

Betrieb und Instandhaltung von Energieanlagen

Beanspruchungen und Schäden

Grundsätzlicher Aufbau der Leistungsbilanz

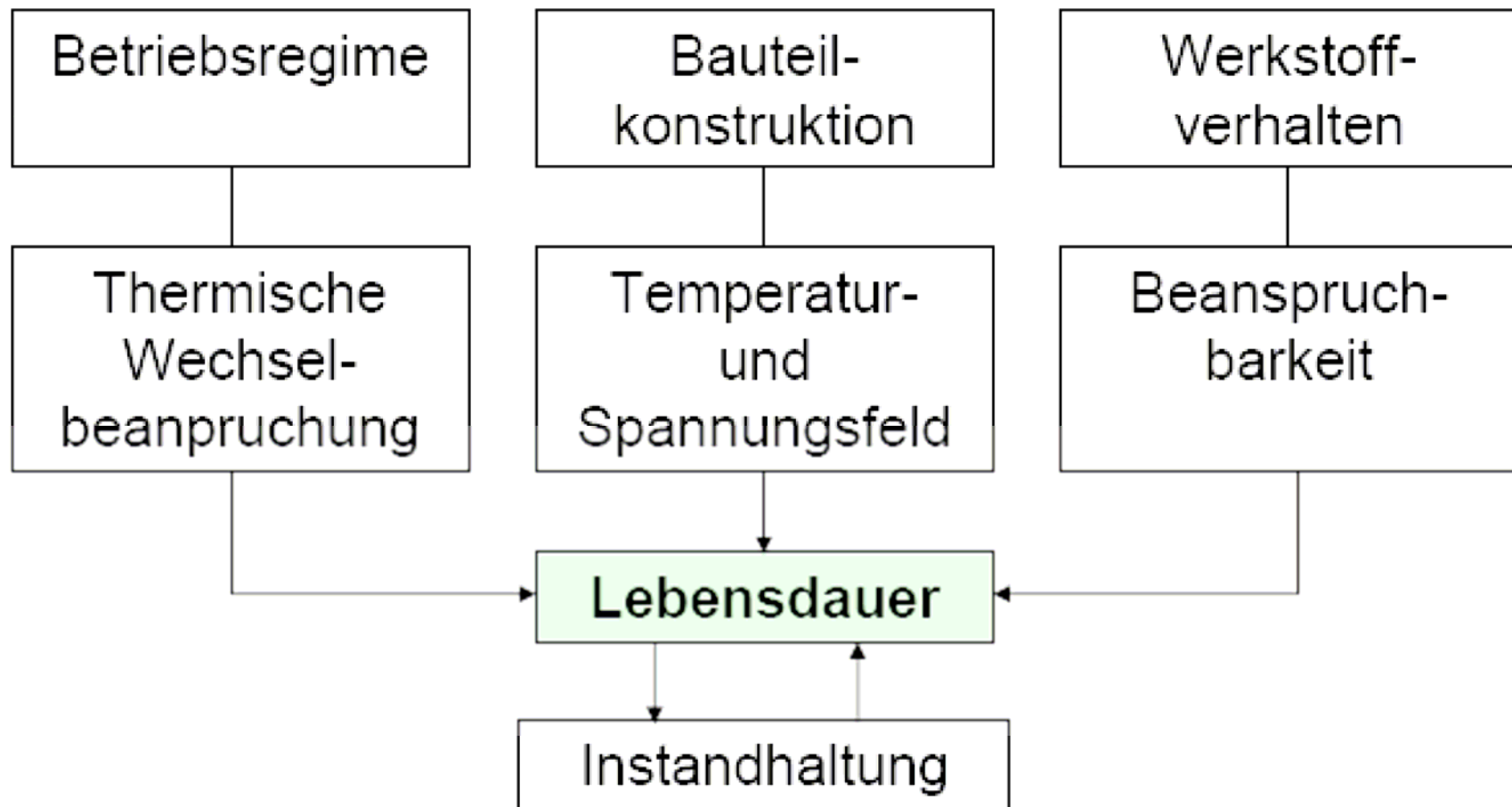
Gesamte Kraftwerksleistung



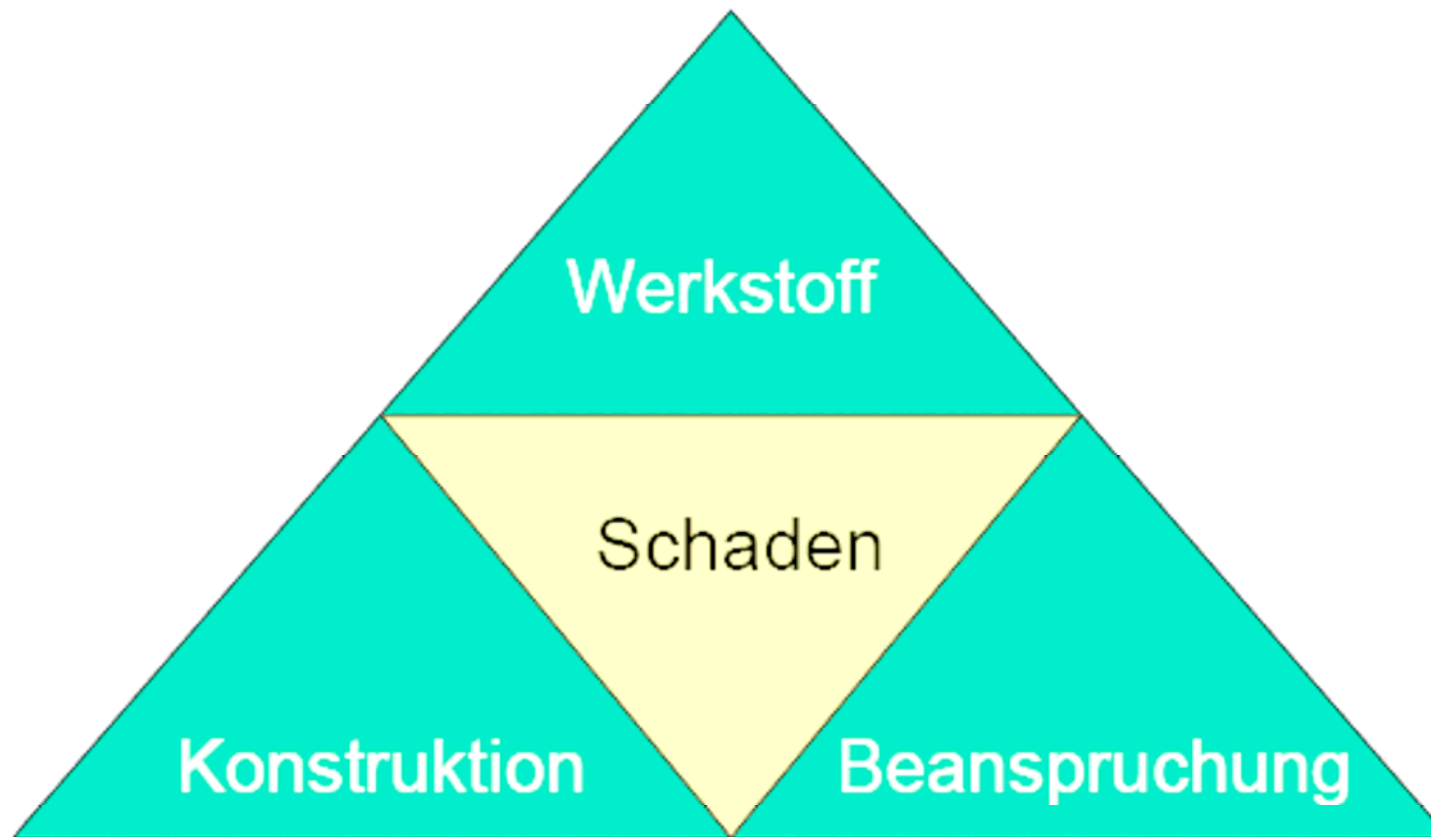
Um die Nutzungsdauer eines (mechanischen) Bauteils zu beurteilen, müssen folgende Fragestellungen einer Bewertung unterzogen werden:

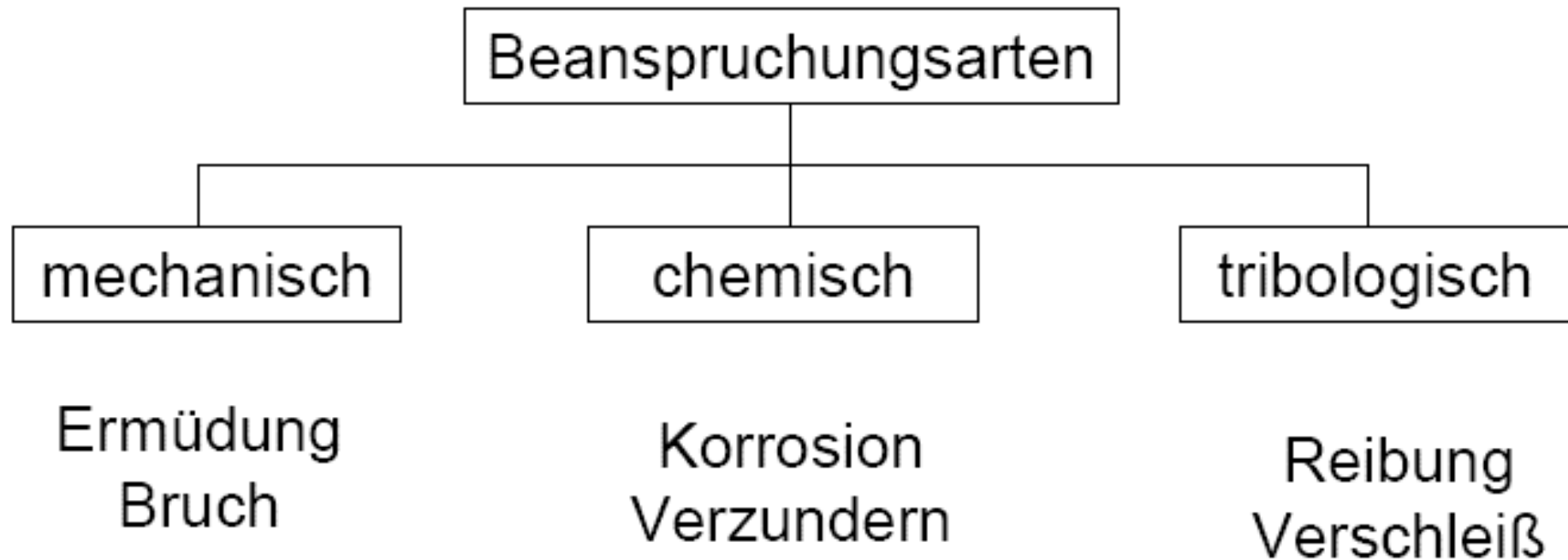
- ▶▶ Welche Schädigungsmechanismen sind für den Werkstoff bei den vorliegenden festigkeitstechnischen, thermohydraulischen und wasserchemischen Einsatzbedingungen relevant?
- ▶▶ Welche Schädigungsrate ist unter den gegebenen Bedingungen für das Bauteil zu erwarten?
- ▶▶ Welche Grenzbedingung wird durch den Schädigungsfortschritt erreicht bzw. unterschritten und limitiert die Lebensdauer des Bauteils?

Komplexe Zusammenhänge der Lebensdauerermittlung von Bauteilen an Gasturbinen



Alle Schäden treten **immer** im Zusammenspiel von Werkstoff, Konstruktion und Beanspruchung auf





- Mechanische Beanspruchung -

Spannungsanalyse

Mechanische Spannungen werden unter anderem nach ihrer Ursache unterschieden:

Last-
spannungen

Eigen-
spannungen

Wärme-
spannungen

Lastspannungen:

Die Werkstoffbeanspruchungen werden durch von außen angreifende Kräfte ("Lasten") verursacht.

z.B. Druck in Kesselteilen, angreifende Kräfte

Eigenspannungen:

Eigenspannungen entstehen durch **innere Kraftwirkungen im Material** - ohne Einwirkung äußerer Kräfte.

Eigenspannungen können beispielsweise durch ungleichmäßiges Abkühlen gegossener Bauteile, durch Schmieden bzw. Schweißen der Bauteile oder durch mechanische Bearbeitungsvorgänge entstehen.

Wärmespannungen:

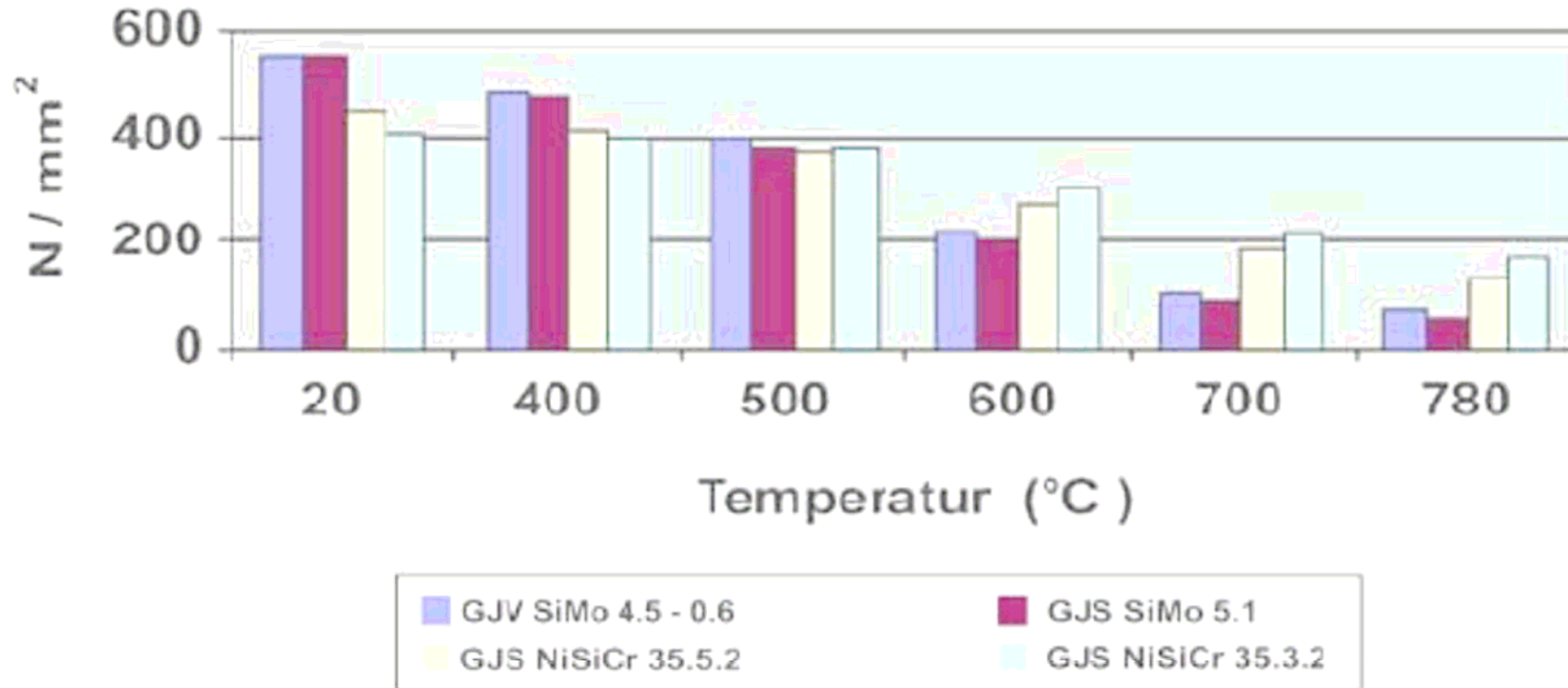
Wärmespannungen entstehen in Bauteilen oder Systemen, in welchen Teile mit **unterschiedlichen Wärme-Ausdehnungskoeffizienten** zum Einsatz kommen, beziehungsweise immer dann, wenn die freie Wärmedehnung von Bauteilen behindert wird sowie bei ungleichmäßiger Erwärmung.

Die Wärmespannung wird durch folgende Beziehung gekennzeichnet:

$$\sigma_{th} = \alpha \frac{E \Delta T S}{1-n}$$

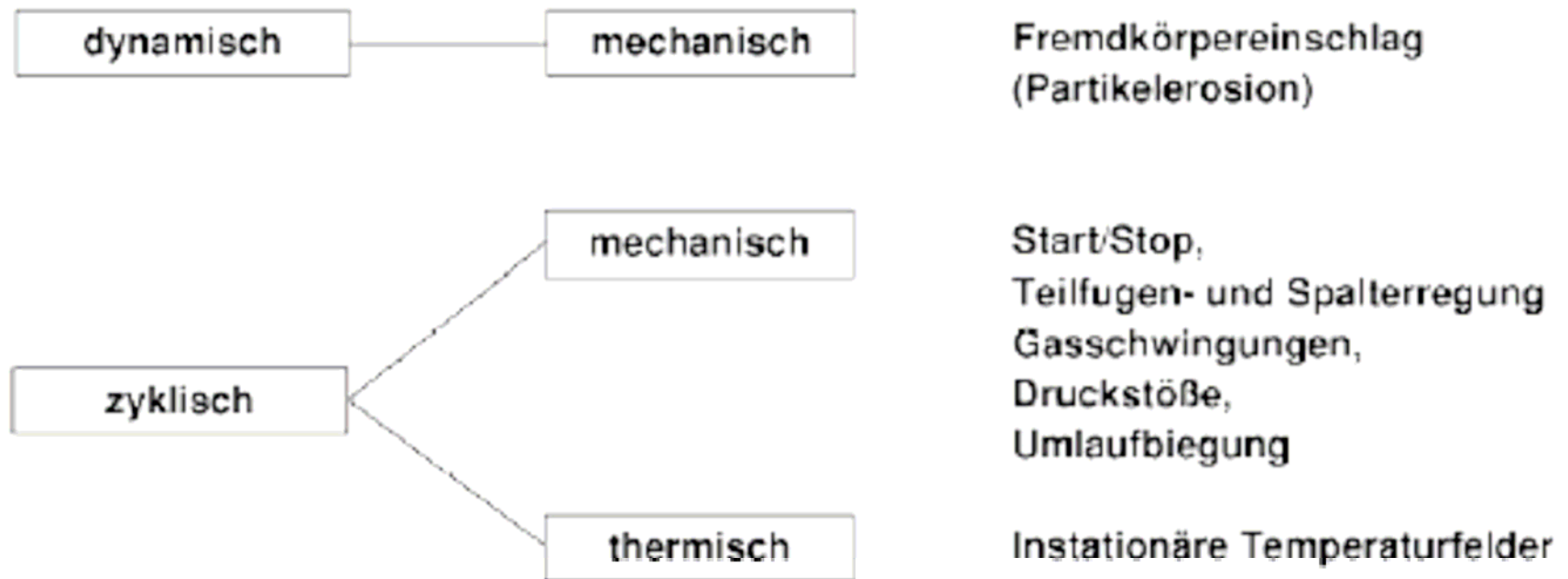
- E = Elastizitätsmodul,
 α = Thermischer Ausdehnungskoeffizient,
 ΔT = Temperaturdifferenz,
n = Poissonzahl,
S = Formfaktor
n .. Poissonzahl **Querdehnungszahl DIN 1304**
 $n_{Stahl} = 0,3$

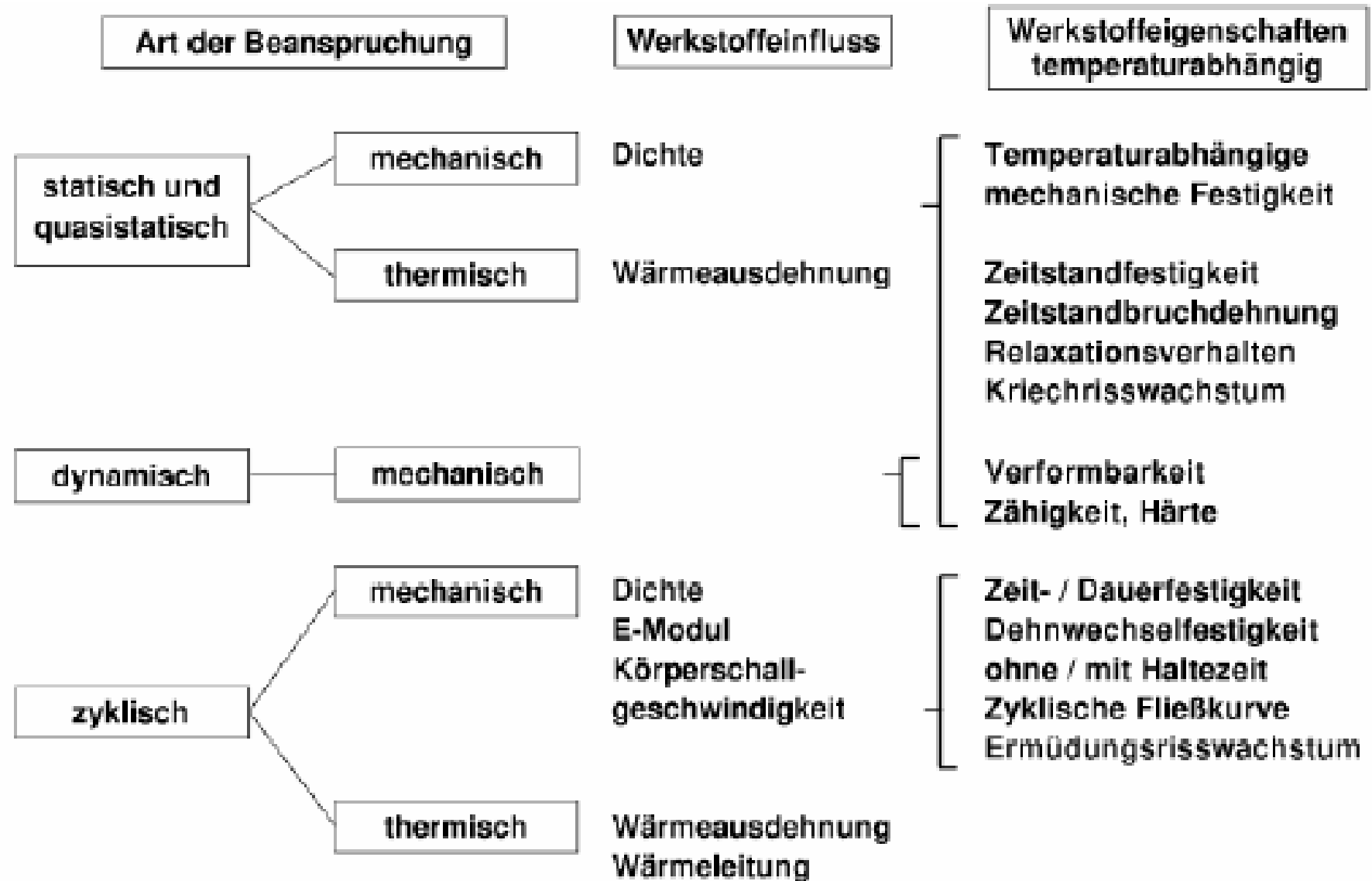
Festigkeit unter Temperaturbelastung



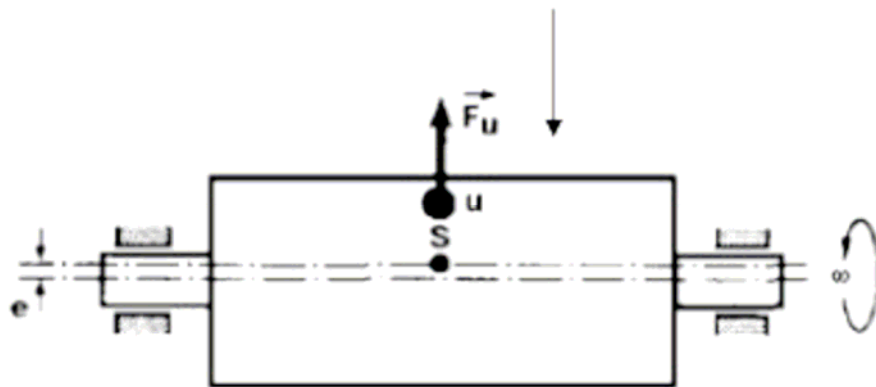
Bauteilbeanspruchung und deren Ursachen





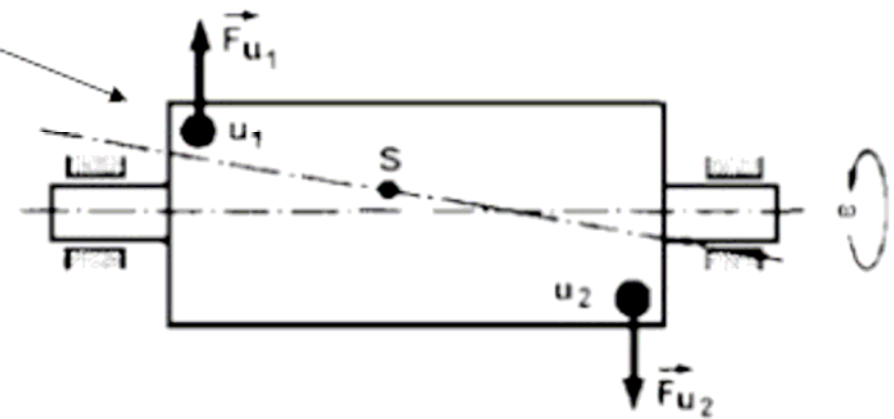


Statische und dynamische Unwucht



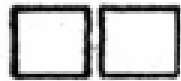
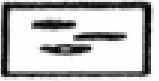






Es entsteht kein Unwuchtmoment.
Das bedeutet, dass die Trägheitsachse stets parallel zur geometrischen Achse ist.

Die Schwereachse ist lediglich versetzt zur geometrischen Achse.

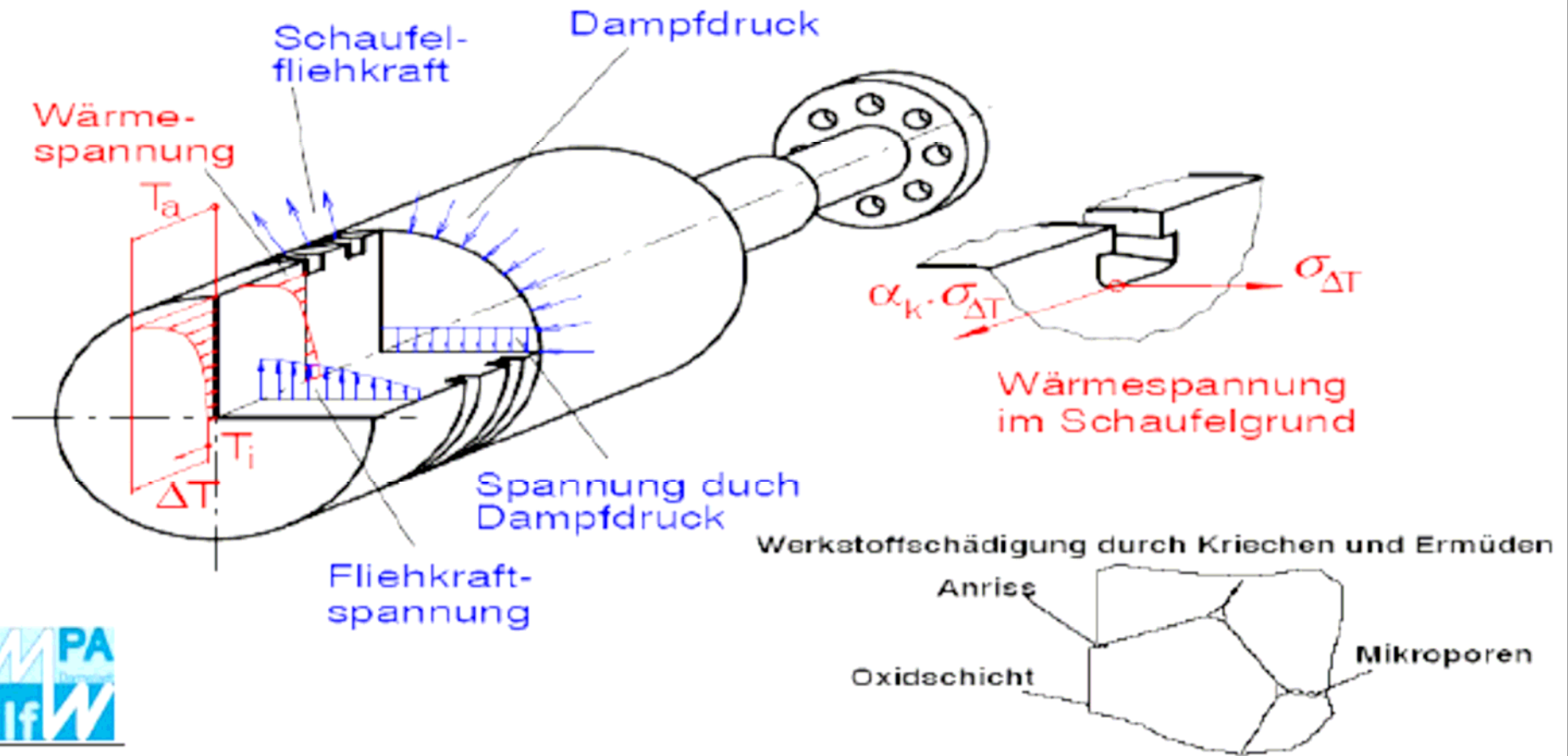


Die Hauptträgheitsachse liegt frei im Körper. Die geometrische Achse kann mehrfach geschnitten werden, kein Schnittpunkt ist jedoch auch möglich. Die Unwucht wird einfach als Gerade zwischen den an den Lagern gemessenen Unwuchten behandelt.

Bruchformen im statischen Lastfall (Gewaltbruch)

		Belastung			
		Zug	Druck	Biegung	Torsion
resultierende Schädigung	spröder Trennbruch				
	zähe Gleitverformung				

Beanspruchung einer Turbinenwelle durch Primär- und Sekundär-Lasten



- Tribologische Beanspruchung -

Definition von Verschleiß nach DIN 50320

- fortschreitender Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers
- hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers (tribologische Beanspruchung)

Einflussgrößen auf den Verschleiß

- Grundkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche)
- Zwischenstoff (Art, Teilchengröße etc.)
- Gegenkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche)
- Belastung (Größe, zeitlicher Verlauf)
- Art der Bewegung (Gleiten, Rollen, Wälzen, Stoßen, Prallen etc.)
- Umgebende Atmosphäre (Luft, Schutzgas, Vakuum etc.)
- Temperatur (Höhe, zeitlicher Verlauf)

Verschleiß bewirkt einen Werkstoffverlust an Bauteilen. Die Abtragung erfolgt nach vier Verschleißmechanismen (DIN 50320), die sich auch kombinieren können:

- **Adhäsion** ("Fresserscheinungen"),
- **Abrasion** (Furchung),
- **Oberflächenzerrüttung** (Ermüdung) und
- **tribochemische Reaktion** (Passungsrost, Wirkung der Öl-Additive auf Oberflächen).

Adhäsiver Verschleiß

Die Oberflächen der Reibpartner gehen bei ungünstigen Schmier- und Kontaktverhältnissen oder Trockenlauf eine enge, haftende Bindung ein. Dies kann besonders bei Oberflächen mit ähnlicher Materialzusammensetzung oder hoher Verbindungsneigung eintreten.

Die Folgen sind Kaltverschweißungen, Abrieb, Riefen, Löcher, Fressen, Aufbauschneiden, Werkzeugbruch.

Abrasion

Im Wasser vorhandene Feststoffe verursachen Abrieb, und somit einen vorzeitigen Verschleiß von Werkstoffen. Je höher die Geschwindigkeit und härter die Feststoffe sind, desto höher ist die Abrasion. Pumpenschaufeln werden häufig in Mitleidenschaft gezogen.

Oberflächenzerrüttung (Ermüdung)

Wiederholte mechanische Wechselbeanspruchungen führen zur Bildung und Ausbreitung von Rissen unter der beanspruchten Oberfläche, die dadurch zerstört wird. Die Folgen sind Quer- und Kammrisse, Grübchen (Pitting) und Graufleckigkeit (Micropitting) (vor allem bei instationärer Beanspruchung) sowie Werkzeugbruch.

Tribochemische Reaktion (Tribooxidation)

Der tribologische Reibungskontakt verursacht eine chemische Reaktion. Die Reaktionsprodukte beeinflussen die tribologischen Vorgänge an der Oberfläche, z. B. können Bauteilpaarungen mit engen Toleranzen verklemmen.

Mit steigender Temperatur nimmt der tribochemische Verschleiß im Allgemeinen zu. Eine häufige Form der tribochemischen Verschleißursache ist die Oxidation.

Die Folge von Tribooxidation ist zum Beispiel Passungsrost.

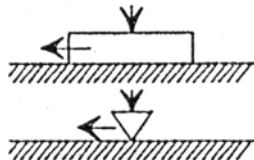
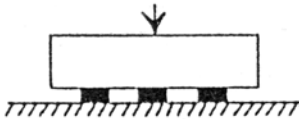

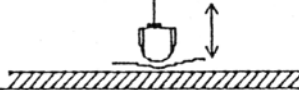
Verschleißarten nach DIN 50320:

- Gleitverschleiß
- Wälzverschleiß
- Stoßverschleiß
- Schwingverschleiß
- Korngleitverschleiß
- Kornwälzverschleiß
- Gleitverschleiß

Weitere Verschleißarten sind als "Erosion" bekannt. (Erosion ist die Abtragung eines Materials durch strömende Medien.)

Einflussgrößen auf Verschleiß

- Grundkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche)
- Zwischenstoff (Art, Teilchengröße u. a.)
- Gegenkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche)
- Belastung (Größe, zeitlicher Verlauf)
- Art der Bewegung (Gleiten, Rollen, Stoßen)
- Umgebende Atmosphäre (z. B. Luft, Schutzgas, Vakuum)
- Temperatur (Höhe, zeitlicher Verlauf)

Art	Anf.-Bedingungen	Kennzeichen	Erscheinungsform Ablauf – Endergebnis	Beispiele
Gleit-Verschleiß	geschmiert ungeschmiert		Fressen, Auskohlung Furchen, Ritzen	Gleitlager Gleitschiene Bremsen (mit Verschmutzung)
Korn-Gleit-Verschleiß	---		Ritzen, Einbettung	Kontakte (bewegt)
Roll-Verschleiß	geschmiert ungeschmiert		Pittings (Ausbröckelung), Schälung	Roll- und Kugellager, Wälzlager, Räder, Zahnräder
Stoß-Verschleiß	geschmiert ungeschmiert		Ausbrechung	---

Betrieb und Instandhaltung von Energieanlagen

Strahl-Verschleiß		<p>Gleit-S. Prall-S. Schräg-S.</p>	Mulden, Durchschlag	Düsen, Turbinen, Rohrkrümmer, Kohlemühlen
Spül-Verschleiß	---		Auswaschung, Mulden	Mechanismen
Erosion - mechanisch - mech.	Energie nieder Energie hoch		Wellen Ablation (zersetzen, verdampfen)	Naßdampfströmung Staubströmung
Kavitation	---	<p>Schwing-K. Strömungs-K.</p>	Aufrauhung Auswaschung	Turbinen Pumpen Verdampfer Kondensatoren
Tropfenschlag	---	<p>Tropfen im Dampfstrom</p>	Lochbildung	Naßdampfschaufeln und Leitapparat Rohrleitungen, Pumpen
Korrosions-Verschleiß	geschmiert ungeschmiert	---	alle Formen	alle Beispiele

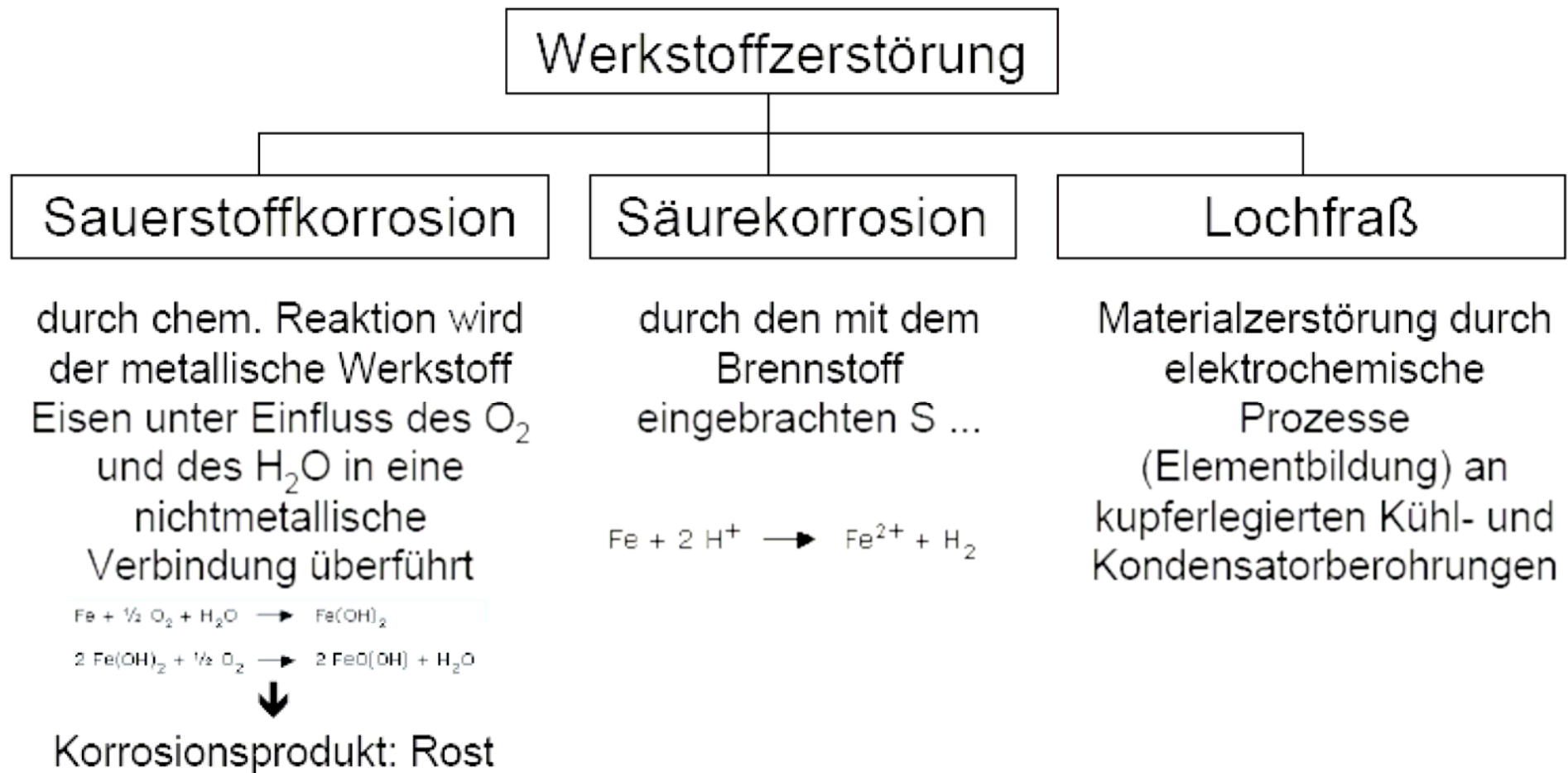
Ausfälle durch zufällige Überlagerung von Belastungen



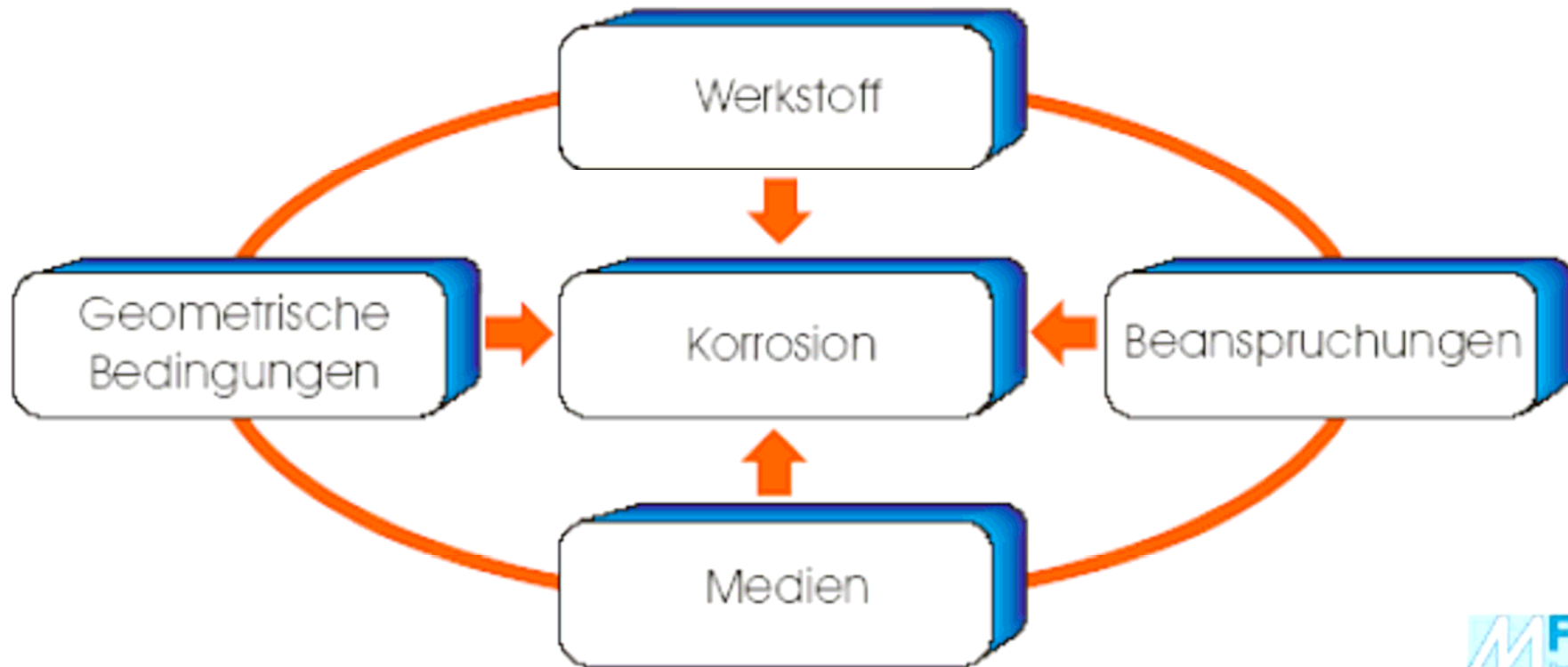
Derartige Komponenten können sein:

- ▶▶ Temperatur
- ▶▶ Absolute oder relative Feuchte
- ▶▶ Vibration und/oder Schock
- ▶▶ Spannungsspitzen aus dem Netz

- Chemische Beanspruchung -

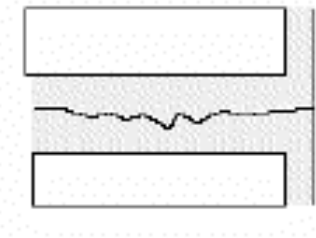


Korrosion als System





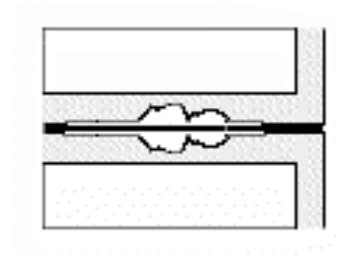
Ebenflächiger Abtrag



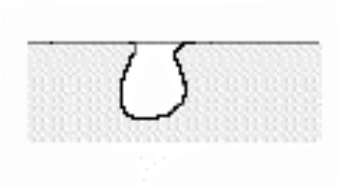
Risskorrosion



Narbig-flächiger Abtrag



Spaltkorrosion

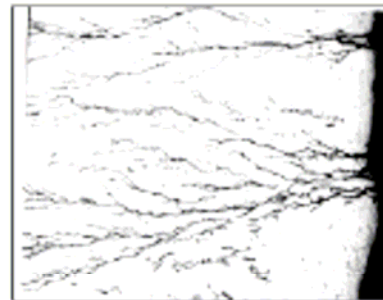


Lochfraßkorrosion

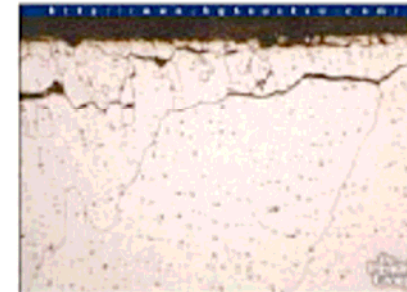
Korrosion von Werkstoffen (Beispiele)

Spannungsrissskorrosion

Oberflächenkorrosion

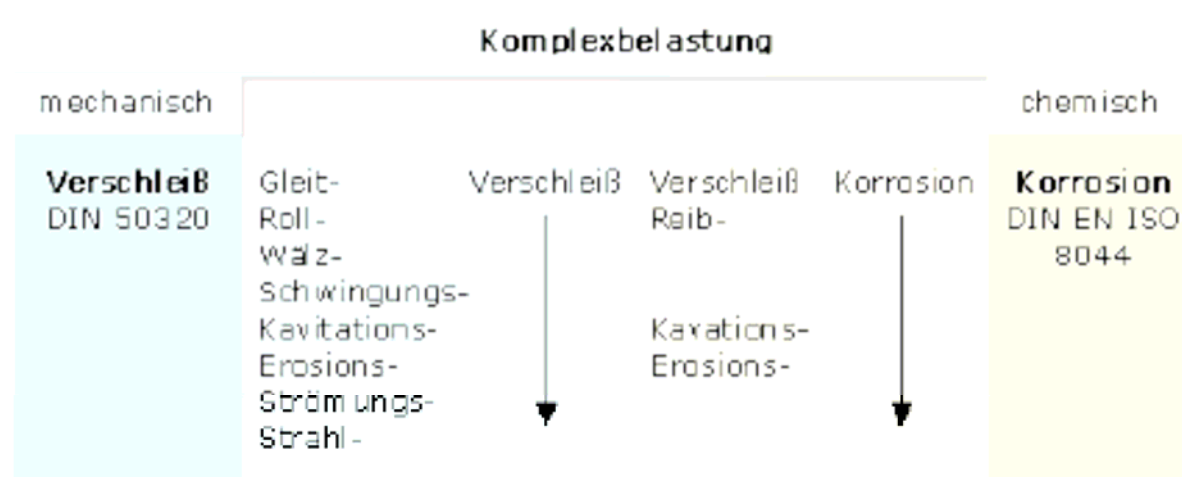


Korngrenzenkorrosion



Korrosion und Verschleiß

Während Korrosion Veränderungen am Werkstoff durch chemische, elektrochemische oder metallphysikalische Reaktionen bewirkt, löst Verschleiß Veränderungen an der Werkstoffoberfläche ausschließlich durch mechanische Einwirkung aus. Dies wird durch die Ergebnisse von Korrosion und Verschleiß deutlich: Zur Bildung von Korrosionsprodukten sind chemische Umsetzungen notwendig, durch Verschleiß abgetragene Werkstoffteilchen bleiben in ihrer chemischen Zusammensetzung unverändert. Korrosion und Verschleiß können auch als komplexe Belastung auftreten:



- Mischbeanspruchungen -

Erosionskorrosion

„Erosionskorrosion ist ein Vorgang, bei dem Erosion und Korrosion gemeinsam beteiligt sind. Anmerkung: Erosionskorrosion kann auftreten z. B. in Rohrleitungen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit und Pumpen und Rohrleitungen, die Flüssigkeiten mit suspendierten, abrasiven Teilchen transportieren.“ (DIN EN ISO 8044: 1999)



**Aufgetrenntes Kupferrohr
mit Erosionskorrosion
durch Wasser mit hoher
Strömungsgeschwindigkeit**

- Schäden -

Schäden

1. Meist ohne Gefahr für Menschen, aber oft hohe Zahl von Schäden und entsprechende Kosten

1.1 Schweißfehler:

- Bindefehler bei Schweißnähten bei kleinen (Heizfl.) Rohren
- Aufhärtung in der Schweißnaht bei hochlegierten kleinen Rohren
- Ausnahmefall Girne: große Folgeschäden (großes Rohr aufgegangen, siehe unten)

1.2 Korrosion, Erosion von Rohren der Flossenwände und der Bündelheizflächen:

- Korrosion (Chemie) und Ablagerungen innen (Explosion durch hohe Mengen austretenden Dampfes)
- Rauchgasseitige Korrosionen (z.B. durch Na, Va, S)

2. Schäden mit dem Potential für Großschäden

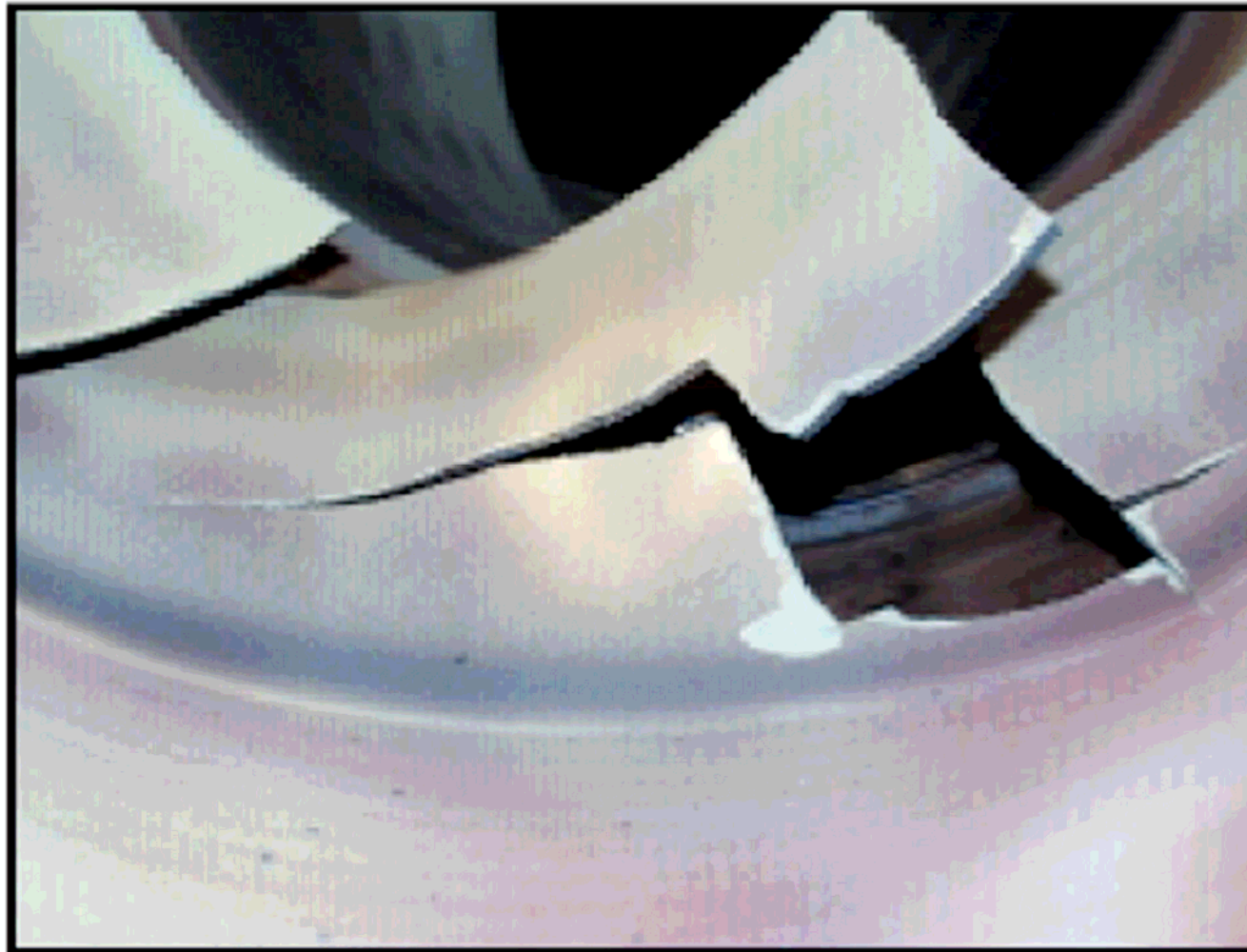
2.1 Schäden an Druckteilen:

- Trommel explodiert
- Flachboden von großen Sammler abgerissen (Weisweiler)
- Frischdampfleitung aufgerissen (Boxberg)
- z.B. aus Schweißporen Einzelrohr austretender Wasser/Dampf beschädigt großes Rohr oder weitere Rohre, die plötzlich aufgehen und Großschäden verursachen (Girne, Lünen)
- Risse bzw. Anrisse, wenn in Einspritzkühlern Wasser auf die heiße Wandung des Druckteiles auftritt (HEW Teifstack)

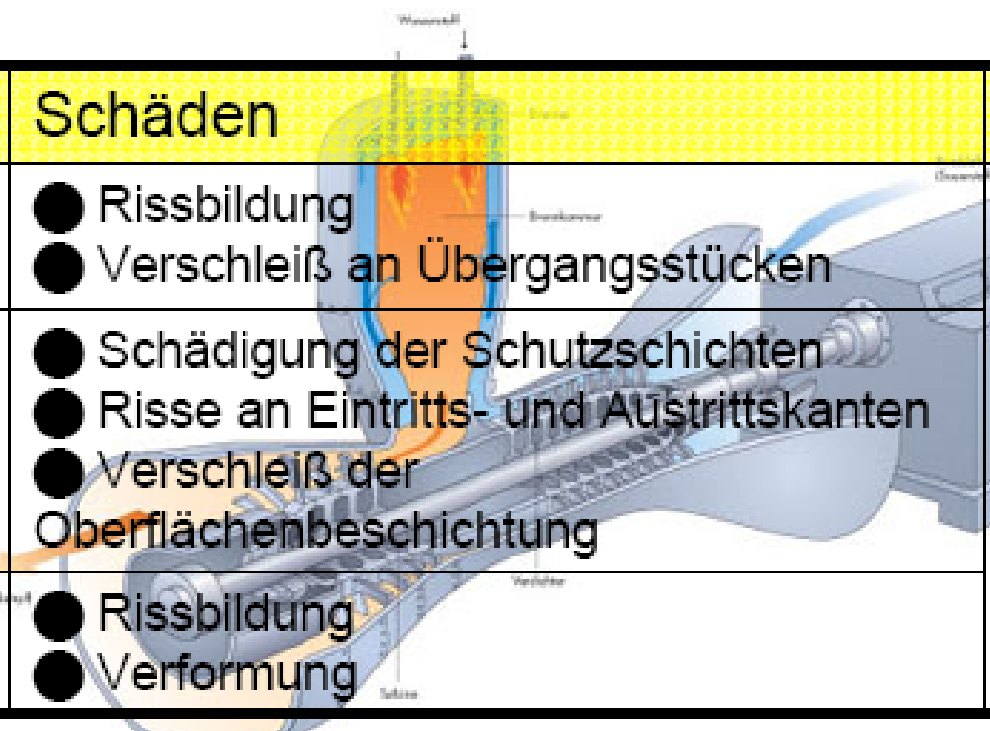
2.2 Verpuffungen durch Zündung von explosivem Gemisch im Kessel:

- z.B. bei nicht ansprechenden Flammenwächter (Irsching, Iran)
- Explosion durch Wasseraustritt auf Brenngut oder auf Schmelze (plötzliche Dampfbildung oder $\text{CO} + \text{H}_2$ Bildung durch Wassergasreaktion – Leinigerwerk, Schwarzlaugenkessel)

Brennkammerschaden in einer Gasturbine



Hervortretende Schäden am Beispiel von Gasturbinenbauteilen



Bauteil	Schäden	Ursachen
Brennkammer	<ul style="list-style-type: none"> ● Rissbildung ● Verschleiß an Übergangsstücken 	<ul style="list-style-type: none"> ● Hohe Temperaturwechsel ● Bauteiltemperaturen ● Spannungskonzentrationen ● Bauteilermüdung
Schaufeln	<ul style="list-style-type: none"> ● Schädigung der Schutzschichten ● Risse an Eintritts- und Austrittskanten ● Verschleiß der Oberflächenbeschichtung 	
Leitgitter und Gehäuse	<ul style="list-style-type: none"> ● Rissbildung ● Verformung 	