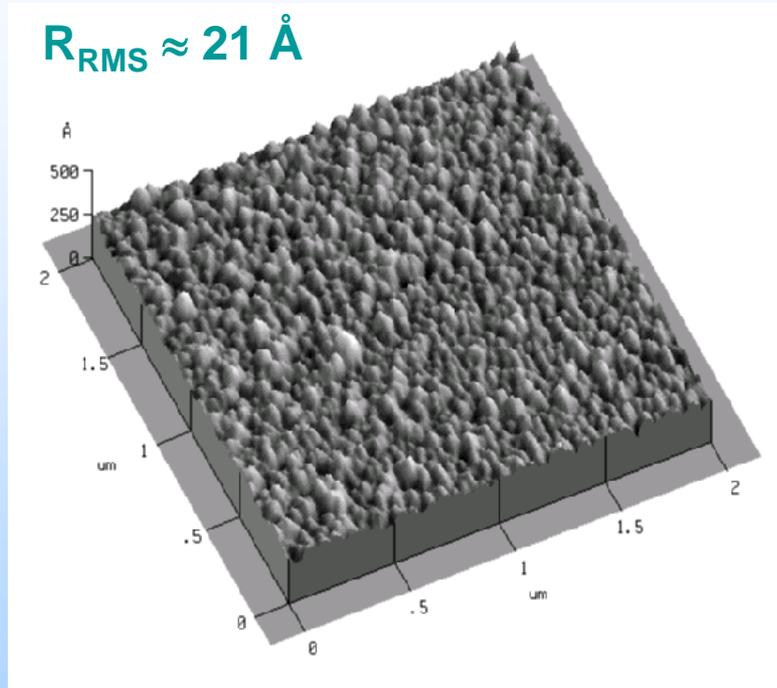
Medium frequency (MF) technique

Prinzipieller Aufbau der HTC 1000 Magnetron-Sputteranlage

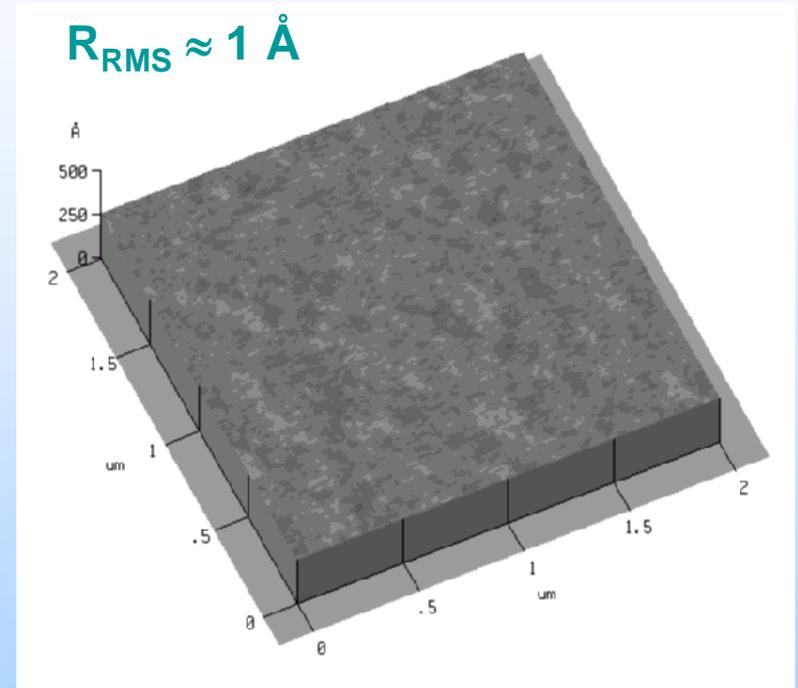


Durch Variation des C_2H_2 -Gehaltes ist eine gradierte Schichtherstellung möglich

DLC-Filme mit extrem niedrigen Rauheiten

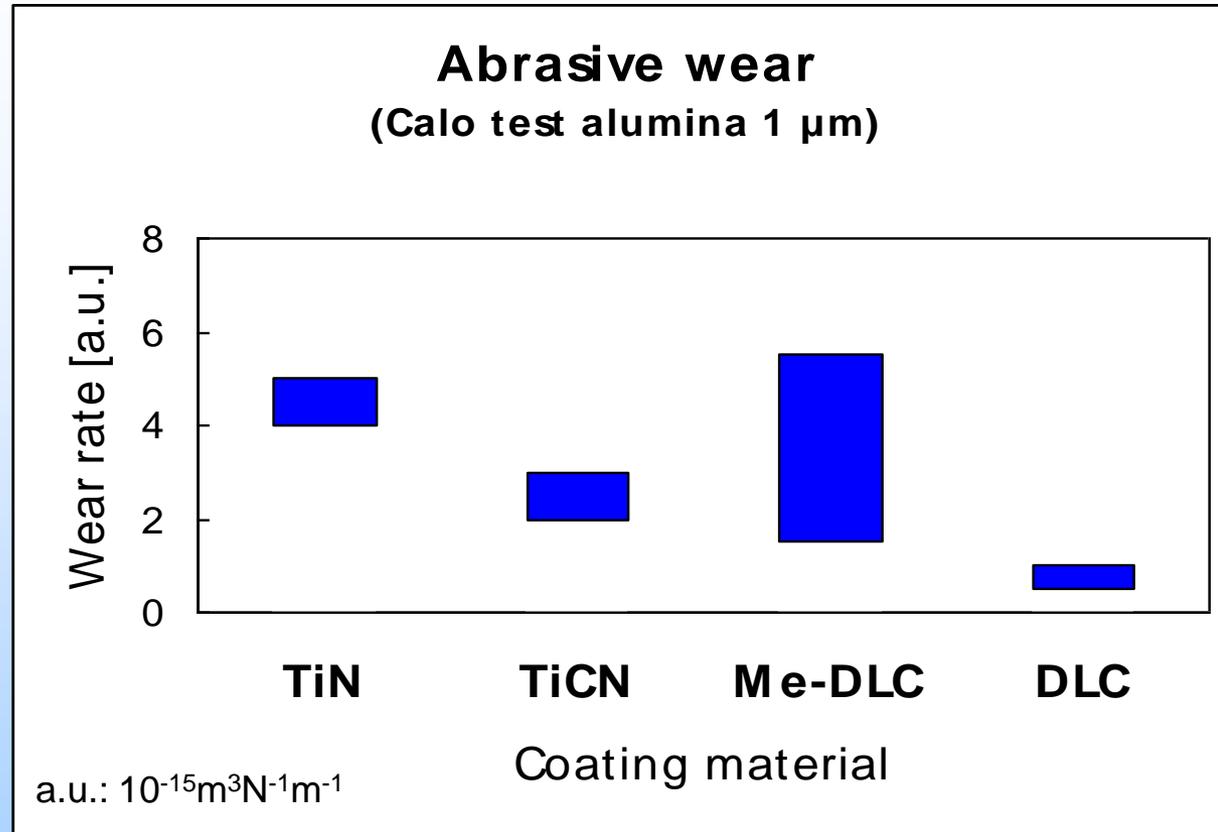


RF-DLC (13.56 MHz)
 $p = 1.5 \text{ Pa} / \text{C}_2\text{H}_2$



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

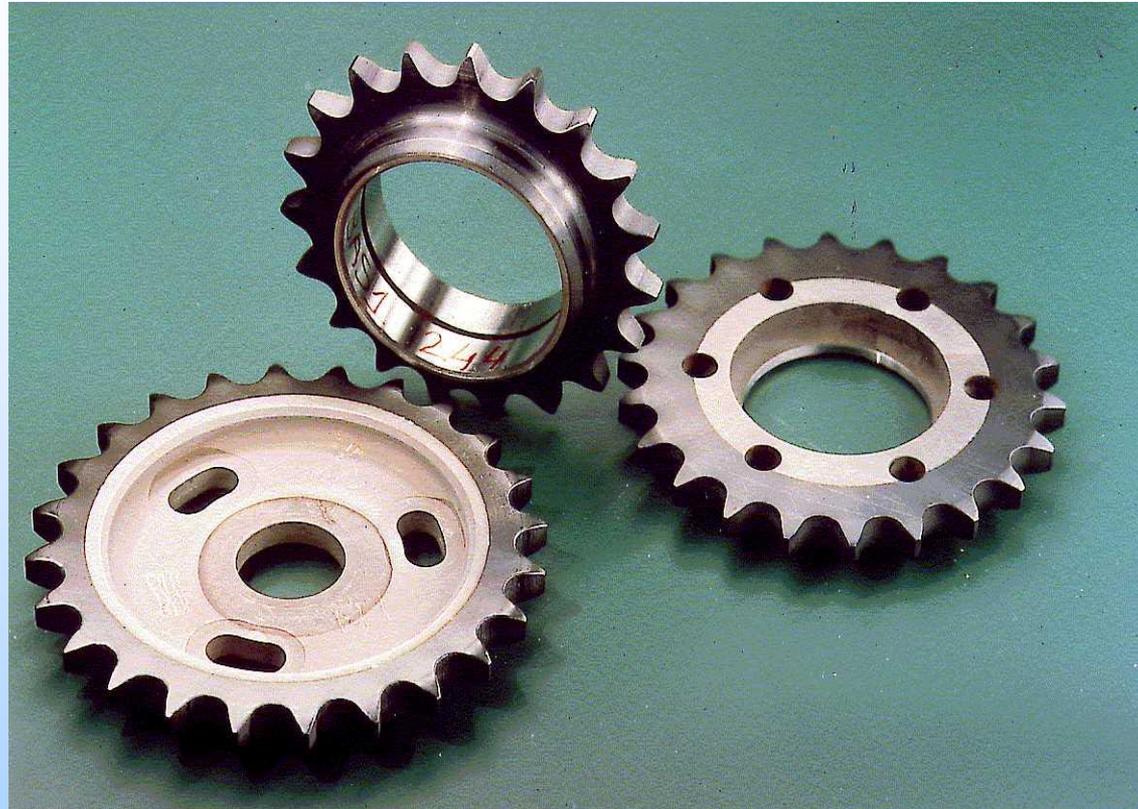
Vergleich der DLC mit Hartstoffschichten



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



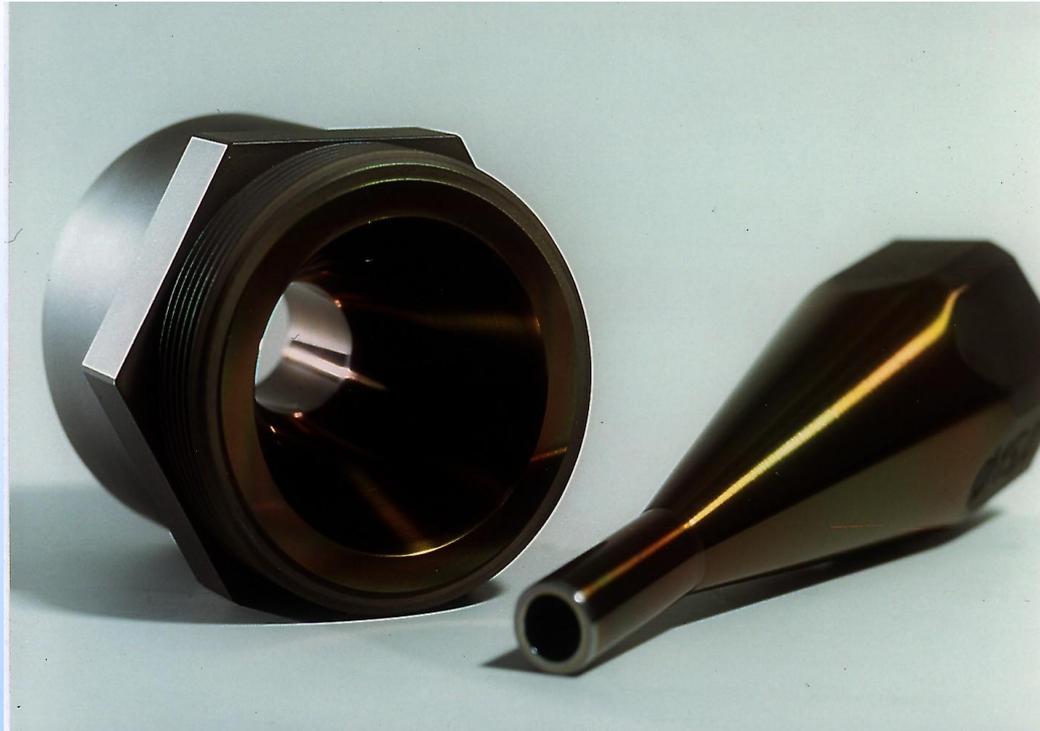
Niedrige Reibung → reduziertes Verschleiß → erhöhte Lebensdauer

DLC-beschichtete Umformwerkzeuge

Tiefziehwerkzeuge



Extrusionswerkzeuge beschichtet mit a-C:H:X



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

Anwendungen von Kohlenstoffschichten

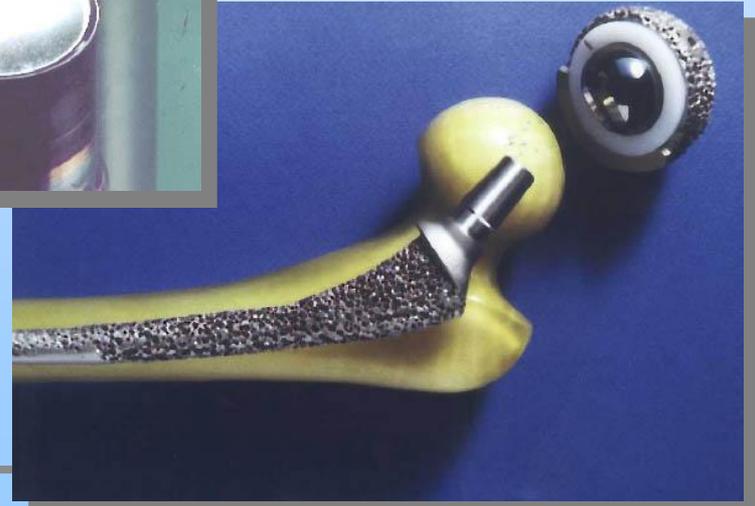


Antriebselemente - Kurbelwelle für
Verbrennungsmotoren:
-Reibungs- und Verschleißreduzierung
→ höhere Beschleunigung

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-

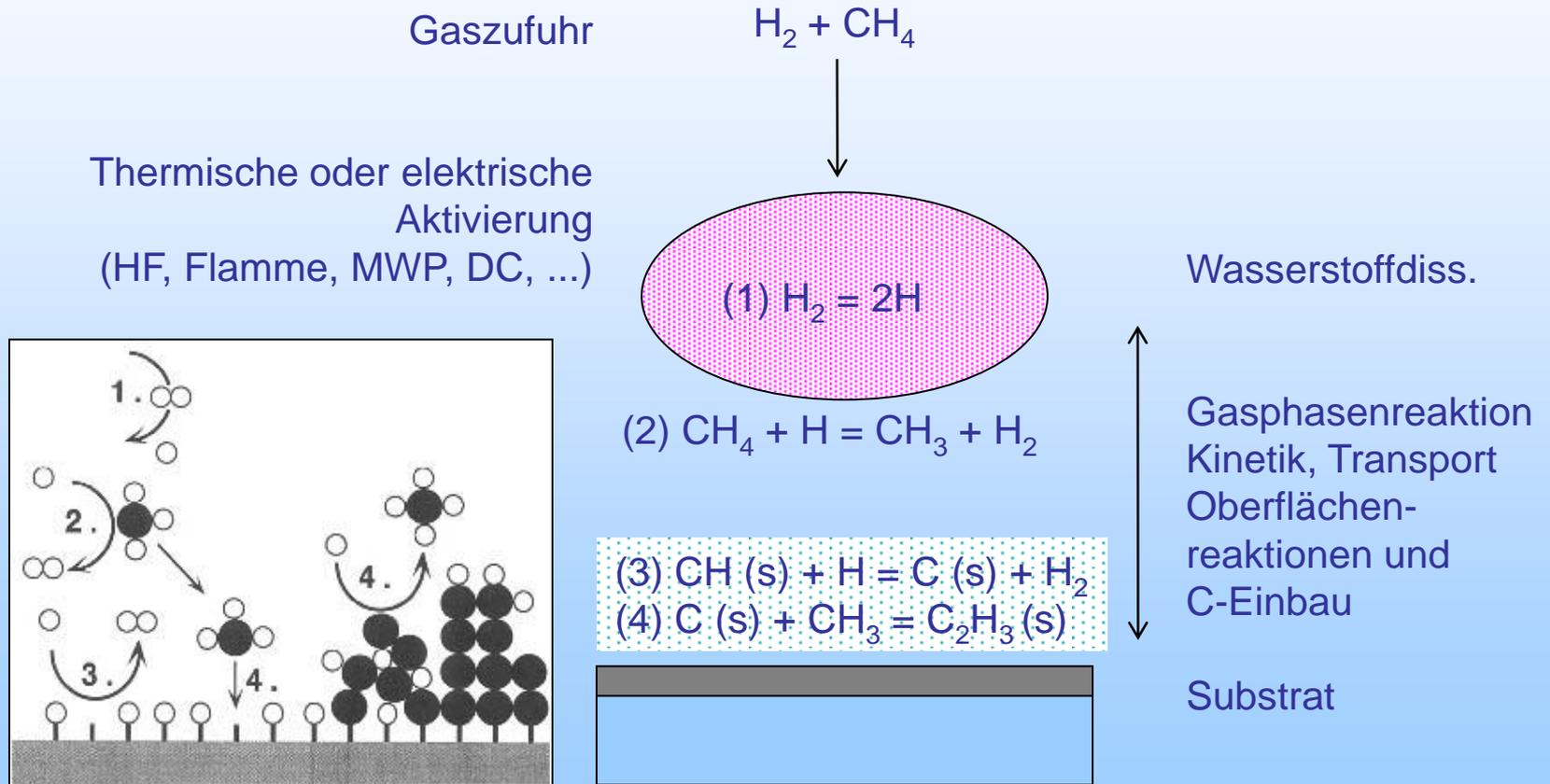


Intrinsische Eigenschaften von Diamant und Anwendungen

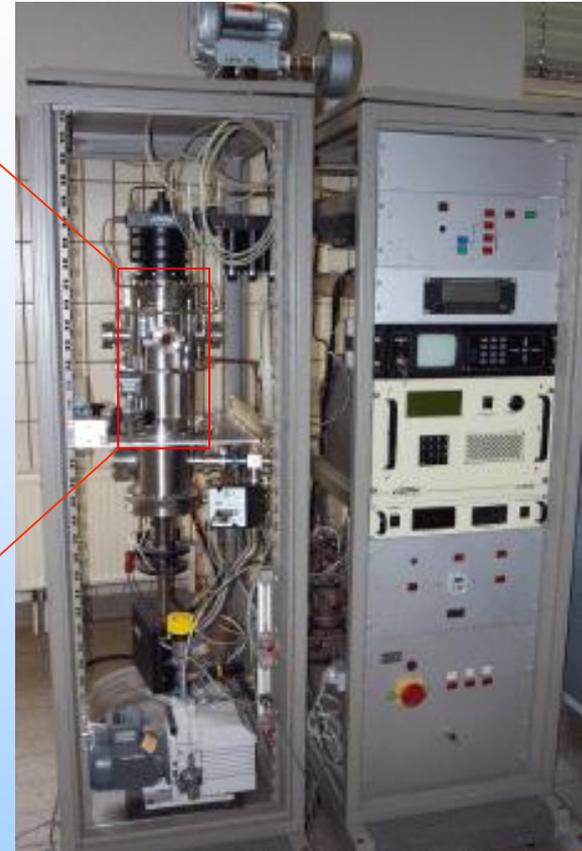
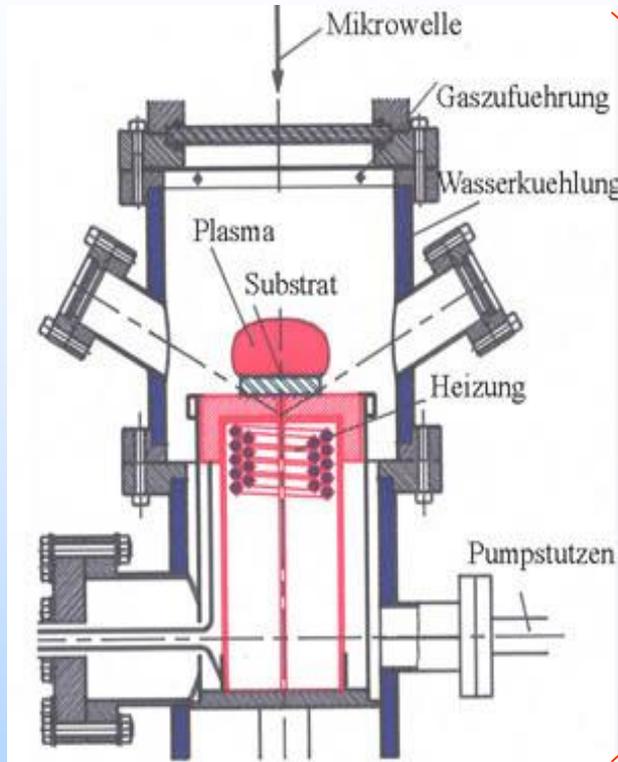
Härte (Hv)	ca. 100 GPa	Werkzeug- und Bauteilbeschichtung
Chemische Resistenz	Gegen allen Chemikalien	Elektrode für die chemische Industrie
Thermische Leitfähigkeit I	20 W/cmK	Isolierende Wärmesenke für Laserdiode
Durchbruchfeldstärke E_s	10^7 V/cm	
Transparenz	UV-, VIS u. IR	Optische Fenster für UV-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

CVD-Diamantabscheidung

(M. Frenklach et al., 1991)



Mikrowellen-Plasma-CVD



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

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

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

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

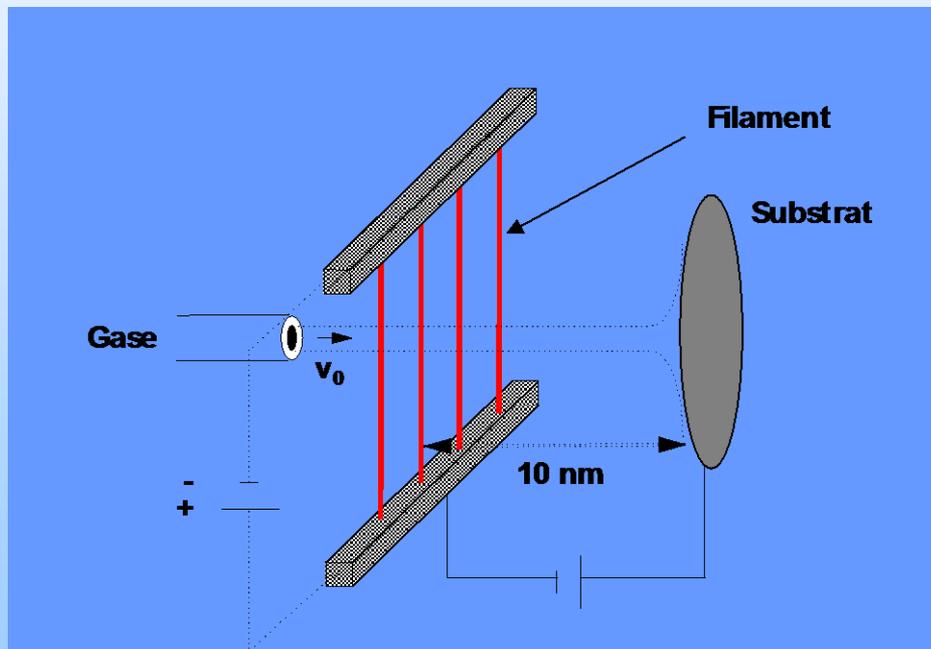
Hot-Filament-CVD

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

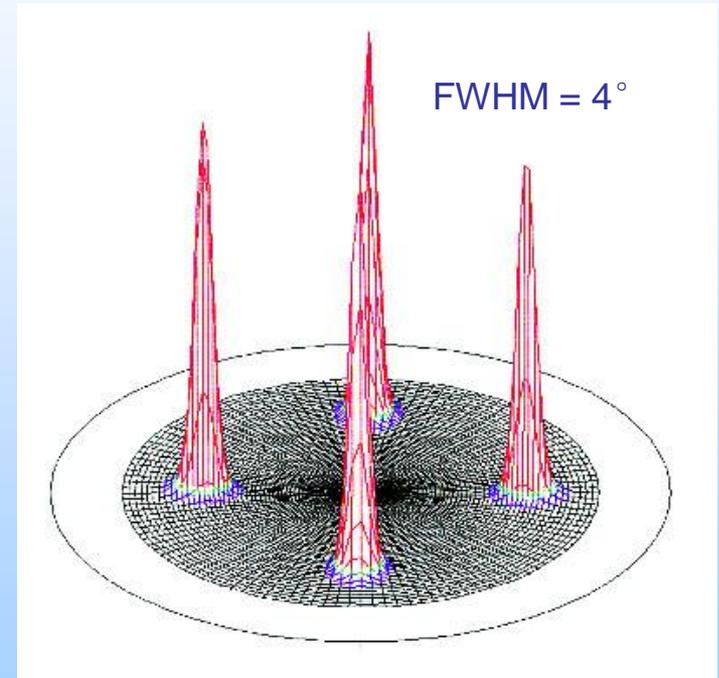
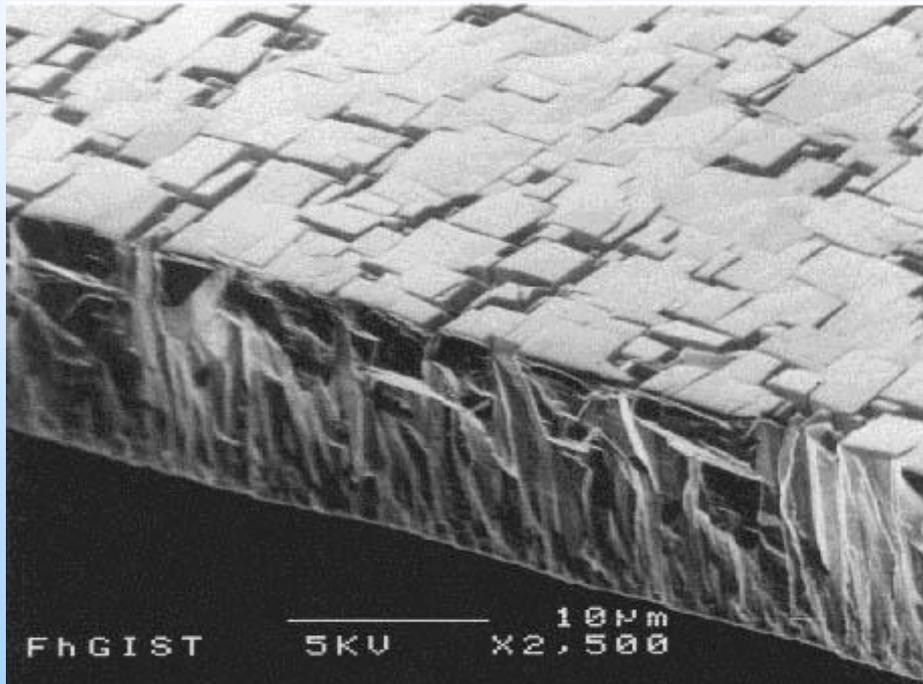
$$T_S = 500 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$$

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

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



Heteroepitaktische Diamantschichten auf Si(001)



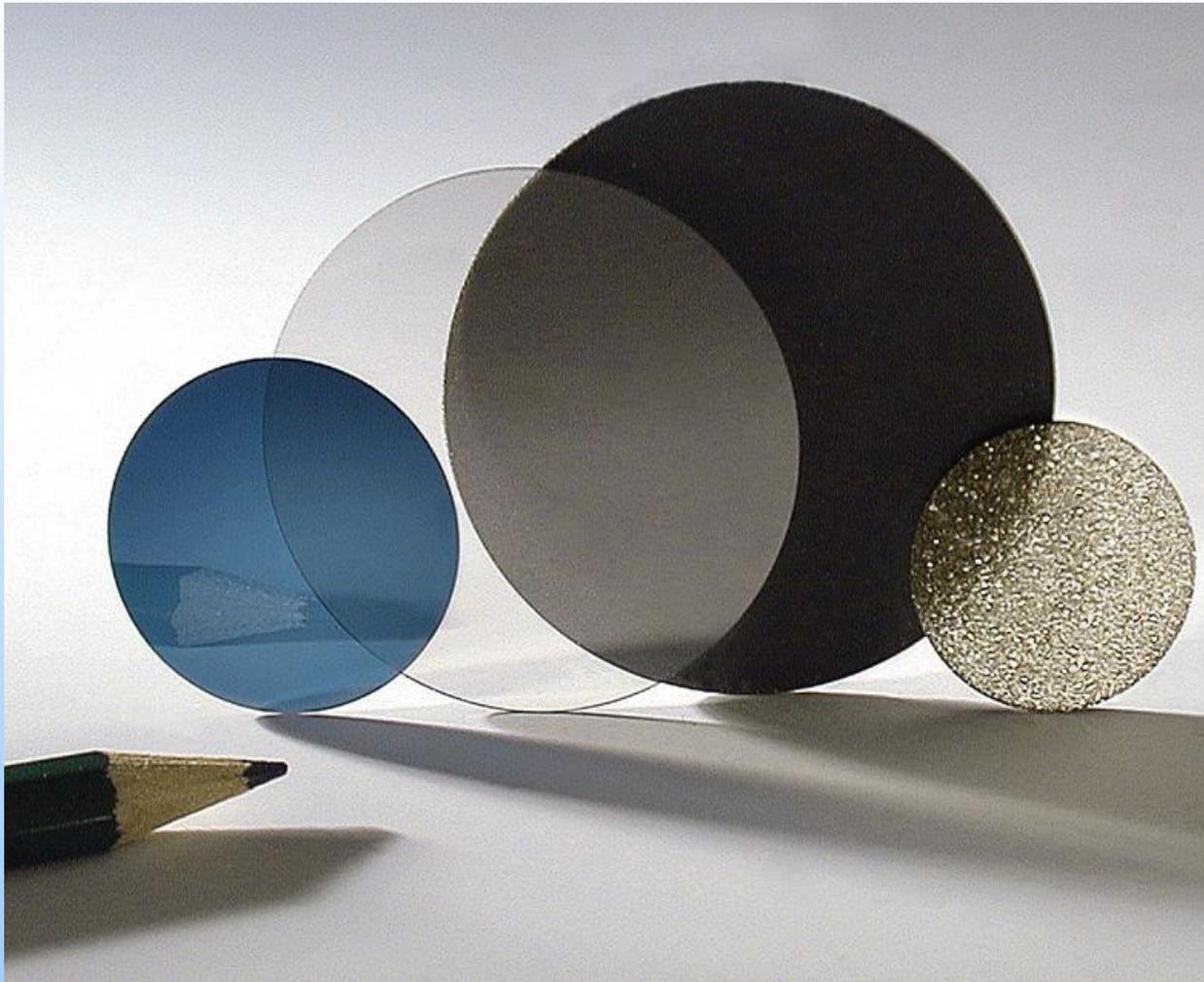
{111}-Röntgen-Polfigur

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

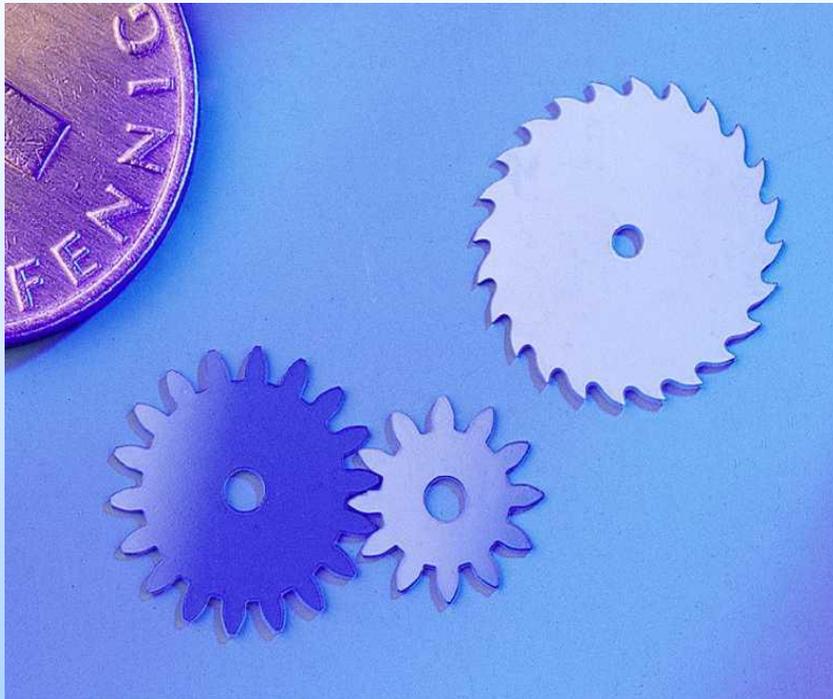
$[110]_{\text{Diamant}} // [110]_{\text{Si}}$

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

CVD-Diamant-Wafers

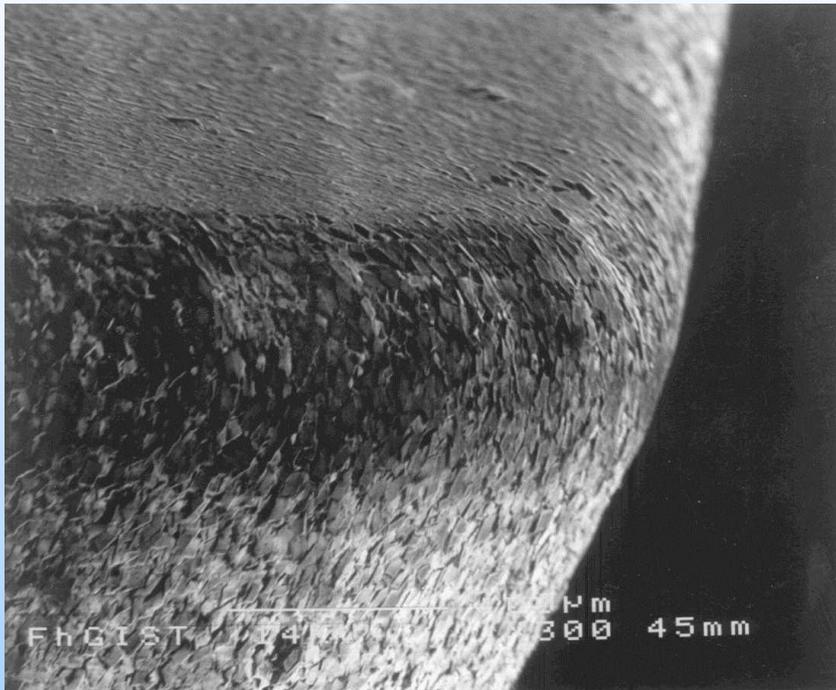


Bauteilen für die Mikromechanik

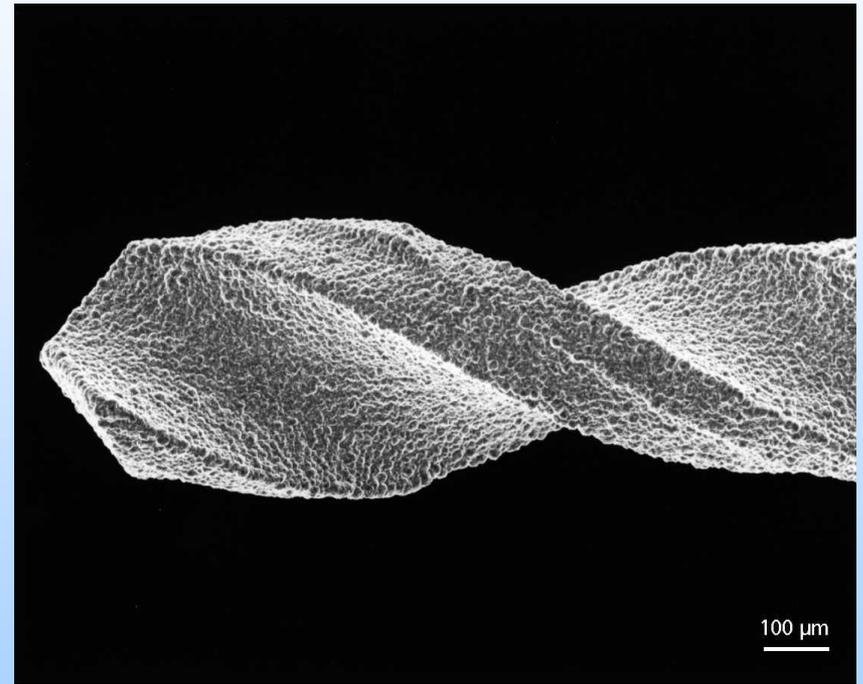


Rechnergesteuertes Laserschneiden (Nd:YAG)

Beschichtung von Schneidwerkzeugen

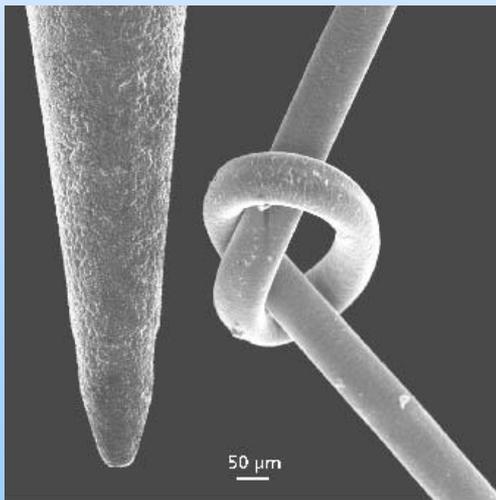
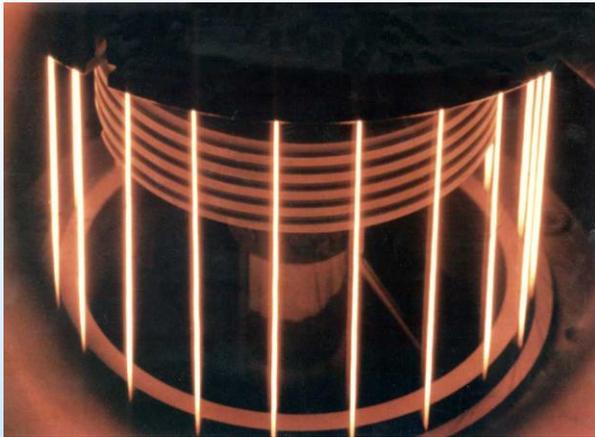


Ecke einer Wendschneidplatte
mit (100)-Diamantschicht

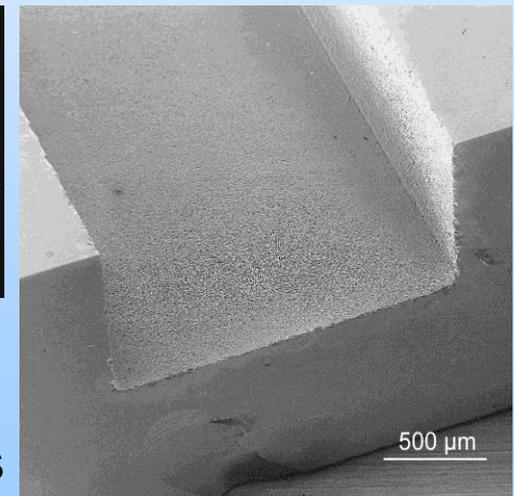
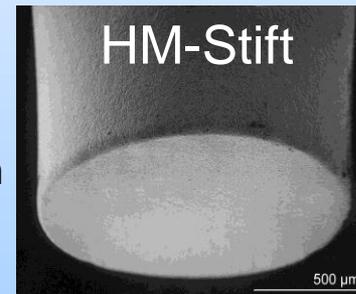
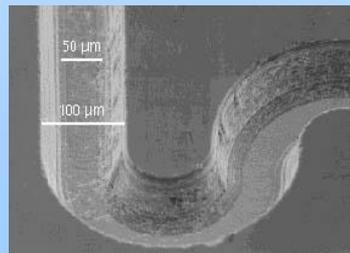


Mikrobohrer $D = 0,15$ mm
zum Bearbeiten von Leiterplatten

Beschichtung von abrasiven Schleifwerkzeugen



geschliffene Nut in Silizium



Glas

kleinster Schleifstift der Welt, D = 50 μm