

GfT

Arbeitsblatt 7

TRIBOLOGIE

Verschleiß, Reibung
DEFINITIONEN, BEGRIFFE, PRÜFUNG

Gesellschaft für Tribologie	Tribologie Definitionen, Begriffe, Prüfung	GfT Arbeitsblatt 7
	Inhalt	
	Einführung	3
1	Tribologie - Begriffe	3
2	Verschleißbegriffe/Systemanalyse	5
2.1	Begriffe	5
2.2	Systemanalyse	6
2.3	Gliederung des Verschleißgebiets	12
2.4	Systembeschreibung eines Verschleißvorgangs	15
2.A	Liste der Verschleißbegriffe in alphabetischer Reihenfolge	16
2.B	Systematische Einordnung	25
2.C	Stichwortverzeichnis in Englisch	26
2.D	Stichwortverzeichnis in Französisch	27
3	Reibung – Begriffe	29
3.1	Reibung in Abhängigkeit vom Bewegungszustand	29
3.2	Reibung nach Art der Relativbewegung der Reibpartner	29
3.3	Reibung in Abhängigkeit vom Aggregatzustand der beteiligten Stoffe	30
3.4	Kenngößen zur Charakterisierung der Reibung	30
4	Verschleiß – Messgrößen	33
4.1	Direkte Verschleiß-Messgrößen	34
4.2	Bezogene Verschleiß-Messgrößen	35
4.3	Indirekte Verschleiß-Messgrößen	37
4.4	Verschleiß-Messmethoden	38
4.5	Empfehlungen für die Auswahl von Verschleiß-Messgrößen	38
4.A	Tabellarische Zusammenstellung der Verschleiß-Messgrößen	40
5	Prüfung von Reibung und Verschleiß	41
5.1	Kategorien der Verschleißprüfung	41
5.2	Modellversuche bei Festkörpergleitreibung	45
5.A	Internationaler Ringversuch im Rahmen von VAMAS	49

Einführung

Dieses Arbeitsblatt dient der Vereinheitlichung des Sprachgebrauchs auf dem Gebiet von Reibung, Verschleiß und Schmierung und soll so zur Vermeidung von Verständigungsschwierigkeiten beitragen. Die Zusammenstellung enthält überwiegend Begriffe, Definitionen und Vorschriften aus DIN-Normen. Sie ist erforderlich geworden, da die entsprechenden Normen wegen fehlender turnusmäßiger Überarbeitung zurückgezogen worden sind (DIN 50281, DIN 50320, DIN 50322, DIN 50323, DIN 50324).

1. Tribologie - Begriffe

Tribologie

Tribologie 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.

ANMERKUNG: Tribologie trägt durch Minderung von Verschleiß und Optimierung von Reibungsbedingungen zur Erhaltung von Werten bei.

Triboforschung

Die Triboforschung befasst sich mit der Erforschung tribologischer Vorgänge und Gesetzmäßigkeiten

a) in qualitativer Hinsicht durch Untersuchung der Erscheinungen nach

- Art
charakterisiert durch die tribologische Beanspruchung
- Form
charakterisiert durch die (makroskopisch) wahrnehmbaren Vorgänge, Zustände und Auswirkungen
- Ursache
bezüglich der den Erscheinungen zugrundeliegenden Grundprozesse (Mechanismen)

b) in quantitativer Hinsicht durch messtechnische Bestimmung der charakteristischen Größen, ihrer gegenseitigen Abhängigkeit und bestehender Gesetzmäßigkeiten (Tribometrie).

Von Bedeutung im Zusammenhang mit tribologischen Phänomenen sind insbesondere Angaben über:

- das Beanspruchungskollektiv
- Struktur des tribologischen Systems
- Energieverluste (Messgrößen: Reibungskraft, Reibungswärme, Schallabstrahlung usw.)
- Verschleiß (Materialverlust aus dem System, abgelöste Partikel usw.)
- geometrische Verhältnisse in der Kontaktzone (Oberflächengeometrien, Kontaktflächen, Spalthöhe, usw.)
- Änderungen der Werkstoffe und Schmierstoffe (Zusammensetzung, Ab- bzw. Aufbau von Oberflächenschichten, Umwandlungen)

Tribotechnik

Die Tribotechnik befasst sich mit der technischen Anwendung tribologischer Erkenntnisse. Dazu gehört die optimale Gestaltung von Funktionselementen und die Beherrschung von Prozessen mit tribologischer Beanspruchung. Hierbei steht die Tribotechnik in

Wechselbeziehungen zu:

- Konstruktion
- Werkstofftechnik
- Schmierstofftechnik
- Verfahrenstechnik
- Betriebstechnik
- Instandhaltung
- Qualitätsmanagement
- Umwelt- und Sicherheitstechnik
- Betriebswirtschaft usw.

Tribophysik

Die Tribophysik ist derjenige Teilbereich der Tribologie, der sich mit den physikalischen Erscheinungen bei tribologischer Beanspruchung befasst. Dazu gehören u.a.:

- Tribomechanik
- Triboelektrizität
- Tribolumineszenz

Tribochemie

Die Tribochemie ist derjenige Teilbereich der Tribologie, der sich mit den chemischen und physikalisch-chemischen Erscheinungen bei tribologischer Beanspruchung befasst. Dazu gehören u.a.:

- Tribokorrosion
- Tribooxidation
- Triboabsorption
- Triboreaktion

ANMERKUNG: Reibung und Verschleiß sind komplexe Phänomene, an denen in der Regel verschiedene tribophysikalische und tribochemische Vorgänge beteiligt sind.

Tribologische Beanspruchung

Die tribologische Beanspruchung ist durch Relativbewegung und Wechselwirkungen zwischen Oberflächen unter Einfluss von Kräften gekennzeichnet.

Tribologisches System (Tribosystem)

Das tribologische System beinhaltet alle an einer tribologischen Beanspruchung beteiligten stofflichen Komponenten und ihre Eigenschaften mit den sich bei ihnen ergebenden Veränderungen sowie die für die Beanspruchung charakteristischen Vorgänge und Größen.

*ANMERKUNG: Die stofflichen Komponenten werden als **Systemstruktur**, die Beanspruchungsgrößen (Bewegung, Belastung, Temperatur usw.) als **Beanspruchungskollektiv** bezeichnet.*

2. Verschleißbegriffe/Systemanalyse

2.1 Begriffe

Verschleiß

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.

Die Beanspruchung der Oberfläche eines festen Körpers durch Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörper wird als tribologische Beanspruchung bezeichnet. Unter tribologischer Beanspruchung ist dabei die Gesamtheit der auf die Elemente des Verschleißsystems von außen einwirkenden Beanspruchungsgrößen zu verstehen.

In der Technik ist Verschleiß normalerweise unerwünscht, d.h. wertmindernd. In Ausnahmefällen, wie z. B. bei Einlaufvorgängen, können Verschleißvorgänge jedoch auch technisch erwünscht sein. Bearbeitungsvorgänge als wertbildende technologische Vorgänge gelten in bezug auf das herzustellende Werkstück nicht als Verschleiß, obwohl im Kontaktbereich zwischen Werkstück und Werkzeug tribologische Prozesse wie beim Verschleiß ablaufen.

Verschleißmechanismen

Unter Verschleißmechanismen versteht man die beim Verschleißvorgang ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse. Die hauptsächlichsten Verschleißmechanismen sind **Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung (Ermüdung) und Tribochemische Reaktion (Tribooxidation)**.

Verschleißarten

Verschleißvorgänge können nach Art der Bewegung, der tribologischen Beanspruchung oder der Systemstruktur (insbesondere der beteiligten Stoffe) durch verschiedene „Verschleißarten“ unterschieden werden.

ANMERKUNG: Sind Verschleißvorgänge nahezu ausschließlich durch einen bestimmten „Verschleißmechanismus“ geprägt, werden sie häufig durch Anfügen des Wortes Verschleiß an den entsprechenden Mechanismus (Abrasive-, Adhäsiv-, Oberflächenzerrüttungs-, Ermüdungs-, Tribokorrosions-) gekennzeichnet.

Verschleißerscheinungsformen

Unter „Verschleißerscheinungsformen“ versteht man die sich durch Verschleiß ergebenden Veränderungen der Oberflächen eines Körpers sowie die Art und Form der entstandenen Verschleißpartikel.

Verschleiß-Messgrößen

Die „Verschleiß-Messgrößen“ kennzeichnen direkt oder indirekt die Änderung der Gestalt oder der Masse eines Körpers durch Verschleiß.

ANMERKUNG: Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff „Verschleiß“ sowohl für den Vorgang des Verschleißens als auch für das Ergebnis verwendet. Zur Unterscheidung können für den Vorgang der Begriff „Verschleißvorgang“ und für das Ergebnis die Begriffe „Verschleißerscheinungsformen“ und/oder die „Verschleiß-Messgrößen“ verwendet werden.

2.2 Systemanalyse von Verschleißvorgängen

Verschleiß tritt in der Technik an Bauteilen auf, deren technische Funktion mit tribologischen Beanspruchungen verbunden ist. Im Unterschied zu den Festigkeitseigenschaften, wie Zugfestigkeit, Druckfestigkeit usw., die als „stoffbezogene“ Werkstoffkenngrößen angesehen werden, resultiert der unter tribologischen Beanspruchungen auftretende Verschleiß aus dem Zusammenwirken aller am Verschleißvorgang beteiligten Teile einer technischen Konstruktion und kann nur durch „systembezogene“ Verschleißkenngrößen beschrieben werden. Ein tribologisches System (oder „Tribosystem“) ist schematisch in Bild 2.1 dargestellt.

Zur Systemanalyse eines Verschleißvorgangs werden die am Verschleiß unmittelbar beteiligten Bauteile und Stoffe von den übrigen Bestandteilen einer technischen Konstruktion gedanklich abgegrenzt. Die am Verschleiß unmittelbar beteiligten Bauteile und Stoffe werden als „Elemente“ des Tribosystems bezeichnet; sie charakterisieren zusammen mit ihren tribologisch wichtigen „Eigenschaften“ und „Wechselwirkungen“ die „Struktur des Tribosystems“. Die auf die Elemente des Tribosystems von außen einwirkenden Beanspruchungsgrößen bilden das „Beanspruchungskollektiv“. Der beim Einwirken des Beanspruchungskollektivs auf die Struktur des Tribosystems auftretende Verschleiß wird durch „Verschleißkenngrößen“ beschrieben.

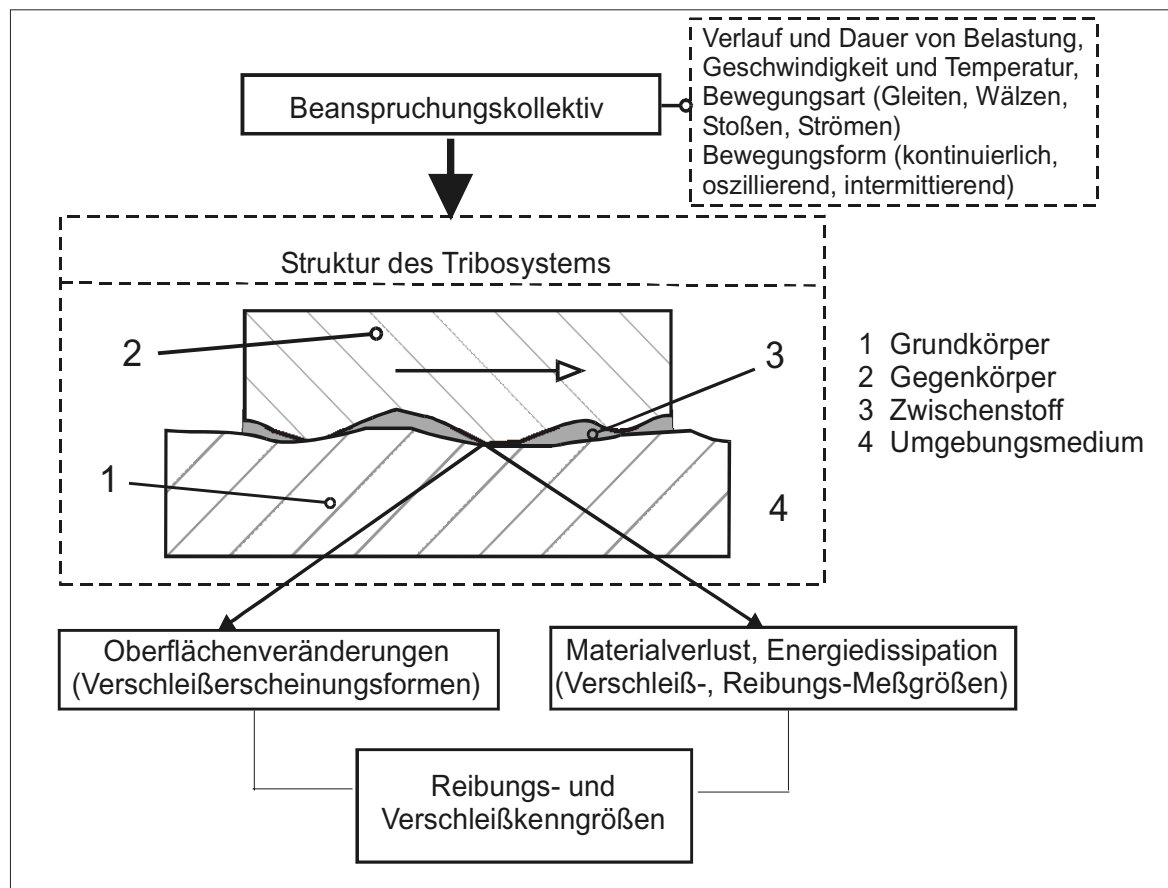


Bild 2.1. Schema eines tribologischen Systems

Die Systemanalyse eines Verschleißvorgangs umfaßt damit die folgende Schritte:

- | | |
|-----|--|
| I | Kennzeichnung der technischen Funktion des Tribosystems |
| II | Angabe des Beanspruchungskollektivs |
| III | Kennzeichnung der Struktur des Tribosystems durch
a) die am Verschleiß beteiligten Elemente
b) die relevanten Eigenschaften der Elemente
(einschließlich der kontaktgeometrischen Größen)
c) die Wechselwirkungen der Elemente |
| IV | Angabe von Verschleißkenngrößen |

Da Verschleißvorgänge stets zeitabhängige Vorgänge sind, ist die Systemanalyse gegebenenfalls für verschiedene Beanspruchungszeitpunkte vorzunehmen.

Das Beanspruchungskollektiv und die Struktur bestimmen das Verschleißverhalten des Tribologischen Systems. Durch geeignete Wahl der Beanspruchungsparameter und der Systemelemente in Verbindung mit einer geeigneten Konstruktion bestehen Möglichkeiten zur Verschleißminimierung.

Technische Funktionsbereiche, in denen Verschleiß auftritt

Tribologische Systeme, die Verschleißvorgängen unterworfen sind, haben unterschiedliche funktionelle Aufgaben zu erfüllen. Aus einer Betrachtung der grundlegenden technischen Anwendungen lassen sich die hauptsächlichen Funktionsbereiche nach Tabelle 2.1 nennen.

Tabelle 2.1 Technische Funktion von Tribosystemen (Beispiele)

Technische Funktion des Tribosystems und Beispiele	Elemente des Tribosystems			
	Grundkörper (Körper 1) (1)	Gegenkörper (Körper 2) (2)	Zwischenstoff (3)	Umgebungsmedium (4)
Bewegungsübertragung -Schubgelenk -Kupplung	Gleitbahn Innenlamelle	Kreuzkopf Außenlamelle	Schmierstoff Kühflüssigkeit	Luft, Wasserdampf Luft
Bewegungshemmung -Bremsen	Bremsklotz	Bremsscheibe Bremstrommel	- -	Luft Wasserdampf
Kraftübertragung -Gleitlager -Zahnradgetriebe -Hüftgelenk -Zugmittelgetriebe -Schraubverbindung	Buchse Ritzel Kugel Riemen Schraube	Welle Rad Pfanne Riemenscheibe Bauteil	Schmierstoff Schmierstoff Gelenkflüssigkeit - -	Luft Luft - Luft Luft, Wasser
Energie- und Informationsübertragung -Kommutator -Schalter/Stecker	Bürste Kontakt/Stecker	Kollektor Gegenkontakt/ Buchse	- -	Schutzgas Luft, Plasma
Materialtransport -Förderband -Fördergebläse	Band Rohrwand	Schüttgut Partikel	- -	Luft, Wasser Luft, Wasser
Materialbearbeitung -Drehen -Bohren	Drehmeißel Bohrer	Werkstück Werkstück	Schneidöl Schmierstoff	Luft Luft
Umformen -Walzen -Drahtziehen	Walze Ziehstein	Bramme/Blech Draht	Schmierstoff Schmierstoff	Luft, Wasser Luft, Wasser

ANMERKUNG:

- a) Die Kennzeichnung der Verschleißpartner als „Grundkörper“ (1) und Gegenkörper (2) richtet sich nach dem jeweiligen konkreten Verschleißfall. Im allgemeinen wird derjenige Verschleißpartner als „Grundkörper“ bezeichnet, dessen Verschleiß für den jeweiligen Verschleißfall besonders wichtig erscheint.
- b) Der „Zwischenstoff“ (3) befindet sich zwischen Grundkörper (1) und Gegenkörper (2) und kann verschleißmindernd (z.B. Schmierstoff) oder verschleißerhöhend (z.B. Staub, harte Körner) wirken.

Beanspruchungskollektiv eines Verschleißvorgangs

Das bei jedem Verschleißvorgang wirkende Beanspruchungskollektiv wird gebildet durch:

- die Bewegungsform und den zeitlichen Bewegungsablauf (Kinematik)
- die technisch-physikalischen Beanspruchungsparameter

Bewegungsform und zeitlicher Bewegungsablauf

Die bei Verschleißvorgängen auftretenden Bewegungsformen können auf die folgenden vier „Elementar-Bewegungsformen“ oder deren Überlagerungen zurückgeführt werden:

- Gleiten
- Rollen
- Stoßen
- Strömen

Der zeitliche Bewegungsablauf der Elementar-Bewegungsformen kann kontinuierlich, oszillierend und/oder intermittierend sein.

ANMERKUNG: Dem Begriff „Gleiten“ entspricht der Begriff „Strömen“ für den Fall, dass der Grundkörper ein fester Körper und der Gegenkörper durch einen körnigen, flüssigen oder gasförmigen Gegenstoff gegeben ist. „Rollen“ ist stets mit mikroskopischen Gleitanteilen (Mikroschlupf) verbunden. Bei Überlagerung einer Rollbewegung mit makroskopischen Gleitanteilen (Makroschlupf) spricht man „Wälzen“. Bei der Bewegungsform „Bohren“ bewegen sich die Flächenelemente in der Kontaktfläche mit unterschiedlichen Relativgeschwindigkeiten. Als synonyme Begriff für „Stoßen“ ist auch der Begriff „Prallen“ üblich.

Technisch-physikalische Beanspruchungsparameter

Die technisch-physikalischen Beanspruchungsparameter bei einem Verschleißvorgang sind durch die folgenden vier Größen gegeben:

- Normalkraft F_N
- Geschwindigkeit v
- Temperatur T
- Beanspruchungsdauer t_B

ANMERKUNG: Aus der Normalkraft F_N läßt sich bei Kenntnis der Größe der geometrische Berührungsfläche zwischen Grundkörper und Gegenkörper, d.h. der „Tribokontaktfläche A_{nom} “, die mittlere Flächenpressung $p = F_N/A_{nom}$ berechnen. Die für einen Verschleißvorgang maßgebende Geschwindigkeit v ist die „Relativgeschwindigkeit“ zwischen den beiden Verschleißpartnern. Die Temperatur T bezieht sich auf den jeweiligen thermischen Gleichgewichtszustand des gesamten tribologischen Systems. Bei thermischen Ungleichgewichten, z.B. bei unterschiedlichen Temperaturen von Grundkörper und Gegenkörper, müssen gegebenenfalls mehrere Temperaturen bzw. Temperaturfunktionen eingeführt werden. Die Beanspruchungsdauer t_B gibt die Zeitspanne an, in der die zu Verschleiß führenden tribologischen Beanspruchungen wirksam sind. Aus der Kenntnis der Beanspruchungsdauer t_B und der Geschwindigkeit v läßt sich der „Beanspruchungsweg“ berechnen.

Neben dem genannten, für die Erfüllung der technischen Funktion des Tribosystems notwendigen Beanspruchungskollektiv können zusätzliche „Störgrößen“, wie z.B. äußere mechanische Schwingungen oder Strahleneinwirkungen, den Verschleißvorgang beeinflussen. Diese gegebenenfalls auftretenden „Störgrößen“ sind gesondert zu erfassen.

Struktur tribologischer Systeme

Die Struktur eines Tribosystems ist gekennzeichnet durch die am Verschleißvorgang beteiligten stofflichen Partner, ihre tribologisch relevanten Eigenschaften und Wechselwirkungen miteinander.

Elemente

An einem Verschleißvorgang sind im allgemeinen vier stoffliche Partner, die „Elemente“ (1), (2), (3), (4) beteiligt, siehe Bild 2.1 und Tabelle 2.1.

Eigenschaften der Elemente

Jeder Verschleißvorgang wird durch eine Reihe von Eigenschaften der Elemente und deren Veränderungen unter der tribologischen Beanspruchung beeinflusst. Hierbei ist zu beachten, dass jeder technische Werkstoff senkrecht zur Oberfläche einen Schichtaufbau besitzt, bestehend z.B. bei metallischen Werkstoffen an Luft aus Adsorptionsschicht, Oxidschicht, Verfestigungsschicht, Grundmaterial.

ANMERKUNG: Für die verschiedenartigen Verschleißprobleme können jeweils unterschiedliche Eigenschaften der Elemente verschleißbestimmend sein. Eine Zusammenstellung wichtiger Eigenschaften enthält der Vordruck (siehe Anhang 2.2.a).

Wechselwirkungen der Elemente

Die tribologisch relevanten Wechselwirkungen zwischen den Elementen im Zusammenhang mit dem Beanspruchungskollektiv – im besonderen die zum Verschleiß führenden Wechselwirkungen zwischen Grundkörper (1) und Gegenkörper (2) – lassen sich beschreiben durch

- den Kontaktzustand (trocken, geschmiert, rau, glatt, ...)
- den Reibungszustand (siehe Abschnitt 2.3)
- die Verschleißmechanismen (siehe Abschnitt 2.3)

Verschleißkenngrößen

Die Systemanalyse eines Verschleißvorgangs zeigt, dass der in einem tribologischen System auftretende Verschleiß sich durch das Einwirken des Beanspruchungskollektivs auf die Systemstruktur ergibt und durch „systemspezifische“ Verschleißkenngrößen zu beschreiben ist. In symbolischer Form gilt somit:

$$\text{Verschleißkenngröße} = f(\text{Beanspruchungskollektiv}, \text{Systemstruktur})$$

Die Verschleißkenngrößen sind somit abhängig von

- dem Beanspruchungskollektiv
- der Struktur des Tribosystems

und gliedern sich in

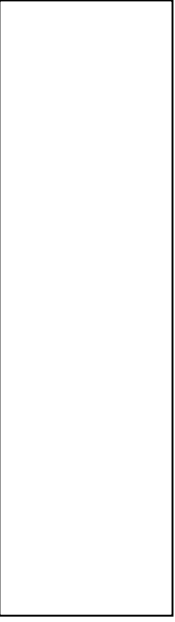

- „Verschleißerscheinungsform“
- „Verschleiß-Messgrößen“.

Anhang 2.2.a Vordruck zur Beschreibung und Systemanalyse von Verschleißvorgängen

Allgemeine Beschreibung des Verschleißvorgangs		Datum:	Blatt-Nr.:	Bearbeiter:
I Technische Funktion des Tribosystems				
II Beanspruchungskollektiv				
Bewegungsform	Gleiten	Rollen/Wälzen	Stoßen	Strömen
Bewegungsablauf	kontinuierlich	reversierend	intermittierend	oszillierend
Belastung ¹⁾	F_n bei t_0	F_n bei t_B	Geschwindigkeit ²⁾ (m/s)	Schwingfrequenz:.....(Hz)
F_n(N)(N)(N)	v_{10}; v_{1B}	T_{10}; T_{1B} Beanspruchungsdauer t_B(h, min, sec)
III Struktur des Tribosystems				
Eigenschaften ⁴⁾	Elemente	Grundkörper (1)	Gegenkörper (2)	Elemente
	Bezeichnung			Bezeichnung
	Werkstoff			Stoff
Abmessungen				Aggregatzustand
Chemische Zusammensetzung,				Chemische Zusammensetzung,
Gefüge				chemische Struktur
Physikalische Stoffdaten ⁵⁾				Physikalische Stoffdaten ⁵⁾
Festigkeitsdaten				Viskositätsdaten
Härte				
Oberflächenrauheitsdaten				Sonstige Eigenschaften
Physikalisch-chemische				Bemerkungen
Oberflächendaten ⁶⁾				
Tribokontaktfläche ¹⁾ A_0 (mm ²)				Reibungszustand: Festkörper-, Festschmierstoff, Flüssigkeit-, Gas-,
Eingriffsverhältnis ⁷⁾		$\epsilon(1)$	$\epsilon(2)$	Grenzreibung (Grenzschicht-), Mischreibung
Verschleißmechanismen				Bemerkungen:
und Wechselwirkungen				

Fortsetzung Anhang 2.2.a Vordruck zur Beschreibung und Systemanalyse von Verschleißvorgängen

IV Verschleißkenngrößen

Verschleißerscheinungsform (Beschreibung, Bild)	Grundkörper (1)	Gegenkörper (2)
Gesamt-Verschleißbetrag	W_v (volumetrisch):.....	W_l (linear):.....
Mittlere Verschleißrate	$\Delta W_v / \Delta s$ (mm ³ /m)	$\Delta W_l / \Delta s$ (µm/m):.....
Mittlere bezogene Verschleißrate	$[W_v / F_n * s]$ k (mm ³ /N*m):.....	Laufweg s nach t _B :.....
Verschleißdiagramm	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="text-align: center; margin-right: 20px;"> <p>Verschleiß- betrag in</p>  </div> <div style="text-align: center; margin-right: 20px;"> <p>Weg s (m), (km)</p>  </div> </div>	
<p>1) Aus Belastung F_n und Tribokontaktfläche A_0 ergibt sich die nominelle Flächenpressung $p_0 = F_n / A_0$</p> <p>2) v ist die Relativgeschwindigkeit zwischen Grundkörper (1) und Gegenkörper (2)</p> <p>3) T ist die makroskopische Durchschnittstemperatur des beanspruchten Bauteils</p> <p>4) Gegebenenfalls sind auch beanspruchungsbedingte Eigenschaftsänderungen zu kennzeichnen</p> <p>5) Tribologisch relevante Größen sind z.B. Dichte, Ausdehnungskoeffizient, Wärmeleitfähigkeit, Volumen, Druck,....</p> <p>6) Eigenschaften der obersten Atomlagen von (1) und (2), z.B. Dicke und Zusammensetzung von Oxidschichten</p> <p>7) Verhältnis von geometrischer Tribokontaktfläche A_0 zu insgesamt überstrichener Lauffläche A_l</p>		
Bemerkungen		

2.3 Gliederung des Verschleißgebietes

Infolge der kaum übersehbaren Vielfalt der in der Technik auftretenden Verschleißvorgänge stößt der Versuch einer logisch einheitlichen Gliederung des Verschleißgebietes auf erhebliche Schwierigkeiten. Die Gliederung nach dem „Reibungszustand“ gestattet nur einen Teil des Verschleißgebietes zu erfassen; die „Verschleißarten“ erlauben dagegen eine in der Praxis übliche Aufgliederung nach Beanspruchungsart und Systemstruktur. Die nach den „Verschleißmechanismen“ bezeichneten Verschleißarten geben eine Gliederung nach den elementaren Grundvorgängen.

Reibungszustand

Auch wenn eine Gliederung des Verschleißgebiets nach Reibungszuständen kaum vollständig möglich ist, trägt die Angabe der vorliegenden Reibungszustände zum besseren Verständnis der auftretenden Verschleißvorgänge bei. Der in einem tribologischen System vorliegende Reibungszustand kann gemäß folgender Klassifikation gekennzeichnet werden:

- Reibung in Abhängigkeit vom Bewegungszustand
 - Haftreibung
 - Bewegungsreibung
- Reibung in Abhängigkeit vom Aggregatzustand der beteiligten Stoffbereiche (Elemente)
 - Festkörperreibung
 - Mischreibung
 - Flüssigkeitsreibung (Hydrostatik, Hydrodynamik, Elastohydrodynamik)
 - Gasreibung (Aerostatik, Aerodynamik)

ANMERKUNG: Durch die Reibung wird ein Teil der in ein Tribosystem eingeleiteten mechanischen Bewegungsenergie in andere Energieformen, hauptsächlich in Wärme, umgeformt. Die innerhalb der geometrischen (nominellen) Kontaktfläche bzw. der wahren Kontaktfläche umgesetzte Reibungsleistung verteilt sich auf die Elemente (1), (2), (3), (4) und erhöht deren „Durchschnittstemperatur“ und „Grenzflächentemperatur“ (bzw. „-temperaturverteilungen“).

Verschleißarten

Die Begriffe der Verschleißarten verweisen auf die Verschleißursachen, die im Zusammenspiel der Art der tribologischen Beanspruchung (insbesondere der Kinematik) mit der Systemstruktur, d.h. den beteiligten Stoffen, mit ihren Eigenschaften und Wechselwirkungen, begründet sind.

Je nach Fragestellung bzw. Kenntnis über das Tribosystem bezeichnet man die Verschleißarten nach der tribologischen Beanspruchung bzw. der Bewegungsform (Gleitverschleiß, Wälzverschleiß, Prallverschleiß, Schwingungverschleiß usw.), den beteiligten Stoffen (Korngleitverschleiß, Festkörperverschleiß, Partikelgleitverschleiß, Strahlverschleiß, Flüssigkeitserosion usw.) oder den Wechselwirkungen bzw. Mechanismen (Furchungs- oder Abrasivverschleiß, Ermüdungverschleiß, Tribooxidationsverschleiß), wenn z.B. die Verschleißerscheinungsformen eindeutig auf einen vorherrschenden Mechanismus hinweisen.

Dabei ist zu beachten, dass bei jedem Verschleißvorgang verschiedene Verschleißmechanismen wirksam werden können, so dass sich auch bei ein und derselben Verschleißart unterschiedliche Verschleißerscheinungsformen zeigen können. In Tabelle 2.2.b sind die hauptsächlichsten Verschleißarten, die sich für die verschiedenen tribologischen Beanspruchungen ergeben können, mit einer Kennzeichnung der wirkenden Verschleißmechanismen zusammengestellt. In Abhängigkeit von der tribologischen Beanspruchung und den am Verschleiß beteiligten Stoffen können sowohl die Verschleißarten als auch die Verschleißmechanismen in Kombination auftreten. In diesen Fällen ist die Einordnung praktischer Verschleißfälle in Tabelle 2.2.b häufig schwierig.

ANMERKUNG:

- a) *In Tabelle 2.2.b sind zur Vereinfachung die Begriffe „Festkörper, Flüssigkeit, Gas“ angewendet worden. In einem konkreten Verschleißfall sind sowohl die Verschleißpartner (durch Angabe genauer Stoffdaten) als auch der Bewegungsablauf der tribologischen Beanspruchung genauer zu spezifizieren.*
- b) *Bei vollständiger Trennung von Grund- und Gegenkörper durch einen flüssigen oder gasförmigen Zwischenstoff (z.B. Hydrodynamik, Aerodynamik) tritt Verschleiß durch Adhäsion und Abrasion nicht auf. Es können jedoch andere Mechanismen, wie z.B. Oberflächenzerrüttung oder tribochemische Reaktionen, wirksam werden.*

Verschleißmechanismen

Unter Verschleißmechanismen versteht man die den Verschleißvorgang verursachenden physikalischen und chemischen Prozesse. Sie ergeben sich durch das Einwirken des Beanspruchungskollektivs auf die Elemente des tribologischen Systems und äußern sich in energetischen und stofflichen Wechselwirkungen zwischen Grundkörper (1) und Gegenkörper (2) bei Beeinflussung durch Zwischenstoff (3) und Umgebungsmedium (4).

Nach dem heutigen Stand der Kenntnisse müssen vier voneinander verschiedene Haupt-Verschleißmechanismen unterschieden werden:

- **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).
- **Abrasion:**
Materialabtrag durch furchende und ritzende Beanspruchung (Mikrospanen, -furchen, -brechen))
- **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.

ANMERKUNG:

- a) *Treten bei einem Verschleißvorgang Materialverluste nicht nur als Verschleißpartikel, sondern auch „molekülweise“ durch Diffundieren, Verdampfen oder Sublimieren auf, so spricht man von „Tribosublimation“.*
- b) *Neben den Haupt-Verschleißmechanismen können in speziellen technischen Systemen, wie z.B. elektrischen Kontakten, auch noch andere Schädigungsprozesse, z.B. durch elektrischen Stromfluss oder lokale Überhitzung im Kontaktbereich, auftreten.*
- c) *In einem konkreten Verschleißfall können die Haupt-Verschleißmechanismen einzeln auftreten, sich bei Änderung des Beanspruchungskollektivs oder der Struktur des tribologischen Systems ablösen, oder auch gleichzeitig einander überlagert sein. Dabei ist eine Voraussage über das Gesamt-Verschleißverhalten durch Superposition bekannter Einzel-Verschleißmechanismen im allgemeinen nicht möglich.*

Die beim Wirken der einzelnen Verschleißmechanismen an den beanspruchten Werkstoffoberflächen auftretenden hauptsächlichen Verschleißerscheinungsformen sind in Tabelle 2.2.b zusammengestellt.

Tabelle 2.2.b Gliederung des Verschleißgebietes nach Art der tribologischen Beanspruchung

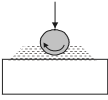
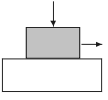
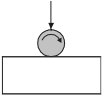
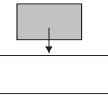
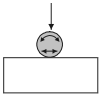
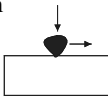
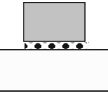
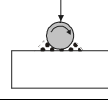
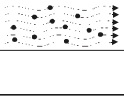
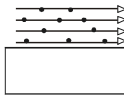
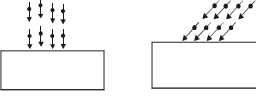
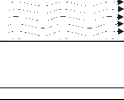
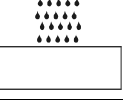
Elemente der Systemstruktur	Tribologische Beanspruchung (Symbole)	Verschleißart	Wirksame Mechanismen			
			Adhäsion	Abrasion	Oberflächenzerüttung	Tribochemische Reaktionen
Festkörper (1) Zwischenstoff (3) (Hydrodynamik) Festkörper (2)	Gleiten Rollen Wälzen Prallen, Stoßen 	---			X	X
Festkörper (1) Festkörper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

Tabelle 2.3. Typische Verschleißerscheinungsformen durch die Haupt-Verschleißmechanismen

Verschleißmechanismus	Verschleißerscheinungsformen
Adhäsion	Fresser, Löcher, Kuppen, Schuppen, Materialübertrag
Abrasion	Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen
Oberflächenzerrüttung	Risse, Grübchen
Tribochemische Reaktionen	Reaktionsprodukte (Schichten, Partikel)

2.4 Systembeschreibung eines Verschleißvorgangs

Die zur Systembeschreibung eines Verschleißvorganges benötigten Daten aus den Bereichen

- Technische Funktion des Tribosystems (Abschnitt 2.2)
- Beanspruchungskollektiv (Abschnitt 2.2)
- Struktur des Tribosystems (Abschnitt 2.2)
- Verschleißkenngrößen (Abschnitt 2.2)

können anhand des Vordruckes (siehe Anhang 2.2.a) zusammengestellt werden.

ANMERKUNG: Der Vordruck kann dazu dienen, die wesentlichen Kenndaten eines praktischen Verschleißfalles zu kennzeichnen, um so u.a. die nötigen Unterlagen für eine Verschleißprüfung festzulegen. Umgekehrt lassen sich mit Hilfe des Vordruckes die wesentlichen Ergebnisse einer Verschleißprüfung festhalten, womit der Bereich entsprechender praktischer Verschleißfälle abgegrenzt werden kann. Im Einzelfall kann der Vordruck auch vereinfacht oder gegebenenfalls erweitert werden.

2.A Liste der Verschleißbegriffe in alphabetischer Reihenfolge

Nr.	Benennung		Definition
1	Abblätterung Spalling, Flaking Ecaillage (Ecaillage)	VE	Ablösung flacher Teilchen aus Oberflächen, z. B. aufgrund von Material- und Bearbeitungsfehlern oder Überbeanspruchung.
2	Abnutzung Wear Usure	BA	Unerwünschte Gebrauchswertminderung von Gegenständen durch mechanische, chemische, thermische und/oder elektrische Energieeinwirkung (siehe auch DIN 31051).
3	Abplatzer Chipping, Flaking Eclat, Ecaillage, Edaillement	VE	Verhältnismäßig großflächiger flacher Ausbruch aus einer Oberfläche (siehe auch DIN 3979).
4	Abrasion Abrasion Abrasion	VM	Verschleißmechanismus (Nr. 105) mit Materialabtrag durch furchende oder ritzende Beanspruchung.
5	Abrasivverschleiß Abrasive wear Usure abrasive	VA	Verschleißart (Nr. 92), hervorgerufen durch den Mechanismus der Abrasion (Nr. 4).
6	Abrieb Wear debris Dechets d'abrasion, Particules d'usure	VE	Von Funktionsfläche durch tribologische Beanspruchung abgetragenes Material.
7	Abstumpfung Blunting, Truncating Emoussement, Epoinement	VE	Unerwünschte Konturveränderung, z. B. einer Schneidkante oder Spitze.
8	Adhäsion Adhesion Adhérence	VM	Ausbildung einer Grenzflächen-Haftverbindung, Reibungsmechanismus, Verschleißmechanismus.
9	Adhäsivverschleiß Adhesive wear Usure d'adhésive	VA	Verschleißart (Nr. 92), hervorgerufen durch den Mechanismus der Adhäsion (Nr.8)
10	An-, Ausschmelzung Fusion of low melting phases Fusion de phases	VE	Durch Reibungswärme auftretende Verschleißerscheinungsform infolge Schmelzens von Werkstoffbestandteilen.
11	Anschürfung Scrape Ecorchure, Eraflure	VE	Aufrauung der Lauffläche eines Wälzlagers durch Gleiten (Nr. 42) statt Rollen (Nr. 67) der Wälzkörper.
12	Ausbruch Flaking Ecaillage	VE	Schädigung in der Oberfläche, bei der die Trennfläche des Schädigungsbereiches überwiegend Bruchmerkmale aufweist.
13	Auskolkung (Kolk) Formation of craters Cratérisation	VE	Muldenförmige Verschleißerscheinung, z. B. in Fördersystemen durch abrasiv wirkende Schüttgüter sowie auf der Spanfläche von Werkzeugen.
14	Auswaschung Erosion, Washout Erosion (par lavage)	VE	Materialabtrag durch strömende Medien, häufig infolge Wirbelbildung.
15	Bauteil-Verschleißprüfung Component wear test Essai d'usure d'éléments mécaniques	VP	Verschleißprüfung mit Original-Bauteilen in einem Aggregat (siehe Kapitel 5.1, frühere DIN 50322)

16	Beanspruchungskollektiv Operating variables Variables de sollicitation	BA	Gesamtheit der auf die Elemente des Verschleißsystems (Nr. 115) von außen einwirkenden Beanspruchungsgrößen.
17	Betriebs-Verschleißprüfung Field wear test Essai d'usure en service	VP	Verschleißprüfung unter Praxisbedingungen mit komplettem Gerät, kompletter Maschine oder Anlage (siehe Kapitel 5.1, frühere DIN 50322).
18	Blitztemperatur Flash temperature Temperatur-Eclair	BA	Kurzzeitige Temperaturerhöhung im Mikrobereich einer Reibfläche (siehe OECD-Glossary).
19	Brandriss Craze Cracking, Checking Fissuration thermique	VE	Risse oder Rissnetzwerk an der Oberfläche, verursacht durch gleichzeitige hohe Schub- und Wärmebeanspruchung bei Grenzreibung oder beginnendem Fressen (Nr. 36).
20	Dauer-Verschleiß Permanent wear Usure en regime permanente	VG	Verschleiß (Nr. 91) nach erfolgtem Einlaufen (Nr. 26).
21	Delamination Delamination Délamination	VE	Ablösung einer (Oberflächen-)Schicht durch mechanische oder thermische Überbeanspruchung.
22	Dreikörperverschleiß Three body abrasion Usure à trois corps	VA	Bezeichnung für Korngleitverschleiß (Nr. 51) und Kornwälzverschleiß (Nr. 52).
23	Einbettung Embedding Inclusion	VE	Einlagerung harter Fremdpartikel in den weicheren Grund- oder Gegenkörper.
24	Eindrückung (Eindruck) Indentation Empreinte par des particules	VE	Oberflächendeformation durch Partikel, die in Grund- oder Gegenkörper eingedrückt wurden.
25	Eingriffsverhältnis Overlap ratio Taux de portance	BK	Verhältnis von Kontaktfläche zu Reibfläche eines Reibkörpers.
26	Einlaufen Running in Rodage	BA	Veränderung sowohl der Geometrie als auch der physikalischen, chemischen oder mechanischen Eigenschaften der Oberflächenbereiche zweier Reibpartner im Anfangsstadium der Beanspruchung (siehe auch ISO 4378-2 :1983).
27	Einlaufgrübchen Initial pitting Piqure naissante, Pitting de rodage	VE	Während des Einlaufens durch örtliche Überbeanspruchung entstandene Grübchen (siehe auch DIN 3979).
28	Einlaufverschleiß Running in wear Usure de rodage	BA	Während des Einlaufens auftretender, leicht erhöhter, oft erwünschter Verschleiß (Nr. 91).
29	Elektroerosiver Verschleiß Electroerosive wear Usure par électroerosion	VA	Durch elektrische Entladung begünstigter Materialabtrag im Verschleißsystem (Nr. 115).
30	Ermüdungverschleiß Fatigue wear Usure par fatigue	VA	Verschleiß (Nr. 91) infolge Werkstoffzerrüttung durch zyklische tribologische Beanspruchungen.

31	Erosion Erosion Erosion	BA	Einwirkung beweglicher abrasiver Stoffe oder strömender Flüssigkeiten und Gase sowie deren Kombinationen auf Festkörper.
32	Erosionsverschleiß Erosive wear Usure par érosion	VA	Materialabtrag durch Erosion (Nr. 31).
33	Erosions-Korrosion Corrosion-erosion Erosio-corrosion	VA	Zusammenwirken von Erosion (Nr. 31) und Korrosion, wobei die Korrosion im Allgemeinen durch Zerstörung von Schutzschichten als Folge der Erosion (Nr. 31) ausgelöst wird (siehe auch DIN 50900-1).
34	Festkörpererosion Solid particles erosion Erosion par solides	VA	Materialabtrag durch einen Festkörper-Partikelstrom (siehe auch Erosion, Nr. 31).
35	Flüssigkeitserosion Fluid erosion Erosion par fluide	VA	Materialabtrag durch eine strömende Flüssigkeit (siehe auch Erosion, Nr. 31).
36	Fressen Seizure Grippage	VA	Zerstörung von Reibflächen durch Adhäsion (Nr. 8) in makroskopisch sichtbarer Ausprägung.
37	Fressverschleiß (Gear) scuffing Usure par grippage	VA	Adhäsivverschleiß (Nr. 9) in makroskopisch sichtbarer Ausprägung.
38	Furchungverschleiß Scouring Abrasion Abrasion par griffures	VA	Verschleiß (Nr. 91) durch die abrasive Wirkung von Rauheiten oder harten Partikeln bei gleitender Beanspruchung.
39	Gaserosion Gas erosion Erosion par gaz	VA	Materialabtrag durch strömendes Gas.
40	Gegenkörper Counter body Corps antagoniste	SS	Einer der Reibpartner und damit Element des Tribosystems neben Grundkörper, Zwischenstoff und Umgebungsmedium, üblicherweise der Reibpartner des betrachteten Bauteils (oder Körpers).
41	Gesamtgebrauchsdauer Total life Durée de vie totale	VG	Dauer der Beanspruchung einschließlich der Stillstandzeiten, nach der ein Bauteil oder Tribosystem durch Verschleiß (Nr. 91) seine Funktionsfähigkeit verliert.
42	Gleiten Sliding Glissement	BK	Tangentiale Relativbewegung eines festen Körpers in Berührung mit einem anderen.
43	Gleitstrahlverschleiß Abrasive erosion Erosion par jet tangentiel	VA	Sonderform des Strahlverschleißes (Nr. 80) bei nahezu parallel zur Oberfläche gerichtetem Partikelstrahl.
44	Gleitverschleiß Sliding wear Usure par glissement	VA	Verschleiß (Nr. 91) bei tangentialer Relativbewegung in Kontakt befindlicher Festkörper.

45	Grübchen Pitting Piqüre	VE	Muschelförmige Vertiefungen durch Abtrag von Werkstoffteilchen infolge Oberflächenzerrüttung (siehe auch DIN 3979). Anmerkung: In Fachnormen über Zahnräder und Wälzlager werden Grübchen den Ermüdungsschäden zugerechnet.
46	Grundkörper Body Corps	SS	Einer der Reibpartner und damit Element des Verschleißsystems (Nr. 115) neben Gegenkörper, Zwischenstoff und Umgebungsmedium, üblicherweise das betrachtete Bauteil.
47	Hydroabrasivverschleiß Hydroabrasive wear Usure par hysroabrasion	VA	Verschleiß (Nr. 91) durch harte Körper oder Partikel, welche in einer strömenden Flüssigkeit mitgeführt werden (siehe auch Erosionsverschleiß, Nr. 32).
48	Kavitation Cavitation Cavitation	BA	Bildung von Hohlräumen in Flüssigkeiten bei lokaler Unterschreitung des Dampfdrucks und deren anschließende Implosion. Dabei können kleinste Flüssigkeitsstrahlen (Micro jets) höchster Geschwindigkeit entstehen, die auf die Werkstoffoberfläche auftreffen können. Die Unterschreitung des Dampfdrucks kann durch Schwingungen oder durch Strömung verursacht werden.
49	Kavitationserosion Cavitation erosion Erosion par Cavitation	VA	Materialabtrag durch Oberflächenzerrüttung infolge des Auftreffens kavitationsbedingter Micro-jets. Anmerkung: Der Begriff "Werkstoffkavitation" sollte nicht verwendet werden.
50	Kolk Crater Cratere	VE	Siehe Auskolkung (Nr. 13).
51	Korngleitverschleiß (Dreikörperverschleiß) Three body abrasion Abrasion, usure par glissement des grains	VA	Verschleiß (Nr. 91) bei gleitender Relativbewegung von zwei Festkörpern, zwischen denen sich abrasiv wirkende Partikel befinden (Dreikörperverschleiß).
52	Kornwälzverschleiß Rolling abrasion Abrasion, usure par roulement de grains	VA	Verschleiß (Nr. 91) bei wälzender Relativbewegung von zwei Festkörpern, zwischen denen sich abrasiv wirkende Partikel befinden (Dreikörperverschleiß).
53	Materialübertrag Transfer of material Transfert de matière	VE	Übertrag von Werkstoffteilen eines Körpers auf einen anderen durch Adhäsion (Nr. 8).
54	Narbe Scar Marque, piqüre	VE	Unregelmäßige Vertiefung, hervorgerufen durch Reibkorrosion (Nr. 62), Erosion (Nr. 31), Kavitation (Nr. 48) oder örtlich begrenzte plastische Verformung z. B. durch agglomerierte Verschleißprodukte.
55	Oberflächenzerrüttung Surface fatigue Déformation par fatigue de la surface	VM	Ermüdung und Rissbildung in oberflächennahen Bereichen durch tribologische Wechselbeanspruchungen, die zu Materialabtrennungen und -abtragungen führen können.
56	Passungsrost Fretting debris Rouille de contact	VE	Pulverförmiger, oxidierter Abrieb oder Belag infolge Schwingungverschleiß durch kleinste Relativbewegungen in Passstellen.
57	Prallen Bouncing Rencontrer, Heurter, Chocs	BK	Stoßen annähernd senkrecht zur Oberfläche.

58	Prallstrahlverschleiß Impingement, Impact erosion Usure par jet oblique	VA	Sonderform des Strahlverschleißes (Nr. 80) bei annähernd senkrecht zur Oberfläche gerichtetem Partikelstrahl.
59	Prallverschleiß Impact wear Usure par des chocs	VA	Sonderform des Stoßverschleißes (Nr. 79) bei etwa senkrechtem Stoß.
60	Rattermarke Chatter marks Marques de vibrations	VE	Durch Ruckgleiten (Nr. 68) oder Schwingungen entstehende periodische Veränderungen der Oberflächentopographie.
61	Reaktionsschicht Reaction layer Couche de reaction	VE	Durch tribochemische Reaktion gebildete Schicht aus festen Reaktionsprodukten an der Oberfläche.
62	Reibkorrosion Fretting corrosion Corrosion de contact	VM	Materialabtrag sich berührender Körper bei oszillierender Relativbewegung kleiner Amplitude in Gegenwart korrosiver Medien. Sonderform der tribochemischen Reaktion.
63	Reibmartensit Friction martensite Marensite engendree par frottement	VE	Sehr harte und spröde Schichten an Stahloberflächen, entstanden durch örtliches Überschreiten der Austenitisierungstemperatur infolge Reibungswärme und nachfolgender, sehr schneller Selbstabschreckung.
64	Reiboxidation Fretting corrosion Oxydation par frottement	VM	Materialabtrag sich berührender Körper bei oszillierender Relativbewegung kleiner Amplitude in Gegenwart oxidierender Medien. Sonderform der tribochemischen Reaktion.
65	Riefe Score, Groove Strie, Striure, Rayure	VE	Längere, geradlinige, grabenförmige Oberflächenbeschädigung in Gleitrichtung, die durch harte Oberflächenspitzen des Gegenkörpers oder harte Partikel hervorgerufen wird (siehe auch DIN 3979).
66	Riffel Ripple, Corrugation Rides Usure ondulatoire	VE	Periodische, wellenförmige Oberflächenveränderungen senkrecht zur Bewegungsrichtung.
67	Rollen Rolling Roulement	BK	Relativbewegung zwischen sich (idealisiert) punkt- oder linienförmig berührender Körper, deren Geschwindigkeiten in der Berührungsfläche nach Betrag und Richtung gleich sind und bei der mindestens ein Körper eine Drehbewegung um eine in der momentanen Berührungsfläche liegende Drehachse vollführt (siehe frühere DIN 50323-3).
68	Ruckgleiten Stick slip Broutage Stickslip, Glissement saccade	BK	Intermittierende, ruckartige Relativbewegung von Gleitkörpern als Folge des Aufbaus und der Freigabe von elastischer Energie im Kontaktbereich, verursacht durch Unterschiede zwischen Haft- und Gleitreibung.
69	Schichtbruch Shelling, Spalling Rupture de couche	VE	Aufbrechen und Abplatzen innerhalb oder an der Grenzfläche einer Oberflächenbeschichtung oder Randschicht.
70	Schichtverschleiß Layer wear Usure de couche	VE	Auf Beschichtungen, Überzüge und Randschichten beschränkter Verschleiß (Nr. 91).
71	Schrägstrahlverschleiß Oblique impact erosion Erosion par jet oblique	VA	Sonderform des Strahlverschleißes (Nr. 80), gekennzeichnet durch einen über 0° und unter 90° zur Oberfläche geneigten Partikelstrahl (siehe Gleitstrahlverschleiß, Nr. 43 und Prallstrahlverschleiß, Nr. 58).

72	Schuppe Flake, Spill, sliver Ecaille, Délamination	VE	Überschichtung der Oberfläche durch tangentielle Oberflächenverformungen oder adhäsionsbedingte Werkstoffübertragungen.
73	Schwingen Oscillation, vibrating Osciller, vibrer	BK	Oszillierende Relativbewegung (oft mit sehr kleiner Amplitude).
74	Schwingungsverschleiß Fretting wear Usure de contact Corrosion de contact	VA	Verschleiß (Nr. 91) einander berührender Körper bei oszillierender Relativbewegung kleiner Amplitude.
75	Spülverschleiß Fluid erosion wear Usure par flux erosif	VA	Mulden- und wellenförmige Materialabtragungen durch strömende erosiv wirkende Medien.
76	Steilanstieg (des Verschleißes) Transition (of wear) Etat d'usure transitoire	BA	Der für einige Verschleißvorgänge charakteristische, bei geringer Parameteränderung eintretende, abrupte Übergang der Verschleißrate (Nr. 111) von einer Tieflage in eine Hochlage.
77	Stillstandsmarkierungen Standstill marks Marques d'arret	VE	Aufgrund mechanischer Belastung, von außen einwirkender Schwingungen, korrosiven Angriffs oder Stromdurchgangs im Stillstand entstehende Oberflächenbeschädigungen, die bei nachfolgender Roll- oder Wälzbeanspruchung Initialpunkte für Ausbrüche bilden können.
78	Stoßen Impact Pousser, Marteler, Grenailer	BK	Mechanische Wechselwirkung von kurzer Zeitdauer mit Impuls- und Energieaustausch zwischen aufeinandertreffenden Körpern.
79	Stoßverschleiß Impact wear Usure par martelage, usure par mattage	VA	Verschleiß (Nr. 91) durch Stoßbeanspruchung.
80	Strahlverschleiß Solid particles erosion Erosion par impact	VA	Verschleiß (Nr. 91) durch einen auf eine Festkörperoberfläche treffenden Partikelstrahl.
81	Strömen Flowing, streaming Couler	BK	Kontinuierlicher Stofftransport mit makroskopischer Gesamtvorzugsrichtung.
82	Teilchenfurchung Particule plowing Sillonage par particules	VA	Oberflächenschädigung in Form von Riefen (Nr. 65) und Furchen, hervorgerufen durch Gleitbewegung mehr oder minder frei beweglicher Partikel (siehe Nr. 38).
83	Thermischer Verschleiß Thermal wear Usure thermique	VA	Materialverlust infolge Erweichens, Schmelzens oder Verdampfens bei Gleit- oder Wälzbeanspruchung.
84	Tragbild Bearing area Portée	VE	Durch Veränderung der Oberflächenmorphologie infolge tribologischer Beanspruchung sichtbare Reibfläche.
85	Tribochemische Reaktion Tribochemical Reaction Reaction tribochimique	VM	Reaktion infolge im Verschleißsystem (Nr. 115) durch Reibung aktivierter chemischer Wechselwirkung zwischen Grundkörper, Gegenkörper und angrenzenden Medien (Zwischenstoff, Umgebungsmedium).

86	Tribometer Tribometer Tribomètre	VP	Jegliches Prüfgerät oder Vorrichtung zur Simulation und messtechnischen Erfassung tribologischer Vorgänge.
87	Tribooxidation Tribooxidation Tribooxydation	VM	Oxidationsreaktion von Grund- und/oder Gegenkörper mit Bestandteilen des Zwischenstoffs oder Umgebungsmediums infolge einer reibbedingten Aktivierung. Sonderform der tribochemischen Reaktion.
88	Tropfenschlag Impingement of drops Battements de gouttes	BK	Stoßbeanspruchung von Festkörperoberflächen durch aufprallende Flüssigkeitstropfen.
89	Tropfenschlagerosion Drop erosion Erosion par battements de gouttes	VA	Materialabtrag durch Tropfenschlag.
90	Umgebungsmedium Surround medium Milieu environnant	SS	Element des Verschleißsystems (Nr. 115) neben Grundkörper, Gegenkörper und Zwischenstoff.
91	Verschleiß Wear Usure	BA	Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch tribologische Beanspruchungen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers.
92	Verschleißart Type of wear Mode d'usure	BA	Kennzeichnung eines Verschleißvorgangs nach der Art der tribologischen Beanspruchung (siehe Kapitel 2.3, frühere DIN 50323-1) und der Systemstruktur.
93	Verschleißbedingter Durchsatz Critical throughput Quantité maximale jusqu'à l'usure critique	VG	Volumen, Masse oder Anzahl der Körper, durch die ein Bauteil oder Verschleißsystem (Nr. 115) durch Verschleiß (Nr. 91) das vorgesehene Ende seiner Funktionsfähigkeit erreicht.
94	Verschleißbedingte Lebensdauer Wear life Durée de vie en usure	VG	Gesamtgebrauchsdauer (Nr. 41) abzüglich der Stillstandzeiten.
95	Verschleißbeständigkeit Wear resistance Résistance à l'usure	VG	Vom Verschleißsystem (Nr. 115) und den relevanten Eigenschaften seiner Elemente abhängige Beständigkeit von Bauteilen/Werkstoffen gegen Verschleiß (Nr. 91), ausgedrückt durch den Reziprokwert einer Verschleißrate (Nr. 111). <i>ANMERKUNG: Der Begriff "Verschleißfestigkeit" sollte nicht verwendet werden.</i>
96	Verschleißbetrag Amount of wear Valeur d'usure	VG	Längen-, Flächen-, Volumen- oder Massenänderung des verschleißenden Körpers (linearer, planimetrischer, volumetrischer bzw. massenmäßiger Verschleißbetrag) (siehe Kapitel 4.1, frühere DIN 50321).
97	Verschleiß-Durchsatz-Verhältnis Wear throughput ratio Relation usure — débit	VG	Ableitung des Verschleißbetrages (Nr. 96) nach einer für den Durchsatz charakteristischen Größe, wie z.B. dem Volumen, der Masse oder der Anzahl der Körper oder Werkstücke, durch welche die Beanspruchung hervorgerufen wird.
98	Verschleißerscheinungsform Wear phenomenon Aspects de l'usure	BA	Durch Verschleiß (Nr. 91) sich ergebende Veränderungen im oberflächennahen Bereich eines Körpers sowie Art und Form der anfallenden Verschleißpartikel.

99	Verschleißfaktor, Verschleißkoeffizient Wear coefficient Facteur d'usure	VG	Empirisch zu bestimmender Proportionalitätsfaktor in Verschleißgleichungen.
100	Verschleißfläche Wear(ing) surface Surface d'usure	VG	Durch Verschleiß (Nr. 91) beanspruchter oder für Verschleißbeanspruchung vorgesehener Oberflächenbereich eines Körpers.
101	Verschleißgeschwindigkeit Wearing rate Vitesse d'usure	VG	Ableitung des Verschleißbetrages (Nr. 96) nach der Beanspruchungsdauer.
102	Verschleißhochlage (Hochlage) Severe wear Usure prononcée Usure sévère	BA	Betriebszustand mit vergleichsweise hoher Verschleißrate (Nr. 111). Der Übergang von der Verschleißtieflage in die Verschleißhochlage erfolgt mehr oder weniger abrupt (Steilanstieg).
103	Verschleißkenngröße Wear characteristics Caractéristiques d'usure	BA	Verschleißerscheinungsform oder Verschleißmessgröße.
104	Verschleißmasse, Massenmäßiger Verschleißbetrag Wear mass Masse d'usure	VG	Massenänderung des verschleißenden Körpers bzw. Masse des Abriebs.
105	Verschleißmechanismus Wear mechanism Mecanisme d'usure	BA	Beim Verschleißvorgang ablaufende physikalische und chemische Prozesse.
106	Verschleißmessgröße Wear quantity Quantite d'usure	BA	Direkte oder indirekte Kennzeichnung der Änderung von Gestalt oder Masse eines Körpers durch Verschleiß (Nr. 91).
107	Verschleißpartikel, Verschleißteilchen (Wear debris) Débris d'usure	VG	Aus der Oberfläche verschleißbeanspruchter Körper herausgelöste Teilchen.
108	Verschleißprozess Wear process Régime d'usure	BA	Entstehen und Fortschreiten eines verschleißbedingten Materialverlustes in Grund- und Gegenkörper.
109	Verschleißprüfkette Wear testing sequence Chaine d'essai d'usure	VP	Reihenfolge verschieden aufwendiger Verschleißprüfungen entsprechend den Prüfkategorien, die jeweils auf das Bauteil bzw. dessen Funktion ausgerichtet ist (siehe Kapitel 5.1, frühere DIN 50322).
110	Verschleißprüfmaschine Wear testing machine Machine d'essai d'usure	VP	Einrichtung zur Prüfung des Verschleißverhaltens und gegebenenfalls Messung des Verschleißes (Nr. 91) von Bauteilen/Werkstoffen unter Berücksichtigung der systembedingten Parameter.
111	Verschleißrate Wear rate Taux d'usure	VG	Auf geeignete Bezugsgrößen wie Beanspruchungsdauer, Beanspruchungsweg usw. bezogener Verschleißbetrag (Nr. 96).
112	Verschleißreserve Wear reserve Reserve d'usure	VG	Werkstoffanteil eines Bauteils, der bis zum verschleißbedingten Ausfall verbraucht werden kann.
113	Verschleißschutz-Additiv Antiwear additive Additif anti-usure	SS	Wirkstoff im Zwischenstoff, der durch Grenzflächenwechselwirkungen oder Aufbau von Zwischenschichten den Verschleiß (Nr. 91) im Mischreibungsgebiet herabsetzt.

114	Verschleißschuttschicht Wear protection layer Couche anti-usure Couche resistente à l'usure	SS	Verschleißbeständige, gegebenenfalls regenerierbare Schicht auf Bauteilen/Werkstoffen geringerer Verschleißbeständigkeit.
115	Verschleißsystem Wear System Système d'usure	SS	Tribologisches System (Tribosystem) (siehe Kapitel 1 und 2.2, frühere DIN 50323-1).
116	Verschleißteil Wear part Pièce d'usure	SS	Verschleißbeanspruchtes Bauteil. Vorwiegend auf Bauteile angewendet, auf die eine Verschleißbeanspruchung konzentriert wird.
117	Verschleißtieflage (Tieflage) Mild wear Usure modérée	BA	Betriebszustand mit vergleichsweise geringer Verschleißrate (Nr. 111). Der Übergang von der Verschleißtieflage in die Verschleißhochlage (Nr. 102) erfolgt mehr oder weniger abrupt (Steilanstieg).
118	Verschleißvolumen, volumetrischer Verschleißbetrag Wear volume Volume total usé	VG	Volumenänderung des verschleißenden Körpers.
119	Verschleiß-Weg-Verhältnis Wear-distance-relation Relation usure-distance	VG	Ableitung des Verschleißbetrages (Nr. 96) nach dem Beanspruchungsweg.
120	Verschleißwiderstand Wear resistance Resistance à l'usure	VG	Reziprokwert des Verschleißbetrages (Nr. 96), d. h. Kenngröße für die Verschleißbeständigkeit.
121	Verschleißzustand State of wear Etat d'usure	BA	An Bauteilen infolge Verschleiß (Nr. 91) eingetretene betriebszeitabhängige bleibende Form- und/oder Stoffveränderung.
122	Wälzen Rolling Roulement	BK	Rollen (Nr. 67) mit überlagertem Gleiten (Nr. 42) (Schlupf).
123	Wälzverschleiß Rolling wear Usure due au roulement	VA	Verschleiß durch Wälzen (Nr. 122) von Festkörperoberflächen aufeinander. ANMERKUNG: Der Begriff "Rollverschleiß" sollte nicht verwendet werden.
124	Werkstoffübertragung Transfer of material Transfert de matière	VE	Siehe Materialübertrag, Nr. 53.
125	Zwischenstoff Interfacial medium Troisième corps, corps de Godet	SS	Element des Verschleißsystem (Nr. 115) neben Grundkörper, Gegenkörper und Umgebungsmedium.

2.B Systematische Einordnung

2.B1 Begriffe allgemeiner Art (BA)

Abnutzung, Nr. 2
 Beanspruchungskollektiv, Nr. 16
 Blitztemperatur, Nr. 18
 Einlaufen, Nr. 26
 Einlaufverschleiß, Nr. 28
 Erosion, Nr. 31
 Kavitation, Nr. 48
 Steilanstieg (des Verschleißes), Nr. 76
 Verschleiß, Nr. 91
 Verschleißart, Nr. 92
 Verschleißerscheinungsform, Nr. 98
 Verschleißhochlage (Hochlage), Nr. 102
 Verschleißkenngröße, Nr. 103
 Verschleißmechanismus, Nr. 105
 Verschleißmessgröße, Nr. 106
 Verschleißprozess, Nr. 108
 Verschleißtieflage, Tieflage, Nr. 117
 Verschleißzustand, Nr. 121

2.B2 Beanspruchungskollektiv (BK)

Eingriffsverhältnis, Nr. 25
 Gleiten, Nr. 42
 Prallen, Nr. 57
 Rollen, Nr. 67
 Ruckgleiten, Nr. 68
 Schwingen, Nr. 73
 Stoßen, Nr. 78
 Strömen, Nr. 81
 Tropfenschlag, Nr. 88
 Wälzen, Nr. 122

2.B3 Systemstruktur (SS)

Gegenkörper, Nr. 40
 Grundkörper, Nr. 46
 Umgebungsmedium, Nr. 90
 Verschleißschutz-Additive, Nr. 113
 Verschleißschutzschicht, Nr. 114
 Verschleißsystem, Nr. 115
 Verschleißteil, Nr. 116
 Zwischenstoff, Nr. 125

2.B4 Verschleißarten (VA)

Abrasivverschleiß, Nr. 5
 Adhäsivverschleiß, Nr. 9
 Dreikörperverschleiß, Nr. 22
 Elektroerosiver Verschleiß, Nr. 29
 Ermüdungverschleiß, Nr. 30
 Erosions-Korrosion, Nr. 33
 Erosionsverschleiß, Nr. 32
 Festkörpererosion, Nr. 34
 Flüssigkeitserosion, Nr. 35
 Fressen, Nr. 36
 Fressverschleiß, Nr. 37
 Furchungverschleiß, Nr. 38
 Gaserosion, Nr. 39
 Gleitstrahlverschleiß, Nr. 43

Gleitverschleiß, Nr. 44
 Hydroabrasivverschleiß, Nr. 47
 Kavitationserosion, Nr. 49
 Korngleitverschleiß (Dreikörperverschleiß), Nr. 51
 Kornwälzverschleiß, Nr. 52
 Prallstrahlverschleiß, Nr. 58
 Prallverschleiß, Nr. 59
 Schrägstrahlverschleiß, Nr. 71
 Schwingungverschleiß, Nr. 74
 Spülverschleiß, Nr. 75
 Stoßverschleiß, Nr. 79
 Strahlverschleiß, Nr. 80
 Teilchenfurchung, Nr. 82
 Thermischer Verschleiß, Nr. 83
 Tropfenschlagerosion, Nr. 89
 Wälzverschleiß, Nr. 123

2.B5 Verschleißerscheinungsformen (VE)

Abblätterung, Nr. 1
 Abplatzer, Nr. 3
 Abrieb, Nr. 6
 Abstumpfung, Nr. 7
 An-, Ausschmelzung, Nr. 10
 Anschürfung, Nr. 11
 Ausbruch, Nr. 12
 Auskolkung (Kolk), Nr. 13
 Auswaschung, Nr. 14
 Brandriss, Nr. 19
 Delamination, Nr. 21
 Einbettung, Nr. 23
 Eindrückung, Nr. 24
 Einlaufgrübchen, Nr. 27
 Grübchen, Nr. 45
 Kolk, Nr. 50
 Materialübertrag, Nr. 53
 Narbe, Nr. 54
 Passungsrost, Nr. 56
 Rattermarke, Nr. 60
 Reaktionsschicht, Nr. 61
 Reibmartensit, Nr. 63
 Riefe, Nr. 65
 Riffel, Nr. 66
 Schichtbruch, Nr. 69
 Schichtverschleiß, Nr. 70
 Schuppe, Nr. 72
 Stillstandsmarkierungen, Nr. 77
 Tragbild, Nr. 84
 Werkstoffübertragung, Nr. 124

2.B6 Verschleiß-Messgrößen (VG)

Dauer-Verschleiß, Nr. 20
 Gesamtgebrauchsdauer, Nr. 41
 Verschleißbedingte Lebensdauer, Nr. 94
 Verschleißbedingter Durchsatz, Nr. 93
 Verschleißbeständigkeit, 95
 Verschleißbetrag, Nr. 96
 Verschleiß-Durchsatz-Verhältnis, Nr. 97
 Verschleißfaktor, Verschleißkoeffizient, Nr. 99
 Verschleißfläche, Nr. 100
 Verschleißgeschwindigkeit, Nr. 101

Verschleißmasse, massenmäßiger Verschleißbetrag, Nr. 104
 Verschleißpartikel, Verschleißteilchen, Nr. 107
 Verschleißrate, Nr. 111
 Verschleißreserve, Nr. 112
 Verschleißvolumen, volumetrischer Verschleißbetrag, Nr. 118
 Verschleiß-Weg-Verhältnis, Verschleißintensität, Nr. 119
 Verschleißwiderstand, Nr. 120

2.B7 Verschleißmechanismen (VM)

Abrasion, Nr. 4
 Adhäsion, Nr. 8
 Oberflächenzerrüttung, Nr. 55
 Reibkorrosion, Nr. 62
 Reiboxidation, Nr. 64
 Tribochemische Reaktion, Nr. 85

Tribooxidation, Nr. 87

2.B8 Verschleißprüfung (VP)

Bauteil-Verschleißprüfung, Nr. 15
 Betriebs-Verschleißprüfung, Nr. 17
 Tribometer, Nr. 86
 Verschleißprüfkette, Nr. 109
 Verschleißprüfmaschine, Nr. 110

2.C Stichwortverzeichnis in Englisch

Abrasion, Nr. 4
 Abrasive erosion, Nr. 43
 Abrasive wear, Nr. 5
 Adhesion, Nr. 8
 Adhesive wear, Nr. 9
 Amount of wear, Nr. 96
 Antiwear additive, Nr. 113
 Bearing area, Nr. 84
 Blunting, Nr. 7
 Body, Nr. 46
 Bouncing, Nr. 57
 Cavitation, Nr. 48
 Cavitation erosion, Nr. 49
 Charter marks, Nr. 60
 Checking, Nr. 19
 Chipping, Nr. 3
 Component wear test, Nr. 15
 Corrosion-erosion, Nr. 33
 Corrugation, Nr. 66
 Counter body, Nr. 40
 Crater, Nr. 50
 Craze Cracking, Nr. 19
 Critical throughput, Nr. 93
 Delamination, Nr. 21
 Drop erosion, Nr. 89
 Electroerosive wear, Nr. 29
 Embedding, Nr. 23
 Erosion, Nr. 14,31
 Erosive wear, Nr. 32
 Fatigue wear, Nr. 30
 Field wear test, Nr. 17
 Flake, Nr. 72
 Flaking, Nr. 1; Nr. 3; Nr. 12
 Flash temperature, Nr. 18
 Flowing, Nr. 81
 Fluid erosion, Nr. 35
 Fluid erosion wear, Nr. 75
 Formation of craters, Nr. 13

Fretting corrosion, Nr. 62; Nr. 64
 Fretting debris, Nr. 56
 Fretting wear, Nr. 74
 Fusion of low melting phases, Nr. 10
 Gas erosion, Nr. 39
 (Gear) scuffing, Nr. 37
 Groove, Nr. 65
 Hydroabrasive wear, Nr. 47
 Impact, Nr. 78
 Impact wear, Nr. 61; Nr. 59
 Indentation, Nr. 24
 Initial pitting, Nr. 27
 Impingement of drops, Nr. 88
 Impingement, Impact erosion, Nr. 58
 Interfacial medium, Nr. 125
 Layer wear, Nr. 70
 Mild wear, Nr. 117
 Oblique impact erosion, Nr. 71
 Operating variables, Nr. 16
 Oscillating, Nr. 73
 Overlap ratio, Nr. 25
 Particle plowing, Nr. 82
 Permanent wear, Nr. 20
 Pitting, Nr. 45
 Reaction layer, Nr. 61
 Ripple, Nr. 66
 Rolling, Nr. 67; Nr. 122
 Rolling abrasion, Nr. 52
 Rolling wear, Nr. 123
 Running in, Nr. 26
 Running in wear, Nr. 28
 Scar, Nr. 54
 Score, Nr. 65
 Souring Abrasion, Nr. 38
 Scrape, Nr. 11
 Seizure, Nr. 36
 Severe wear, Nr. 102
 Shelling, Nr. 69
 Sliding, Nr. 42
 Sliding wear, Nr. 44
 Sliver, Nr. 72
 Solid particle erosion, Nr. 34; Nr. 80
 Spalling, Nr. 1; Nr. 69
 Spill, Nr. 72
 Standstill marks, Nr. 77
 State of wear, Nr. 121
 Stick slip, Nr. 68
 Streaming, Nr. 81
 Surface fatigue, Nr. 55
 Surrounding medium, Nr. 90
 Thermal wear, Nr. 83

Three body abrasion, Nr. 22; Nr. 51
 Total life, Nr. 41
 Transfer of material, Nr. 53; Nr. 124
 Transition (of wear), Nr. 76
 Tribochemical Reaction, Nr. 85
 Tribometer, Nr. 86
 Tribooxidation, Nr. 87
 Truncating, Nr. 7
 Type of wear, Nr. 92
 Vibrating, Nr. 73
 Washout, Nr. 14
 Wear,Nr3;Nr91
 Wear debris, Nr. 6; Nr. 107
 Wear — distance relation, Nr. 119
 Wear characteristics, Nr. 103
 Wear coefficient, Nr. 99
 Wear life, Nr. 94
 Wear mass, Nr. 104

2.D Stichwortverzeichnis in Französisch

Abrasion, Nr. 4; Nr. 51; Nr. 52
 Abrasion par griffures, Nr. 38
 Additif anti-usure, Nr. 113
 Adherence, Nr. 8
 Aspects de l'usure, Nr. 98
 Battements de gouttes, Nr. 88
 Broutage, Nr. 68
 Cavitation, Nr. 48
 Cavitation erosion, Nr. 49
 Chaîne d'essai d'usure, Nr. 109
 Caractéristiques d'usure, Nr. 103
 Chocs, Nr. 57
 Corps, Nr. 46
 Corps antagoniste, Nr. 40
 Corps de Godet, Nr. 125
 Corrosion de contact, Nr. 62
 Couche anti-usure, Nr. 114
 Couche de reaction, Nr. 61
 Couche resistente à l'usure, Nr. 114
 Couler, Nr. 81
 Cratere, Nr. 50
 Craterisation, Nr. 13
 Debris d'usure, Nr. 107
 Dechets d'abrasion, Nr. 6
 Deformation par fatigue de la surface, Nr. 55
 Delamination, Nr. 21; Nr. 72
 Duree de vie en usure, Nr. 94
 Duree de vie totale, Nr. 41
 Ecaillage, Nr. 12
 Ecaillage (Ecaillage), Nr. 1; Nr. 3
 Ecaille, Nr. 72
 Eclat, Nr. 3
 Ecorchure, Nr. 11
 Emoussement, Nr. 7
 Empreinte par des particules, Nr. 24
 Epoinement, Nr. 7
 Eraflure, Nr. 11
 Erosion, Nr. 31
 Erosion-corrosion, Nr. 33
 Erosion (par lavage), Nr. 14
 Erosion par battements de gouttes, Nr. 89
 Erosion par cavitation, Nr. 49
 Erosion par fluide, Nr. 35
 Erosion par gaz, Nr. 39
 Erosion par impact, Nr. 80
 Erosion par jet oblique, Nr. 71
 Erosion par jet tangentiel, Nr. 43

Wear mechanism, Nr. 105
 Wear phenomenon, Nr. 98
 Wear process, Nr. 108
 Wear protection layer, Nr. 114
 Wear quantity, Nr. 106
 Wearing rate, Nr. 101; Nr. 111
 Wear reserve, Nr. 112
 Wear resistance, Nr. 95; Nr. 120
 Wear System, Nr. 115
 Wear testing machine, Nr. 110
 Wear testing sequence, Nr. 109
 Wear throughput ratio, Nr. 97
 Wear(ing) surface, Nr. 100
 Wearvolume, Nr. 118
 Wear part, Nr. 116

Erosion par solides, Nr. 34
 Essai d'usure d'elements mecaniques, Nr. 15
 Essai d'usure en Service, Nr. 17
 Etat d'usure, Nr. 121
 Etat d'usure transitoire, Nr. 76
 Facteur d'usure, Nr. 99
 Fissuration thermique, Nr. 19
 Fusion de phases, Nr. 10
 Glissement, Nr. 42
 Glissement saccade, Nr. 68
 Grenailleur, Nr. 78
 Grippage, Nr. 36
 Heurter, Nr. 57
 Inclusion, Nr. 23
 Machine d'essai d'usure, Nr. 110
 Marque, Nr. 54
 Marques d'arret, Nr. 77
 Marques de vibrations, Nr. 60
 Marteler, Nr. 78
 Martensite engendree par friction, Nr. 63
 Masse d'usure, Nr. 104
 Mechanisme d'usure, Nr. 105
 Milieu environnant, Nr. 90
 Mode d'usure, Nr. 92
 Osciller, Nr. 73
 Oxidation par frottement, Nr. 64
 Particules d'usure, Nr. 6
 Piece d'usure, Nr. 116
 Piqûre, Nr. 45, Nr. 54
 Piqûre naissante, Nr. 27
 Pitting de rodage, Nr. 27
 Portee, Nr. 84
 Pousser, Nr. 78
 Quantite d'usure, Nr. 106
 Quantite maximale jusqu'à l'usure critique, Nr. 93
 Rayure, Nr. 65
 Reaction tribochimique, Nr. 85
 Regime d'usure, Nr. 108
 Relation usure — debit, Nr. 97
 Relation usure distance, Nr. 119
 Rencontrer, Nr. 57
 Reserve d'usure, Nr. 112
 Resistance à l'usure, Nr. 95; Nr. 120
 Rides, Nr. 66
 Rodage, Nr. 26
 Rouille de contact, Nr. 56
 Roulement, Nr. 67; Nr. 122
 Rupture de couche, Nr. 69
 Sillonage par particules, Nr. 82
 Stickslip, Nr. 68

Strie, Nr. 65
Striure, Nr. 65
Surface d'usure, Nr. 100
Systeme d'usure, Nr. 115
Taux de portance, Nr. 25
Temperature-Eclair, Nr. 18
Transfert de matiere, Nr. 53; Nr. 124
Tribometre, Nr. 86
Tribooxydation, Nr. 87
Troisieme corps, Nr. 125
Usure,Nr2;Nr91
Usure à trois corps, Nr. 22
Usure abrasive, Nr. 5
Usure d'adhesive, Nr. 9
Usure de contact, Nr. 74
Usure de couche, Nr. 70
Usure de rodage, Nr. 28
Usure due au roulement, Nr. 123
Usure moderee, Nr. 117
Usure ondulatoire, Nr. 66
Usure par des chocs, Nr. 59
Usure par electroerosion, Nr. 29
Usure par erosion, Nr. 32
Usure par fatigue, Nr. 30
Usure par flux erosif, Nr. 75
Usure par glissement, Nr. 44
Usure par glissement des grains, Nr. 51
Usure par grippage, Nr. 37
Usure par hydroabrasion, Nr. 47
Usure par jet oblique, Nr. 58
Usure par martelage, Nr. 79
Usure par mattage, N r 79
Usure par roulement de grains, Nr. 52
Usure en regime permanente, Nr. 20
Usure prononcee, Nr. 102
Usure severe, Nr. 102
Usure thermique, Nr. 83
Valeur d'usure, Nr. 96
Variables de sollicitation, Nr. 16
Vibrer, Nr. 73
Vitesse d'usure, Nr. 101
Volume total use, Nr. 118

3. Reibung – Begriffe

Reibung ist eine Wechselwirkung zwischen sich berührenden Stoffbereichen von Körpern. Sie wirkt einer Relativbewegung entgegen.

Bei äußerer Reibung sind die sich berührenden Stoffbereiche verschiedenen Körpern, bei innerer Reibung ein und demselben Körper zugehörig.

3.1 Reibung in Abhängigkeit vom Bewegungszustand

Haftreibung

(auch: statische Reibung, Ruhereibung)

Haftreibung ist die Reibung, bei der die angreifenden Kräfte nicht ausreichen, um eine Relativbewegung zu bewirken.

Bewegungsreibung

(auch: dynamische Reibung)

Reibung zwischen Kontaktpartnern in Relativbewegung zueinander

Anlaufreibung

Anlaufreibung ist die Reibung zu Beginn der Relativbewegung (Haftreibung wird überwunden).

Auslaufreibung

Auslaufreibung ist die Reibung gegen Ende der Relativbewegung (Haftreibung wird erreicht).

3.2 Reibungsarten

(Reibung nach Art der Bewegung der Reibpartner)

Gleitreibung

Gleitreibung ist die Reibung zwischen Körpern, deren Geschwindigkeiten in der Berührungsfläche nach Betrag und/oder Richtung verschieden sind.

Rollreibung

Rollreibung ist die Reibung zwischen sich punkt- oder linienförmig (idealisiert) berührenden Körpern, deren Geschwindigkeiten in der Berührungsfläche nach Betrag und Richtung gleich sind und bei der mindestens ein Körper eine Drehbewegung um eine momentane, in der Berührungsfläche liegende Drehachse ausführt.

Wälzreibung

Wälzreibung ist die Rollreibung, der eine Gleitkomponente (Schlupf) überlagert ist.

Bohrreibung

Bohrreibung ist die Reibung zwischen sich punktförmig (idealisiert) berührenden Körpern, deren Geschwindigkeiten in der Berührungsfläche nach Betrag und/oder Richtung verschieden sind und bei der mindestens ein Körper eine Drehbewegung um eine senkrecht im Zentrum der Berührungsfläche stehende Achse ausführt.

Stoßreibung

Stoßreibung ist die Reibung zwischen Körpern, wobei ein Körper senkrecht oder schräg zur

Berührungsfläche auf einen anderen Körper auftrifft und sich eventuell wieder entfernt.

ANMERKUNG: Zwischen den Reibungsarten können weitere Mischformen auftreten, die durch Kombination der Einzelbegriffe benannt werden.

3.3 Reibungszustände

(Reibung in Abhängigkeit vom Aggregatzustand der beteiligten Stoffbereiche)

Festkörperreibung

Festkörperreibung ist die Reibung zwischen Stoffbereichen mit Festkörpereigenschaften in unmittelbarem Kontakt.

ANMERKUNG: Findet die Reibung zwischen festen Grenzschichten mit modifizierten Eigenschaften, z. B. Reaktionsschichten statt, so nennt man dies Grenzschichtreibung. Handelt es sich bei der Grenzschicht um einen vom Schmierstoff stammenden molekularen Film, so nennt man dies Grenzreibung.

Flüssigkeitsreibung

Flüssigkeitsreibung ist die Reibung im Stoffbereich mit Flüssigkeitseigenschaften (innere Reibung). Dieser Reibungszustand ist auch für eine die Festkörper vollständig trennende flüssige Stoffschicht zutreffend.

Gasreibung

Gasreibung ist die Reibung im Stoffbereich mit Gaseigenschaften (innere Reibung). Dieser Reibungszustand ist auch für eine die Festkörper vollständig trennende gasförmige Stoffschicht zutreffend.

Mischreibung

Mischreibung nennt man jede Mischform der Reibungszustände, primär der Festkörper- und Flüssigkeitsreibung.

3.4 Kenngrößen zur Charakterisierung der Reibung

Reibungskraft F_f

Reibungskraft ist die Kraft, die infolge Reibung als mechanischer Widerstand gegen eine Relativbewegung auftritt.

Reibungsmoment M_f

Reibungsmoment ist das Drehmoment, das infolge Reibung als mechanischer Widerstand gegen eine Drehbewegung auftritt.

$$M_f = F_f \cdot r \quad (1)$$

Hierin bedeutet:

r kürzeste Entfernung zwischen Drehpunkt und Wirkungslinie der Reibungskraft

Reibungsarbeit W_f

Reibungsarbeit ist die Arbeit, die infolge Reibung aufzuwenden ist und die größtenteils oder ganz in Wärme (Reibungswärme) umgewandelt wird.

Reibungsleistung P_f

Reibungsleistung ist die geleistete Reibungsarbeit dividiert durch die Zeit

$$P_f = \frac{W_f}{t} = F_f \cdot v_{\text{rel}} = M_f \cdot \omega_{\text{rel}}$$

Hierin bedeuten:

t	Zeitintervall
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit
ω_{rel}	Relativ-Winkelgeschwindigkeit

Reibungszahl f

Die Reibungszahl ist eine dimensionslose Kenngröße der Reibung der Form

$$f = \frac{F_f}{F_n} \quad (\text{für translatorische Relativbewegung})$$

oder

$$f = \frac{M_f}{r \cdot F} \quad (\text{für rotatorische Relativbewegung})$$

Hierin bedeuten:

F_n	Normalkraft
F	Lagerkraft

Reibungswinkel ρ

Reibungswinkel ist der Winkel zwischen der Richtung der Normalkraft F_n und der Richtung der Resultierenden aus Reibungskraft F_f und Normalkraft F_n

$$\rho = \arctan f$$

und

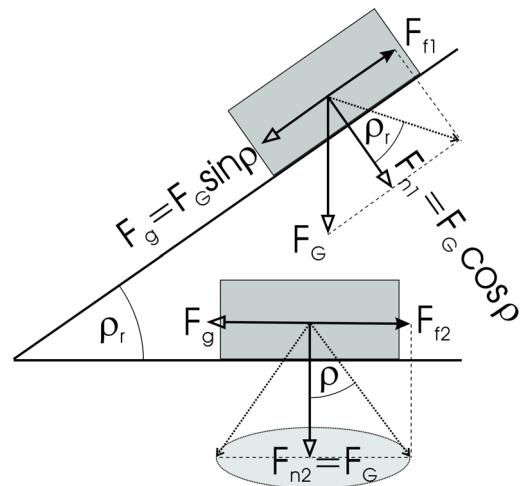
$$f = \tan \rho$$

ANMERKUNG: Der Reibungswinkel ρ beschreibt einen Kegel mit dem Kegelwinkel 2ρ um den Vektor (die Richtung) der Normalkraft F_n , wenn die Reibung im Kontakt rotationssymmetrisch gleich ist. Gleiten liegt vor, wenn die Vektorsumme aus der Normalkraft F_n und der angreifenden Kraft F_g außerhalb dieses Kegels mit dem Kegelwinkel 2ρ liegt.

Haft- oder Ruhereibungswinkel ρ_r nennt man den Reibungswinkel, bei dessen Überschreiten Gleiten eintritt.

$$\rho_r = \arctan f_r$$

Zur Bestimmung von f_r kann ein Probekörper auf eine entsprechende schiefe Ebene gelegt werden und der Neigungswinkel der Ebene so lange erhöht werden, bis der Probekörper bei einem Winkel ρ_r ins Gleiten gerät.



Reibfläche A_f

Die Reibfläche ist der Oberflächenbereich eines Festkörpers, der ständig oder zeitweilig im Reibkontakt steht.

ANMERKUNG: Der Körper mit der kleineren Reibfläche bestimmt die makroskopische (scheinbare) Berührungsfläche, die auch als „nominelle Reibfläche“ oder „nominelle Kontaktfläche“ A_{nom} bezeichnet wird. Innerhalb der nominellen Reibfläche existiert bei Festkörperreibung die „reale Reibfläche A_{real} “ als Summe der statistisch verteilten mikroskopischen Berührungsflächen.

Nominelle Berührungsfläche A_{nom}

Die nominelle Berührungsfläche ist der Reibflächenbereich, in dem die Reibpartner ständig im Eingriff sind.

Reale Berührungsfläche A_{real}

Die reale Berührungsfläche ist die Summe der statistisch verteilten mikroskopischen Berührungsflächen innerhalb der nominellen Berührungsfläche A_{nom} bei Festkörperreibung.

Eingriffsverhältnis ε

Das Eingriffsverhältnis ist das Verhältnis von nomineller Berührungsfläche zur Reibfläche eines Körpers.

$$\varepsilon = \frac{A_{nom}}{A_f}$$

Reibungsvolumen V_f

Das Reibungsvolumen ist der Volumenbereich eines Körpers, in dem sich Reibung mechanisch auswirkt.

|

Reibungsschubspannung

Die Reibungsschubspannung ist die flächenbezogene Reibungskraft in Form

$$\tau_f = \frac{F_f}{A_{nom}} = p_{nom} \cdot f$$

Hierin bedeutet:

p_{nom} nominelle Flächenpressung

4 Verschleiß-Messgrößen

Die Verschleiß-Messgrößen kennzeichnen direkt oder indirekt die Änderung der Gestalt oder Masse eines Körpers durch Verschleiß.

Sie gehören neben den Verschleißerscheinungsformen zu den Verschleißkenngrößen eines tribologischen Systems und sind durch das Einwirken des Beanspruchungskollektivs auf die Struktur des Tribosystems bedingt (siehe Bild 4.1), die aus allen am Verschleißvorgang beteiligten stofflichen Elementen, ihren Eigenschaften und Wechselwirkungen besteht.

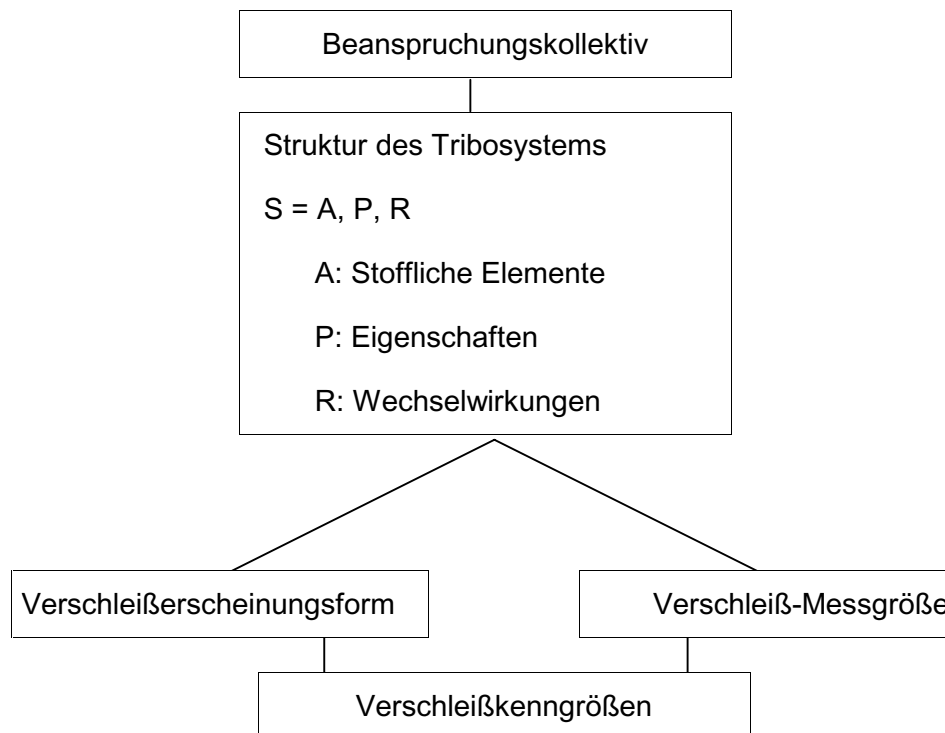


Bild 4.1. Schematische Darstellung eines tribologischen Systems

ANMERKUNG: Da die Verschleiß-Messgrößen keine Werkstoff- sondern Systemkenngrößen darstellen, ist die Angabe von Zahlenwerten dieser Messgrößen nur dann sinnvoll, wenn auch das Beanspruchungskollektiv und die Struktur des Tribosystems angegeben werden.

Es wird zwischen direkten, bezogenen und indirekten Verschleiß-Messgrößen unterschieden.

Direkte Verschleiß-Messgrößen geben die Gestalt- oder Masseänderung eines verschleißenden Körpers an. Bezogene Verschleiß-Messgrößen werden aus den direkten abgeleitet, indem diese auf die Beanspruchungsdauer, den Beanspruchungsweg, den Durchsatz oder gegebenenfalls auch andere geeignete Größen bezogen werden.

Indirekte Verschleiß-Messgrößen geben im allgemeinen die Dauer an, in der ein verschleißendes Bauteil oder Tribosystem seine Funktionsfähigkeit verliert.

Je nach den Verschleißbedingungen, den Messmöglichkeiten und dem Ziel der Untersuchung ist die geeignete Messgröße auszuwählen. Da ungeeignete Messgrößen zu Fehlbeurteilungen führen können, werden Hinweise und Empfehlungen für die Auswahl der jeweils geeigneten Messgröße gegeben.

4.1 Direkte Verschleiß-Messgrößen

Die direkten Verschleiß-Messgrößen sind Maße für die Gestalt- oder Masseänderung eines verschleißenden Körpers.

Verschleißbetrag

Längen-, Flächen-, Volumen- oder Massenänderung des verschleißenden Körpers.

Es erfolgt meistens eine Abnahme der Länge, der Fläche, des Volumens oder der Masse.

Zeichen: W [m]; [m²]; [m³] oder [kg].

*ANMERKUNG: Das Zeichen W ist aus dem Englischen von *Wear* abgeleitet.*

Dezimale Teile der Einheiten für den Verschleißbetrag sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1. Beispiele für dezimale Teile der Einheiten

m	m ²	m ³	kg
cm:= 10 ⁻² m	cm ² := 10 ⁻⁴ m ²	cm ³ := 10 ⁻⁶ m ³	g:= 10 ⁻³ kg
mm:= 10 ⁻³ m	mm ² := 10 ⁻⁶ m ²	mm ³ := 10 ⁻⁹ m ³	mg:= 10 ⁻⁶ kg
µm:= 10 ⁻⁶ m	µm ² := 10 ⁻¹² m ²	µm ³ := 10 ⁻¹⁸ m ³	µg:= 10 ⁻⁹ kg

Linearer Verschleißbetrag

Längenänderung senkrecht zur verschleißenden Fläche.

Zeichen: W_l Einheit: [m]

Planimetrischer Verschleißbetrag

Größe der Schnittfläche, die senkrecht zur verschleißenden Fläche abgetragen wird.

Zeichen: W_q Einheit: [m²]

ANMERKUNG: Die Lage der Schnittfläche ist durch Ortskoordinaten anzugeben. Häufig genügen auch weniger präzise Angaben, wie z.B. der Zusatz „senkrecht zur Bewegungsrichtung“.

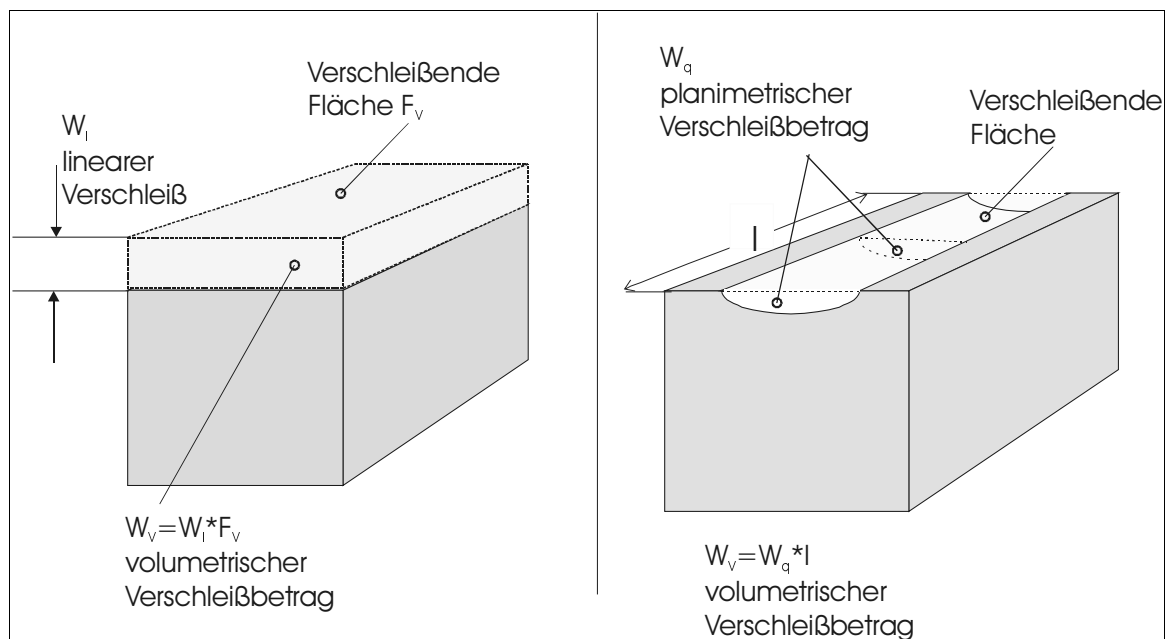


Bild 4.2 Schematische Darstellung des linearen, planimetrischen und volumetrischen Verschleißbetrags

Volumetrischer Verschleißbetrag (Verschleißvolumen)

Volumenänderung des verschleißenden Körpers

Zeichen: W_v Einheit: $[m^3]$ **Massenmäßiger Verschleißbetrag (Verschleißmasse)**

Massenänderung des verschleißenden Körpers

Zeichen: W_m Einheit: $[kg]$ **Relativer Verschleißbetrag**

Verhältnis der Verschleißbeträge des verschleißenden Körpers und eines unter den gleichen Bedingungen verschleißenden Referenzkörpers

Zeichen: W_r Einheit: $[\]$ **Verschleißwiderstand**

Reziprokwert des Verschleißbetrages

Zeichen: $1/W$ Einheiten: $[m^{-1}]$; $[m^{-2}]$; $[m^{-3}]$; $[kg^{-1}]$ **Relativer Verschleißwiderstand**

Reziprokwert des relativen Verschleißbetrages

Zeichen: $1/W_r$ Einheit: $[\]$

ANMERKUNG: Diese sog. „direkten Verschleiß-Messgrößen“ sind für sich allein wenig aussagekräftig. Erst durch die Angabe der Beanspruchungsparameter, insbesondere der Dauer, und des tribologischen Systems werden solche Zahlenwerte nützlich (siehe auch Hinweis unter Bild 4.1). Aus diesem Grund ist die Angabe von „bezogenen Verschleiß-Messgrößen“ vorzuziehen.

4.2 Bezogene Verschleiß-Messgrößen (Verschleißraten)

Die bezogenen Verschleiß-Messgrößen ergeben sich aus dem Verhältnis des Verschleißbetrages zu Bezugsgrößen, wie der Beanspruchungsdauer, dem Beanspruchungsweg, dem Durchsatz oder gegebenenfalls auch anderen geeigneten Größen.

ANMERKUNG: Die bezogenen Verschleiß-Messgrößen kann man durch die mathematische Ableitung des Verschleißbetrages nach der Bezugsgröße ermitteln. Diese Ableitung ist gleich dem Anstieg der in Bild 4.3 wiedergegebenen Kurven. Danach kann sich der Verschleißbetrag linear, progressiv oder degressiv mit der Bezugsgröße ändern. Zu Beginn wird auch gelegentlich ein negativer Verschleißbetrag gemessen, wenn z.B. Werkstoff vom Verschleißpartner aufgetragen wird. Da sich der Anstieg der Verschleißkurven im allgemeinen mit der Bezugsgröße ändert, sollte der Bereich – oder das Intervall – der Bezugsgröße angegeben werden, für den die bezogene Verschleiß-Messgröße gültig ist.

Die bezogenen Verschleiß-Messgrößen lassen sich in drei Hauptgruppen unterteilen (siehe auch Tabelle 4.2):

Verschleißgeschwindigkeit

Ableitung des Verschleißbetrages nach der Beanspruchungsdauer

Zeichen:	$W_{l/t} = \frac{dW_l}{dt}$	$W_{q/t} = \frac{dW_q}{dt}$	$W_{v/t} = \frac{dW_v}{dt}$	$W_{m/t} = \frac{dW_m}{dt}$
Einheiten:	[m/h]	[m ² /h]	[m ³ /h]	[kg/h]

ANMERKUNG: Für die Vergleichbarkeit solcher Werte ist unbedingt die Geschwindigkeit der Bewegung bzw. der Durchsatz anzugeben.

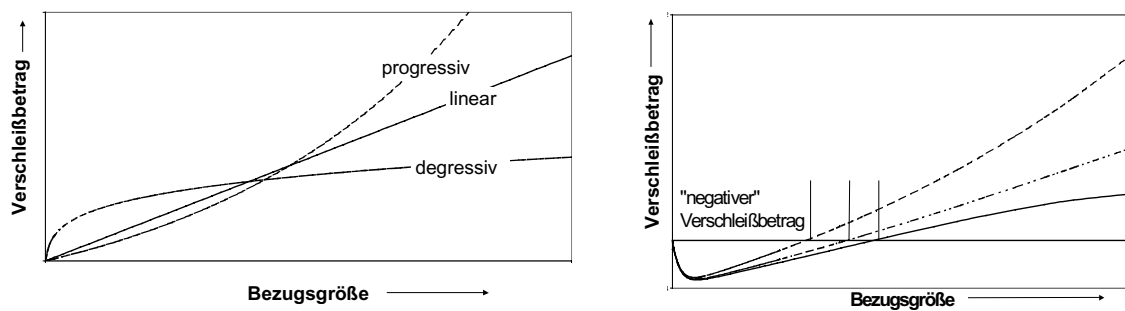


Bild 4.3 Schematischer Verlauf des Verschleißbetrags über der Bezugsgröße

Tabelle 4.2. Zusammenstellung der gebräuchlichsten bezogenen Verschleiß-Messgrößen

	Verschleißbetrag				Bezeichnung
	linear W_l [m]	plani- metrisch W_q [m ²]	volu- metrisch W_v [m ³]	massen- mäßig W_m [kg]	
Bezugsgröße					
Beanspruchungsdauer t [h]	$W_{l/t}$	$W_{q/t}$	$W_{v/t}$	$W_{m/t}$	Verschleiß- geschwindigkeit
Beanspruchungsweg s [m]	$W_{l/s}$	$W_{q/s}$	$W_{v/s}$	$W_{m/s}$	Verschleiß- Weg-Verhältnis
Durchsatz z [m ³]; [kg]; [Stck]	$W_{l/z}$	$W_{q/z}$	$W_{v/z}$	$W_{m/z}$	Verschleiß- Durchsatz- Verhältnis

Verschleiß-Weg-Verhältnis (manchmal auch als Verschleißintensität bezeichnet)

Ableitung des Verschleißbetrages nach dem Beanspruchungsweg

Zeichen:	$W_{l/s} = \frac{dW_l}{ds}$	$W_{q/s} = \frac{dW_q}{ds}$	$W_{v/s} = \frac{dW_v}{ds}$	$W_{m/s} = \frac{dW_m}{ds}$
Einheiten:	[m/m]	[m ² /m]	[m ³ /m]	[kg/m]

Die Ableitung des volumetrischen Verschleißbetrags in [mm³] nach dem Beanspruchungsweg in [m] wird häufig als Verschleißrate bezeichnet.

Verschleißkoeffizient: Die auf die Belastung normierte Verschleißrate wird als Verschleißkoeffizient bezeichnet.

Zeichen: $k = \frac{dW_v}{ds \cdot F}$ Einheit: $\left[\frac{\text{mm}^3}{\text{m} \cdot \text{N}} \right]$

Verschleiß-Durchsatz-Verhältnis

Ableitung des Verschleißbetrages nach dem Volumen, der Masse oder der Anzahl der Körper, z.B. der Gesteinsmenge oder der Anzahl der Werkstücke, durch welche die Beanspruchung hervorgerufen wird.

Zeichen:	$W_{l/z} = \frac{dW_l}{dz}$	$W_{q/z} = \frac{dW_q}{dz}$	$W_{v/z} = \frac{dW_v}{dz}$	$W_{m/z} = \frac{dW_m}{dz}$
Einheit:	$\frac{\text{m}}{\text{m}^3}; \frac{\text{m}}{\text{kg}}; \frac{\text{m}}{\text{Stck}}$	$\frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}; \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}; \frac{\text{m}^2}{\text{Stck}}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}; \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}; \frac{\text{m}^3}{\text{Stck}}$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}_3}; \frac{\text{kg}}{\text{kg}}; \frac{\text{kg}}{\text{Stck}}$

4.3 Indirekte Verschleiß-Messgrößen

Die indirekten Verschleiß-Messgrößen beruhen nicht auf der Messung von verschleißbedingten Gestalt- oder Masseänderungen, sondern auf der Messung der Dauer oder des Durchsatzes, in welcher ein verschleißendes Bauteil oder Tribosystem seine Funktionsfähigkeit verliert.

ANMERKUNG: Zum Abschätzen der indirekten Verschleiß-Messgrößen ist es notwendig, den Neuzustand des Tribosystems genau zu erfassen und das Erreichen seiner Funktionsunfähigkeit genau festzulegen, z.B. durch Angabe eines zulässigen Grenzwertes für die Leistungsabnahme einer Maschine.

Verschleißbedingte Gebrauchsdauer

Dauer der Beanspruchung abzüglich der Stillstandzeiten, in der ein Bauteil oder ein Tribosystem durch Verschleiß seine Funktionsfähigkeit verliert.

Zeichen: T_w Einheit: [h]

Gesamt-Gebrauchsdauer

Dauer der Beanspruchung einschließlich der Stillstandzeiten, in der ein Bauteil oder Tribosystem durch Verschleiß seine Funktionsfähigkeit verliert.

Zeichen: T_G Einheit: [h]

Verschleißbedingte Durchsatzmenge

Volumen, Masse oder Anzahl der Körper, durch die ein Bauteil oder Tribosystem durch Verschleiß seine Funktionsfähigkeit verliert.

Zeichen: D_w

Einheiten: [m^3]; [kg]; [Stck]

4.4 Verschleiß-Messmethoden

In diesem Abschnitt sind die wichtigsten Methoden zur Messung der direkten und bezogenen Verschleiß-Messgrößen aufgeführt. Zum Abschätzen der indirekten Verschleiß-Messgrößen wäre eine so große Zahl von Meßmethoden zu nennen, dass ihre Aufzählung den Rahmen dieser Norm sprengen würde.

Methoden zur Messung direkter Verschleiß-Messgrößen

Von den direkten Verschleiß-Messgrößen können der lineare und in manchen Fällen auch der volumetrische Verschleißbetrag durch Differenzmessung von Längenmaßen ermittelt werden. Dazu können die gebräuchlichen Mengemessgeräte, wie Schieblehre, Bügelmessschraube, Messuhr, Messmikroskop u.a., verwendet werden.

Der volumetrische Verschleißbetrag kann auch aus dem massenmäßigen abgeschätzt werden, wenn die Dichte des verschleißenden Körpers bekannt ist und sich durch den Verschleiß nicht verändert.

Der planimetrische Verschleißbetrag lässt sich am einfachsten mit einem Tastschnittgerät erfassen, mit dem das Profil der Verschleißspur aufgezeichnet wird. Die Profilfläche kann anschließend mit einem Planimeter bestimmt werden.

Der massenmäßige Verschleißbetrag wird in der Regel durch Wägung des verschleißenden Körpers, in manchen Fällen auch durch Messung der Masse der Verschleißpartikel bestimmt.

Methoden zur Messung bezogener Verschleiß-Messgrößen

Bei der Messung von bezogenen Verschleiß-Messgrößen muss neben einer direkten Verschleiß-Messgröße auch eine Bezugsgröße, wie die Zeit, der Weg oder der Durchsatz, erfasst werden. Hierzu sind kontinuierlich oder intermittierend arbeitende Messverfahren notwendig, mit welchen die Verschleiß-Messgrößen über der Bezugsgröße registriert werden können. Für die kontinuierliche Messung der Längenänderung sind induktive und kapazitive Messwertaufnehmer geeignet. Die Verschleißmasse kann kontinuierlich, z.B. durch radioaktive Markierung der verschleißenden Körper, erfasst werden, indem entweder die Abnahme der Aktivität der verschleißenden Oberflächenbereiche oder die Zunahme der Aktivität an einer Sammelstelle für Verschleißpartikel gemessen wird.

ANMERKUNG: Besonders empfindliche Verfahren zur Bestimmung der Masse von Verschleißpartikeln sind unter besonderen Bedingungen die Röntgenfluoreszenz-Analyse und die Atomabsorptionsspektroskopie.

4.5 Empfehlungen für die Auswahl von Verschleiß-Messgrößen**Direkte oder bezogene Verschleiß-Messgrößen**

Direkte Verschleiß-Messgrößen sind angebracht, wenn es in erster Linie auf den Zustand eines verschleißenden Körpers nach Unterbrechung oder Beendigung der Beanspruchung ankommt. Sollen dagegen Aussagen über den Verschleißverlauf gemacht werden, indem z.B. die Dauer des Einlaufverschleißes erfasst werden soll, so sind bezogene Verschleiß-Messgrößen zu bevorzugen.

Direkte oder indirekte Verschleiß-Messgrößen

Indirekte Verschleißmessgrößen werden verwendet, wenn die Messung von direkten Verschleiß-Messgrößen einen nicht tragbaren Aufwand erfordert, den Verschleißablauf stört oder wenn nur Aussagen über eine verschleißbedingte Abnahme der Funktionsfähigkeit eines Tribosystems von Interesse sind.

Lineare, planimetrische, volumetrische oder massenmäßige Verschleiß-Messgrößen

Lineare Verschleiß-Messgrößen können vor allem dann benutzt werden, wenn der Verschleiß gleichmäßig über die verschleißende Fläche verteilt ist und wenn die Größe der verschleißenden Fläche konstant bleibt. Ist der Verschleiß über die verschleißende Fläche nicht konstant, so sind planimetrische, volumetrische oder massenmäßige Verschleiß-Messgrößen angebracht. In manchen Fällen reicht es auch, den linearen Verschleißbetrag an einer oder mehreren repräsentativen Stellen zu messen.

Verschleißbetrag oder relativer Verschleißbetrag

Im Regelfall ist der Verschleißbetrag zu messen. Die Angabe des relativen Verschleißbetrages empfiehlt sich dann, wenn bei vergleichenden Verschleißuntersuchungen das Beanspruchungskollektiv oder die Eigenschaften der anderen am Verschleiß beteiligten Elemente nicht konstant gehalten werden können, oder absichtlich verändert werden.

Verschleißbetrag oder Verschleißwiderstand

Im allgemeinen wird der Verschleißbetrag gemessen. Zur Verdeutlichung des Einflusses verschiedener Werkstoff- oder Beanspruchungsparameter ist häufig die Angabe des Verschleißwiderstandes vorteilhaft.

4.A Tabellarische Zusammenstellung der Verschleiß-Messgrößen

Verschleiß-Messgrößen-Gruppe	Benennung	Zeichen	Einheit ¹⁾	Abschnitt
Direkte Verschleiß-Messgrößen	Verschleißbetrag (allgemein)	W	m; m ² ; m ³ ; kg	4.1
	Linearer Verschleißbetrag	W _l	m	4.1
	Planimetrischer Verschleißbetrag	W _q	m ²	4.1
	Volumetrischer Verschleißbetrag (Verschleißvolumen)	W _v	m ³	4.1
	Massenmäßiger Verschleißbetrag (Verschleißmasse)	W _m	kg	4.1
	Relativer Verschleißbetrag	W _r	Verhältniszahl	4.1
	Verschleißwiderstand	1/W	m ⁻¹ ; m ⁻² ; m ⁻³ ; kg ⁻¹	4.1
	Relativer Verschleißwiderstand	1/W _r	Verhältniszahl	4.1
Bezogene Verschleiß-Messgrößen	Verschleißgeschwindigkeit			4.2
	a) linear	W _{l/t}	m/h	
	b) planimetrisch	W _{q/t}	m ² /h	
	c) volumetrisch	W _{v/t}	m ³ /h	
	d) massenmäßig	W _{m/t}	kg/h	
	Verschleiß-Weg-Verhältnis			4.2
	a) linear	W _{l/s}	m/m	
	b) planimetrisch	W _{q/s}	m ² /m	
c) volumetrisch (Verschleißrate)	W _{v/s}	m ³ /m		
d) massenmäßig	W _{m/s}	kg/m		
	Verschleiß-Durchsatz-Verhältnis			4.2
	a) linear	W _{l/z}		
	b) planimetrisch	W _{q/z}		
	c) volumetrisch	W _{v/z}		
	d) massenmäßig	W _{m/z}		
Indirekte Verschleiß-Messgrößen	Verschleißbedingte Gebrauchsdauer	T _w	h	4.3
	Gesamt-Gebrauchsdauer	T _G	h	4.3
	Verschleiß-Durchsatzmenge	D _w	m ³ ; kg; Stck	4.3

¹⁾ Dezimale Teile der Einheiten sind nach DIN 1301 zu verwenden.

5. Prüfung von Reibung und Verschleiß

Ziele der Verschleißprüfung

Mit Verschleißprüfungen werden unterschiedliche Ziele verfolgt, die sich folgendermaßen unterteilen lassen:

- a) Optimieren von Bauteilen bzw. tribotechnischen Systemen zum Erreichen einer vorgegebenen, verschleißbedingten Gebrauchsdauer
- b) Bestimmung verschleißbedingter Einflüsse auf die Gesamtfunktion von Maschinen bzw. Optimieren von Bauteilen und tribotechnischen Systemen zur Erreichung einer vorgegebenen Funktion
- c) Überwachung der verschleißabhängigen Funktionsfähigkeit von Maschinen
- d) Vorauswahl von Werkstoffen und Schmierstoffen für praktische Anwendungsfälle
- e) Qualitätskontrolle von Werkstoffen und Schmierstoffen
- f) Verschleißforschung, mechanismenorientierte Verschleißprüfung
- g) Schadensanalyse
- h) Diagnose von Betriebszuständen
- i) Sammlung von Daten für die Instandhaltung.

Um die genannten Ziele zu erreichen, ist oft eine Simulation des Verschleißes tribologisch beanspruchter Bauteile zweckmäßig bzw. notwendig.

5.1. Kategorien der Verschleißprüfung

Bei Prüfungen mit betriebsähnlichen Versuchen bzw. Modellversuchen ist die Frage von besonderer Wichtigkeit, inwieweit sich die gewonnenen Ergebnisse auf Bauteile der Praxis übertragen lassen. Dazu ist eine Wertung der unterschiedlichen Prüfverfahren notwendig, für die eine Abstufung in sechs Kategorien zweckmäßig ist.

Diese Abstufung stellt eine schrittweise Reduktion bzw. Veränderung des Tribologischen Systems dar. Dabei sind verschärfte Betriebsbedingungen oft sinnvoll und dienen dem Erkennen verschleißkritischer Zustände, wobei jedoch zu beachten ist, dass das Spektrum der möglichen betriebsbedingten Verschleißmechanismen eingehalten wird. Tabelle 5.1 zeigt eine Kurzbeschreibung der sechs Kategorien. Tabelle 5.2 gibt das Beispiel für ein Nutzkraftwagen-Getriebe wieder. Mit zunehmender Reduktion sinkt die Sicherheit der Übertragbarkeit, im Gegensatz zu den Möglichkeiten von Messungen tribologischer Größen und deren Aussagekraft.

Kategorie I - Betriebsversuche

Im Betriebs- bzw. Feldversuch — hier Fahrzeug im Straßenverkehr — läuft das Betriebsaggregat (z. B. Getriebe) unter Betriebsbedingungen, wobei das Gesamtsystem bezüglich des optimalen Verhaltens und der Gebrauchsdauer untersucht wird. Eine systematische Untersuchung, geschweige denn Optimierung des Verhaltens zur Verlängerung der verschleißbedingten Gebrauchsdauer, ist recht schwierig, da in der Regel das Beanspruchungskollektiv und oft ein Teil der stofflichen Struktur (Schichtbildung, Schmierstoffalterung, unterschiedliche Umgebungsmedien,...) starken Schwankungen unterworfen ist, so dass die gezielte Optimierung eines Parameters meist nicht mit einem einzelnen Betriebsversuch möglich ist. Repräsentative Aussagen über Laufverhalten und Gebrauchsdauer lassen sich nur bei einer Vielzahl von Versuchen erreichen. Dadurch ergibt sich aber ein hoher Zeit- und Kostenaufwand.

Kategorie II — Prüfstandsversuch mit kompletter Maschine

Der erste Schritt der Vereinfachung besteht darin, das Originalaggregat unter Prüfstandsbedingungen zu betreiben, bei denen im wesentlichen nur die Variationsbreite des

Beanspruchungskollektives eingeeignet wird. So kommt man zum Betriebsaggregat unter Prüfstandsbedingungen. Es können gezielte Parameterstudien durchgeführt werden; einzuschränken ist jedoch, dass die Änderung eines Parameters oftmals die gleichzeitige Änderung anderer Parameter mit sich bringt. Dies entspricht der Praxis, doch lassen sich nicht in allen Fällen daraus Grundgesetzmäßigkeiten ableiten. Störfaktoren, wie sie teilweise im realen Betrieb auftreten, werden meist nicht erfasst. Die Zielsetzung ist hauptsächlich die Feststellung der verschleißbedingten Gebrauchsdauer, die sich unter Nutzung kennzeichnender, im Betrieb aufgenommener Beanspruchungskollektive relativ genau vorausbestimmen lässt.

Kategorie III — Prüfstandsversuche mit Aggregat oder Baugruppe

Das Einzelaggregat in Originalgröße, z. B. das Getriebe (Beispiel siehe Tabelle 5.2) wird aus der gesamten Anlage bzw. der Maschine herausgelöst und definierten Beanspruchungen unterworfen. An den Schnittstellen müssten zur Realisierung der tatsächlichen Betriebsbeanspruchung „Größen“ eingeführt werden, die oftmals schwer oder überhaupt nicht zu erfassen sind. So können dadurch u. a. Schwingungsübertragungen fehlen, die Wärmeableitungsverhältnisse sowie die Eigenfrequenz des Systems verändert werden. Die Beanspruchungsbedingungen vereinfachen sich. Der Bezug zur Praxis wird unsicherer. In diesem Stadium der Versuchstechnik ist es bereits schwierig, von tatsächlicher Gebrauchsdauer zu sprechen. Vielmehr muss die Beschreibung der Gebrauchsdauer-Verhältnisse auf einen Vergleich mit Aggregaten beschränkt bleiben, deren echtes Betriebsverhalten bekannt ist.

Kategorie IV — Versuch mit unverändertem Bauteil oder verkleinertem Aggregat

Um die unterschiedliche Größe der betrachteten Betriebssysteme berücksichtigen zu können, wird eine Aufteilung entsprechend der Größe der Anlage vorgenommen. Hier sind also herausgelöste Bauteile in unveränderter Abmessung aus kleineren oder mittleren Maschinen und Versuche mit verkleinertem Aggregat für große Anlagen z. B. Schiffsgetriebe oder Großmühlen) einzuordnen. Der Ansatz soll immer noch funktionsgetreu gestaltet sein. Einige Probleme der Übertragbarkeit bei Versuchen mit maßstäblich verkleinerten Aggregaten liegen — abgesehen von Änderungen im Beanspruchungskollektiv — ebenfalls in der Wärmeableitung und Schwingungsneigung sowie in der Eingriffsdauer der sich in Kontakt befindenden Verschleißflächen, ferner in der örtlichen Energiekonzentration. Bei der Herstellung der Probekörper können sich wegen des Größeneinflusses auch Probleme bezüglich der verwendeten Werkstoffe, der Bearbeitung bzw. der Wärmebehandlung ergeben. Es lassen sich Parameterstudien kostengünstiger sowie gezielt durchführen und Einflüsse auf die Gesamtfunktion der Maschine erkennen.

Kategorie V — Beanspruchungsähnlicher Versuch mit Probekörpern

Wird ein Bauteil aus dem Aggregat längs der Systemeinhüllenden „herausgeschnitten“ und zusätzlich noch vereinfacht (z. B. Zahnrad) oder werden beanspruchungsähnliche Probekörper verwendet, dann sind die Beanspruchungs- und Eingriffsverhältnisse nicht mehr die ursprünglichen, sondern sie sind verändert, und die notwendigen Schnittkräfte lassen sich nicht oder nicht dem Betriebszustand entsprechend aufprägen. Bei der dadurch eingeschränkten Aussagefähigkeit ergibt sich jedoch der Vorteil, dass Randbedingungen konstant gehalten und Parameterstudien gezielt durchgeführt werden können.

Kategorie VI - Modellversuch mit einfachen Probekörpern

Mit dieser Prüfung wird angestrebt, die Vorgänge am realen Bauteil, die im momentanen Kontaktbereich ablaufen, zu simulieren. Der meist komplizierte Beanspruchungsfall der Praxis wird im Hinblick auf Grundlagenuntersuchungen hinsichtlich Bewegungsform, Belastungsverlauf u. a. in elementare Grundvorgänge zerlegt. Die Parameter des Versuches sind überschaubar und relativ leicht konstant zu halten. Die Durchführung erfolgt in Prüfmaschinen mit geometrisch einfachen Probekörpern, wodurch die infolge

Fertigungstoleranzen, Montage usw. verursachten Streuungen der Ergebnisse klein gehalten werden können. wie sie beim Betriebsversuch und an (verkleinerten) Aggregaten bzw. Bauteilen kleiner Abmessungen, also bei Kategorie I bis IV bzw. sogar V oft in starkem Maße in Kauf genommen werden müssen. Durch die (kleinen) Probekörper jedoch besteht infolge verminderter Wärmeableitungsverhältnisse die Gefahr, dass sich in den Grenzflächen ganz andere, meist höhere Temperaturen einstellen als im Betrieb, wodurch sich z.B. infolge andersartiger tribo-chemischer Reaktionen erhebliche Verfälschungen ergeben können. Die thermische Analyse muss deshalb ein Bestandteil der Verschleißanalyse sein. Nicht zuletzt dadurch steigt der Aufwand zur Überprüfung der Übertragbarkeit auf den Betriebsfall. Die Ergebnisse solcher mechanismenorientiert durchgeführter Versuche können Hinweise auf das Verschleißverhalten im Betrieb geben.

Beispiele für die Kategorien der Verschleißprüfung

Die genannten Kategorien sind auf den allgemeinen Fall abgestellt und zeigen ein Beispiel aus dem Fahrzeugbau (siehe Tabelle 5.2). Die Kategorien lassen sich in den verschiedensten Gebieten der Tribologie, auch der Reibungsprüfung oder der Schmierstoffprüfung, anwenden.

Prüfkette

Die Verschleißprüfungen mit Proben in Modellversuchen oder mit Bauteilen in Betriebsversuchen oder betriebsähnlichen Versuchen entsprechend den sechs Kategorien haben jeweils Vorzüge und Nachteile. Die moderne Prüftechnik bedient sich deshalb einer Kombination von jeweils durch die Prüfkategorien charakterisierten Einrichtungen bzw. Aggregaten, die sinnvoll in Form einer Prüfkette auf den Zweck der Prüfung und das Bauteil bzw. dessen Funktion abgestimmt ist. Ein Beispiel für ein Nutzkraftwagen-Getriebe nach Tabelle 5.2 ist die Kombination von Versuchen mit der FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine, siehe Kategorie V, sowie mit einem Aggregat auf dem Prüfstand (Kategorie III) und von Betriebsversuchen (Kategorie I).

Allgemeine Forderung für die praktische Anwendung

Bei der Durchführung von Verschleißprüfungen sollte die zugehörige Kategorie gekennzeichnet werden. Sollen die Ergebnisse einer Kategorie auf eine andere übertragen werden, so ist - sofern möglich — durch Korrelationsprüfungen im Rahmen einer Prüfkette nachzuweisen, inwieweit eine Übertragbarkeit möglich ist, z. B. durch Vergleich der Verschleißerscheinungsformen.

Tabelle 5.1. Reduktion eines Tribosystems nach Kategorien der tribologischen Prüfung

Kategorie	Art des Versuches Beanspruchungskollektiv		Systemstruktur	
I	Betriebs- bzw. betriebsähnliche Versuche	Betriebsversuch (Feldversuch)	Originalbauteile	komplette Maschine/ komplette Anlage
II		Prüfstandsversuch mit kompletter Maschine oder Anlage		komplette Maschine / komplette Anlage
III		Prüfstandsversuch mit Aggregat oder Baugruppe		komplettes Aggregat/ Baugruppe
IV	Versuche mit Modellsystem	Versuch mit unverändertem Bauteil oder verkleinertem Aggregat •	Modellproben	herausgelöste Bauteile/ verkleinertes Aggregat
V		Beanspruchungsähnlicher Versuch mit Probekörpern		Teile mit vergleichbarer Beanspruchung
VI		Modellversuch mit einfachen Probekörpern		einfache Probekörper

Tabelle 5.2. Kategorien der Verschleißprüfung bei einem Nutzkraftwagen-Getriebe

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

5.2 Modellversuche bei Festkörpergleitreibung

(KUGEL-SCHEIBE-PRÜFGERÄT)

Grundlage des Verfahrens

Eine Kugel als stationärer Probekörper (Grundkörper) wird mit einer definierten Normalkraft F_n gegen die Planfläche einer rotierenden Scheibe (Gegenkörper) gedrückt, so dass bei Versuchsbeginn ein punktförmiger Kontakt gegeben ist, der sich mit zunehmendem Verschleiß zu einer Fläche ausweitet (Kugel-Scheibe-Prüfsystem).

Statt der Kugel kann auch ein Stift mit einer kugelförmigen Reibfläche verwendet werden.

Probekörper

Geometrie

Form der Probekörper siehe Bild 5.1.

Herstellung

Die Herstellverfahren sind freigestellt. Es ist zu berücksichtigen, dass Werkstoff, Werkstoffcharge und Endbearbeitung der Reibflächen die Ergebnisse beeinflussen.

Vorbehandlung

Unmittelbar vor dem Einbau müssen die Reibflächen der Probekörper gereinigt werden.

Für metallische und keramische Probekörper eignen sich folgende Arbeitsschritte:

- Reinigung mit Aceton/ Alkohol, z.B. im Ultraschallbad
- Trocknen in warmer Luft
- Abspülen mit Hexan
- Trocknen im Trockenofen bei 110°C

Bei Proben aus Kunststoffen ist es unter Umständen erforderlich, das Reinigungsmittel zu modifizieren und die Arbeitsschritte entsprechend anzupassen.

Prüfeinrichtung

Mögliche Anordnungen von Kugel und Scheibe sind in Bild 5.1 wiedergegeben.

Die drei Anordnungen in Bild 5.1a, b und c bedingen einen unterschiedlichen Abtransport von Verschleißpartikeln aus der Reibfläche. In Versuchen mit unterschiedlicher Anordnung der Probekörper sind deshalb auch unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten.

Zur Prüfung sind die Probekörper u.U. in einer Kammer unterzubringen, in der das Umgebungsmedium, insbesondere die relative Feuchte, vorgegeben werden kann.

Durchführung der Prüfung

Kugel und Scheibe sind in Kontakt zu bringen, wenn die Scheibe ihre Nenndrehzahl erreicht hat, die der gewünschten Gleitgeschwindigkeit entspricht.

Die Gleitbeanspruchung ist mit gleichbleibender Bewegungsrichtung durchzuführen.

Die Kugel ist so zu fixieren, dass eine wie auch immer geartete Drehbewegung ausgeschlossen ist und reines Gleiten zwischen Kugel und Scheibe stattfindet.

Auswertung und Prüfbericht

Als Kenngrößen eines tribologischen Systems sind Reibung und Verschleiß immer nur systembezogen zu werten, d.h. nur zusammen mit den Prüfbedingungen ergibt das Prüfergebnis eine sinnvolle und verwertbare Aussage.

Grundsätzlich sind deshalb von jeder Prüfung die Systemparameter vollständig festzuhalten.

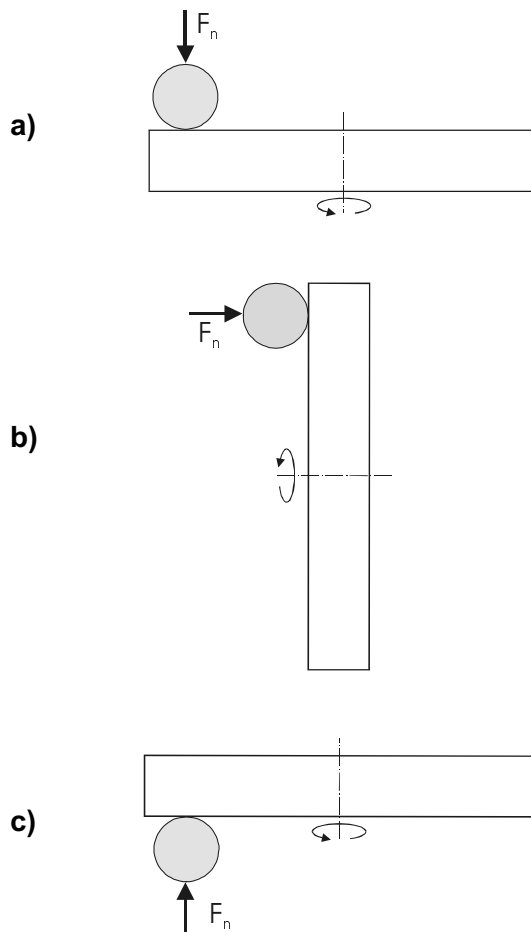


Bild 5.1. Mögliche Anordnung der Probekörper

Struktur des Prüfsystems

- Grundkörper (Kugel bzw. Stift mit kugelförmiger Reibfläche), zu kennzeichnen durch:
 - Abmessungen (Durchmesser, Krümmungsradius usw.)
 - Werkstoff (Bezeichnung, chemische Zusammensetzung, Wärmebehandlung, Gefüge, Härte, Bearbeitung usw.)
 - Rauheit¹⁾
- Gegenkörper (Scheibe), zu kennzeichnen durch:
 - Abmessungen (Durchmesser, Dicke)
 - Verschleißspurdurchmesser
 - Werkstoff (Bezeichnung, chemische Zusammensetzung, Wärmebehandlung, Gefüge, Härte, Bearbeitung usw.)
 - Rauheit¹⁾
- Umgebungsmedium, zu kennzeichnen durch:
 - Art
 - relative Feuchte (Schwankungsbreite nicht größer als $\pm 10\%$)
 - Temperatur

Darüber hinaus sind die gewählte Anordnung der Probekörper nach Bild 5.1 sowie die Art der Probekörperhalterung anzugeben.

¹⁾ Für Metalle: R_z , R_a , nach DIN 4768 Für Keramik: R_k nach DIN 4776

Beanspruchungskollektiv

Die Bewegungsform „Gleiten“ und der Bewegungsablauf „kontinuierlich“ sind vorgegeben. Folgende physikalische Beanspruchungsgrößen müssen angegeben werden:

- F_n Normalkraft in N
- v Gleitgeschwindigkeit in m/s
- T_a Ausgangstemperatur in K (Ausgangsgleichgewichtstemperatur des Systems)
- s Gleitweg in m

Tribologische Kenngrößen

Die tribologischen Kenngrößen sind vor allem im stationären Zustand bzw. zum Ende des Versuchs anzugeben. Daneben kann der zeitliche Verlauf in Form von Diagrammen wiedergegeben werden.

Folgende Größen sind anzugeben:

- f Reibungszahl mit $f = \frac{F_f}{F_n}$
hierin bedeuten: F_f Reibungskraft F_n Normalkraft

- d_{Kugel} Durchmesser der Kugelverschleißfläche in mm (Mittelwert²⁾ aus 2 Messungen, senkrecht und parallel zur Gleitrichtung

- $W_{V, \text{Kugel}}$ Verschleißvolumen der Kugel in [mm³]

$$\text{mit } W_{V, \text{Kugel}} = \frac{1}{3} \pi h^2 (3R - h) \quad 2) \quad (1)$$

$$\text{und } h = R - \sqrt{R^2 - \frac{d_{\text{Kugel}}^2}{4}} \quad 2) \quad (2)$$

R ist der Kugelradius in [mm]

- k_{Kugel} auf die Normalkraft bezogene Verschleißrate der Kugel in $\left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N} \cdot \text{m}} \right]$
manchmal auch weniger sinnvoll in $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{N}} \right]$

$$\text{mit } k_{\text{Kugel}} = \frac{W_{V, \text{Kugel}}}{F_n \cdot s} \quad (3)$$

hierin bedeuten: F_n : Normalkraft in [N] s : Gleitweg in [m]

- b_{Scheibe} Breite der Scheibenverschleißspur in [mm]

- $W_{q, \text{Scheibe}}$ planimetrischer Verschleißbetrag der Scheibe in [mm²]

- $W_{V, \text{Scheibe}}$ Verschleißvolumen der Scheibe in [mm³]

$$\text{mit } W_{V, \text{Scheibe}} = \pi \cdot D \cdot W_{q, \text{Scheibe}} \quad (4)$$

D mittlerer Durchmesser der Verschleißspur in [mm]

²⁾ Gilt nur für annähernd kreisförmige Verschleißflächen auf der Kugel. Bei möglichen anderen Verschleißflächenformen sind geeignete Berechnungsgrößen einzusetzen.

- k_{Scheibe} auf die Normalkraft bezogene Verschleißrate der Scheibe
in $\left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N} \cdot \text{m}} \right]$ manchmal auch weniger sinnvoll in $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{N}} \right]$

$$\text{mit } k_{\text{Scheibe}} = \frac{W_{\text{v,Scheibe}}}{F_n \cdot s} \quad (5)$$

- $W_{\text{I/S}}$ Gesamtverschleißrate der Probekörper in $[\mu\text{m}/\text{km}]$, als Summe der linearen Verschleißbeträge beider Probekörper, bezogen auf den Gleitweg (aus Verschleißbetrag – Gleitweg-Diagramm im stationären Zustand)

Außerdem sind die Verschleißerscheinungsformen der Probekörper und eventuell entstehende Verschleißpartikel zu charakterisieren, damit sich Aussagen über die wirkenden Verschleißmechanismen gewinnen lassen.

Präzision des Verfahrens

Als Vergleichswerte für gewonnene Ergebnisse von Reibungs- und Verschleißuntersuchungen können die Reibungs- und Verschleißkenngrößen der Gleitpaarungen Stahl (100 Cr 6)/Stahl (100 Cr 6), Aluminiumoxid/ Aluminiumoxid, Stahl (100 Cr 6)/ Aluminiumoxid und Aluminiumoxid/ Stahl(100 Cr 6) dienen, die unter definierten Versuchsbedingungen in einem internationalen Ringversuch ermittelt wurden. Sie sind im Abschnitt 5.A wiedergegeben und beziehen sich auf die Anordnung der Probekörper nach Bild 5.1a.

Mit diesen Werten können gleichartige Prüfanordnungen kalibriert werden, indem entsprechende Versuche mit einer der genannten Paarungen durchgeführt werden.

Bei Versuchen mit Anordnung der Probekörper nach Bild 5.1b oder 1c sind hingegen abweichende Ergebnisse möglich.

5.A Internationaler Ringversuch im Rahmen von VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards)

5.A.1 Prüfbedingungen

Kugel-Scheibe-Prüfsystem nach Bild 5.A.1.

Vor Beginn der Versuche wurden die Probekörper in einem Ultraschall-Bad gereinigt, in warmer Luft getrocknet, mit Hexan abgespült und in einem Trockenofen 30 min bei 110°C gelagert.

5.A.1.1 Struktur des Prüfsystems

Maße der Probekörper: siehe Bild 5.A.1

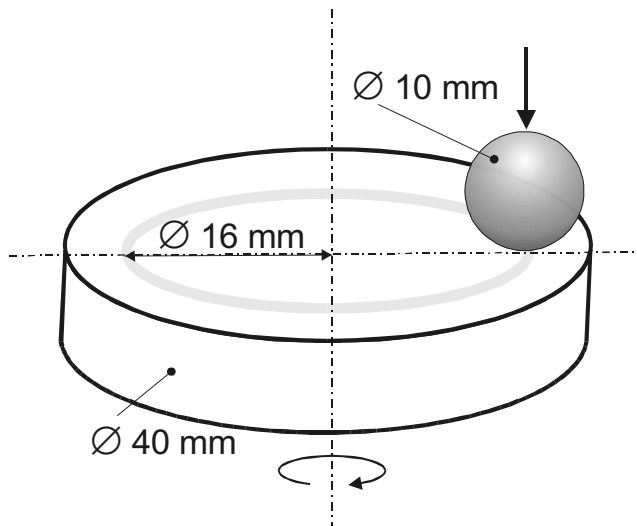


Bild 5.A.1 Prüfsystem

Untersuchte Werkstoffe: Stahl 100 Cr 6; Aluminiumoxid
 Eigenschaften der Probekörper: siehe Tabelle 5.A.2
 Umgebungsmedium: Laborluft, Soll-Vorgabe für relative Luftfeuchte $(50 \pm 10) \%$
 Ist-Werte 17 bis 78 %

Tabelle 5.A.1 Eigenschaften der Probekörper im Ringversuch

Probekörper/ Werkstoff	Chemische Zusammensetzung Massenanteil in %	Gefüge	Härte	R_z μm (Mittel- werte)	R_a μm (Mittel- werte)
Kugel/ Stahl 100 Cr 6	C: 0,95 bis 1,10 Si: 0,15 bis 0,35 Mn: 0,25 bis 0,45 P: max. 0,030 S: max. 0,030 Cr: 1,35 bis 1,65	Martensit mit Carbiden, Restaustenit	(838 ± 21) HV10	0,100	0,010
Scheibe/ Stahl 100 Cr 6	wie Kugel	wie Kugel	(852 ± 14) HV10	0,952	0,113
Kugel/ Aluminiumoxid	Al_2O_3 : 95 Zusätze: TiO_2 , MgO, ZnO	α - Al_2O_3 , wenig Sekundär- Phasen	(1610 ± 101) HV0,2	1,369	0,123
Scheibe/ Aluminiumoxid	wie Kugel	wie Kugel	(1599 ± 144) HV0,2	0,968	0,041

Beanspruchungskollektiv

Bewegungsform und -ablauf : kontinuierliches Gleiten
 Normalkraft: $F_n = 10 \text{ N}$
 Gleitgeschwindigkeit: $v = 0,1 \text{ m/s}$
 Ausgangstemperatur: $T_a = 23 \text{ }^\circ\text{C}$
 Gleitweg: $s = 1000 \text{ m}$

Ergebnisse

Tribologische Kenngrößen: siehe Tabelle 5.A.2

Präzision der Versuchsergebnisse:
 Reibwerte Wiederholpräzision *) $\pm 9 \%$ bis $\pm 13 \%$

Vergleichspräzision ^{*)}	± 18 % bis ± 20 %
Verschleißdaten der Probekörper	
Wiederholpräzision ^{*)}	± 5 % bis ± 7 %
Vergleichspräzision ^{*)}	± 15 % bis ± 20 %
Verschleißdaten des Systems	
Wiederholpräzision ^{*)}	± 14 %
Vergleichspräzision ^{*)}	± 29 % bis ± 38 %

^{*)} Nach DIN ISO 5725

Tabelle 5.A.2 Ergebnisse des internationalen Ringversuchs
(mit Standardabweichung)

Tribologische Kenngrößen	Gleitpaarungen (Kugel/ Scheibe)			
	Stahl/ Stahl	Aluminiumoxid/ Stahl	Stahl/ Aluminiumoxid	Aluminiumoxid/ Aluminiumoxid
Reibungszahl ¹⁾ f	0,60 ± 0,11	0,76 ± 0,14	0,60 ± 0,12	0,41 ± 0,08
Anzahl der Daten	109	75	64	76
Anzahl der Laboratorien	26	26	23	26
Gesamtverschleißrate des Systems ²⁾ $W_{1/s}$ in $\mu\text{m}/\text{km}$	70 ± 20	sehr klein	81 ± 29	sehr klein
Anzahl der Daten	47		29	
Anzahl der Laboratorien	11		11	
Verschleißkalottendurchmesser ¹⁾ der Kugel d_{Kugel} in mm	2,11 ± 0,27	³⁾	2,08 ± 0,35	0,30 ± 0,05
Anzahl der Daten	102		60	56
Anzahl der Laboratorien	23		21	19
Breite der Scheibenverschleißspur ¹⁾ $b_{Scheibe}$ in mm	⁴⁾	0,64 ± 0,13	⁴⁾	nicht messbar
Anzahl der Daten		54		
Anzahl der Laboratorien		19		
¹⁾ bei $s = 1000 \text{ m}$ ²⁾ aus der Verschleiß/Gleitweg-Kurve zwischen $s = 300 \text{ m}$ und $s = 1000 \text{ m}$ ³⁾ Materialübertrag von der Scheibe auf die Kugel ⁴⁾ Materialübertrag von der Kugel auf die Scheibe				

An der Zusammenstellung des Inhalts der früheren Verschleißnormen des DIN und deren Überarbeitung zum GfT Arbeitsblatt waren beteiligt:

Deters, Ludger, Prof. Dr.-Ing.,
Fischer, Alfons, Prof. Dr.-Ing.,
Santner, Erich, Dr.,

Stolz, Ulrich, Dr.,

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Universität Essen
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
(BAM), Berlin
Robert Bosch GmbH, Stuttgart

