

Vorlesung Schadensanalyse

Reibung und Verschleiß

Grundvorgänge bei der Korrosion

Beanspruchung

mechanisch

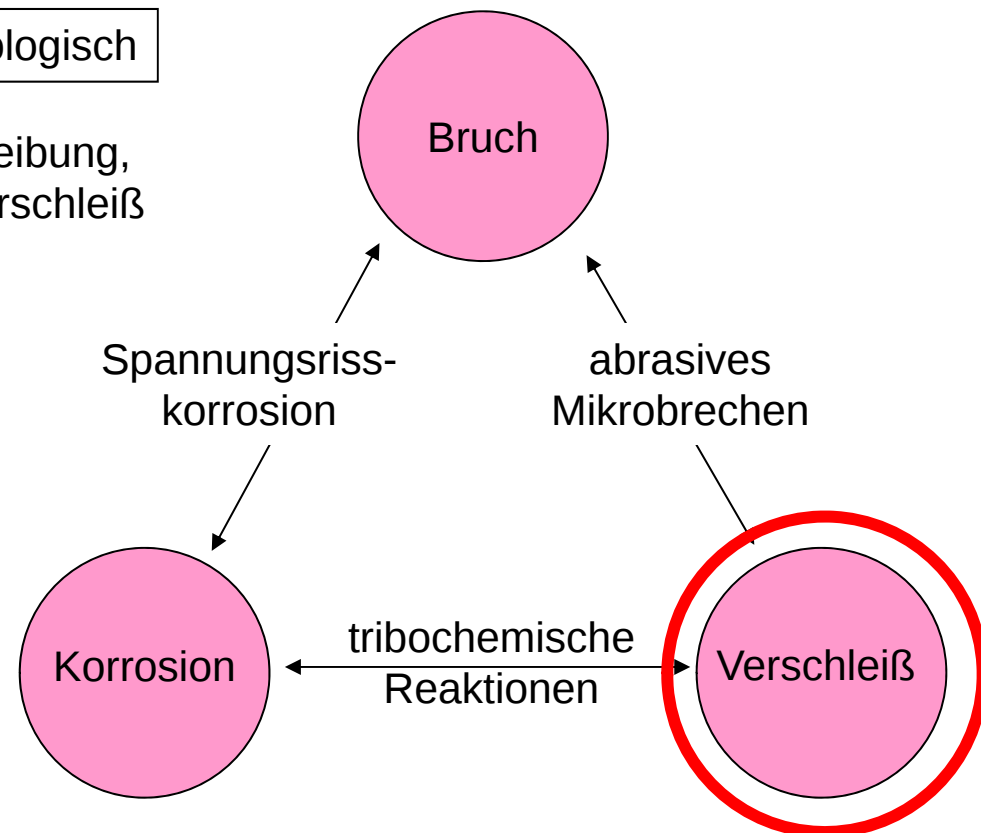
Überlast,
Ermüdung,
etc.

chemisch

Korrosion,
Verzundern,
etc.

tribologisch

Reibung,
Verschleiß



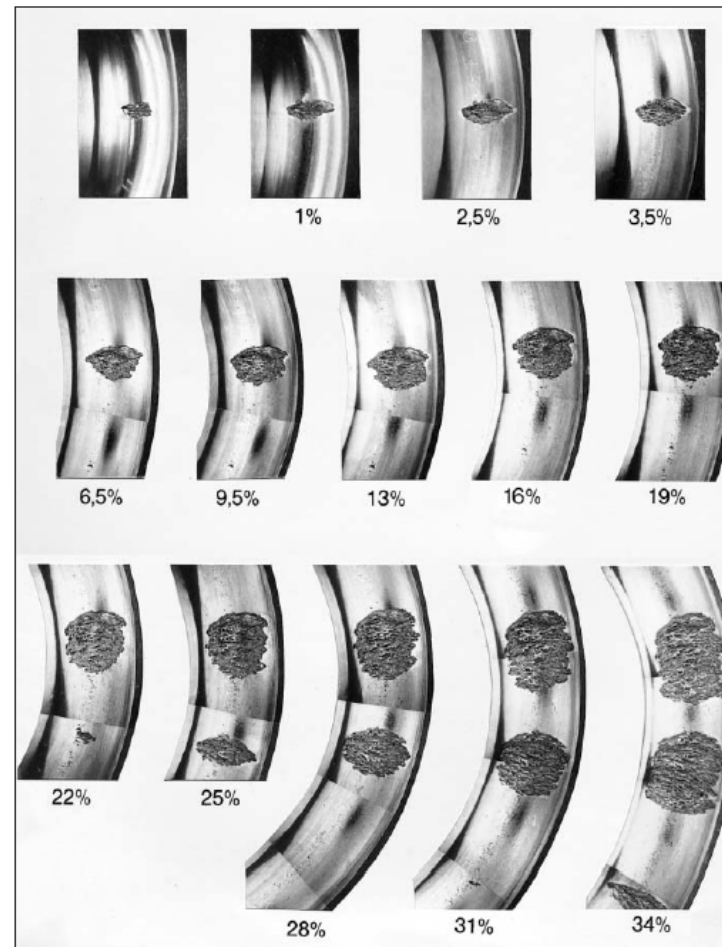
Verschleiß als Schadensursache

Tribologische Schadensmechanismen in Abhängigkeit der Industriezweige am Beispiel von Kanada

Wirtschaftszweig	Tribologische Schadensmechanismen und Schadensanteil in %					
	Abrasion	Adhäsion	Erosion	Fretting	Ermüdung	Tribochemie
Transportwesen						
- Schienenverkehr	29,7	27,5	–	1,0	37,2	4,4
- LkW- und Busverkehr	76,8	13,1	–	1,4	3,2	5,5
Elektrizitätsversorgung	33,4	16,6	13,9	17,8	18,3	–
Bergbau						
- Untertagebau	75,4	0,3	22,8	–	0,5	1,0
- Tagebau	88,8	4,0	–	0,3	6,4	0,5
- Raffinerien	55,6	3,8	30,5	–	4,4	5,3
Land- und Forstwirtschaft	76,3	11,8	4,9	1,3	5,4	0,3
Zellstoff- u. Papierindustrie	57,4	9,4	24,6	0,6	3,0	5,0
Alle Wirtschaftszweige	66,5	12,1	7,8	1,9	8,9	2,8

Verschleiß als Schadensursache

Entwicklung eines Ermüdungsschadens in einer Schrägkugellager-Innenringlaufbahn,
Prozentangabe relativ zur nominellen Lebensdauer L_{10}



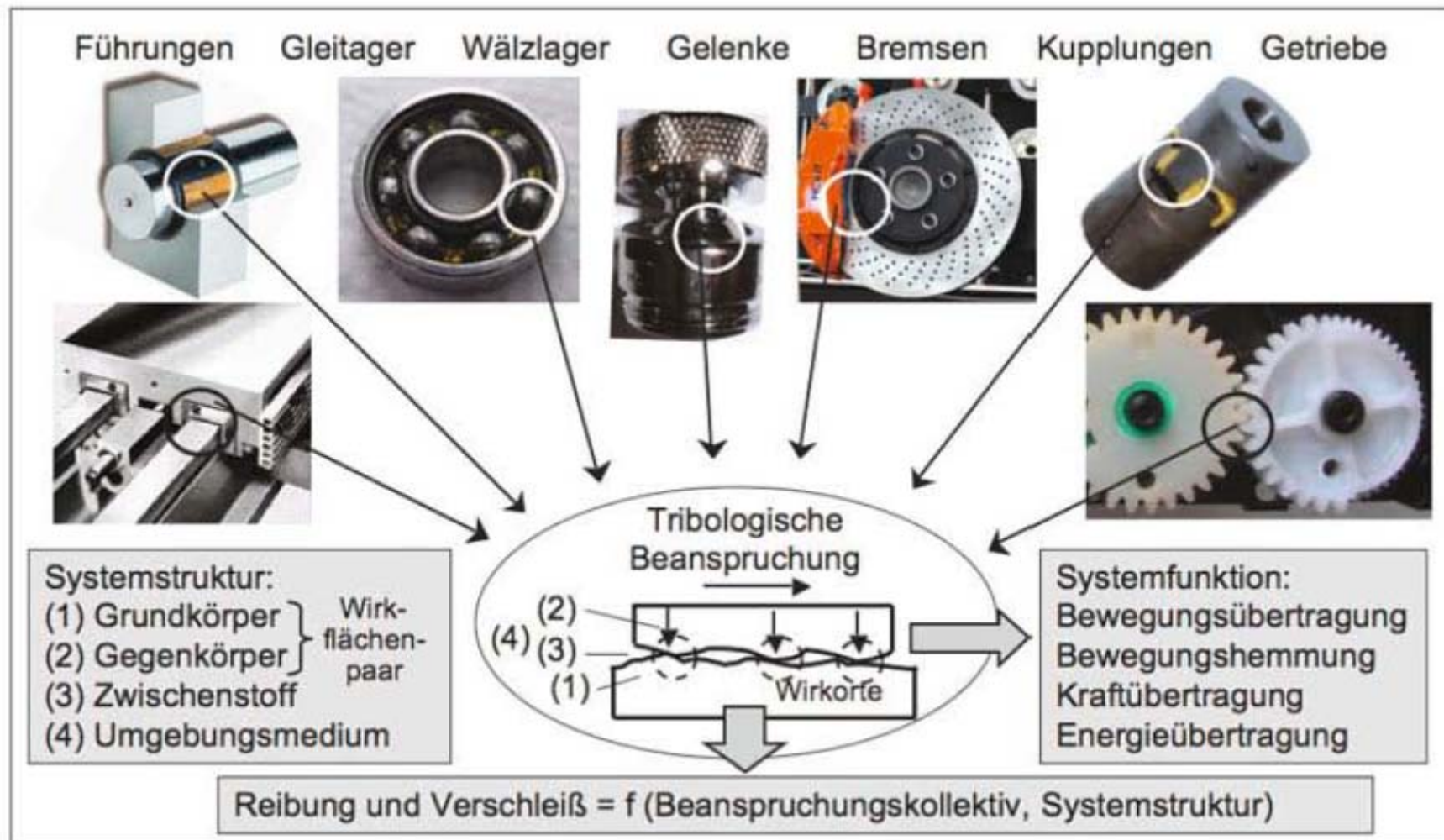
Verschleiß als Schadensursache

Kolbenfresser am Kolbenschaft eines Motors: Spielmangel durch Montagefehler oder Überhitzung



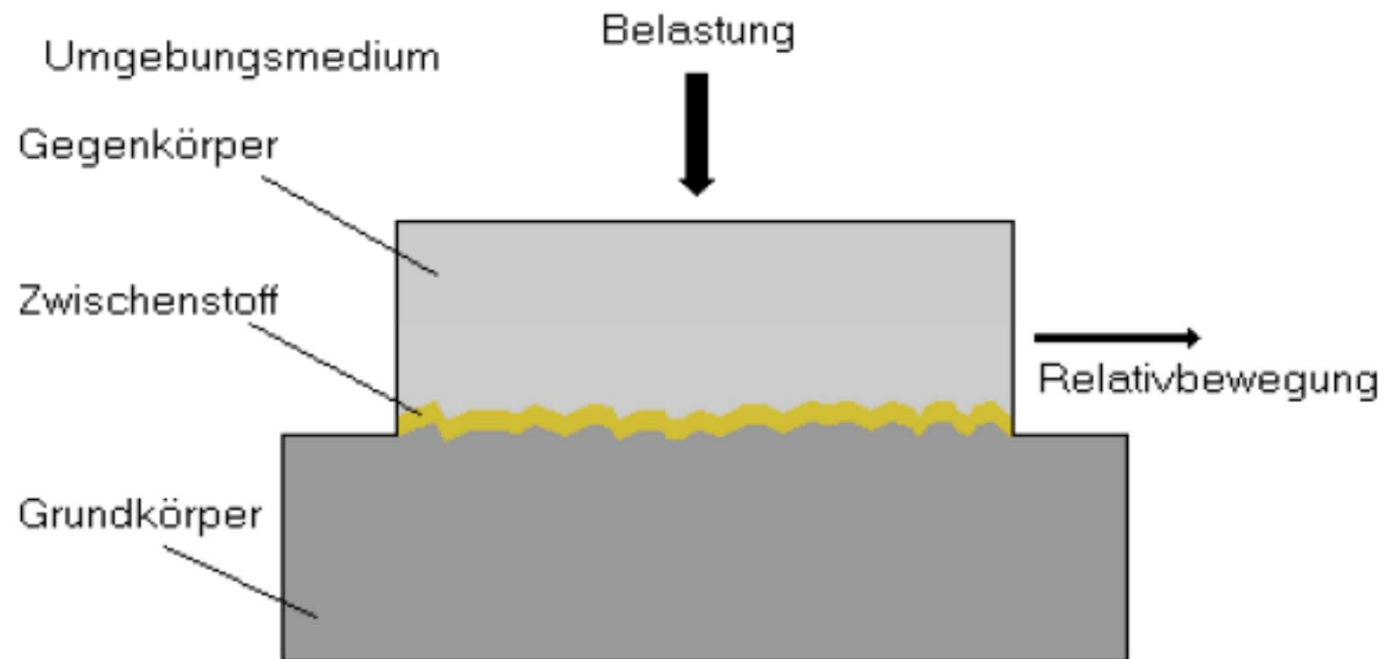
Tribologische Systeme

Beispiele für tribologische Systeme im Maschinenbau-Sektor

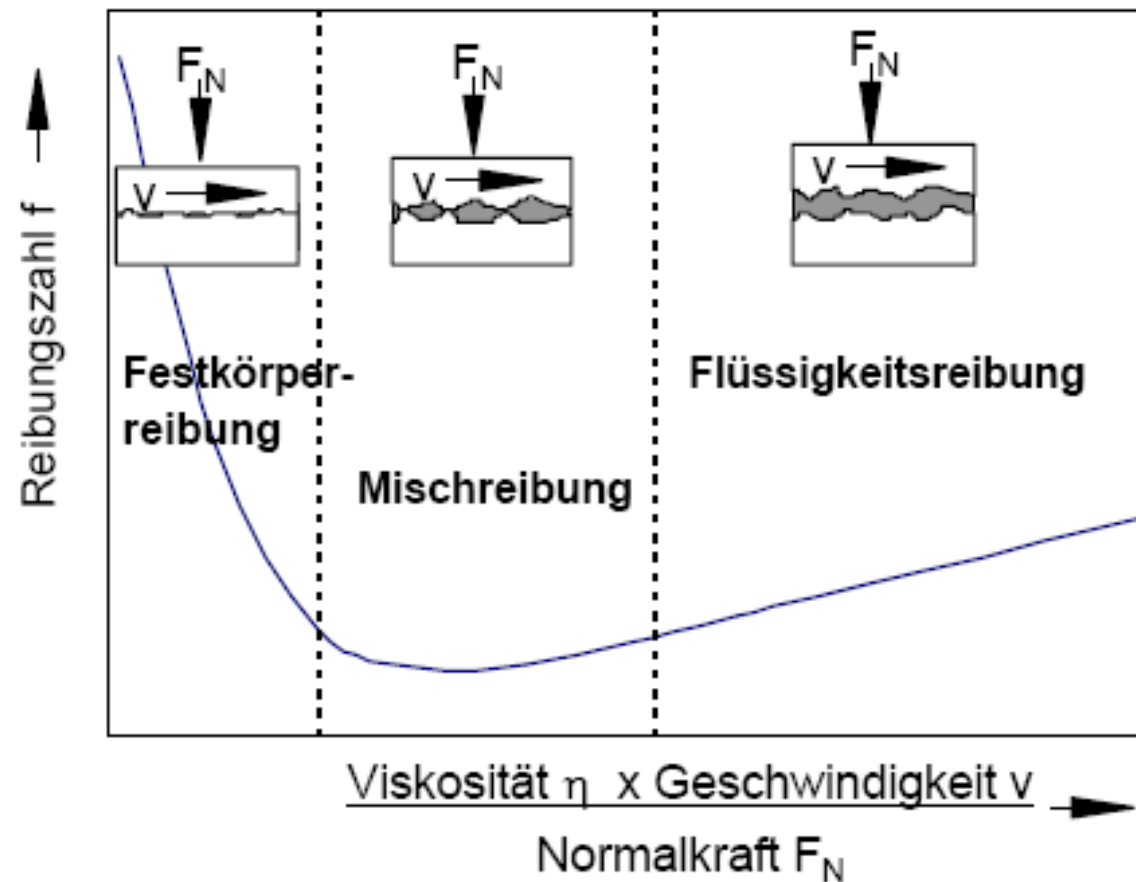




Tribologisches System



Reibung



Reibung

Reibungszahlen für verschiedene Materialpaarungen

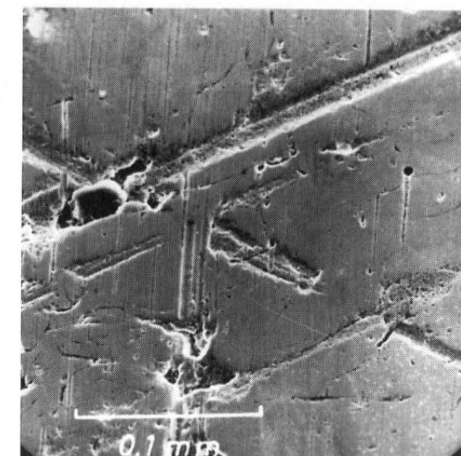
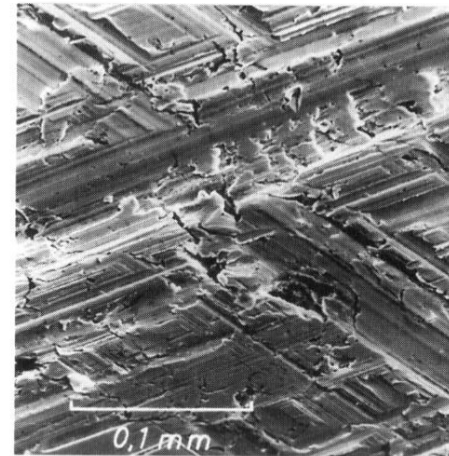
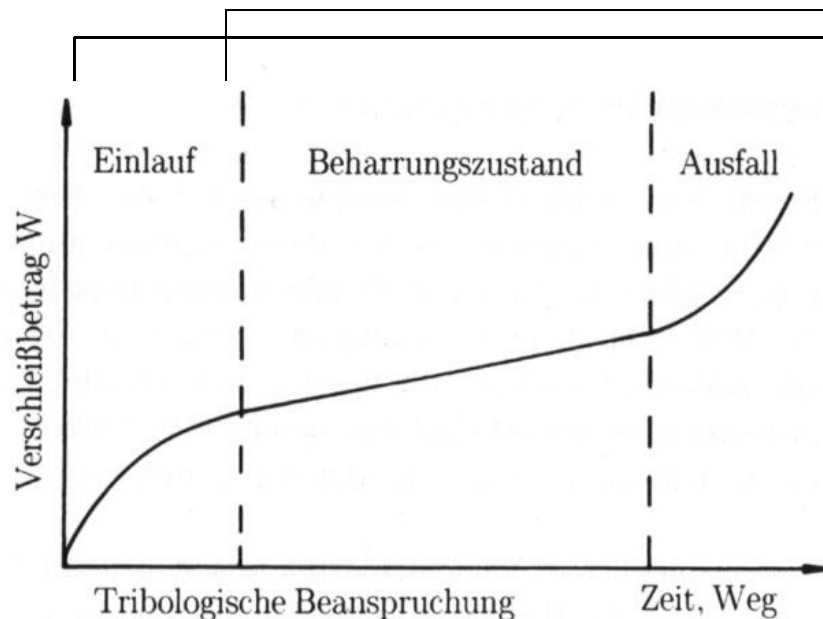
Materialpaarung	Reibungszahl bei		
	Festkörperreibung im Vakuum (10^{-9} bis 10^{-10} Torr)	Festkörperreibung in Luft (feucht)	Grenzreibung (Mineralöl)
Kupfer/Kupfer	> 100	1,0	0,08
NaCl/NaCl	1,3	0,7	0,22
Diamant/Diamant	0,9	0,1	0,05
Saphir/Saphir	0,8	0,2	0,2
Quartz/Quartz	0,7	0,35	0,2
Glas/Glas	0,5	1,0	0,28

Verschleiß

Die Tribologie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung, Schmierung und Verschleiß. Erst beim Auftreten von Verschleiß wird diese Thematik relevant für die Schadensanalyse.

Definition von Verschleiß gemäß DIN 50320:

Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers.



Lauffläche eines GGL-Zylinder aus einem Großdiesel

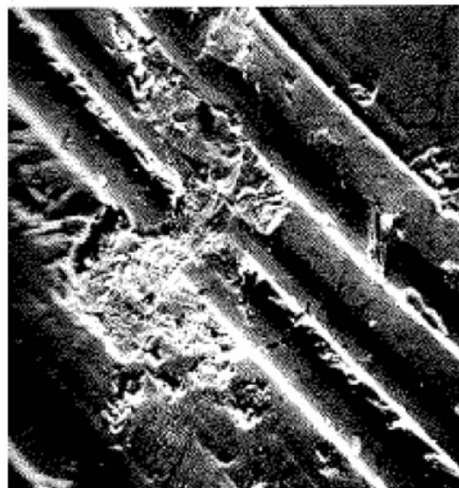
Verschleißmessgrößen

Verschleiß-Messgrößen:		Symbol	Einheit
Direkte Verschleiß-messgrößen	Verschleißbetrag:	W	
	linear (Tiefe)	W_l	m
	volumetrisch	W_V	m³
	Verschleißmasse	W_m	kg
	Verschleißwiderstand	$1/W$	
Bezogene Verschleiß-messgrößen	Verschleißgeschwindigkeit (bei konst. Relativbewegung)	$W_{LV,m/t}$	m/h, m³/h, kg/h
	Verschleiß-Weg-Verhältnis	$W_{LV,m/s}$	m/m, m³/m, kg/m

Verschleiß

Verschleißmechanismen („wie“):

Oberflächenzerrüttung
Abrasion (Mikropflügen, -spanen,
-ermüden, -brechen)
Adhäsion
Tribochemische Reaktion
Materialdissipation



Verschleißform:

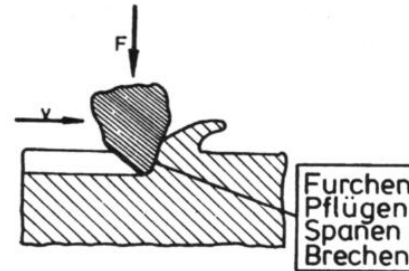
Risse, Grübchen
Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen
Fresser, Löcher, Kuppen,
Schuppen, Materialabtrag
Reaktionsprodukte als Partikel,
Schichten



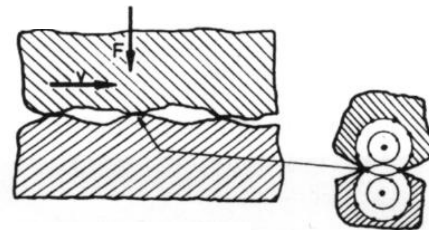
Verschleiß: Einteilung gemäß Mechanismen

Mechanismen

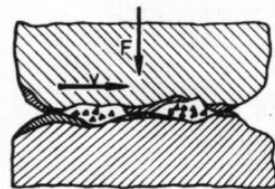
Abrasion



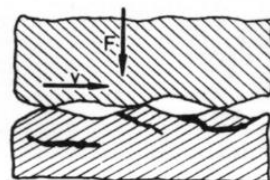
Adhäsion



Tribochemische
Reaktion



Oberflächen-
ermüdung



Verschleißformen

Kratzer, Riefen, Mulden,
Wellen

Materialübertrag;
Kaltpreßschweißung, Fresser,
Schuppen, Kuppen, Löcher

Reaktionsprodukte:
Schichten, Partikel

Zungen (Keile), Risse
(Delamination, Butterflies),
Grübchen (Pittings)

Verschleiß: Einteilung gemäß Mechanismen

Mechanismen

Abrasion:

Materialabtrag durch furchende und ritzende Beanspruchung (Mikrospanen, -furchen, -brechen))

Adhäsion:

Ausbildung von Grenzflächen-Haftverbindungen (z.B. „Kaltverschweißungen“, „Fressen“); Verschleiß tritt durch nachfolgende Trennung der Haftverbindung außerhalb der ursprünglichen Grenzflächen auf, und zwar im angrenzenden Material des Kontaktpartners mit der geringeren Festigkeit (Materialübertrag).

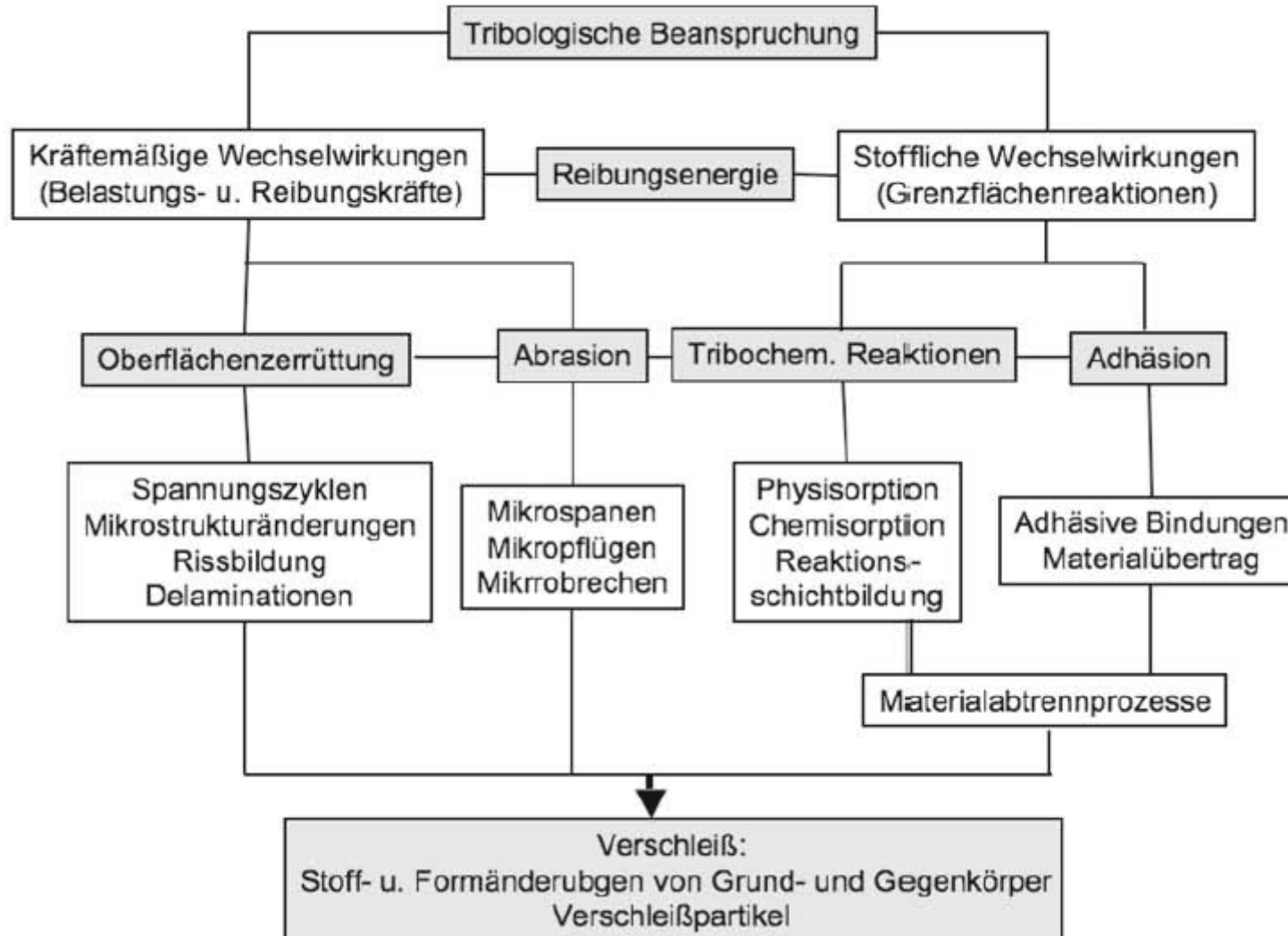
- - Oberflächenzerrüttung:

Ermüdung (Festigkeitsabnahme) und Rissbildung in Oberflächenbereichen durch tribologische Wechselbeanspruchungen, die zu Materialtrennungen und -abtragungen führen (z.B. „Grübchen“)

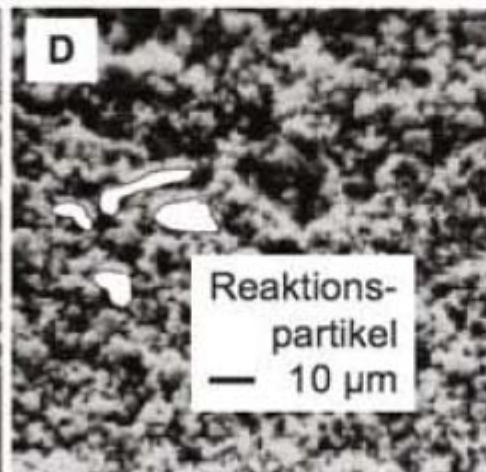
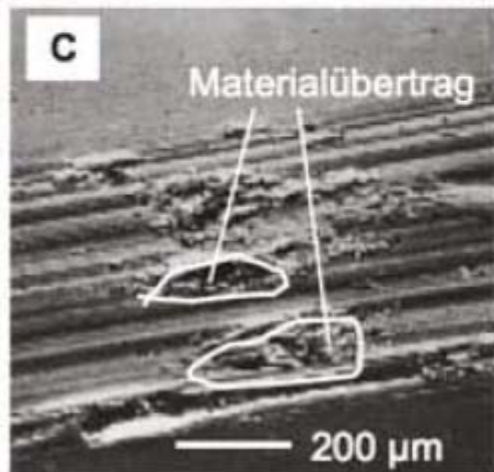
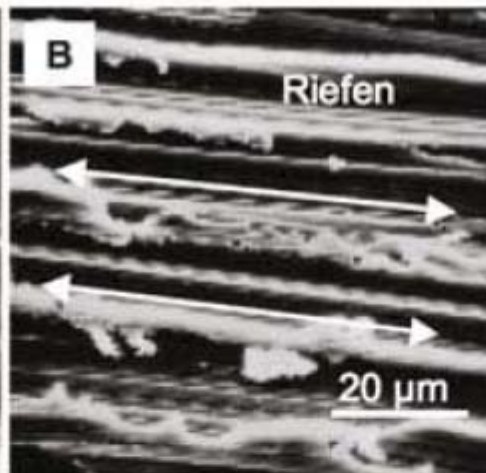
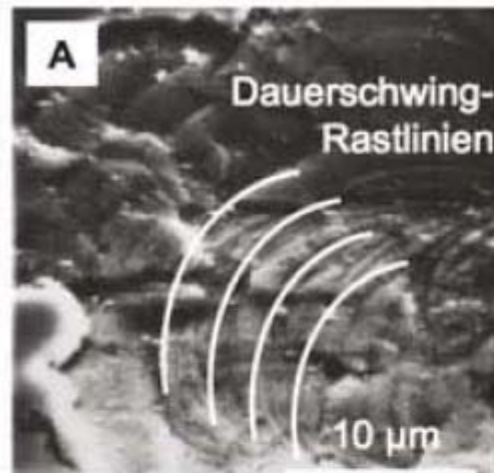
- Tribochemische Reaktionen:

Durch tribologische Beanspruchung aktivierte bzw. geförderte chemische Reaktionen zwischen Grundkörper, Gegenkörper und angrenzenden Medien (Schmierstoff, Umgebungsmedium), die zur Entstehung von Reaktionsschichten bzw. -partikeln führen. Diese weisen häufig vom Grundmaterial verschiedene Abtragungsraten auf.

Verschleiß: Einteilung gemäß Mechanismen



Verschleiß: Einteilung gemäß Mechanismen



Verschleißmechanismen und ihr
Erscheinungsbild:

A Oberflächenzerrüttung

Dauerschwing-Rastlinien, Rissbildung
und Partikelbildung durch tribologische
Ermüdungs-Wechselbeanspruchung

B Abrasion

Riefenbildung und Materialabtrag durch
ritzende Beanspruchung (Mikrospanen,
Mikropflügen, Mikrobrechen)

C Adhäsion

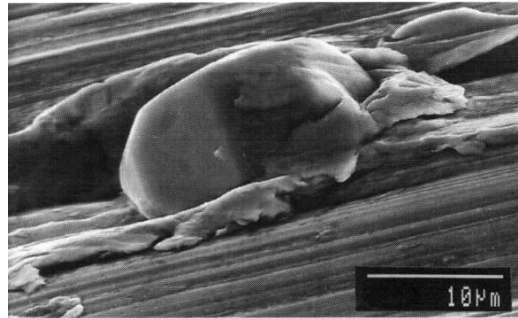
Bildung und Trennung von (atomaren)
Grenzflächen-Haftverbindungen mit
„Kaltverschweißungen“ und
Materialübertrag („Fressen“)

D Triboreaktionen

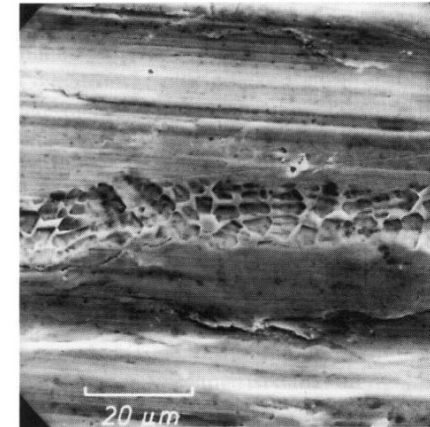
Bildung von Reaktionsprodukten durch
chemische Reaktionen (aktiviert durch
Reibungsenergie) tribologisch
beanspruchter Kontaktpartner

Verschleiß: Einteilung gemäß Mechanismen

Abrasion

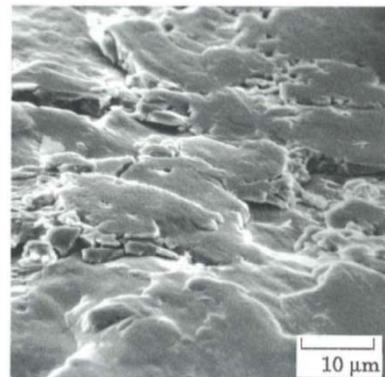


Verschleißfurchen in der Dichtfläche eines Gasventils durch harte, intermetallische Phasen (Fe-Mo) zwischen Ventilküken u. Ventilgehäuse

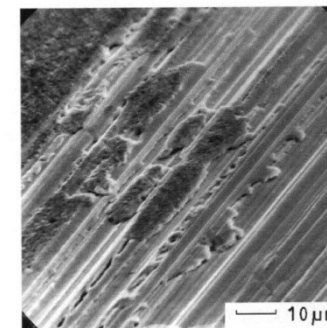


Tire-Track-Muster (Abrollmuster harter Partikel des Zwischenstoffs) auf einer Gleitlager-Oberfläche

Adhäsion



Adhäsion in C45, vergütet, Festkörperreibung in Vakuum

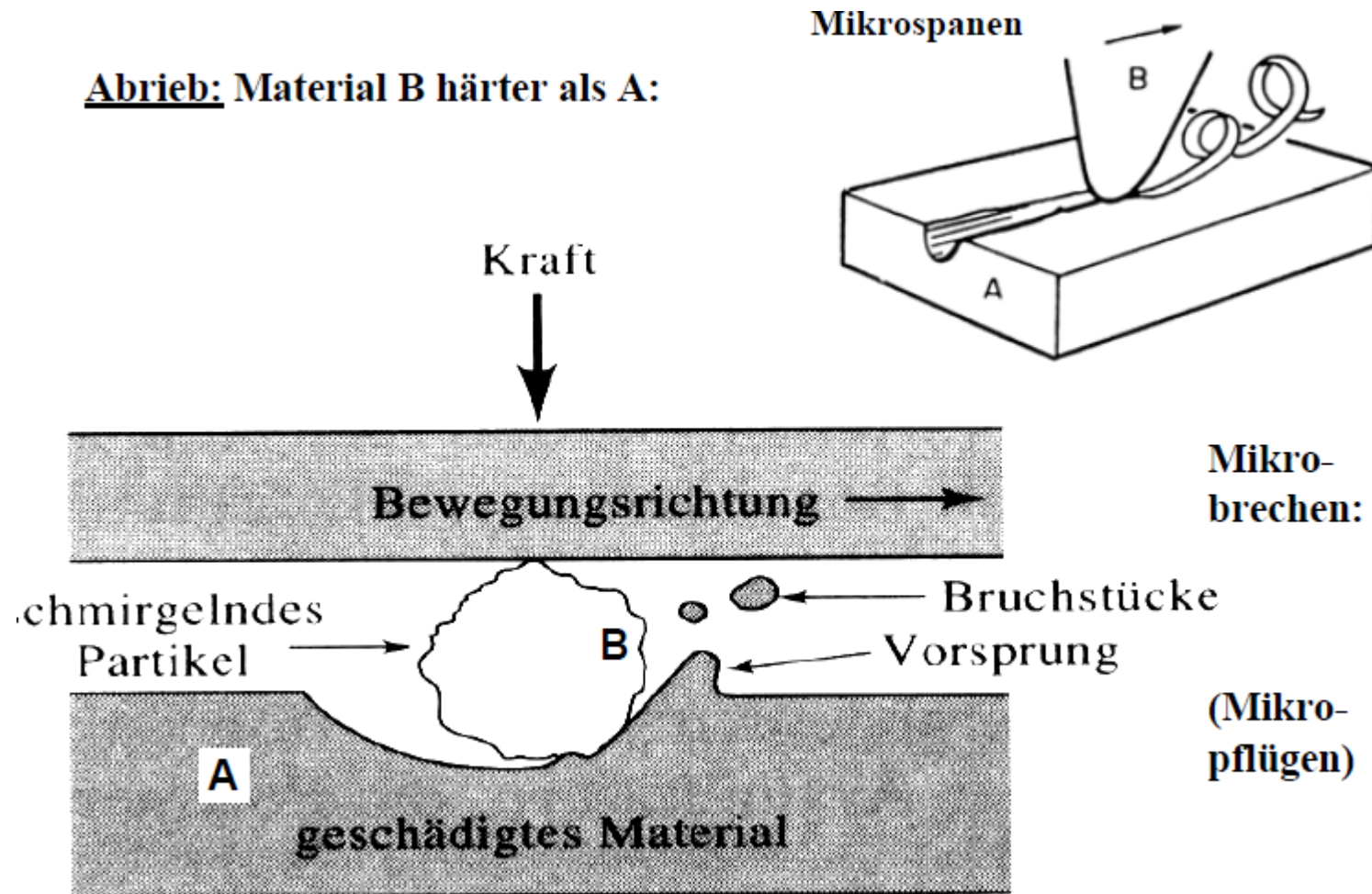


Fehlerhafte Mischreibung zwischen niedriglegiertem Stahl (z.B. Welle) und Bronze (Lager) führt zu Bronzearauftrag auf der Stahlgleitfläche

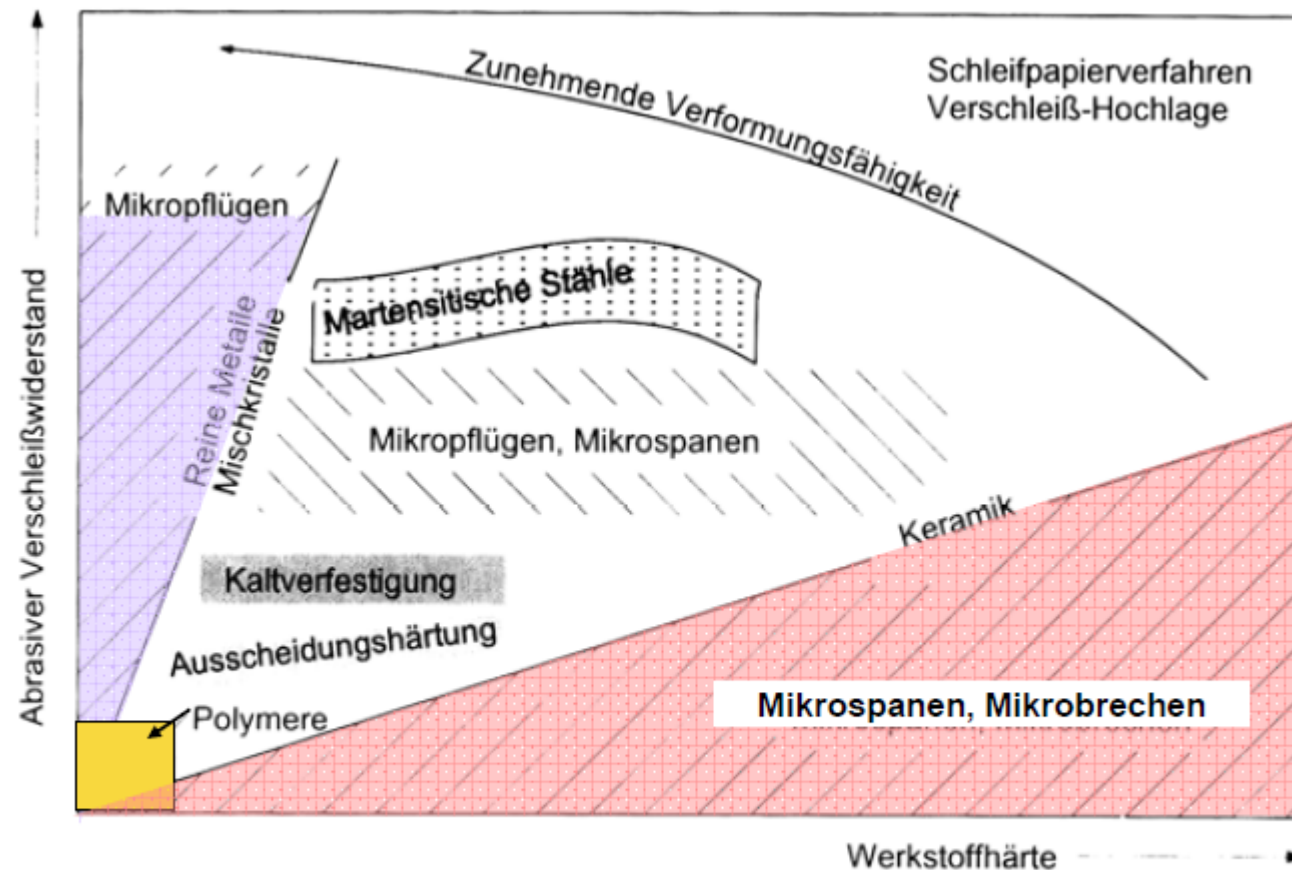
Verschleiß: Einteilung gemäß Mechanismen

Abrasion

Abrieb: Material B härter als A:



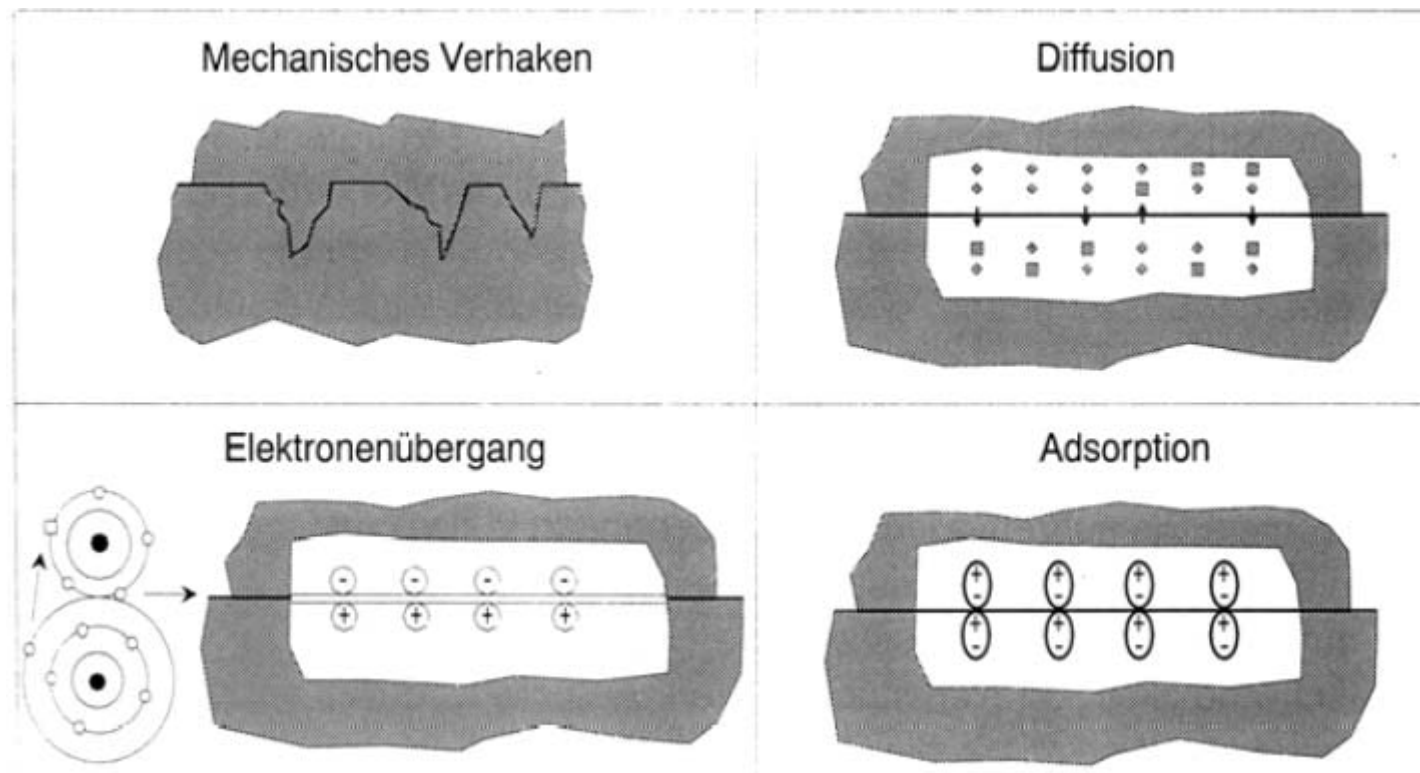
Verschleiß: Einteilung gemäß Mechanismen



Abrasiver Verschleißwiderstand verschiedener Werkstoffe in der Verschleißhochlage als Funktion der Werkstoffhärte (schematisch nach *Zum Gahr*)

Verschleiß: Einteilung gemäß Mechanismen

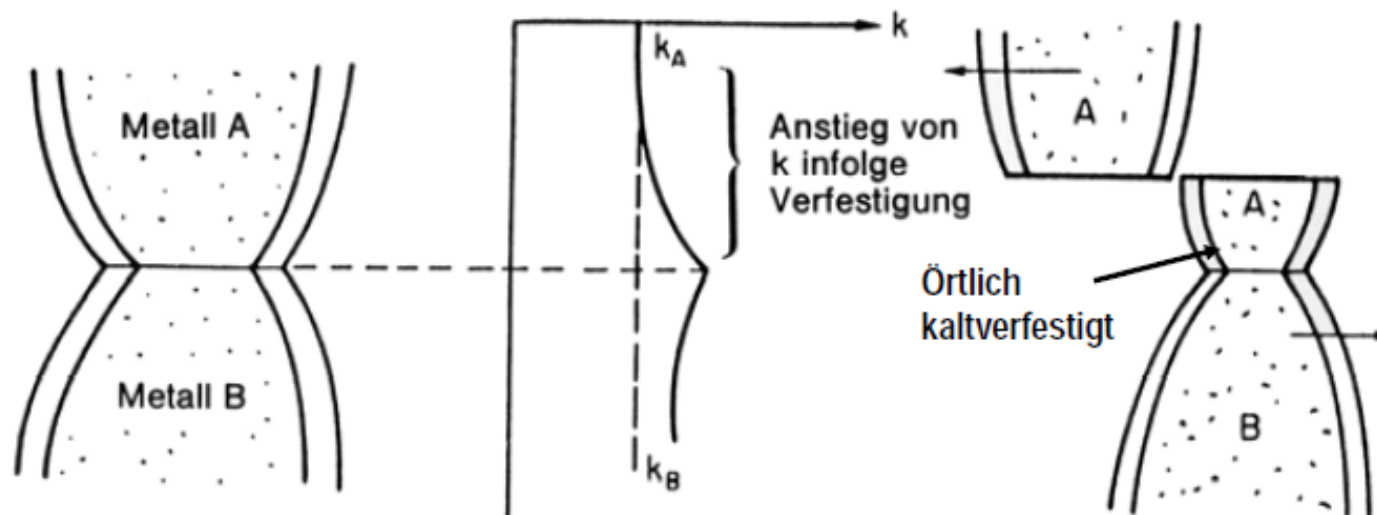
Adhäsion



Verschleiß: Einteilung gemäß Mechanismen

Abrasion

**Örtliches Reibschweißen führt zu Materialtrennung/-übertrag:
führt zu „Fressen“, Löchern, Kuppen, Schuppen**

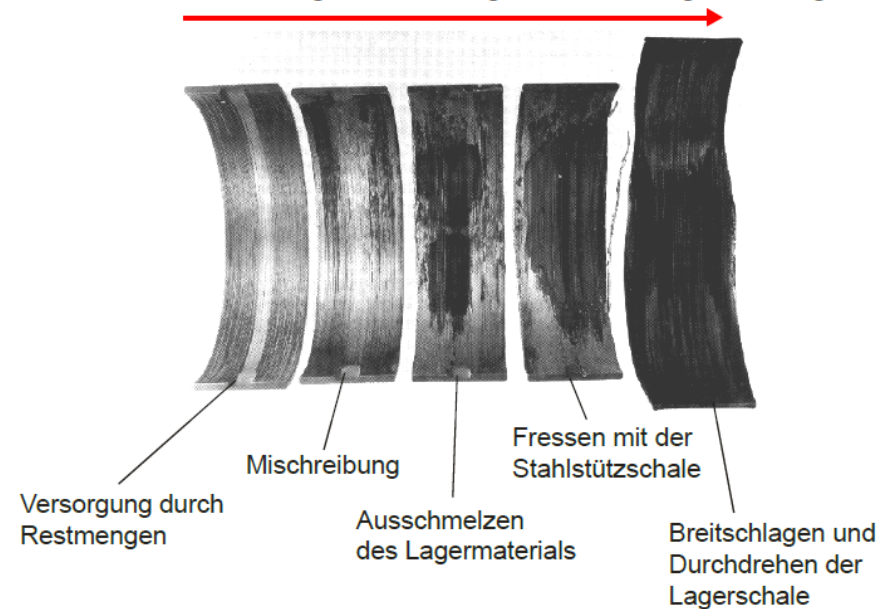


**Artgleiche Werkstoffpaarungen sind in Vakuum (Weltraum)
besonders empfindlich für Adhäsion (Kohäsion)**

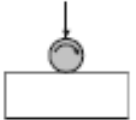
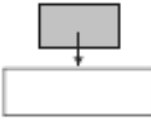
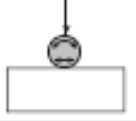
Verschleiß: Einteilung gemäß Verschleißarten

- Gleitverschleiß
- Wälzverschleiß
- Schlagverschleiß
- Fretting (Schwingungsreibverschleiß)
- Strahlverschleiß, Erosionsverschleiß
- Tropfenschlagverschleiß
- Kavitationsverschleiß

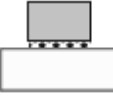
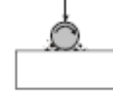
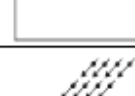
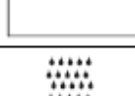
Schadensentwicklung an einer Lagerschale infolge Ölmangels



Verschleiß: Mechanismen & Verschleißarten

Elemente der Systemstruktur	Tribologische Beanspruchung (Symbole)	Verschleißart	Wirksame Mechanismen			
			Adhäsion	Abrasion	Oberflächenzerüttung	Tribochemische Reaktionen
Festkörper (1) Zwischenstoff (3) (Hydrodynamik) Festkörper (2)	Gleiten Rollen Wälzen Prallen, Stoßen 	---			X	X
Festkörper (1) Festkörper (2) (Festkörperreibung, Grenzreibung, Mischreibung)	Gleiten 	Gleitverschleiß	X	X	X	X
	Rollen Wälzen 	Rollverschleiß Wälzverschleiß	X	X	X	X
	Prallen Stoßen 	Prallverschleiß Stoßverschleiß	X	X	X	X
	Oszillieren 	Schwingungsverschleiß	X	X	X	X

Verschleiß: Mechanismen & Verschleißarten

Elemente der Systemstruktur	Tribologische Beanspruchung (Symbole)	Verschleißart	Wirksame Mechanismen			
			Adhäsion	Abrasion	Oberflächenzerüttung	Tribochemische Reaktionen
Festkörper (1) Festkörperpartikel (2)	Gleiten 	Furchungverschleiß, Erosion		X		X
Festkörper (1) Festkörper (2) Festkörperpartikel (3)	Gleiten 	Korngleitverschleiß, Dreikörperverschleiß		X	X	X
	Wälzen 	Kornwälzverschleiß		X	X	X
	Mahlen 	Mahlverschleiß		X	X	X
Festkörper (1) Flüssigkeit mit Partikeln (2)	Strömen 	Spülverschleiß (Erosionsverschleiß)		X	X	X
Festkörper (1) Gas mit Partikeln (2)	Strömen 	Gleitstrahlverschleiß (Erosionsverschleiß)		X	X	X
	Prallen 	Prallstrahl-, Schrägstrahlverschleiß		X	X	X
Festkörper (1) Flüssigkeit oder Gas(2)	Strömen Schwingen 	Werkstoffkavitation, Kavitationserosion			X	X
	Stoßen 	Tropfenschlag			X	X

Verschleiß: Beispiele für Schadensbilder

- Gleitverschleiß: Beim **Gleitverschleiß** haben zwei Körper Kontakt miteinander, indem sie durch eine Gleitbewegung aneinander reiben. Ein Beispiel für diese Gleitbewegung sind die Kolben eines Motors, welche sich im Zylinder auf- und abbewegen.



Bild 258: Übersicht zu den Bildern 259–261. Am Fuß einer Zahnflanke des treibenden Rades trat in einem Streifen durch Überbeanspruchung des Wälzkreises Pittingbildung auf. Die Pittings entstehen durch plastisches Verschieben von Zungen (im Bild von oben nach unten), schieferartige Unterteilung der Zungen durch Gleitpakete und Scherrisse, Ausbreitung von Schwingbrüchen ins Werkstoffinnere und schließlich gewaltsames Abreißen der Zungen. 45:1

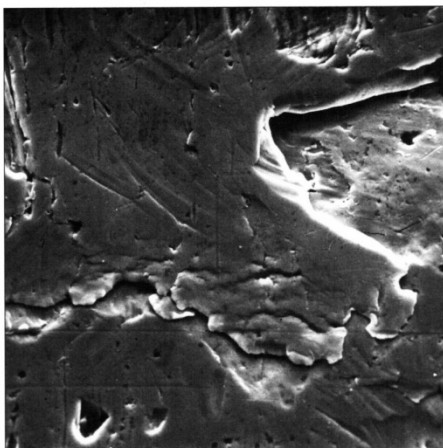


Bild 259: Am Fuß einer Zahnflanke des treibenden Rades bildeten sich flache Verformungszungen, deren Enden abgebrochen sind. Deutlich ist sichtbar, dass die kaltverformten Zungen in das darunterliegende Material eingedrückt werden. Aus der Mulde rechts im Bild kann das ungefährte Profil der Zunge ersehen werden. Der Mittelbereich der Zunge ist etwa 60 µm überschoben und ausgewalzt worden. 100:1

Bild 260: Im unteren Teil dieses Bildes erkennt man die Abdrücke von abgehobenen Zungen. Diese Zungenabdrücke erstrecken sich 40 µm in Gleitrichtung. Weiter oben im Bild liegt sich ein Schwingbruch in die Tiefe. Bemerkenswert ist die mehrschichtige schieferartige Anordnung von Zungen oben links, während oben rechts eine kompakte Gewaltbruchkante vorliegt (vgl. Bild 237). 1000:1

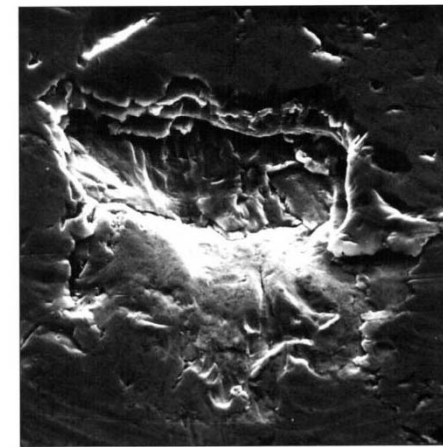
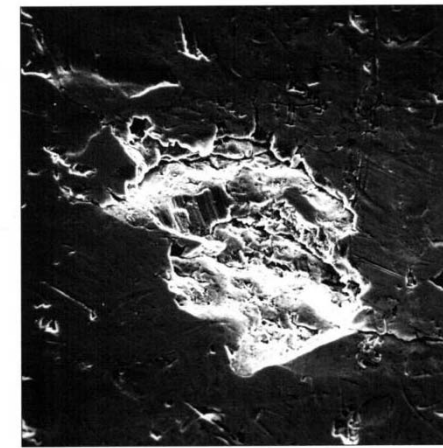


Bild 261: Die tiefsten, mehr zerfurchten Bezirke dieses großen Kraters (Durchmesser etwa 0,1 mm) sind keine Abdrücke von Verformungszungen, sondern verformte Schwingbruchflächen. Aus den Querstreifen im Krater kann abgeleitet werden, dass dieser aus drei schrägen Teilbrüchen entstanden ist. Innerhalb der größten Stufe erkennt man die Wabenstruktur des duktilen Gewaltbruches. 450:1



Verschleiß: Beispiele für Schadensbilder

- Wälzverschleiß: Verschleißart, bei der durch Rollen oder Wälzen von Kontaktpartnern Verschleiß auftritt, wie z.B. bei Kugellagern, bei denen durch die kontraforme Kontaktgeometrie Hertzsche Pressungen auftreten. Hierbei ist die Grübchenbildung (Pitting) die wesentliche Erscheinungsform des Wälzverschleißes.

Bild 270: Abblättern einer 0,1 µm dicken Oberflächenschicht einer Ringeinlage nach $2 \cdot 10^6$ Umdrehungen.
4000:1

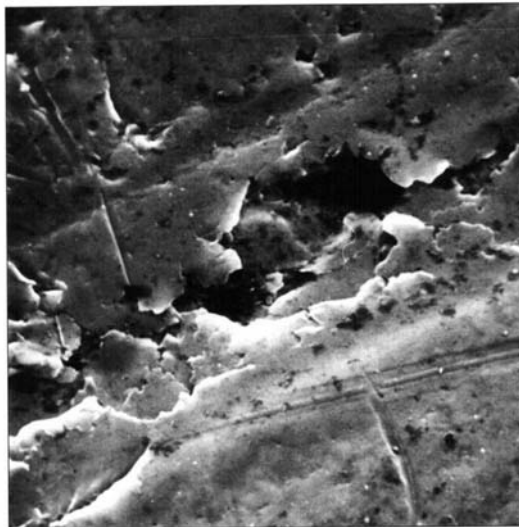
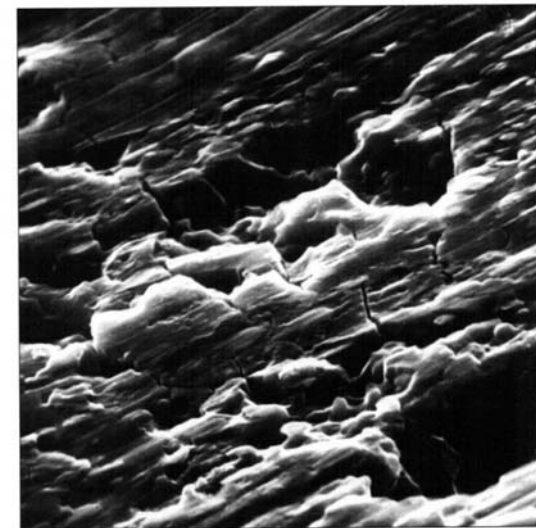


Bild 271: Oberfläche des Innenringes eines Rillenkugellagers nach $2 \cdot 10^6$ Umdrehungen bei 19,2 kN Belastung. Der Schmierfilm wurde durchbrochen, so dass sich die Metallflächen direkt berührten. Der Werkstoff wird in Blöcke von 2 bis 6 µm Durchmesser aufgeteilt an Stellen, an denen die hell erscheinenden Karbide deutliche Verschleißspuren zeigen. Es ist anzunehmen, dass die fest verwurzelten harten Karbide Schwingungen besonders intensiv auf das darunterliegende Gefüge übertragen. Dadurch breiten sich Schwingbrüche aus (vgl. Bild 262).
4000:1



Verschleiß: Beispiele für Schadensbilder

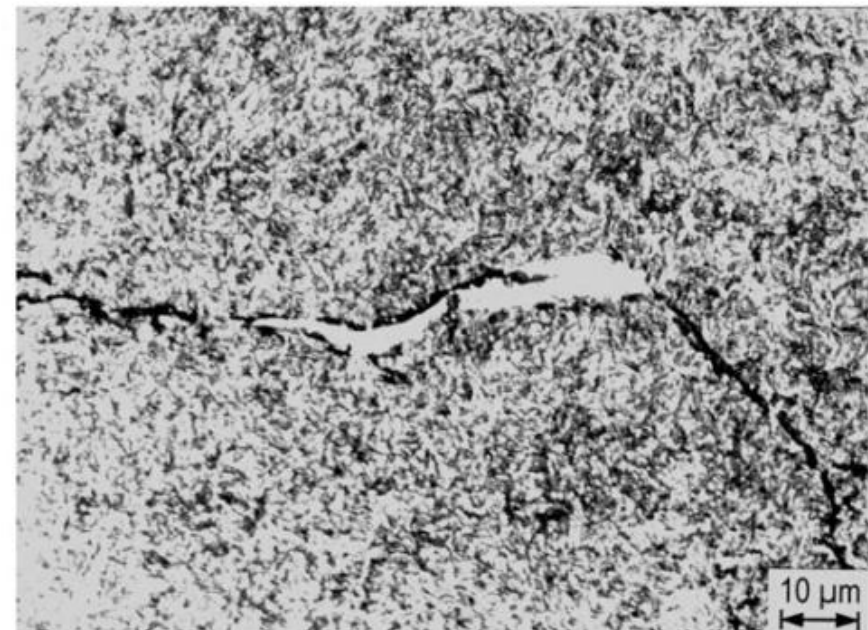
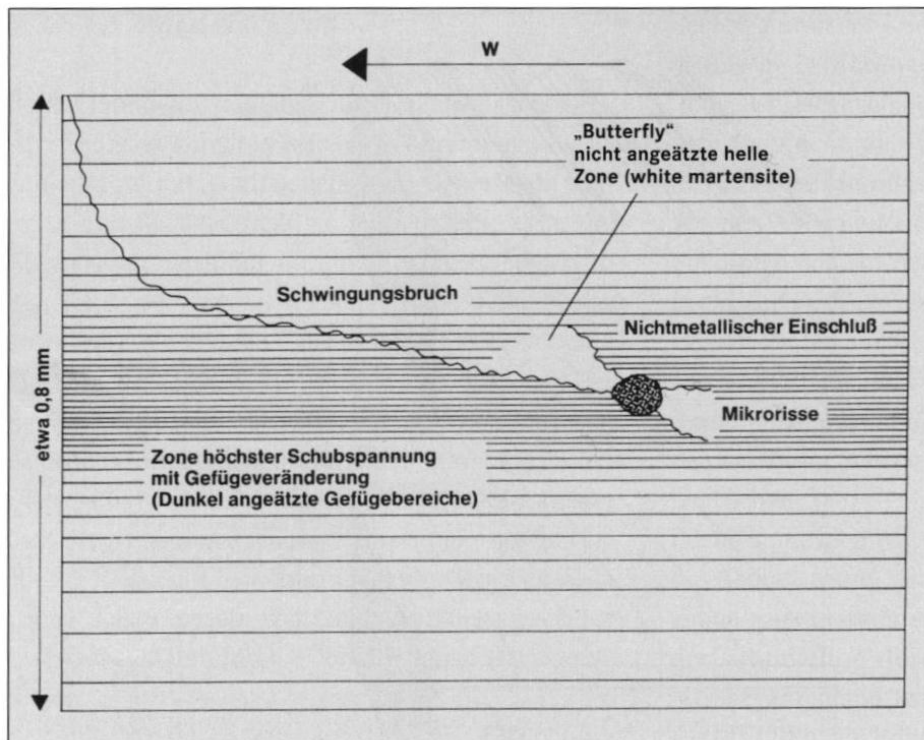
- Wälzverschleiß



Gegenüber den WB liegt den *butterflies* ein anderer Mechanismus zugrunde [211]. Die Wälzbeanspruchung ruft im Bereich der nichtmetallischen Einschlüsse aufgrund des hydrostatischen Druckes und der größten Schubspannung Rissbildung hervor. Dabei erwärmen sich die Rissflanken in sehr kurzer Zeit durch die plastische Verformung bis zur Austenitisierungstemperatur, die zur Karbidauflösung führt. Der in Lösung gegangene Kohlenstoff wird in das Gitter eingelagert. Durch Selbstabschreckung bilden sich extrem feinkörnige martensitische Neuhärtungszonen (*white etching areas, WEA*), die eine höhere Härte aufweisen als die sie umgebende Matrix [138, 211]. Das Gefüge kann mit dem eines durch Austenitformhärten entstandenen Gefüges verglichen werden. Anlasszonen zwischen diesen *WEA* und Matrix

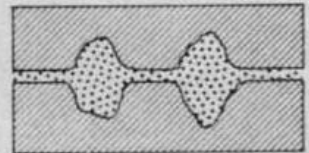
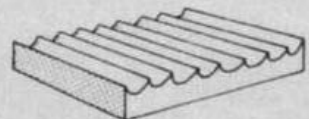
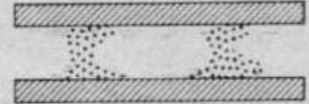
Verschleiß: Beispiele für Schadensbilder

- Wälzverschleiß



Verschleiß: Beispiele für Schadensbilder

- Fretting (Schwingungsreibverschleiß): Ergebnis mehrerer gleichzeitig ablaufender Schadensmechanismen durch oszillierende Relativbewegungen der Kontaktpartner: Entstehung von Verschleißpartikeln durch Abrasion, Schwingbruch u. Materialübertragung.

Nr. Bezeichnung	Kurzdarstellung	Zustand
1 „Graufleckigkeit“ (Mattierung durch Mikrogrübchen), tritt in verschiedenen großen flächenhaften Formen auf		trocken
2 „Welligkeit“ (Ondulations); teilweise metallisch blank, glatt		Öle/Fette
3 „Grübchenbildung“ durch örtliche Anhäufung von Abrieb. Verdichtungszone Plastisches Eindrücken der Anhäufungen in den Werkstoff		trocken, Öle/Fette
4 Aufrauungen in Form regelmäßiger Verwalkungen. Plastische Verformungen u.a. mit Ansammlungen von Abriebpulver, lose.		trocken, Öle/Fette
5 Turmartiges Aufwachsen einzelner stark verfestigter Kontaktpunkte aus pastösem Abrieb		Öle/Fette

Verschleiß: Beispiele für Schadensbilder

- Fretting (Schwingungsreibverschleiß)

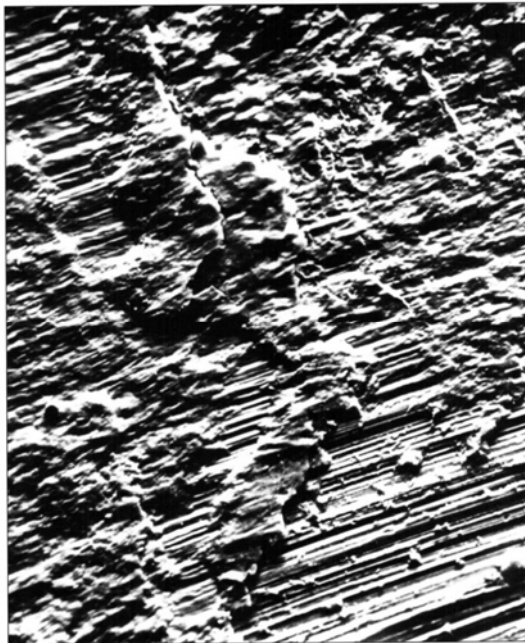
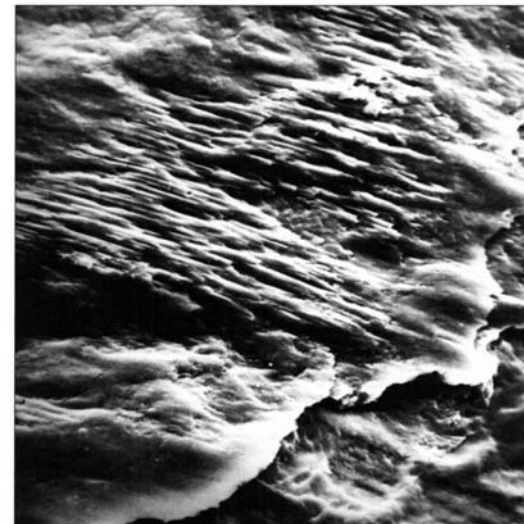
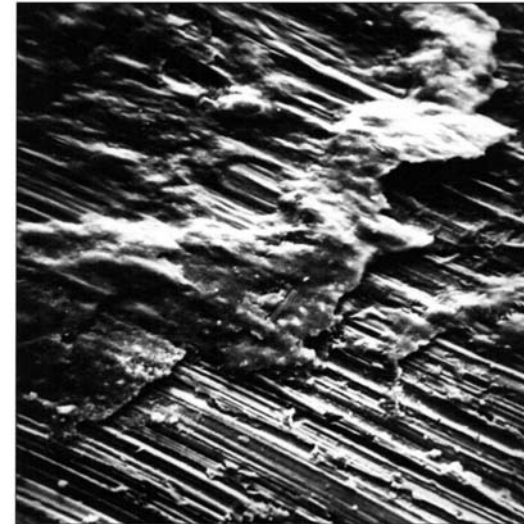


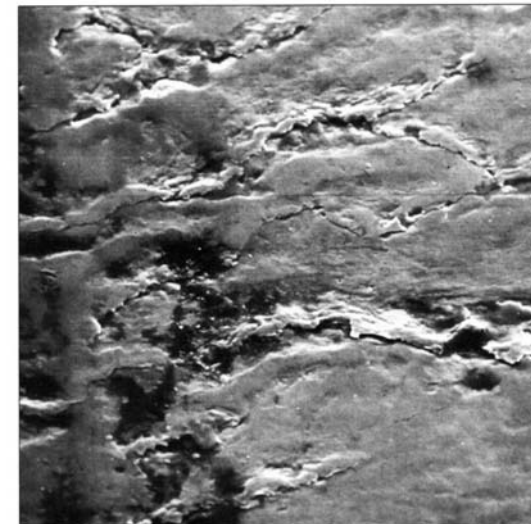
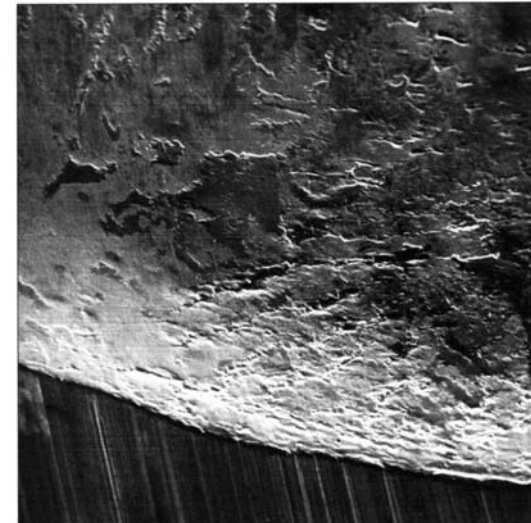
Bild 284, 285, 286: Beim Schwingungsreibverschleiß in einem Stahlring sind die Schichten terrassenartig aufgebaut. In der Oxidationsschicht zeichnet sich rinnenförmig die Bewegungsrichtung ab.
180:1; 480:1; 1000:1



Verschleiß: Beispiele für Schadensbilder

- Fretting (Schwingungsreibverschleiß)

Bild 289, 290: In einem Spurku-
gelager aus 100Cr6 wurde durch
oszillierende Bewegungen Schwin-
gungsreibverschleiß ausgelöst. So-
wohl verbliebene Schichten wie auch
verwalzte Bezirke sind erkennbar.
100x; 500x



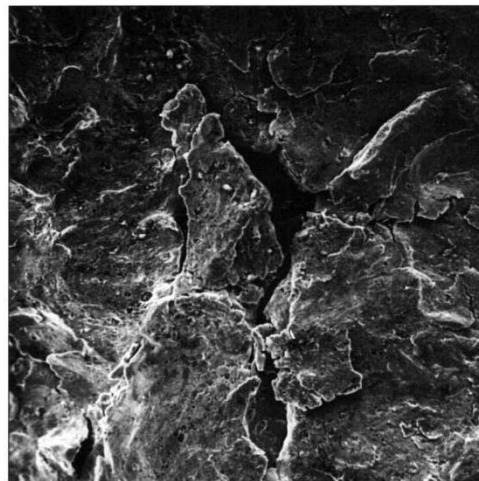
Verschleiß: Beispiele für Schadensbilder

- Erosionsverschleiß: verursacht durch Gas- oder Flüssigkeitsströmung ohne bzw. mit enthaltenen Teilchen.

Bild 300: Kugelgestrahlte Aluminium-
fläche mit Einschlägen von zersplit-
terten alten Glaskugeln. Oben rechts
im Bild leuchtet infolge Aufladung ein
Glossplitter auf.
1000:1



Bild 301: Die Oberfläche eines
Motorpleuels ist durch zu starkes
Sandstrahlen zerklüftet und rissig.
Außerhalb dieser Stelle begann ein
Schwingbruch.
1000:1



- Tropfenschlagverschleiß:

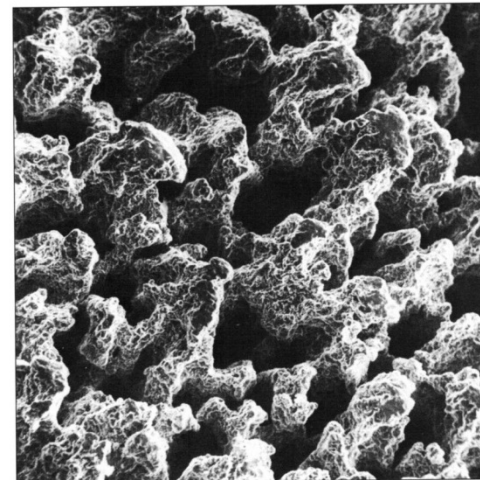


Bild 314: Tropfenschlagerosion an der
Eintrittskante einer Dampfturbinen-
schaufel.
110:1

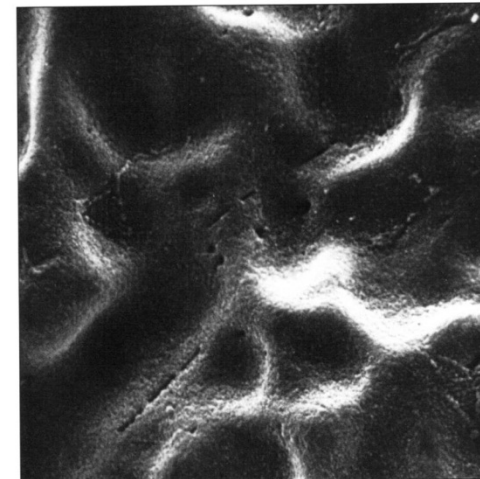


Bild 314 A: Plastische Verformun-
gen und Schwingbrüche sind die
kennzeichnenden Merkmale der
Tropfenschlagerosion im Kratergrund.
2200:1

Verschleiß: Beispiele für Schadensbilder

- Kavitationsverschleiß: wiederholte Beanspruchung von Werkstoffoberflächen durch kurzzeitig wirkende Flüssigkeitsstöße (wird je nach Lehrbuch ebenfalls der Erosion zugeordnet)

Bild 316: An einem Dreistoffflager mit einer PbSnCu-Laufschicht wurde im Labor durch Ultraschall Kavitation erzeugt. Das Anfangsstadium zeigt ausgewaschene Rinnen und Risse, die bevorzugt am Fuße von Warzen auftreten. Die einzelnen kugelförmigen Phasen werden nicht deformiert.
12300:1

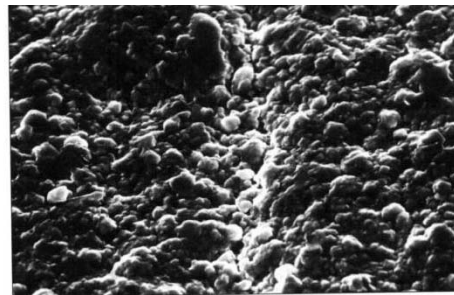


Bild 317: In der im Bild gezeigten Zone wurde die galvanische Laufschicht bis zur Nickelschicht abgetragen. Aus den Linienzügen ist abzuleiten, dass sich die Trennung schwingenbruchartig in der Laufschicht entlang des Nickeldammes ausbreitet. Dieser ist eine Barriere für die Kavitation. Bemerkenswert ist die plastische Umschließung der Muldenränder.
12300:1

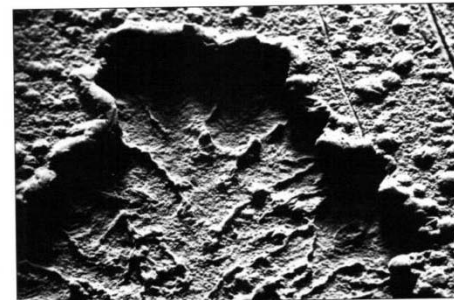


Bild 318: Das Bild zeigt die Ausbreitung der Kavitationsmulde entlang der Nickelschicht. Die Nickelschicht stellt dem Druckstoßen einen Widerstand entgegen, während die weiche Laufschicht an den Rändern der Mulde plastisch verformt wird.
12300:1

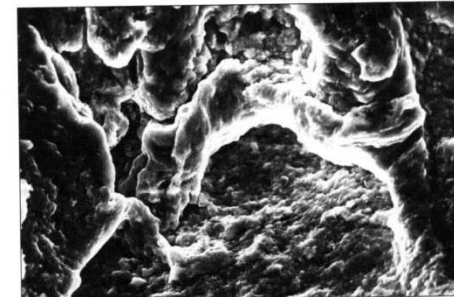


Bild 321: Der im Betrieb entstandene Kavitationsschaden in einer galvanischen Dreistoff-Laufschicht beginnt mit feinen geradlinigen Schwingbrüchen senkrecht zur Laufrichtung.
12300:1

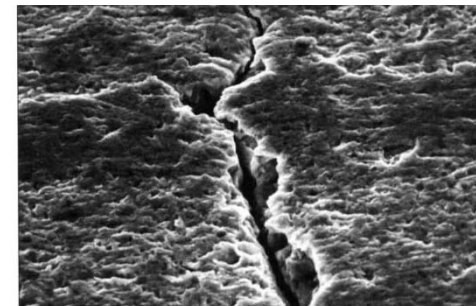


Bild 322: Im Zentrum von zwei Kavitationsmulden in der Pb-Sn-Cu-Laufschicht wurde der Nickeldamm durchbrochen, so dass kleinere Zentralkrater auf die darunterliegende Bleibronze übergriffen.
1230:1

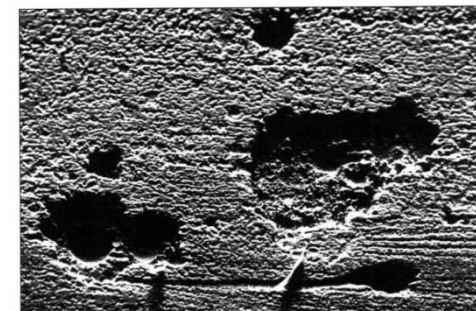
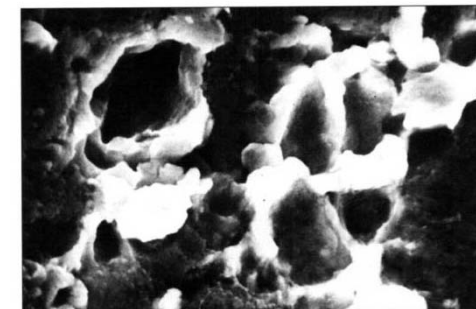
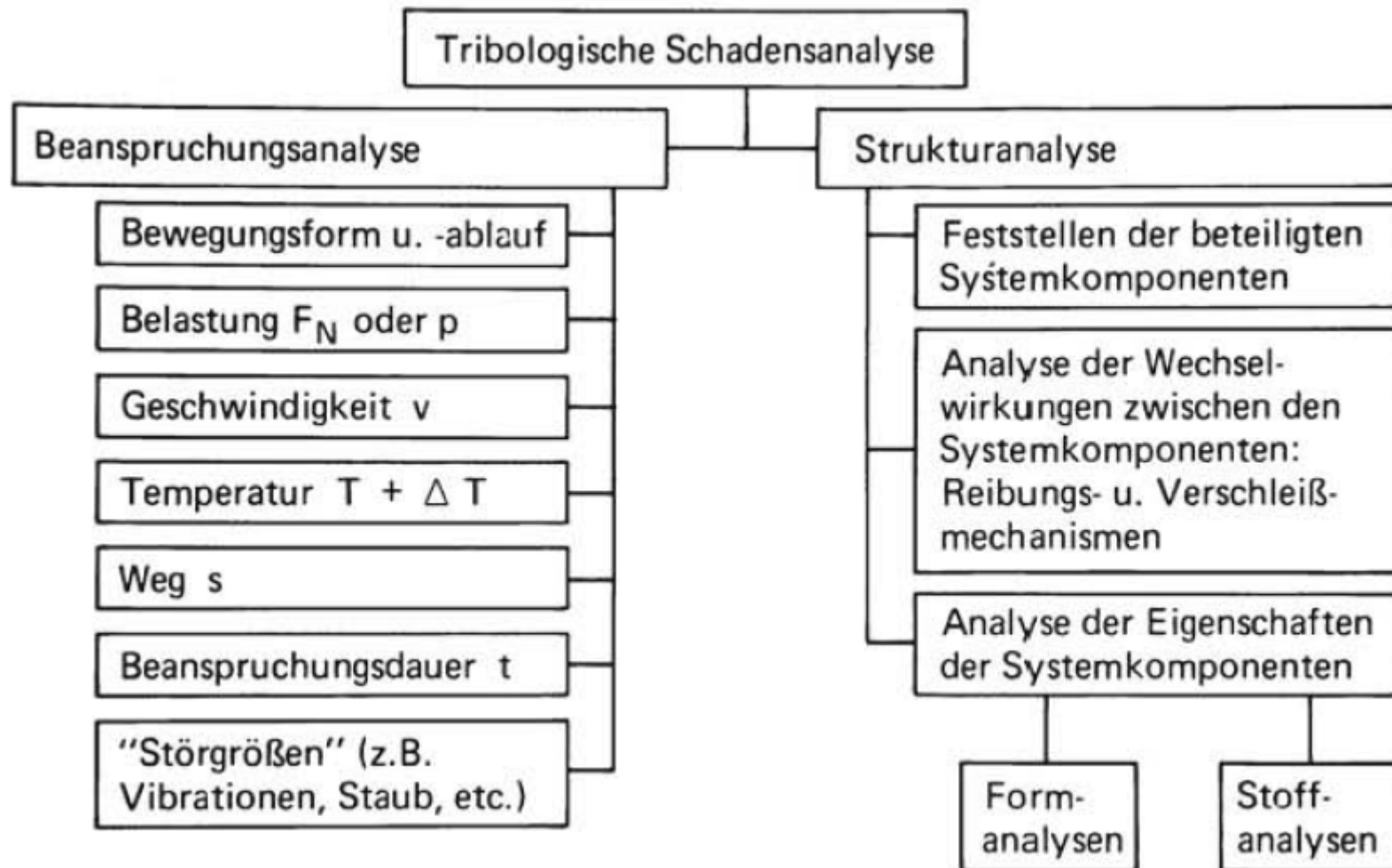


Bild 323: Auch im Betrieb wird im Zentrum der Kavitationsmulden die Nickelschicht durchbrochen. Der durchlöcherichte Nickeldamm sinkt wie ein Netz in die Tiefe. Die weichere darunterliegende Bleibronze quillt durch die Lücken der Nickelhaut heraus, ihre Geste werden abgeschlagen.
12300:1



Methodische Schadensanalyse



Methodische Schadensanalyse: Fallbeispiel

Fallstudie: Schadensanalyse eines Kompressor-Dichtungssystems

In einem chemischen Industriewerk wurde nach Überholungsarbeiten von Altanlagen eine stark verkürzte Funktionsdauer des Dichtungssystems einer Kompressoranlage festgestellt. Hierdurch wurde der gesamte Produktionszyklus gestört.



Problem:

Überhöhter Verschleiß und verkürzte Gebrauchsdauer eines Kolbendichtungssystems

Systemansatz:

Verschleiß = f (Beanspruchungskollektiv; Systemstruktur)

Bearbeitungsmethodik:

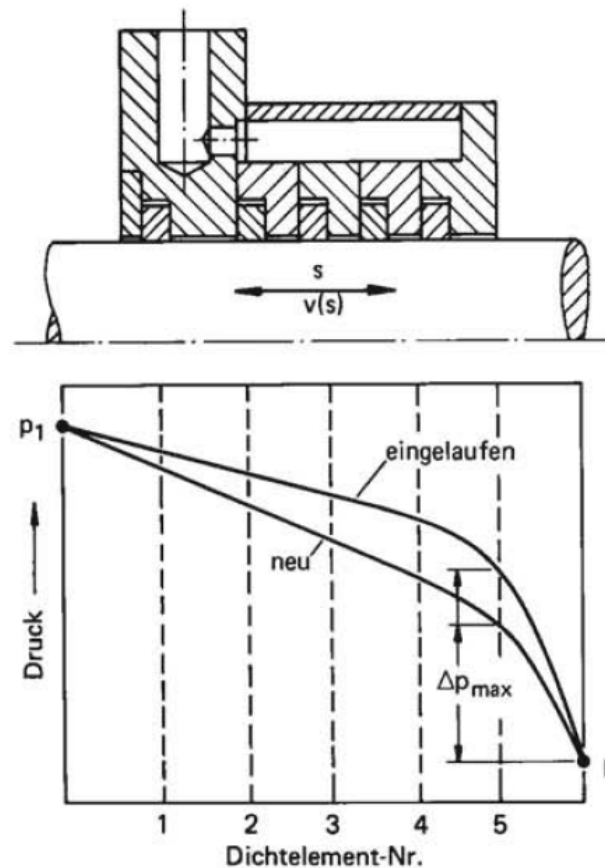
Beanspruchungsanalyse

Strukturanalyse

Methodische Schadensanalyse: Fallbeispiel

Fallstudie: Schadensanalyse eines Kompressor-Dichtungssystems

Die Beanspruchungs-
analyse zeigte, dass
alle Daten im
Toleranzbereich lagen.



Beanspruchungskollektiv

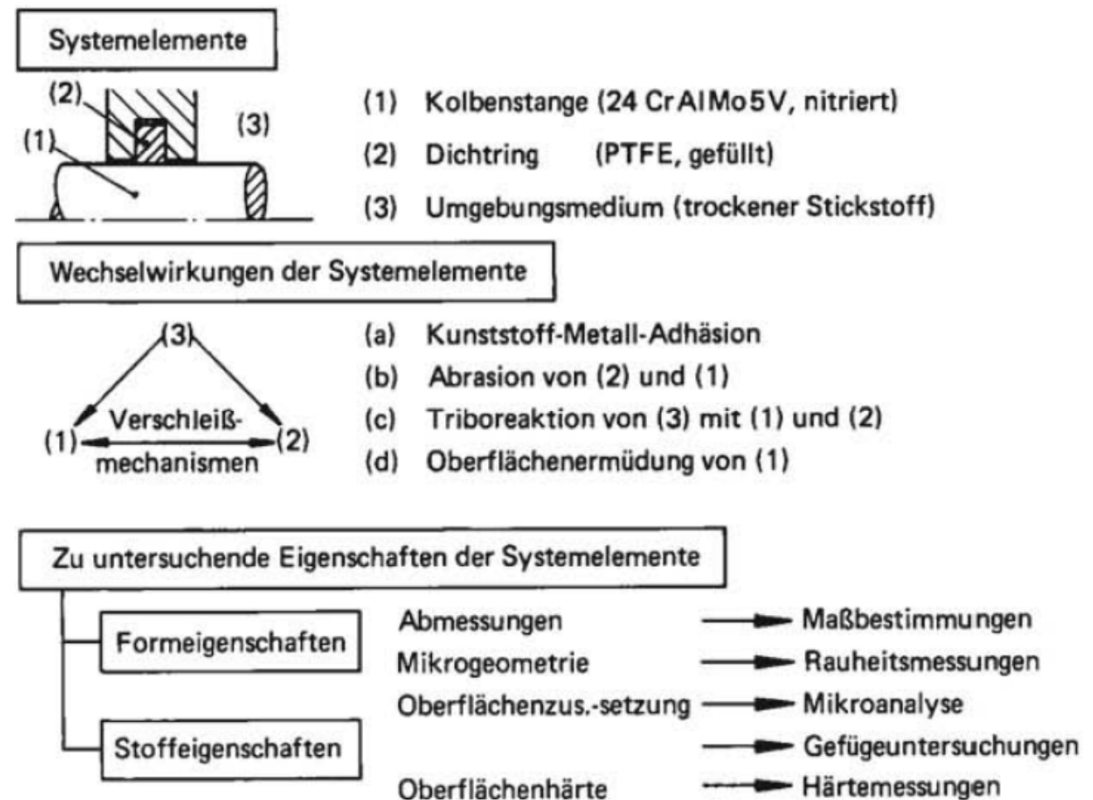
Bewegungsart:	Gleiten
Bewegungsablauf:	Oszillierend, 600 Zyklen/min
Flächenpressung:	$p = 100 - 200 \text{ N/cm}^2$ (s. Diagramm)
Gleitgeschwindigkeit:	$v = 0 - 4 \text{ m/s}$
Gleitweg:	$s = 300 \text{ mm/Zyklus}$
Temperatur:	$T_u = 120 \text{ °C}$

Methodische Schadensanalyse: Fallbeispiel

Fallstudie: Schadensanalyse eines Kompressor-Dichtungssystems

Umfang der Strukturanalyse:

- Festlegung der Systemelemente
- Kennzeichnung ihrer wesentlichen Eigenschaften
- Untersuchung von Verschleißwechselwirkungen
 - Maßbestimmungen
 - Rauheitsmessungen
 - Mikroanalysen
 - Gefügeuntersuchungen
 - Härtemessungen

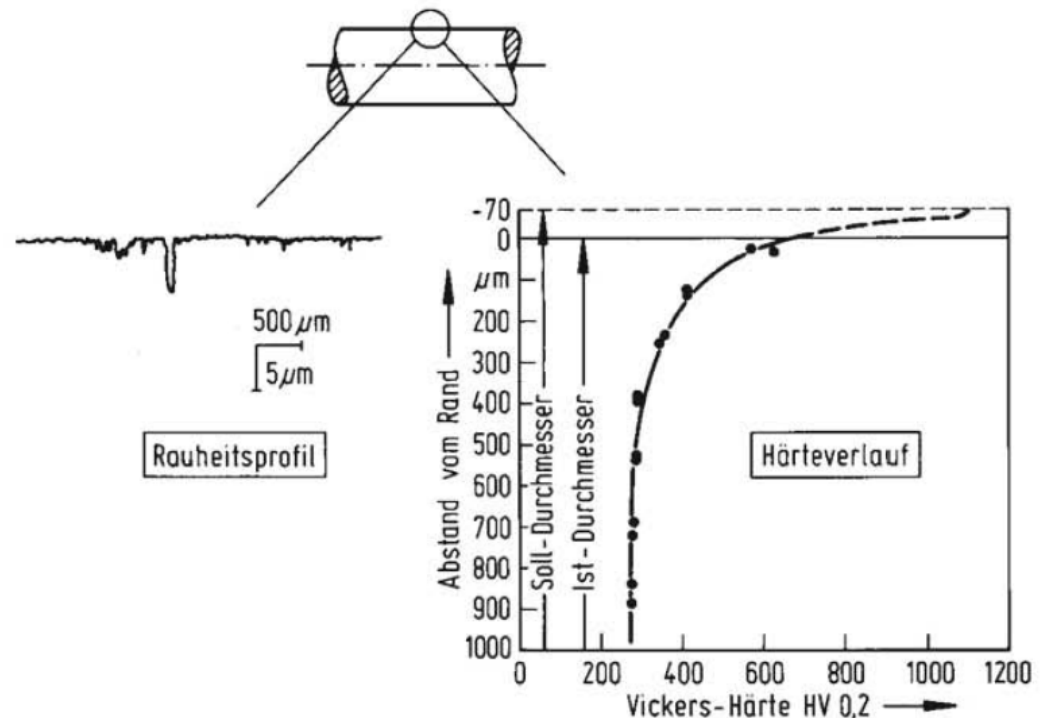


Methodische Schadensanalyse: Fallbeispiel

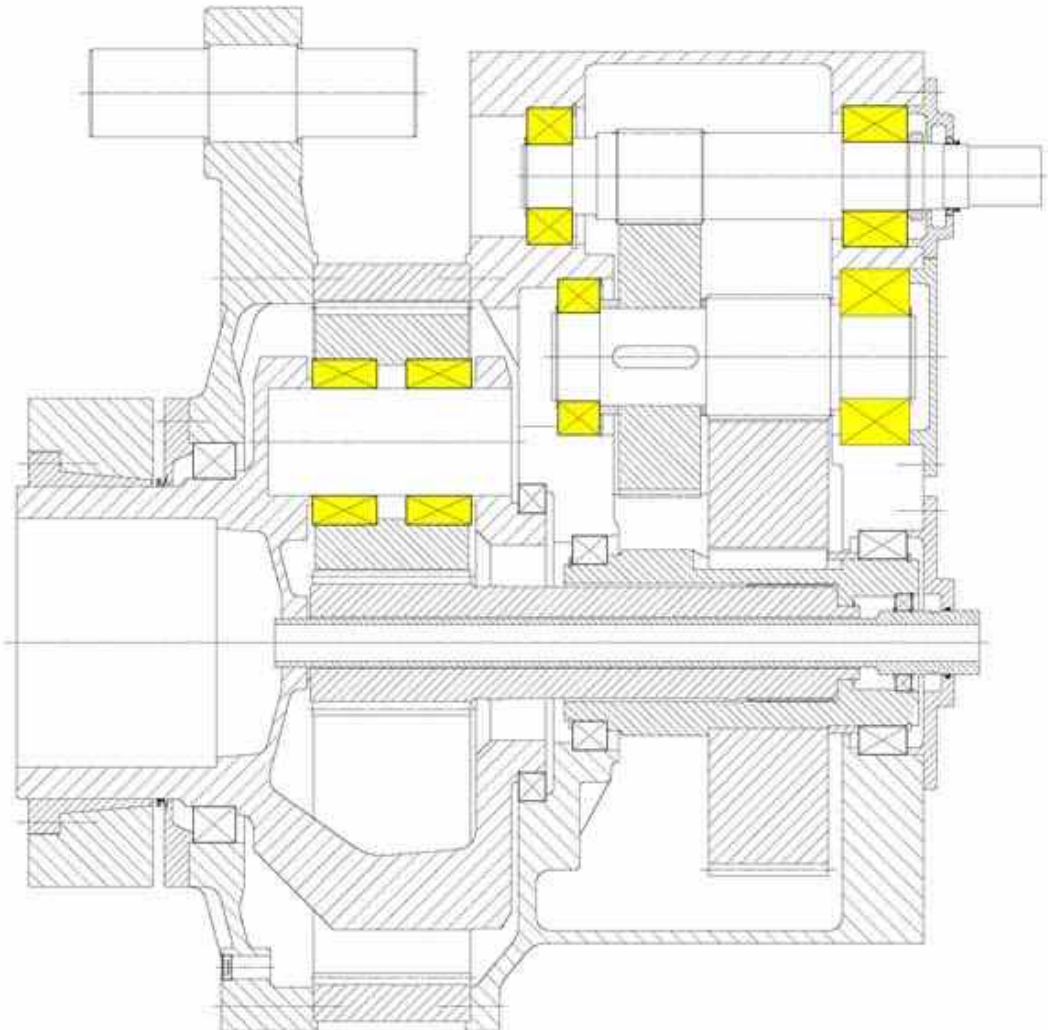
Fallstudie: Schadensanalyse eines Kompressor-Dichtungssystems

Für die Kolbenstange wurden dabei gravierende Abweichungen von den ursprünglich konstruktiv vorgegebenen Daten von Rauheit und Härte, d. h. eine entscheidende Änderung der Soll-Systemstruktur, festgestellt.

Überholungsarbeiten der Kompressoranlage führten zu einer Entfernung der Nitrierschicht beim Nachschleifen der Kolbenstange. Dies wiederum führte zu einer Veränderung der ursprünglichen Oberflächenzusammensetzung, zu einer Erniedrigung der Härte und zu einer Erhöhung der Oberflächenrauheit der Kolbenstange.



Fallbeispiel: Windkraftanlagen



Fallbeispiel: Windkraftanlagen



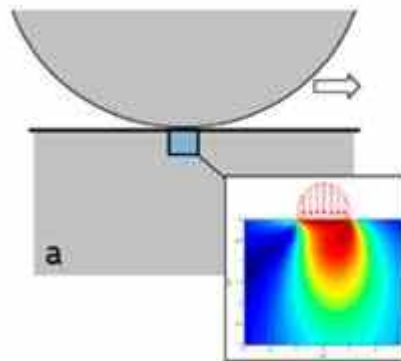
4a



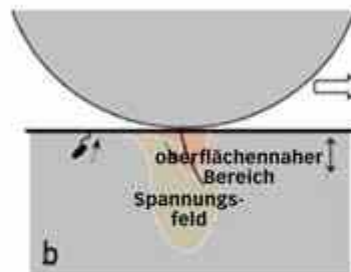
4b



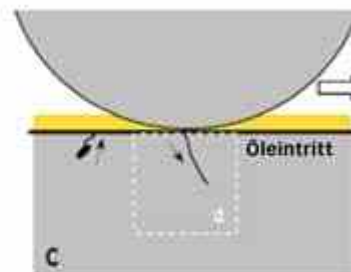
4c



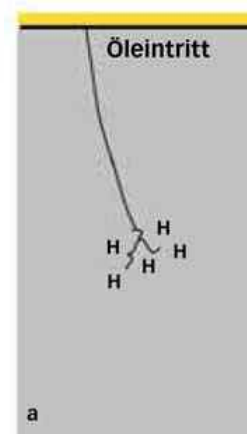
a



b



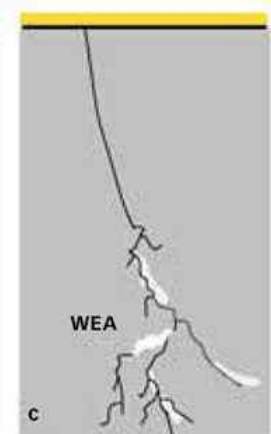
c



a



b



c

Vermeidung von Verschleiß als Schadensursache

- 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

Vermeidung von Verschleiß als Schadensursache

Verschleißbeständige Stähle u. Stahlgussarten

Werkstoff	Beispiele	Anwendung
Vergütungsstahl bzw. Vergütungsstahlguss	34CrNiMo6 42CrMo4 50Mn7	● Schmirgelnder Verschleiß ● Mittlere Schlagbeanspruchung
Höherfeste Stähle bzw. Stahlguss	22NiMoCr5-6 G22NiMoCr5-6	● Schmirgelnder Verschleiß ● Mittlere Schlagbeanspruchung
Legierte Kaltarbeitsstähle	145V33 X38CrMoV5-1 X40CrMoV5-1 X155CrVMo12-1 X165CrMoV12	● Schmirgelnder Verschleiß ● Mittlere Schlagbeanspruchung
Warmarbeitsstähle	56NiCrMoV7	● Schmirgelnder Verschleiß ● Mittlere Schlagbeanspruchung
Schnellarbeitsstähle	HS12-1-4-5 HS10-4-3-10	● Schmirgelnder Verschleiß ● Mittlere Schlagbeanspruchung
Manganhartstähle	X120 Mn12 X110 Mn14 X90 Mn18	● Geringer schmirgelnder Verschleiß ● Hohe Druck- und Schlagbeanspruchung

Maßnahmen zur Verschleißminderung

Abrasion:

Der Verschleiß ist nur dann gering, wenn der tribologisch beanspruchte Werkstoff härter als das angreifende Material ist. Für die Werkstoffauswahl gilt demnach:

- Härte des beanspruchten Körpers mindestens um den Faktor 1,3 größer als die Härte des Gegenkörpers
- Harte Phasen, z.B. Carbide in zäher Matrix
- Wenn das angreifende Material härter als der Werkstoff ist: zäher Werkstoff

Adhäsion:

- Schmierung
- Vermeiden von Überbeanspruchung, welche zum Durchbrechen des Schmierfilms führen
- Verwendung von Schmierstoffen mit EP-Additiven (extreme pressure)
- Vermeidung von Paarung Metall/Metall: besser: Metall/Kunststoff, Keramik/Metall, Kunststoff/Kunststoff, Keramik/Keramik, Kunststoff/Keramik
- Bei metallischen Paarungen: keine kubisch flächenzentrierten Metalle, sondern kubisch raumzentrierte u. hexagonale Metalle, Werkstoffe mit heterogenem Gefüge

Maßnahmen zur Verschleißminderung

Oberflächenzerrüttung:

- Werkstoffe mit hoher Härte und hoher Zähigkeit (Kompromiss)
- Homogene Werkstoffe (Wälzlagerstähle)
- Druckeigenspannungen in den Oberflächenzonen, z.B. durch Aufkohlen oder Nitrieren

Tribochemische Reaktionen:

- Keine Metalle, höchstens Edelmetalle, stattdessen Kunststoffe und keramische Werkstoffe
- Formschlüssige anstelle kraftschlüssige Verbindungen
- Zwischenstoffe und Umgebungsmedium ohne oxidierende Bestandteile
- Hydrodynamische Schmierung

Vermeidung von Verschleiß: Schmierstoffe

Schmieröle

- Mineralöle (unlegierte oder legierte Öle): die meisten Schmierstoffe besitzen Mineralölbasis
- synthetische Flüssigkeiten (unlegierte oder legierte Flüssigkeiten)

Schmierfette

- Fette mit Seifenverdickern (Fette mit Mineralöl oder synthetischen Flüssigkeiten als flüssige Phase mit Schmierwirkung)
- Fette mit Nichtseifenverdickern (Fette mit Mineralöl oder synthetischen Flüssigkeiten als flüssige Phase mit Schmierwirkung)

Festschmierstoffe

- Trockenpulver (z. B. Graphit, MoS_2), weiche Metalle (z. B. Pb, Cu, Au)
- Gleitlacke
- Pasten
- Polymere (z. B. PTFE)

Haftschmierstoffe

- Sprühhaftschmierstoffe mit Festschmierstoffen
- bitumenhaltige Schmierstoffe

Emulsionen

- Öl-in-Wasser-Emulsionen
- Wasser-in-Öl-Emulsionen

sonstige Schmierstoffe

- Flüssigkeiten, wie Wasser, flüssige Metalle, Säuren, Laugen
- Gase, z. B. Luft-Stickstoff, Kohlendioxid, Helium

Einteilung nach
Aggregatzustand
und Konsistenz

Vermeidung von Verschleiß: Schmierstoffe

- Eigenschaftsoptimierung durch Additive möglich:
 - ⇒ Oxidationsinhibitoren (Antioxidantien, Metalldeaktivatoren)
 - ⇒ Detergentien (Verhinderung von Partikelagglomeration)
 - ⇒ Dispersants (Verhinderung des Koagulierens von Schlamnteilchen)
 - ⇒ Hochdruck-Additive (EP-Zusätze: Extreme Pressure)
 - ⇒ Verschleißschutz-Additive
 - ⇒ Reibungsminderer (Friction Modifier, FM)
 - ⇒ Schauminhibitoren (Verhinderung der Schaumbildung: Oxidation)
 - ⇒ Korrosionsinhibitoren (Passivierung der Metalloberfläche)
 - ⇒ Festschmierstoffe (höher belastbare Schmierfilme)
- ⇒ oft Additivpakete (für Motorenöle, Hydrauliköle)

Vermeidung von Verschleiß: Oberflächenschutzschichten

- Mechanische Oberflächenverfestigung
- Randschichthärten
- Randschichtumschmelzen
- Ionenimplantieren
- Thermochemische Verfahren (z.B. Nitrieren)
- Physikalische Abscheidung aus der Gasphase (PVD-Verfahren)
- Chemische Abscheidung aus der Gasphase (CVD-Verfahren)
- Beschichten aus dem ionisierten Zustand (z.B. galvanisch Beschichten)
- Schmelztauchen
- Aufgießen/Aufsintern
- Thermisches Spritzen (z.B. Plasmaspritzen)
- Auftragsschweißen/Schweißplattieren
- Plattieren