

5. Vorlesung

Tribologisches Verhalten

Inhalt der Vorlesung

- **Grundlagen Tribologie**
- **Schmierung**
- **Werkstoffe**
- **Werkzeugverschleiß**
- **Verschleiß an Lagern und Führungen**
- **Maßnahmen zur Verbesserung des tribologischen Verhaltens**

Störeinflüsse auf das Übertragungsverhalten von Fertigungssystemen

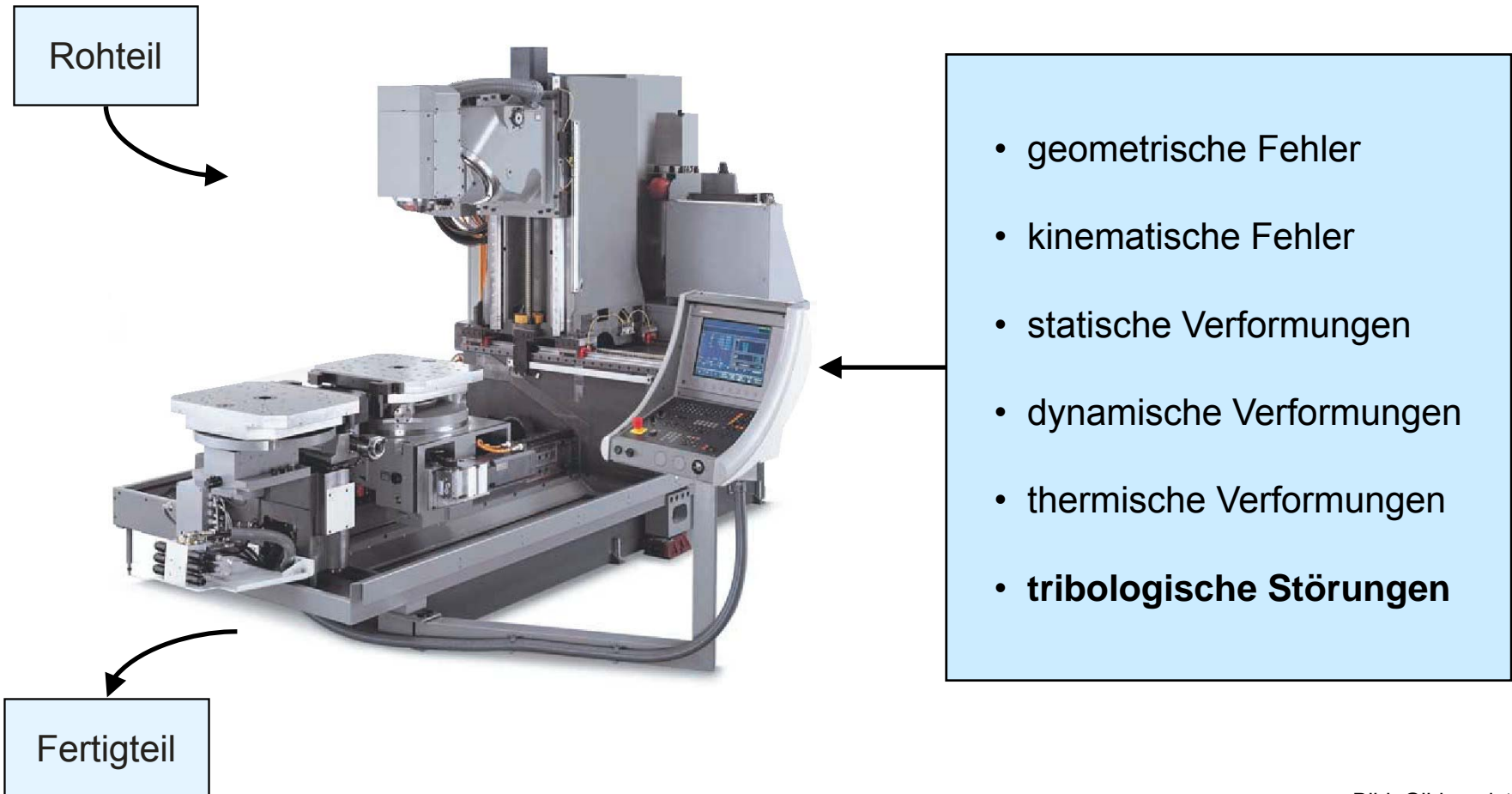
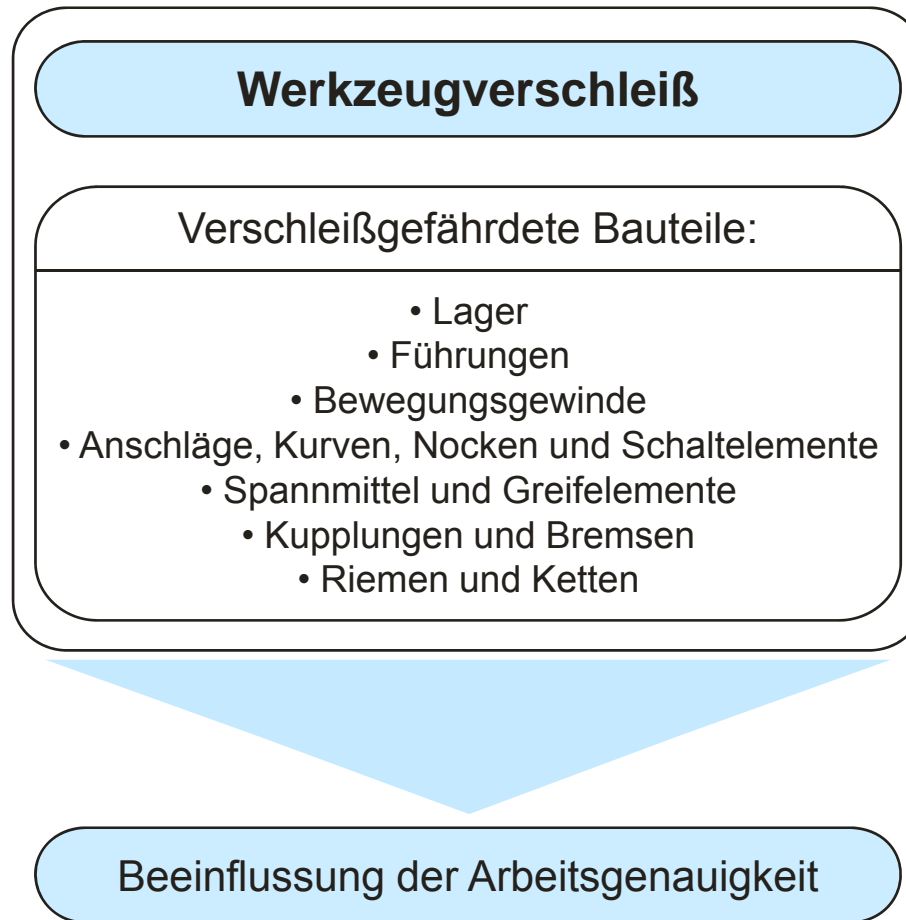


Bild: Gildemeister AG

Verschleiß an Werkzeugmaschinen



Tribologie

Definition:

Tribologie (griech. Reibungslehre) 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.

Merkmale:

Reibung ist als irreversibler Vorgang zu verstehen. Dabei führt die Erzeugung von reibungsinduzierten Wärmeschwingungen zur Zerstörung der geordneten Form von Festkörpern (Entstehung von Verschleißpartikeln). Reibung und Verschleiß sind komplexe Vorgänge von stochastischer Natur.

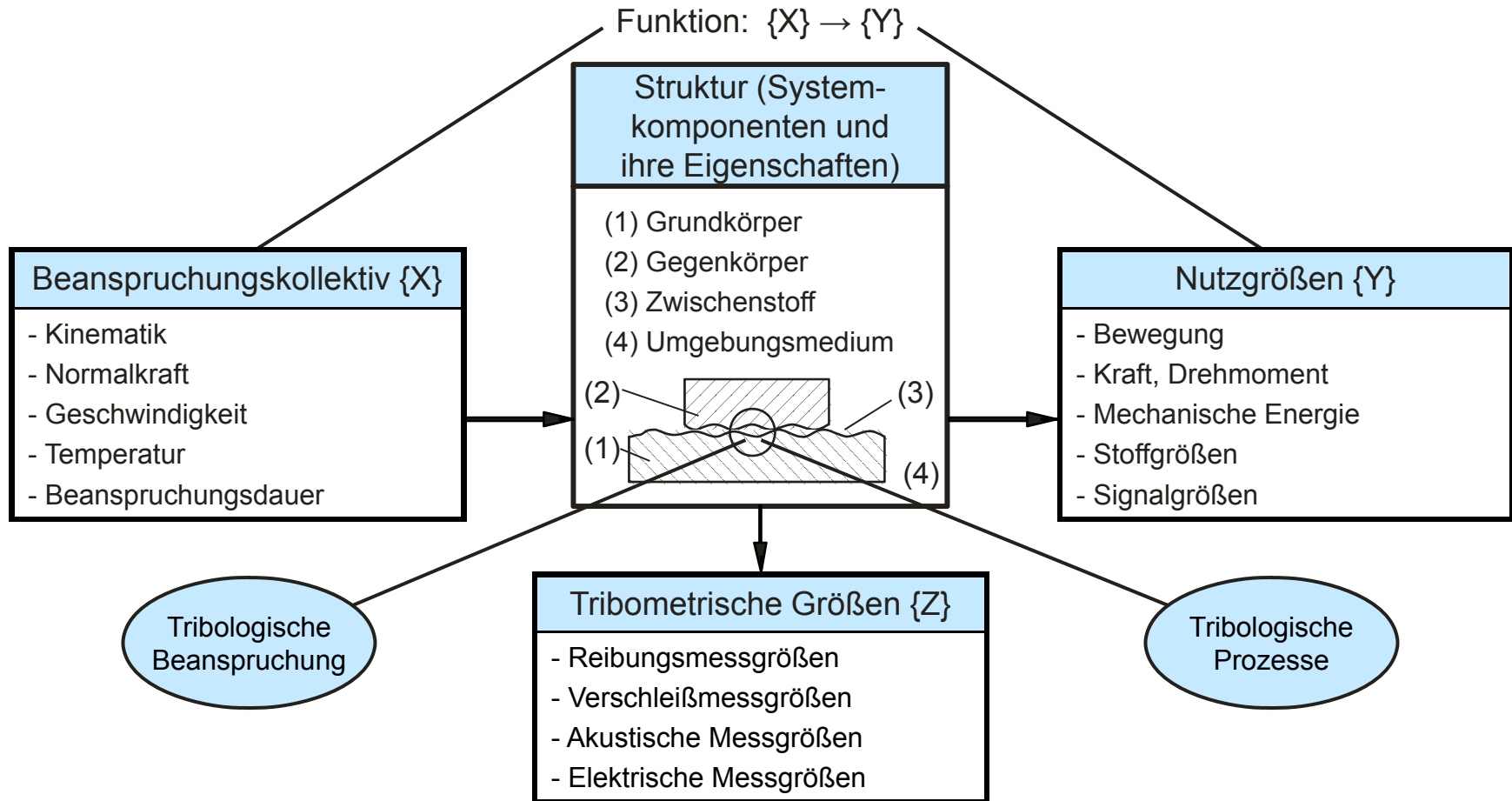
Dissipative, nichtlineare und dynamische Vorgänge treten in zeitlich und örtlich verteilten Mikrokontakten auf.

Wissenschaftliche Aufgabe:

Erforschung reibungsbedingter Energiedissipationen und verschleißbedingter Materialschädigungsprozesse.

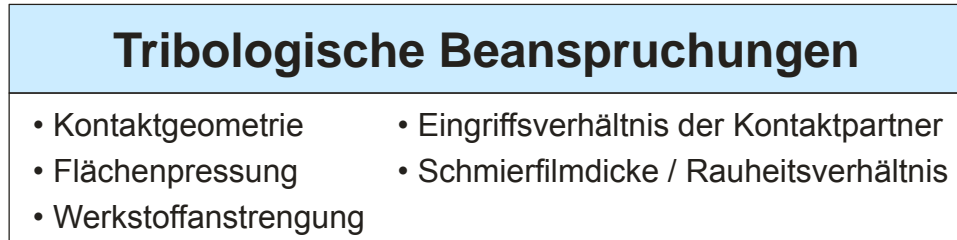
Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

Tribotechnisches System und seine Einflussgrößen

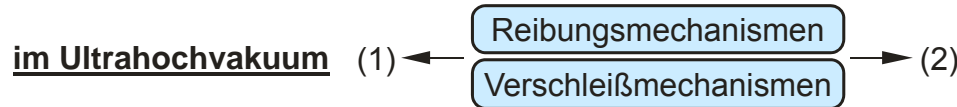


Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

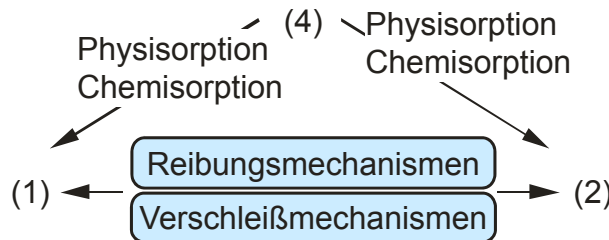
Tribologische Beanspruchung und Prozesse



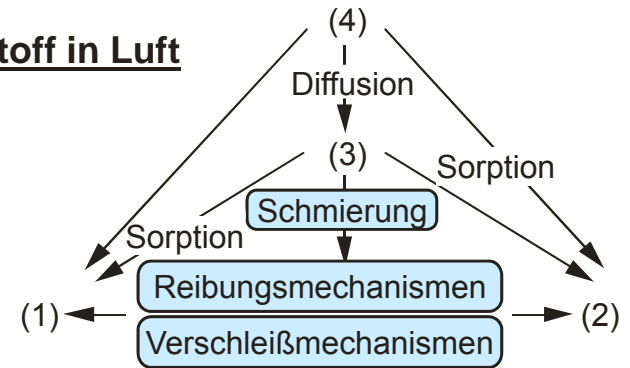
Tribologische Prozesse



in Luft



mit Schmierstoff in Luft



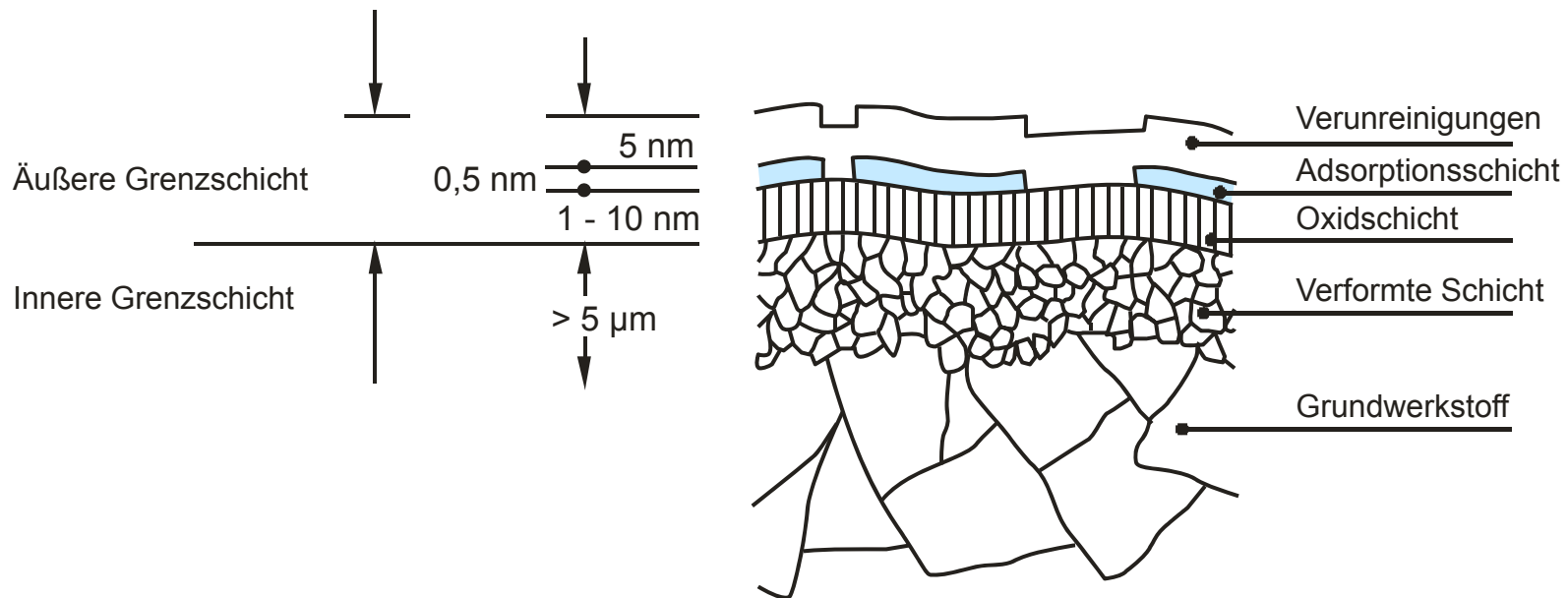
- (1) Grundkörper
- (2) Gegenkörper
- (3) Zwischenstoff (Schmierstoff)
- (4) Umgebungsmedium (Luft)

Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

Aufbau technischer Oberflächen

Unterschiede zwischen Grenzschichtbereich und Grundwerkstoff hinsichtlich:

- chemischer Zusammensetzung
- Gefüge
- Härte



Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

Kontaktvorgänge

Atomare und molekulare Wechselwirkungen

- Adhäsion (Festkörper/Festkörper-Grenzfläche)
- Ionenbindung
- Atombindung
- Metallische Bindung
- Van-der-Waals-Bindung
- Physi- bzw. Chemisorption
(Festkörper/Flüssigkeit/Festkörper-Grenzflächen)

Mechanische Wechselwirkungen

- Elastischer Kontakt
- Viskoelastischer Kontakt
- Plastischer Kontakt

Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

Kontaktgeometrien

Kontaktform		Fläche des		Skizze	Anwendungsbeispiele
		Grundkörpers I	Gegenkörpers II		
Konform	Flächenberührung	Ebene	Ebene		Geradführung
		Hohlzylinder	Vollzylinder		Gleitlager/Rundpassungen/Zylinderlaufbahnen
		Hohlkegel	$d_I \approx d_{II}$ Vollkegel		Lager/ Kegelpassungen
Kontraform	Linienberührung	Ebene	Zylinder		Rollenführungen
		Hohlzylinder	$d_I > d_{II}$ Vollzylinder		Nadellager
		Vollzylinder	$d_I \leq d_{II}$ Vollzylinder		Walzenstühle/ Rollenlager
		Vollkegel	Vollkegel		Kegelreibradgetriebe
		Hohlkegel	Kugelkalotte		Spitzenlager
		Vollprisma	V-Prisma		Schneidenlager
		Evolventenfläche	Evolventenfläche		Zahnräder
	Punktberührung	Ebene	Kugel		Kugelführungen
		Hohlzylinder	Kugel		Kugelführungen
		Vollzylinder	Kugel		Kugelführungen
		Innenringfläche	Kugel		Wälzlager
Außenringfläche		Kugel			

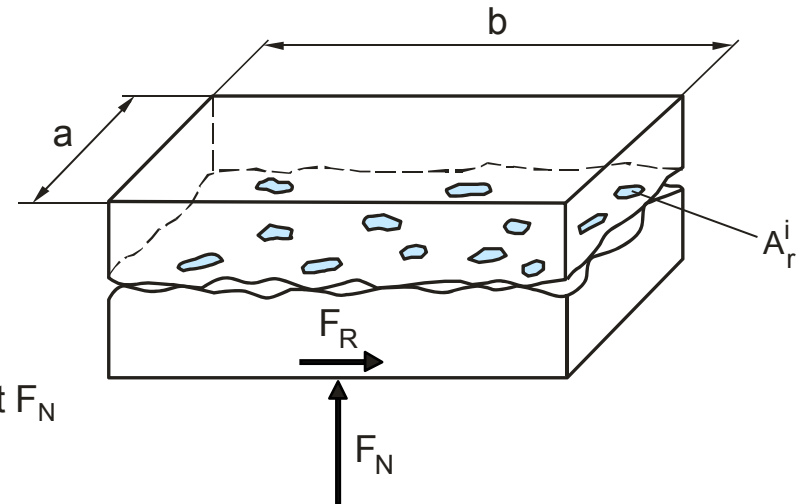
Quelle: Czichos, Habig:
Tribologie-Handbuch

Reibung und Mikrokontakte

Reibungskraft $F_R \sim$ Anzahl der Mikrokontakte \sim Normalkraft F_N

$$F_R = f \cdot F_N$$

f = Reibungszahl



$$A_0 = a \cdot b \gg A_r = \sum_{i=1}^n A_r^i$$

(n : Anzahl der Mikrokontakte)

Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

Reibungszustände

Festkörperreibung

Reibung beim unmittelbaren Kontakt fester Körper

Grenzreibung

Festkörperreibung, bei der die Oberflächen der Reibpartner mit einem molekularen, z.B. von einem Schmierstoff stammenden, Film bedeckt werden.

Flüssigkeitsreibung

Reibung in einem die Reibpartner lückenlos trennenden flüssigen Film, der hydrostatisch oder hydrodynamisch erzeugt werden kann.

Gasreibung

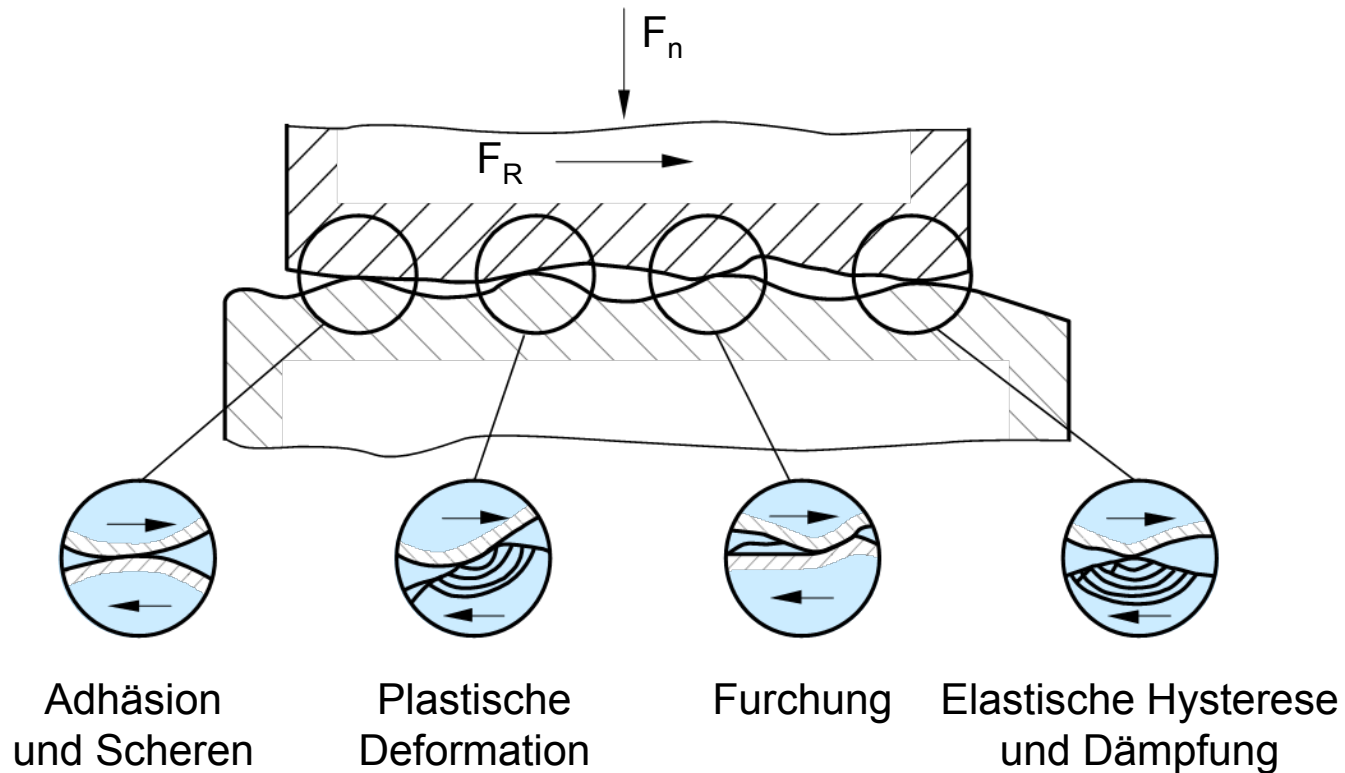
Reibung in einem die Reibpartner lückenlos trennenden gasförmigen Film, der aerostatisch oder aerodynamisch erzeugt werden kann.

Mischreibung

Reibung, bei der Festkörperreibung und Flüssigkeits- bzw. Gasreibung nebeneinander vorliegen.

Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

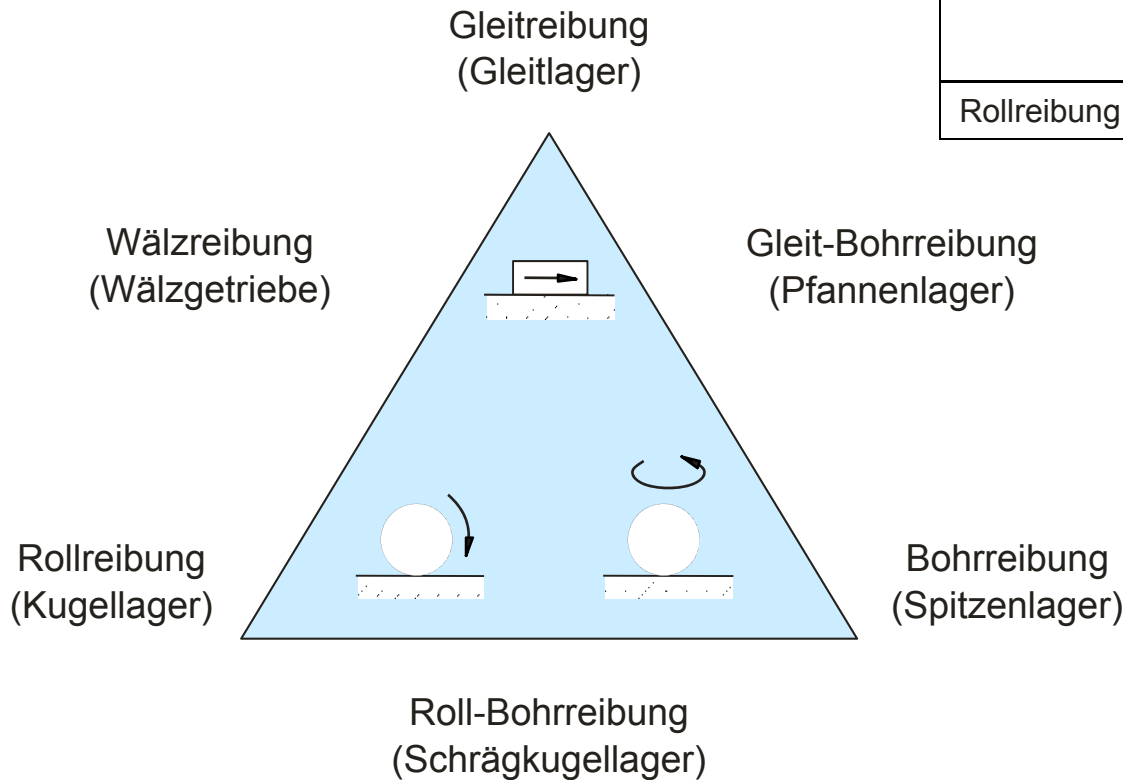
Reibungsmechanismen



Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

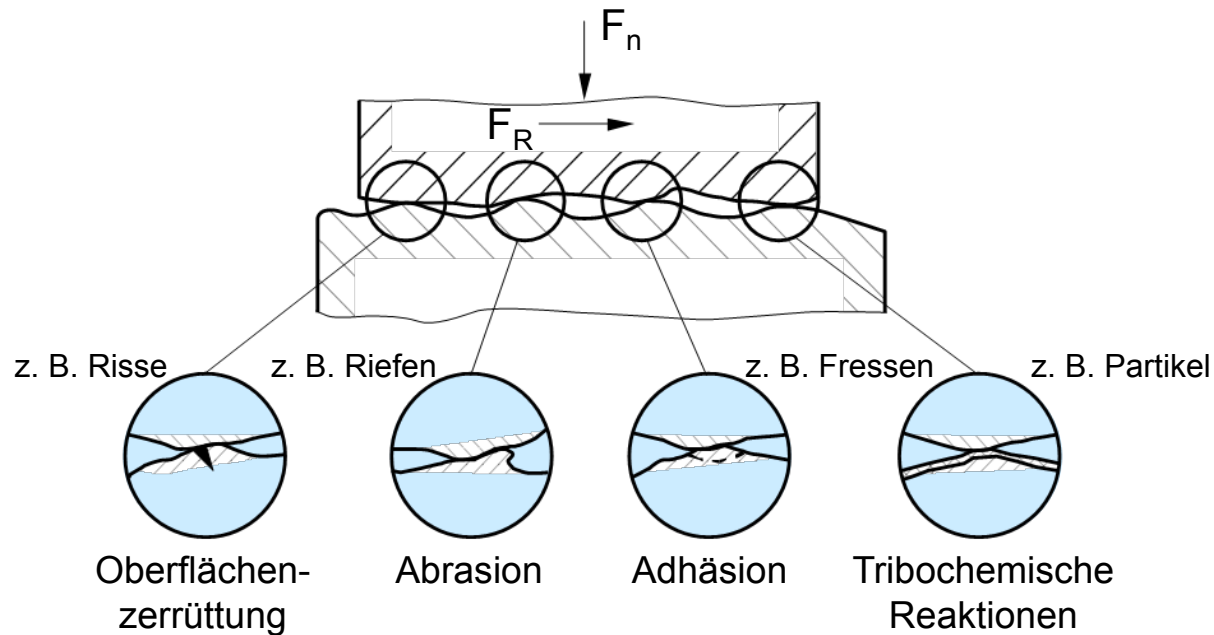
Reibungsarten

Reibungsart	Reibungszustand	Reibungszahl f
Gleitreibung	Festkörperreibung	0,1 ... > 1
	Grenzreibung	0,01 ... 0,2
	Mischreibung	0,01 ... 0,1
	Flüssigkeitsreibung	0,001 ... 0,01
	Gasreibung	0,0001
Rollreibung	Mischreibung	0,001 ... 0,005



Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

Verschleißmechanismen

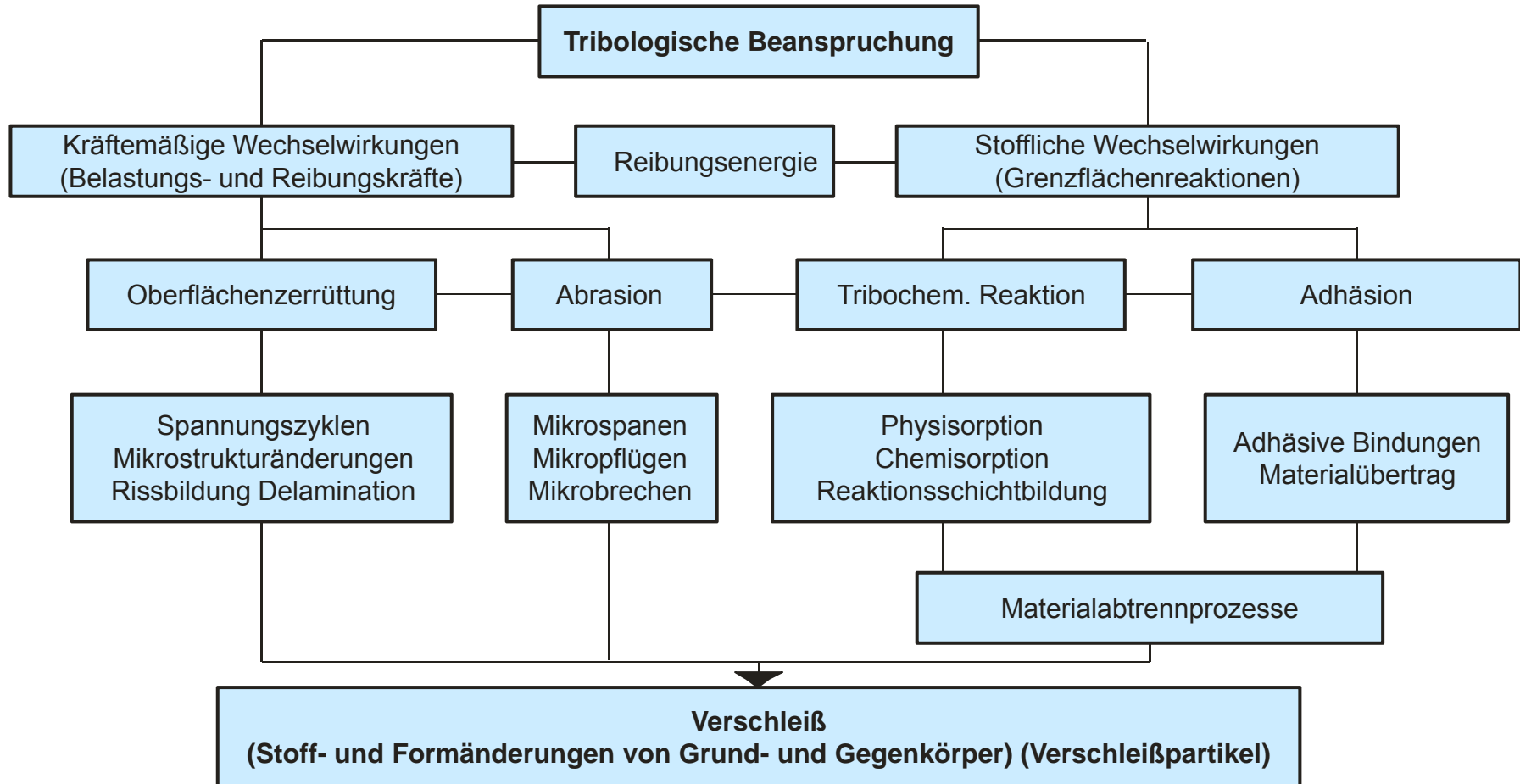


Oberflächenzerrüttung und Abrasion
Kräftemäßige, spannungmäßige oder energetische Wechselwirkungen führen zu Rissvorgängen und Stoffabtrennungen der Kontaktpartner

Adhäsion und tribochemische Reaktion
Atomare und molekulare Wechselwirkungen werden auf das Auftreten chemischer Bindungen im Kontaktbereich unter Beteiligung von Materialabtrennprozessen und Mitwirkung des Umgebungsmediums zurückgeführt

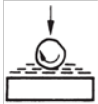
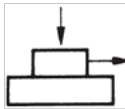
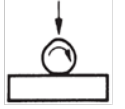
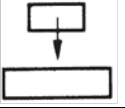

Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

Verschleißmechanismen – Stoff- und Formänderungsprozesse



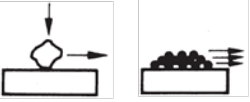
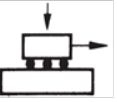


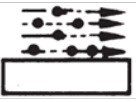
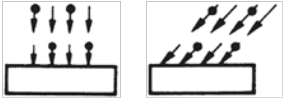

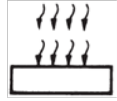
Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

Verschleißarten I

Systemstruktur	Tribologische Beanspruchung	Verschleißart	Adhäsion	Abrasion	Oberfl.-zerrüttung	Tribochem. Reaktionen
Festkörper – Zwischenstoff (vollständige Filmtrennung) – Festkörper	Gleiten, Rollen, Wälzen, Prallen, Stoßen 	-			●	●
Festkörper – Festkörper (bei Festkörperreibung, Grenzreibung, Mischreibung)	Gleiten 	Gleitverschleiß	●	●	●	●
	Rollen, Wälzen 	Rollverschleiß, Wälzverschleiß	●	●	●	●
	Prallen, Stoßen 	Prallverschleiß, Stoßverschleiß	●	●	●	●
	Oszillieren 	Schwingungsverschleiß	●	●	●	●

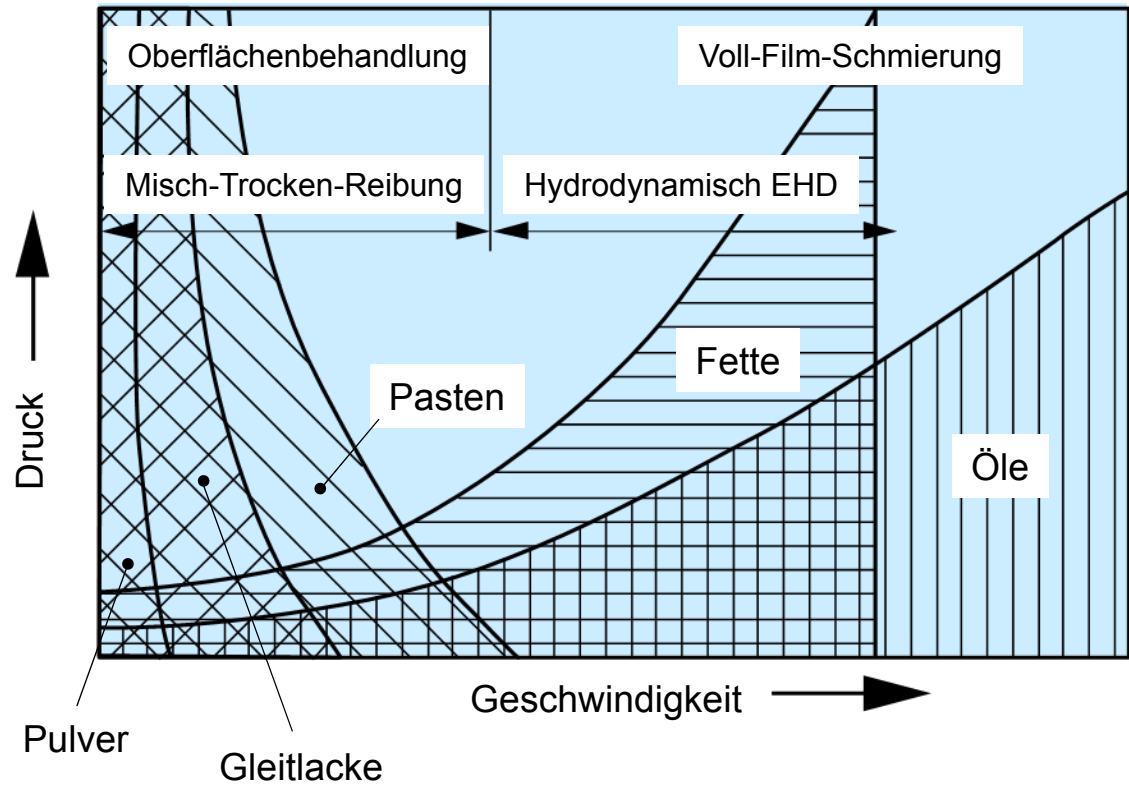
Quelle: DIN 50 320

Verschleißarten II

Systemstruktur	Tribologische Beanspruchung	Verschleißart	Adhäsion	Abrasion	Oberfl.-zerrüttung	Tribochem. Reaktionen
Festkörper – Festkörper und Partikel	Gleiten 	Furchungs- verschleiß		●		
	Gleiten 	Korngleit- verschleiß		●		
	Wälzen 	Kornwälz- verschleiß		●		
Festkörper – Flüssigkeit mit Partikeln	Strömen 	Spülverschleiß (Erosionsverschleiß)		●	●	●
Festkörper – Gas mit Partikeln	Strömen 	Gleitstrahlverschleiß (Erosionsverschleiß)		●	●	●
	Prallen 	Prallstrahlverschleiß, Schrägstrahlverschleiß		●	●	●
Festkörper – Flüssigkeit	Strömen, Schwingen 	Werkstoffkavitation, Kavitationserosion			●	●
	Stoßen 	Tropfenschlag			●	●

Schmierstoffe und ihre Einsatzbereiche

Schmierstoffarten
• Flüssige Schmierstoffe
• Schmierfette
• Pastöse Schmierstoffe
• Festschmierstoffe
• Gleitfähige Kunststoffe
• Trockenschmierfilme
• Gasförmige Schmierstoffe

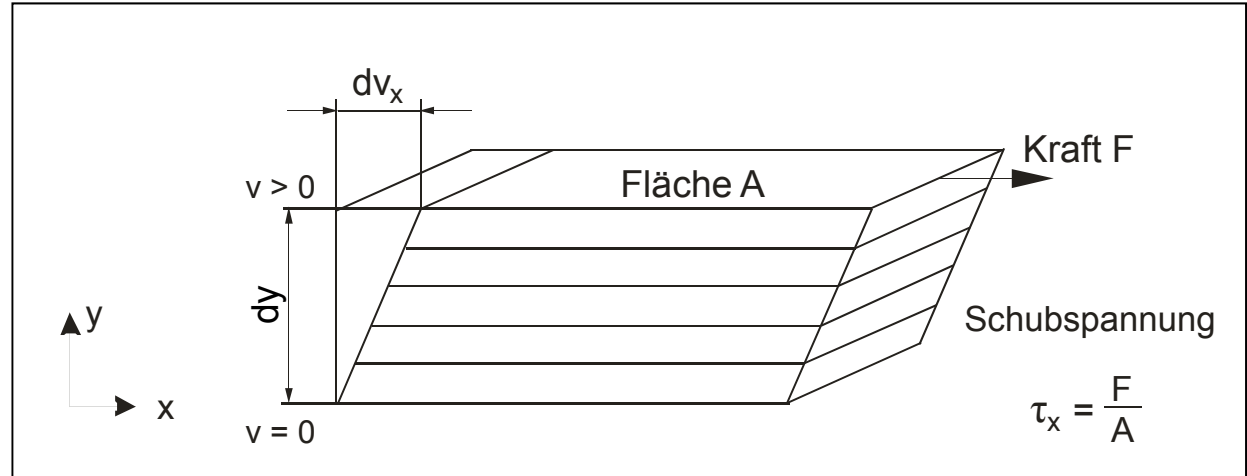


Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

Schmieröle

Schmierölarten

- Mineralöle
- Tierische und Pflanzliche Öle
- Synthetische Öle
- Sonstige, z.B. Wasser, flüssige Metalle



Geschwindigkeitsgefälle $D = \frac{dv_x}{dy} \quad [s^{-1}]$

Dynamische Viskosität
(Innere Reibung) $\eta = \frac{\tau}{D} \quad \left[\frac{N}{m^2} s = Pa \cdot s \right]$

Kinematische Viskosität $\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right]$

Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch; Franke: Schmierstoffe und ihre Anwendung

Tribotechnische Werkstoffe

Guß- und Knetwerkstoffe:

- Stahl, Gußeisen, Hartlegierungen,
- Nickel- und Kobaltlegierungen
- Kupfer-, Aluminium- und Titanlegierungen

Sinterwerkstoffe:

- Hartmetalle,
- Ingenieurkeramische Werkstoffe

Oberflächenschutzschichten

Polymere Werkstoffe

Vergleich tribologischer Eigenschaften:

Massenkräfte:

$$F_{\text{Polymer}} < F_{\text{Keramik}} < F_{\text{Metall}}$$

Hertzsche Pressung:

$$P_{\text{Polymer}} < P_{\text{Metall}} < P_{\text{Keramik}}$$

Reibbedingte Temperaturerhöhung:

$$T_{\text{Metall}} < T_{\text{Polymer}} < T_{\text{Keramik}}$$

Adhäsionsenergie (Oberflächenspannung):

$$Ad_{\text{Polymer}} < Ad_{\text{Metall}} < Ad_{\text{Keramik}}$$

Abrasion (Anstieg in die Verschleißhochlage):

$$Ab_{\text{Keramik}} < Ab_{\text{Metall}} < Ab_{\text{Polymer}}$$

Tribochemische Reaktionsfähigkeit:

$$R_{\text{Polymer}} ; R_{\text{Keramik}} < R_{\text{Metall}}$$

Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

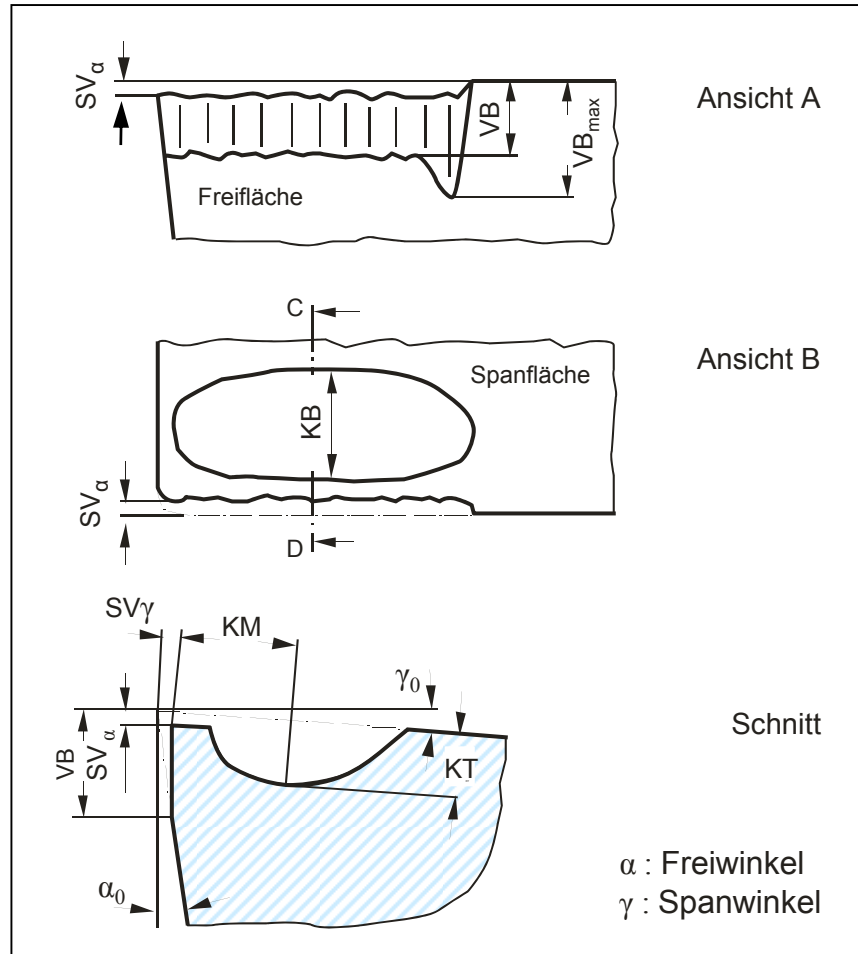
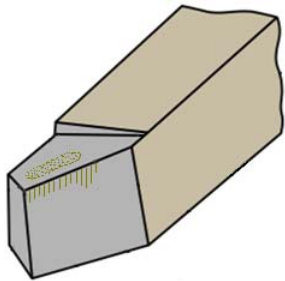
Werkstoffeigenschaften

Werkstoff	Dichte $\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]$	E-Modul $E \left[\frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \right]$	Zugfestigkeit $R_m \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	Bruchzähigkeit $K_{Ic} \left[\text{MNm}^{\frac{-3}{2}} \right]$	Härte (Vickers) *Kugeldruckhärte $HV \text{ [-]}$	Wärmeleitfähigkeit $\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha \left[\frac{10^{-6}}{\text{K}} \right]$
Stahl	7,8 – 7,9	210	440 – 930	50 – 214	100 – 900	30 – 60	10,5 – 17
Gußeisen	7,1 – 7,4	64 – 181	140 - 490	6 – 20	100 – 850	30 – 60	9 – 12
Aluminium-Legierung	2,6 – 2,9	60 – 80	300 – 700	23 – 45	25 – 140	121 – 237	18,5 – 24
Aluminiumoxid	3,9	210 – 380		3 – 5	1400 – 1900	25 – 35	7 – 8
Zirkondioxid	5,6	140 – 210		8 – 10	1200	8	11
Siliciumnitrid	3,2	170		4 – 7	1600 – 1800	10 – 25	2,8
Siliciumcarbid	1,01 – 1,14	450		4,5	2500	90 – 125	4 – 5
Polyamid	1,3	2 – 4	40 – 80	3	80 – 100*	0,25 – 0,35	70 – 150
Polyimid	2,1 – 2,3	3 – 5	100 – 300			0,37 – 0,52	50 – 60
Polytetrafluorethylen		0,4	15 – 25		12*	0,25	100 – 160
Polyethylen	0,92			1 – 2		0,33 – 0,57	90 – 140
• Hochdruck	0,94	0,2	14 – 18		13*		
• Niederdruck		0,45	30		30*		

Quelle: Czichos, Habig, Tribologie-Handbuch

Verschleißmerkmale am Werkzeug

Schneidteil
eines Drehmeißels



Verschleißgrößen:

- VB: Verschleißmarkenbreite
- KB: Kolkbreite
- KT: Kolktiefe
- KM: Kolkmittenabstand
- K: Kolkverhältnis KT / KM
- SV: Schneidkantenversatz

Verschleißmerkmale:

- Schneidkantenrundung
- Spitzenverschleiß
- Eckenverschleiß
- Rissbildung
- Ausbrüche

Ursachen und Einflüsse auf den Werkzeugverschleiß

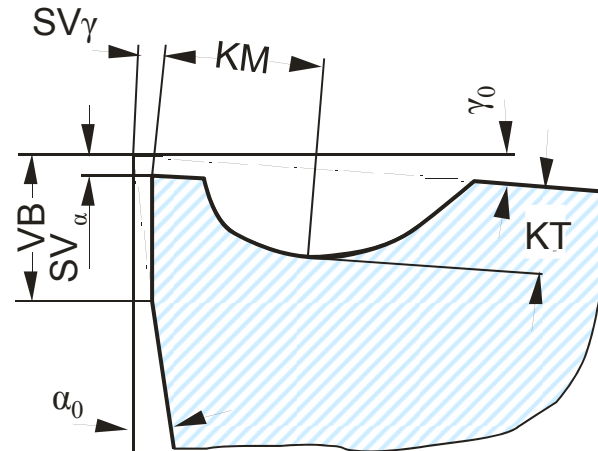
Verschleißursachen

- mechanischer Abrieb
- plastische Verformung
- Mikroausbröckelungen durch Preßschweißungen zwischen Werkstückstoff und Werkzeug
- Diffusion zwischen Werkstückstoff und Werkzeug
- Oxidation des Schneidstoffes
- Ausbrüche der Schneide infolge mechanischer oder mechanisch-thermischer Belastung

Einflussgrößen

- Werkstoff des Werkstücks
- Werkstoff des Werkzeugs
- Werkzeuggeometrie
- Werkstückgeometrie
- Einstellgrößen
- Anschliffzustand des Werkzeugs
- Temperatur in der Verschleißzone
- dynamisches Verhalten der Werkzeugmaschine
- Umweltbedingungen
- Kühlschmiermittel
- Einwirkungszeit

Einflüsse der Werkzeuggeometrie auf den Werkzeugverschleiß

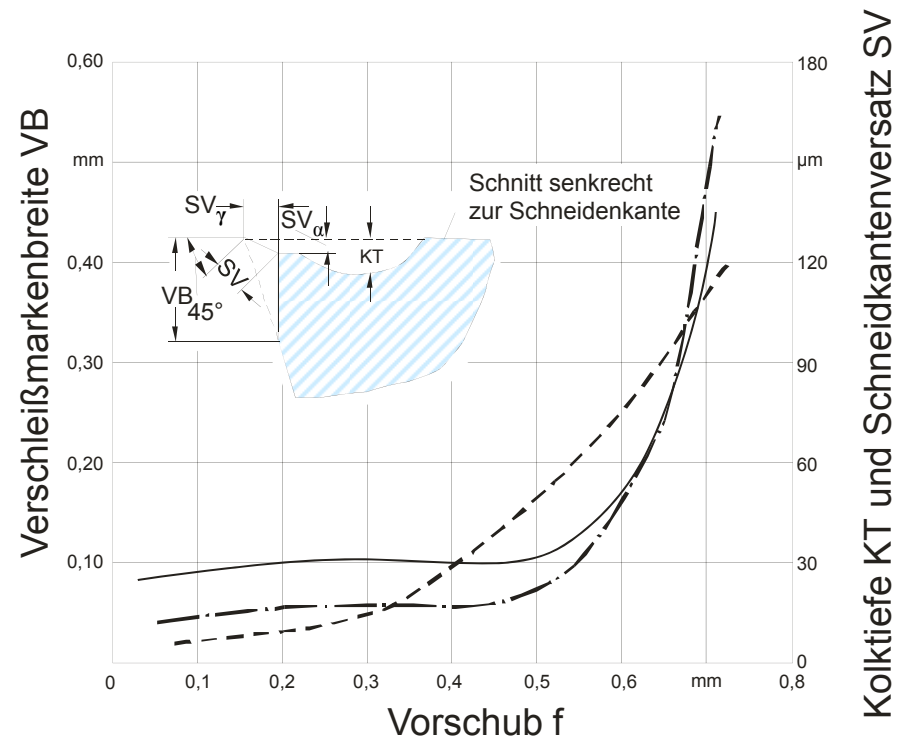
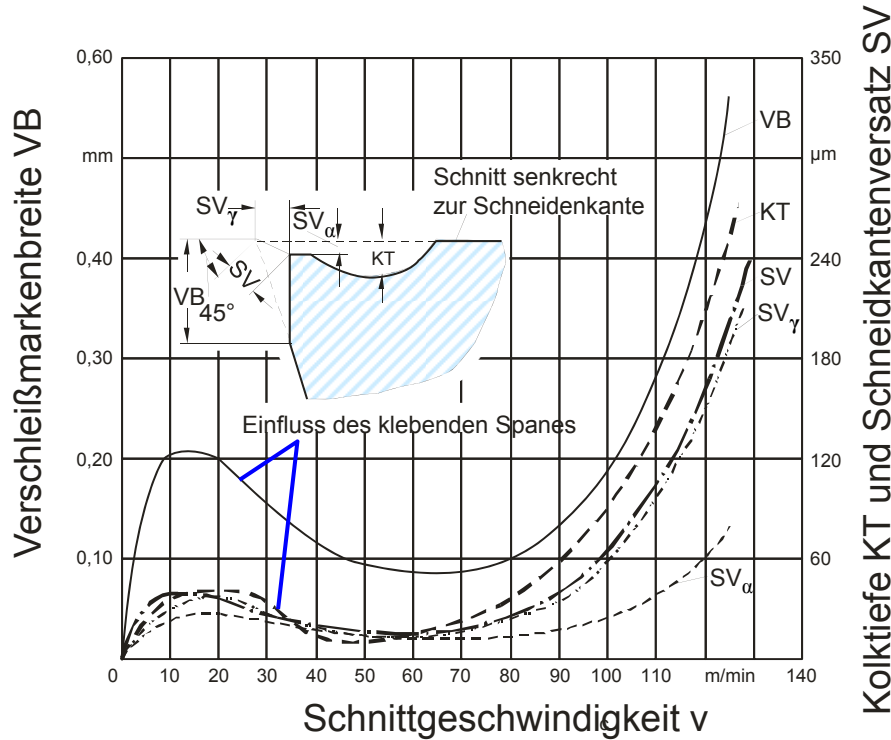


Spanwinkel γ	Freiwinkel α
<p>Ein kleiner Spanwinkel führt zu einer größeren Spanstauung und verursacht dadurch höhere Zerspankräfte.</p> <p>Andererseits wird der Schneidkeil des Werkzeugs verstärkt, wodurch die Bruch- und Verschleißanfälligkeit der Schneide abnimmt.</p>	<p>Bei großen Freiwinkeln ist die Berührungsfläche zwischen Werkstück und Freifläche des Werkzeugs klein. Damit ergibt sich eine geringere Reibung.</p> <p>Andererseits nimmt wegen der Schwächung des Schneidkeils die Gefahr von Schneidenbrüchen bei größeren Freiwinkeln zu.</p>

Ursachen und Einflüsse auf den Werkzeugverschleiß

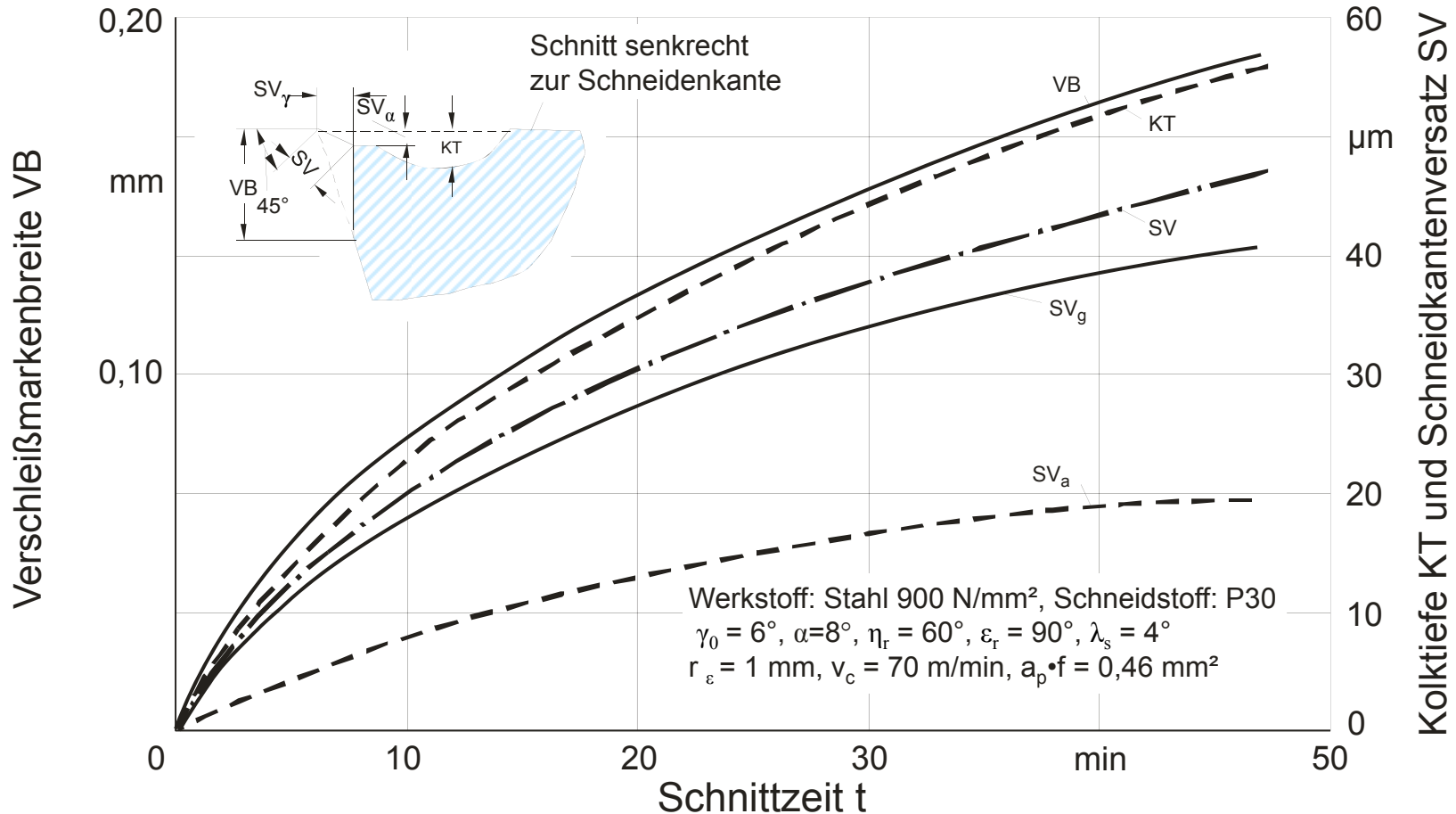
Werkstoff: Stahl 900 N/mm², Schneidstoff: P30
 $\gamma_0 = 6^\circ, \eta_r = 60^\circ, \varepsilon_r = 90^\circ, \lambda_s = 4^\circ$
 $r_\varepsilon = 1 \text{ mm}, L = 1000 \text{ m}, a_p \cdot f = 0,4 \text{ mm}^2$

Werkstoff: Stahl 900 N/mm², Schneidstoff: P30
 $\gamma_0 = 6^\circ, \alpha = 8^\circ, \eta_r = 60^\circ, \varepsilon_r = 90^\circ, \lambda_s = 4^\circ$
 $r_\varepsilon = 1 \text{ mm}, v_c = 85 \text{ m/min}, a_p \cdot f = 0,4 \text{ mm}^2$



Quelle: nach Vieregge; Zerspangung der Eisenwerkstoffe

Einfluss der Schnittzeit auf den Werkzeugverschleiß

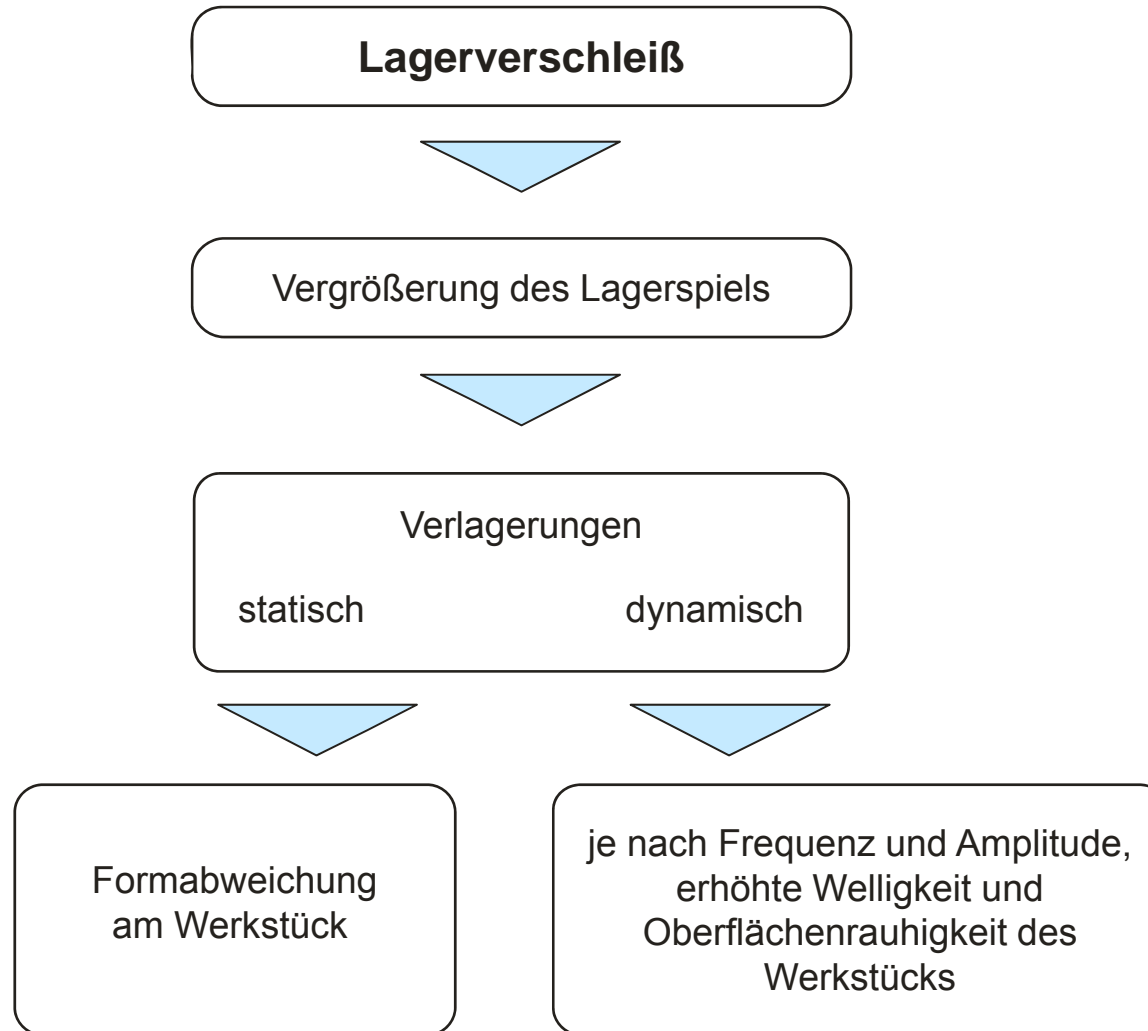


Auswirkungen des Werkzeugverschleißes

Geometrische Wirkungen	
direkte geometrische Änderungen	indirekte geometrische Änderungen
Der Werkzeugverschleiß beeinflusst die Lagezuordnung von Werkstück und Werkzeug.	Sie entstehen durch energetische Wirkungen und beruhen darauf, dass mit zunehmender Schnitttemperatur und zunehmender Schwingungsamplitude eine Änderung der Lagezuordnung eintritt.

Energetische Wirkungen
Mit wachsender Größe der Verschleißmerkmale ändert sich die Schneidkeilgeometrie. Damit tritt ein Anwachsen der Zerspankräfte und eine Vergrößerung der Energiezufuhr an der Zerspanstelle auf.

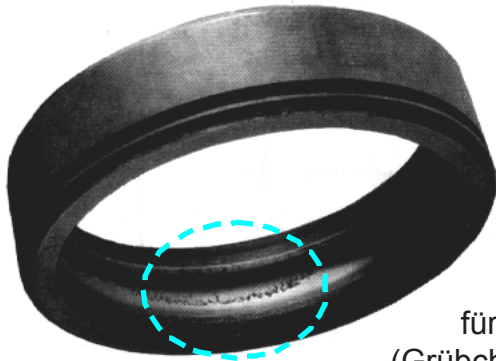
Lagerverschleiß und seine Auswirkungen



Reibungsarten und Reibungszustände von Lagerbauformen

Bauform	Reibungsart	Reibungszustand
Wälzlager	Rollreibung Gleitreibung (Mikroschlupf, Käfigreibung) Bohrreibung (Schräggugellager)	Mischreibung, Flüssigkeitsreibung
Hydrodynamische Gleitlager	Gleitreibung	Mischreibung, Flüssigkeitsreibung
Hydrostatische Gleitlager	Gleitreibung	Flüssigkeitsreibung
Aerostatische Gleitlager	Gleitreibung	Gasreibung

Wälzlagerverschleiß



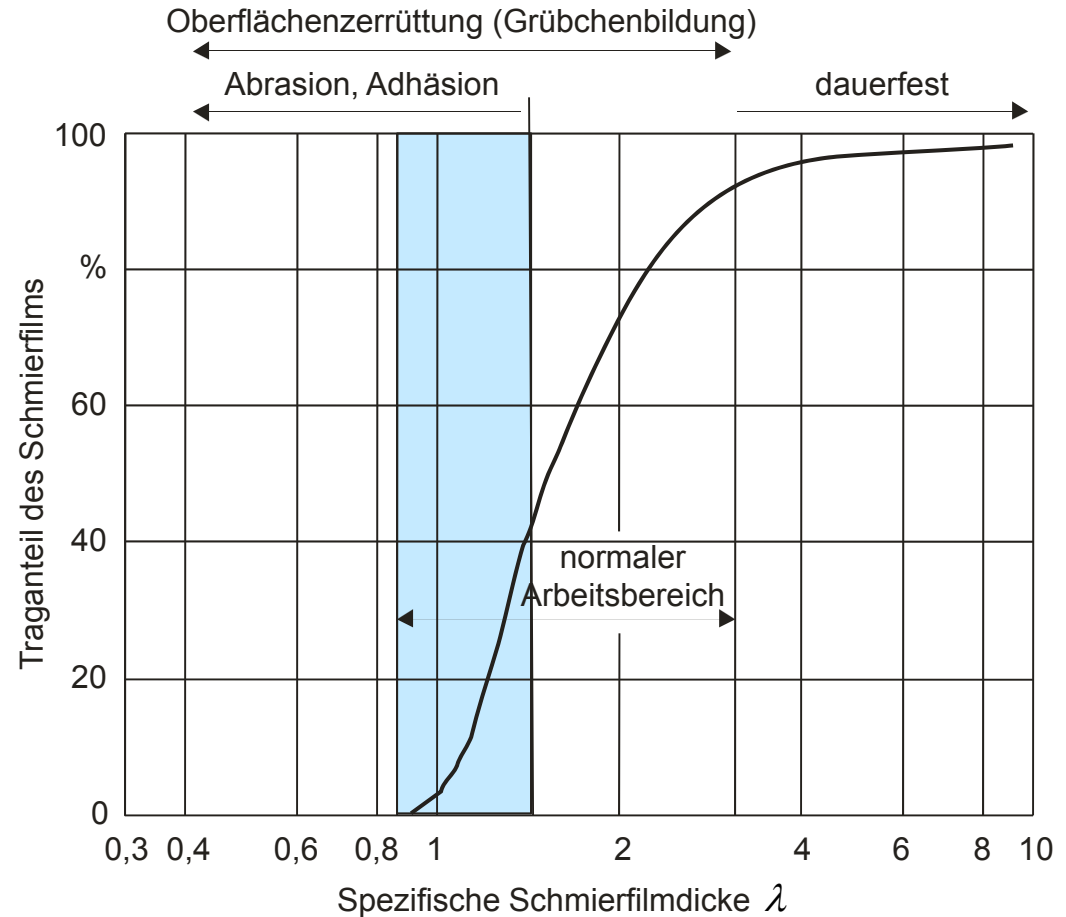
Beispiel für Ermüdung (Grübchenbildung)

Spezifische Schmierfilmdicke:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} = \frac{\text{Schmierfilmdicke}}{\text{Rauheitskennzahl}}$$

Rauheitskennwert $\sigma = 1,3R_a$

Index 1: Wälzkörper
2: Laufbahn



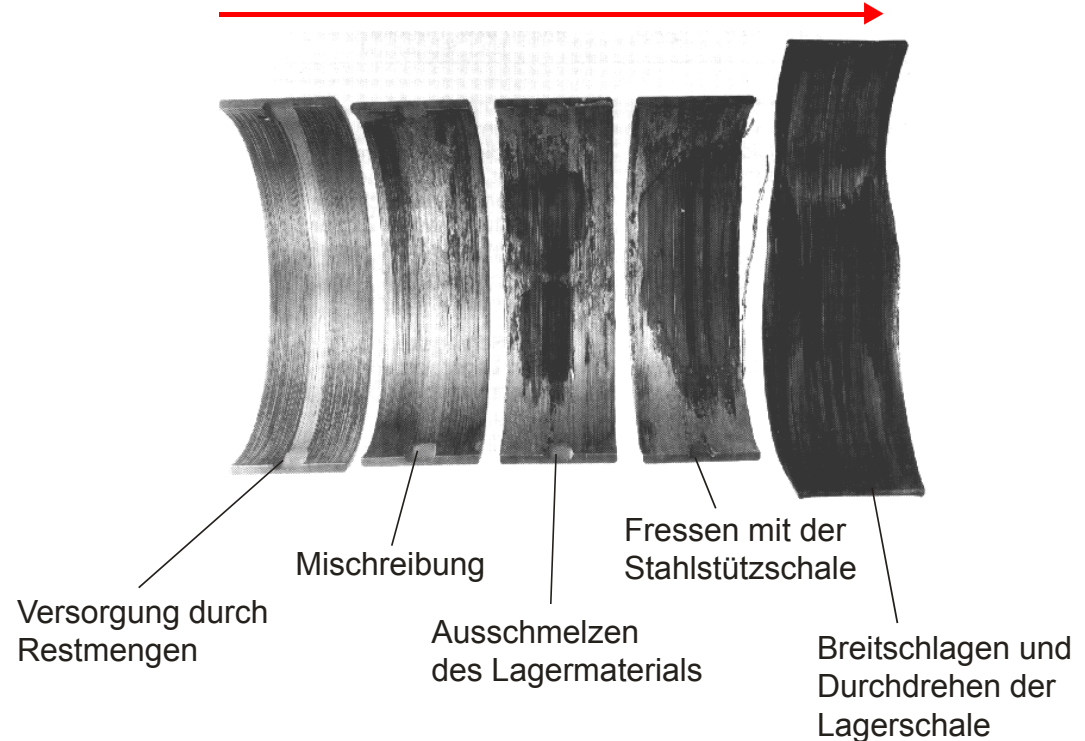
Quelle: Albert, Köttrich: Wälzlager; Czichos, Habig: Tribologie-Handbuch

Gleitlagerverschleiß

Verschleiß wird beschleunigt durch:

- ungenügende Vorschmierung
- häufiges An- und Abfahren
- An- und Abfahren unter Last
- Verschmutzung
- zu grobe Ölfilter
- raue Zapfenoberfläche
- Abweichung von der idealen Spaltgeometrie

Schadensentwicklung an einer Lagerschale infolge Ölmangels



Quelle: Bartz; Schäden an geschmierten Maschinenelementen

Verschleiß von Gleitführungen

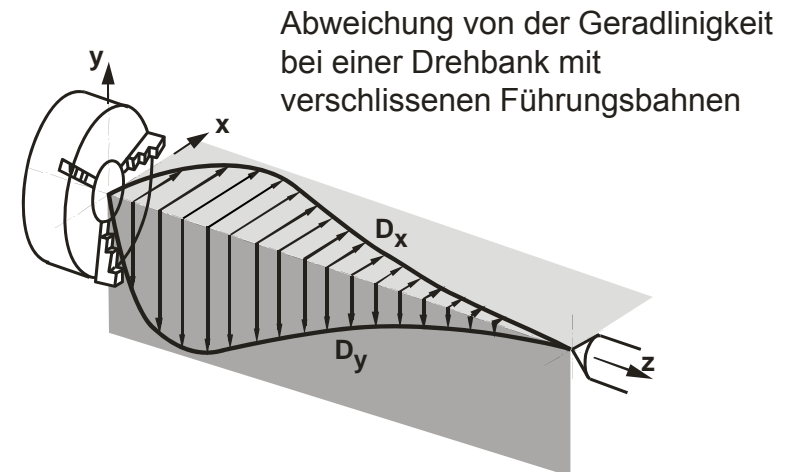
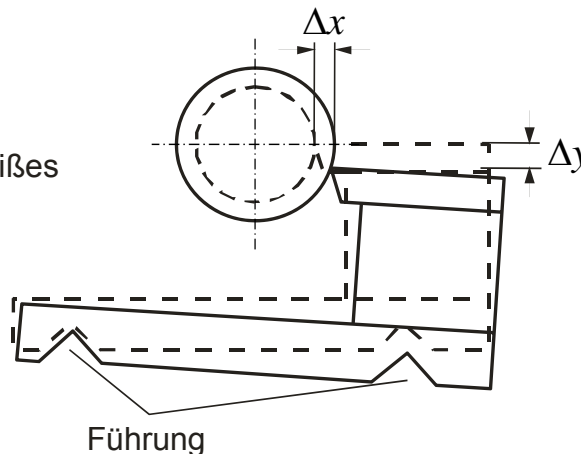
Gleitführungen sind besonders verschleißgefährdet, da sie sehr häufig im Mischreibungsgebiet arbeiten.

- Der Verschleiß an Führungen ruft eine statische Verlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück hervor,
- er tritt nicht gleichmäßig längs der Führungsbahnen auf und
- der Absolutwert der Verlagerung hängt von der Stellung des Schlittens auf der Führungsbahn ab.

Beispiel Spitzendrehmaschine:

- Eine Verlagerung in x-Richtung (Werkzeugrichtung) bewirkt eine Durchmesseränderung, die dem doppelten Verschleißbetrag entspricht.
- Eine Verlagerung in y-Richtung hat eine deutlich geringere Wirkung auf den Werkstückdurchmesser.

Einfluss des Verschleißes auf das Drehergebnis



Verbesserung des Verschleißverhaltens

- Wahl einer günstigen Werkstoffpaarung
- Herabsetzen der Verschleißkräfte
- Festlegen einer günstigen Verschleißbewegung
- gute Kühlung und Schmierung der Reibflächen und
- Verringerung der Verschleißfolgen

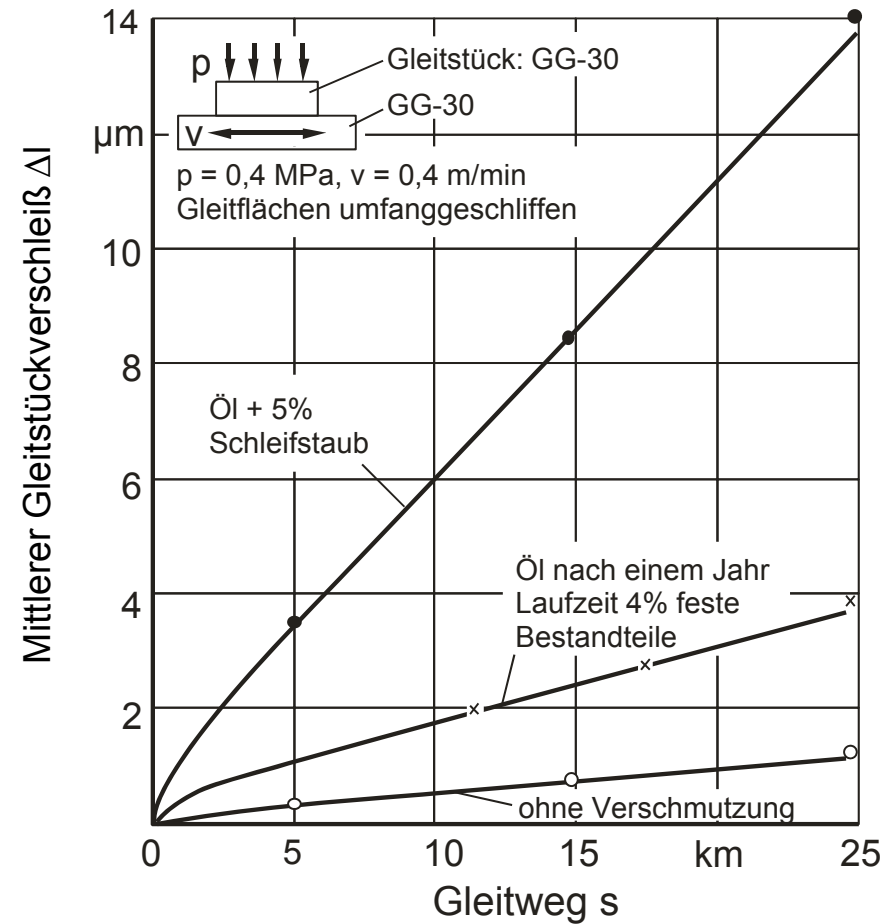
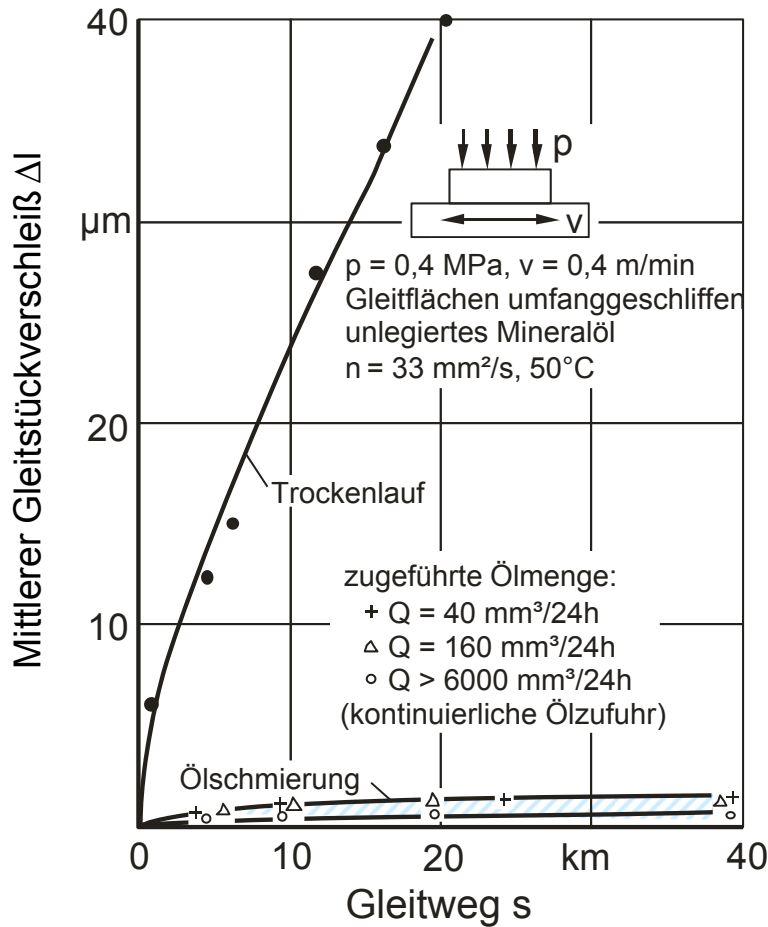
Herabsetzen der Verschleißkräfte

- Herabsetzen der Flächenpressung
Beispiel: Vergrößern der Gleitflächen
- Geeignete Formgebung der Bauelemente
- Herabsetzen des Reibungskoeffizienten
Beispiel: bessere Oberflächengüte
- Schutz der Gleitfläche vor Verunreinigungen durch Abdeckungen und Dichtungen

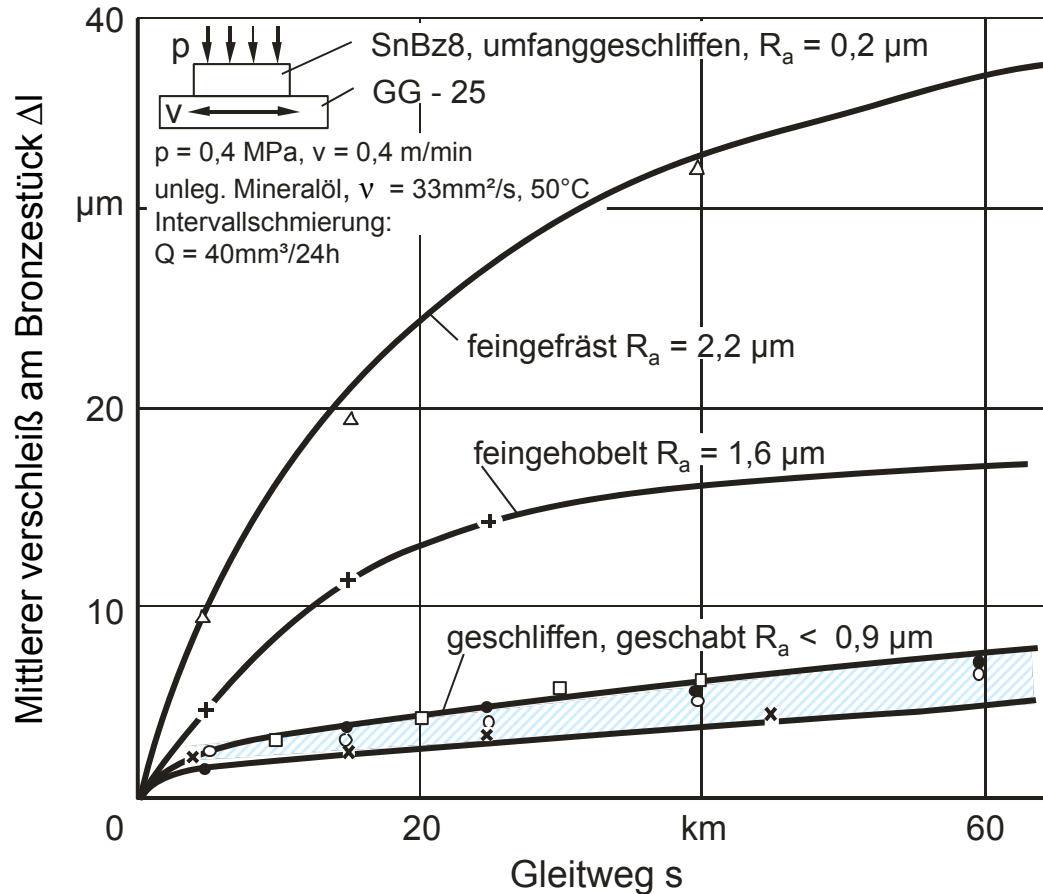
Kriterien bei der Auswahl der Werkstoffpaarung

- Oberflächenbeschaffenheit
- Gitteraufbau der Werkstoffe beider Reibpartner
- Art der Schmierung
- Gleitgeschwindigkeit
- Belastung und
- Neigung zum "Fressen" bei Schmierungsausfall

Einfluss der Schmierung



Einfluss der Oberflächenqualität



Einfluss der Werkstoffplanung

