

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

durch Verschleiß entstehen den Volkswirtschaften jährlich Schäden in Milliardenhöhe. Die Broschüre Basiswissen Verschleiß und Verschleißschutz soll einen Beitrag dazu leisten, die jährlich entstehenden Schäden in Folge Verschleiß zu reduzieren. Sie behandelt die Themen Reibung, Verschleiß, Verschleißschutz und die dazugehörigen Analyseverfahren. Die Broschüre liefert einen umfassenden Überblick über die Themen rund um den Verschleiß und den Verschleißschutz. Um den Verschleiß von Bauteilen und deren Ausfallrisiko zu reduzieren, erfordert es einer intensiven Zusammenarbeit der Fachleute entlang der Prozesskette von der Konstruktion über die Fertigungstechnik bis hin zur Beschichtung. Dabei spielt die Verschleiß- und Schadensanalytik eine wichtige Rolle. Denn diese ist Voraussetzung dafür, um die Ursachen für Verschleiß und Ausfälle zu ermitteln und um letztlich dadurch nachhaltige Gegenmaßnahmen treffen zu können.



Eine Basis für ein gutes Verständnis wird einführend mit dem Grundlagenwissen rund um Reibung und Verschleiß und der Aufbau des tribologischen Systems und dem Zusammenhang zwischen der Oberflächenbeschaffenheit und dem Reibungs- und Verschleißverhalten in den ersten beiden Abschnitten gelegt. Aufgrund der Wichtigkeit der Verschleiß- und Schadensanalytik wurde diesem Thema ein eigenes Kapitel gewidmet, in dem auch die dazugehörigen Verfahren behandelt werden. Beim Thema Verschleiß ist eines der wichtigsten Themen der Verschleißschutz. Dieser kann durch geeignete Werkstoffauswahl, durch gezielte Gestaltung der Oberflächen oder durch aufgebraute Schutzschichten erfolgen. Diese unterschiedlichen Möglichkeiten werden alle einzeln beleuchtet und knapp und verständlich beschrieben sowie durch Bilder und Skizzen veranschaulicht. Beim Verschleißschutz dürfen natürlich die Analysemethoden zur Charakterisierung der Verschleißschutzmaßnahmen nicht fehlen, womit die Broschüre abschließt.

Im Steinbeis-Transferzentrum Tribologie an der Dualen Hochschule in Karlsruhe beschäftige ich mich zusammen mit meinem Team mit der tribologischen Analytik sowie mit Beratungen und Seminaren rund um die Themen Reibung und Verschleiß. Wir führen Dienstleistungen für die Industrie durch und sind Kooperationspartner von Forschungseinrichtungen. Die Dienstleistungen umfassen hochauflösende Vermessungen von Oberflächentopografien, Beschichtungsanalysen, Material- und Beschaffenheitsanalysen bis hin zu kompletten Entwicklungsprojekten. Neben einer modernen Analytik ist unsere Stärke das tribologische Fachwissen durch jahrelange Erfahrung. Einen Überblick über unser Dienstleistungsangebot und unsere technische Ausstattung gibt die Homepage: www.steinbeis-analysezentrum.com

Mein Dank für das Zustandekommen der Broschüre Basiswissen Verschleiß und Verschleißschutz gilt allen Mitautorinnen und Mitautoren, welche dies mit ihren hervorragenden Fachartikeln möglich gemacht haben. Ein besonders großer Dank geht dabei an Franz Xaver Breit und an meinen lieben Kollegen Professor Manfred Schlatter von der Dualen Hochschule in Lörrach, dem ich meinen persönlichen Dank aussprechen möchte.

Weiterhin danke ich und das WOTech-Team allen Unternehmen, welche durch eine Werbeanzeige die kostenfreie Verteilung dieser Broschüre ermöglichen. Dadurch können mit einer Auflage von 10.000 Exemplaren viele interessierte Leserinnen und Leser erreicht werden.

Mein herzlicher Dank geht auch an Herrn Käzmann und Frau Schade von der WOTech für die Idee zur Herausgabe dieser Broschüre, für das Layout und das Verlegen. Dieser Idee habe ich mich gerne angenommen, wengleich damit sehr viele Arbeitsstunden verbunden waren.

Karlsruhe, im April 2017

Dietmar Schorr

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1	Ionenplattieren	53
1 Grundlagenwissen	3	Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)	54
Reibung und Verschleiß	3	Thermisch	55
Begriffe	6	Plasmaaktiviert	55
Erscheinungsformen – Kenngrößen	6	DLC Schichten	56
Verschleißmechanismen	7	CVD Diamantbeschichtungen	61
Verschleißarten	9	Heißdraht-aktiviert	62
2 Oberflächenbeschaffenheit	12	Nickel	64
Einfluss Oberflächenmikrostruktur	12	Nickel – chemische Abscheidung	68
Oberflächenvermessung	12	Hartchrom	72
Gleitschleifen	14	Anodische Oxidation	76
3 Tribologische Prüfung	17	Thermisches Beschichten (Lichtbogendraht-Spritzen)	78
Verschleißprüfung von Werkstoffpaarungen und Beschichtungen	17	Auftragsschweißen	82
4 Verschleiß- und Schadensanalyse	22	Diamantglätten	83
Analysegeräte	22	Verschleißschutz an Pumpen	85
Taktile Oberflächenvermessung	23	6 Analysemethoden Verschleißschutz	86
Optische Oberflächenvermessung	23	Photothermie	86
Weißlichtinterferometrie	24	Schichthärte – Nanohärte	87
Konfokalmikroskopie	26	Schichtdickenmessung	90
Rasterelektronenmikroskopie (REM)	27	Zerstörende Verfahren	91
5 Verschleißschutz	36	Chemisch (Coulometrie)	92
Werkstoffe	36	Chemisch-mechanisch (Gravimetrie)	94
Hartmetall	36	Zerstörungsfreie Verfahren	94
Ferro-Titanit® – Ein pulvermetallurgischer Verbundwerkstoff	41	Mechanisch	94
Kunststoffe	44	Elektromagnetisch	95
Werkstoffbehandlung	45	Radiometrisch	97
Thermische Verfahren – Härten	45	Optisch	98
Randschichtlegieren / Randschicht- umschmelzlegieren	46	Akustisch	100
Thermochemische Verfahren	47	Schichthaftungsprüfung	100
Einsatzhärten	47	Rockwell-Eindrucktest	100
Nitrieren, Nitrocarburieren und Oxinitrieren	47	Ritztest (Scratch Test)	101
Borieren	48	Gitterschnitthaftfestigkeitsverfahren	103
Beschichtungen	49	Strahlverschleißtest	103
Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)	49	Impacttest	103
Bedampfung	50	Eigenspannungsmessung	103
Sputtern	51	Glanzmessung	103
		Autorenprofile	105
		Stichwortverzeichnis	107

IMPRESSUM

ISBN 978-3-9814687-4-8

Herausgeber und Verlag

WOTech – Charlotte Schade – Herbert Käszmann – GbR
Am Talbach 2, 79761 Waldshut-Tiengen
© WOTech GbR, 2017

Druck

Holzer Druck + Medien GmbH & Co. KG
Fridolin-Holzer-Straße 22+24, 88171 Weiler im Allgäu
Verantwortlich für Text und Anzeigen:
Herbert Käszmann, WOTech GbR

REIBUNG UND VERSCHLEISS – ÜBERBLICK – Technische Oberflächen erfüllen zahlreiche wichtige Funktionen wie zum Beispiel Korrosionsbeständigkeit, Wärmeisolation, Benetzbarkeit, Biokompatibilität, dekorative und optische Funktionen (Reflexion, Absorption), elektrische Leitfähigkeit/Isolation sowie häufig auch eine möglichst hohe Beständigkeit gegenüber Verschleißangriffen. Wie folgend näher beschrieben werden wird, kann Verschleiß diverse Ursachen haben und sich in verschiedenen Erscheinungsformen äußern. Fortschreitender Verschleiß führt in der Regel zur Beeinträchtigung der Funktion eines Bauteils und ist deshalb grundsätzlich unerwünscht.

Die volkswirtschaftliche Bedeutung von verschleißbedingten Schäden ist enorm. Das Bundesministerium für Forschung und Technologie schätzte in einem 1983 veröffentlichten Report [1], dass den Industriena-tionen durch Verschleiß jährliche Verluste in Höhe von etwa 4,5 % des Bruttonationaleinkommens (BNE) entstehen. Auch in neueren Publikationen [2, 3] werden ähnliche Zahlen genannt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der prozentuale Anteil bis heute in etwa gleich geblieben ist. *Abbildung 1* verdeutlicht am Beispiel Deutschlands anhand aktueller Wirtschaftsdaten den zahlenmäßigen Umfang der durch Verschleiß hervorgerufenen Schäden. Interessanterweise gehen Schätzungen davon aus, dass etwa 20 % bis 30 % dieses Betrages allein durch die konsequente Umsetzung des bereits vorhandenen Wissens zum Verschleißschutz eingespart werden könnten [4]. Dies entspricht einem jährlichen Einsparpotential von ca. 35 Mrd. € (*Abb. 2*).

Neben der immensen wirtschaftlichen Bedeutung spielt auch der sicherheitstechnische Aspekt eine entscheidende Rolle in der Verschleißforschung. Das Versagen von Bauteilen infolge von Verschleiß hat oftmals keine gravierenden Folgen, kann aber im Einzelfall durchaus zu einer Gefährdung von Leib und Leben führen. Tragisches Beispiel hierfür ist das ICE-Unglück von Eschede im Jahre 1998, das auf einen Radreifenbruch infolge von verschleißbedingter Materialermüdung zurückgeführt wurde [5]. Auch die leider beinahe



Abb. 1: Jährlich in Deutschland durch Verschleiß hervorgerufene volkswirtschaftliche Schäden

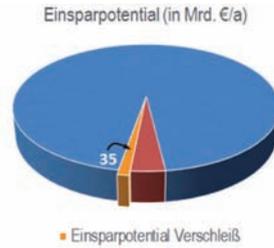


Abb. 2: Geschätztes jährliches Einsparpotential

alltäglichen Verkehrsunfälle, die durch übermäßig verschlissene Bremsanlagen oder Reifen verursacht werden, sind hier zu nennen.

Das Verständnis tribologischer Zusammenhänge, die Früherkennung und daraus resultierend die Minimierung von Verschleiß sind folglich wichtige Ziele industrieller und akademischer Forschung.

REIBUNG UND VERSCHLEISS – BEGRIFFLICHE EINORDNUNG

– Der Begriff Tribologie bezeichnet die Wissenschaft und Technik von Wirkflächen in Relativbewegung sowie zugehöriger Technologien und Verfahren [2]. Die Tribologie umfasst dabei das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß, einschließlich der Schmierung. Eine weitere, eher zielorientierte ingenieurwissenschaftliche Definition beschreibt die Tribologie als ein interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste [2]. Die wörtliche Bedeutung des Begriffs Tribologie ist Reibungslehre, abgeleitet von den griechischen Vokabeln *tribein* (= reiben) und *logos* (= Wort, Lehre).

Reibung äußert sich als Widerstandskraft sich berührender Körper gegen die Einleitung einer Relativbewegung (Haft- oder Ruhreibung, statische Reibung) oder deren Aufrechterhaltung (Gleit- oder Bewegungreibung, dynamische Reibung) [2]. Diese *äußere Reibung* ist von der *inneren Reibung* von Materialien und Fluiden (Viskosität) zu unterscheiden. Letztere ist eine wichtige Größe der Rheologie, hat aber insbesondere beim Einsatz von Schmierstoffen auch einen unmittelbaren Bezug zur Tribologie. Auch wenn Reibung ohne Verschleiß eigentlich nur in der Modellvorstellung existiert [6], ist Reibung keineswegs immer unerwünscht. Im Gegenteil: in Bremsen, Kupplungen, Reibrad- und Keilriemengetrieben, Schraubverbindungen, Kegelsitzen oder Mahlwerken ist Reibung für die technisch nutzbare Übertragung von Energie-, Stoff- oder Signalgrößen zwingend erforderlich. Ohne Reibung würden Schüttguthalden in sich zusammenrutschen, Streichinstrumente keinen Ton von sich geben und jegliche Art

der Fortbewegung an Land, sei es zu Fuß, mit dem Auto oder per Bahn, wäre zumindest auf konventionelle Art und Weise nicht mehr möglich. Dem gegenüber stehen zahlreiche technische Anwendungen wie zum Beispiel Gleitlager, Wälzlager, Führungen, Zahnradgetriebe, Kolben-Zylinder-Paarungen, Umformprozesse oder Rohrströmungen, in denen Reibung den Wirkungsgrad signifikant verschlechtert und zu unerwünschten Verschleißerscheinungen unterschiedlicher Art führt.

Verschleiß ist die bleibende Form-, Größen- und/oder Stoffänderung der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, das heißt Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers. Diese Definition weicht von der in der 1997 zurückgezogenen DIN 50320 [7] gewählten Formulierung insofern ab, dass dort der Verschleiß als *fortschreitender Materialverlust* definiert ist [2, 8]. Diese Begriffswahl erscheint zu eng, da – wie noch ausführlicher dargestellt werden wird – auch Verschleißerscheinungsformen existieren, die nicht mit einem Materialverlust einhergehen. Zu nennen sind hier das lediglich in einer Materialverlagerung resultierende ideale Mikropflügen [2], die Ausbildung von tribochemischen Reaktionsschichten oder der adhäsive Materialübertrag auf den üblicherweise härteren Kontaktpartner. Dementsprechend wird hier die an Fleischer [9] angelehnte und von zahlreichen anderen Autoren [10–12] übernommene, oben genannte Formulierung verwendet. Dieser Definition können noch weitere, wichtige Informationen entnommen werden. Das Wort *bleibend* weist darauf hin, dass vorübergehende Form- und Größenänderungen, also rein elastische Verformungen, noch keinen Verschleiß darstellen. Bei zyklischer Beanspruchung können sie aber eine Verschleißursache sein (siehe *Oberflächenzerrüttung*).

Des Weiteren entsteht Verschleiß stets aufgrund *mechanischer Ursachen*. Das bedeutet, dass durch nicht-mechanische Ursachen (wie z.B. Strahlung oder Wasserstoffversprödung) hervorgerufene stoffliche Veränderungen nicht zum Verschleiß, sondern zur physikalischen Korrosion zählen. Schließlich beinhaltet die Definition noch den Hinweis auf das Vorhandensein eines Gegenkörpers. Dieser kann nicht nur ein Festkörper, sondern auch ein flüssiges oder sogar gasförmiges Medium sein. Er ist stets in die Verschleißbetrachtungen mit einzubeziehen, denn die Verschleißbeständigkeit ist keine Material-, sondern eine Systemeigenschaft, wie nachfolgend anhand des sogenannten tribologischen Systems verdeutlicht wird. Verschleiß ist normalerweise unerwünscht, das heißt wertmindernd. In Ausnahmefällen wie beispielsweise Einlaufvorgängen können Verschleißprozesse jedoch auch technisch erwünscht sein. Bearbeitungsvorgänge

wie Spanen, Fräsen oder Schleifen sind wertbildende technologische Prozesse und gelten daher in Bezug auf das herzustellende Werkstück per definitionem nicht als Verschleiß, obwohl im Grenzflächenbereich zwischen Werkstück und Werkzeug tribologische Prozesse wie beim Verschleiß ablaufen [13].

REIBUNG UND VERSCHLEISS – TRIBOLOGISCHES SYSTEM

– Das schematisch dargestellte tribologische System ist eine Abstrahierung, die letztlich auf jeden denkbaren Verschleißfall anwendbar ist. Der im Mittelpunkt der Betrachtung stehende Grundkörper befindet sich in Kontakt und Relativbewegung mit einem (festen, flüssigen oder gasförmigen) Gegenkörper. Das Beanspruchungskollektiv und hierbei insbesondere die aufgebachte Belastung bestimmt im Zusammenspiel mit der Mikrogeometrie und dem Verformungsvermögen von Grund- und Gegenkörperwerkstoff die Kontaktbedingungen (d.h. die reale Kontaktfläche).

Zwischen den beiden Körpern befindet sich häufig ein Zwischenstoff. Dabei kann es sich beispielsweise um Luft, Wasser, Abrasivpartikel oder auch gezielt zur Verschleißminderung eingebrachte Schmierstoffe handeln. Der Zwischenstoff hat in Kombination mit dem Umgebungsmedium (häufig identisch mit dem Zwischenstoff) und der Temperatur des Systems entscheidenden Einfluss auf eventuell parallel auftretende korrosive Prozesse, die wiederum das Verschleißverhalten beeinflussen können. Die Festlegung der Systemgrenze entscheidet darüber, in welchem Umfang äußere Faktoren mit in die Verschleißbetrachtung einbezogen werden. So kann es für orientierende Untersuchungen im Labormaßstab sinnvoll sein, eine enge Systemgrenze zu ziehen, während für betriebsähnliche Versuche die Grenze hinreichend weit gefasst sein sollte, um alle potentiellen Einflüsse realitätsnah abbilden zu können. Diese Ausführungen verdeutlichen, dass die Verschleißbeständigkeit eines Werkstoffs nur in Bezug auf den konkreten Anwendungsfall und unter Berücksichtigung aller Systembestandteile bewertet werden kann. Kein Werkstoff ist per se verschleißbeständig.

Wie *Abbildung 3* zu entnehmen ist, umfasst das auf Grund- und Gegenkörper wirkende Beanspruchungskollektiv zahlreiche, höchst unterschiedliche Einzel-faktoren, die jedoch alle miteinander verknüpft sind. So ergeben sich die in der Grenzfläche wirkenden Belastungen (Kräfte und Momente) unmittelbar aus den Bewegungsverhältnissen und dem Reibungszustand. Ausgehend von einem festen Gegenkörper werden vier Grundformen der Kinematik von Festkörpern unterschieden (*Abb. 4*). Das Gleiten ist charakterisiert durch eine Translation in der Kontaktfläche (Pendant für flüssigen oder gasförmigen Gegenkörper: Strömen),

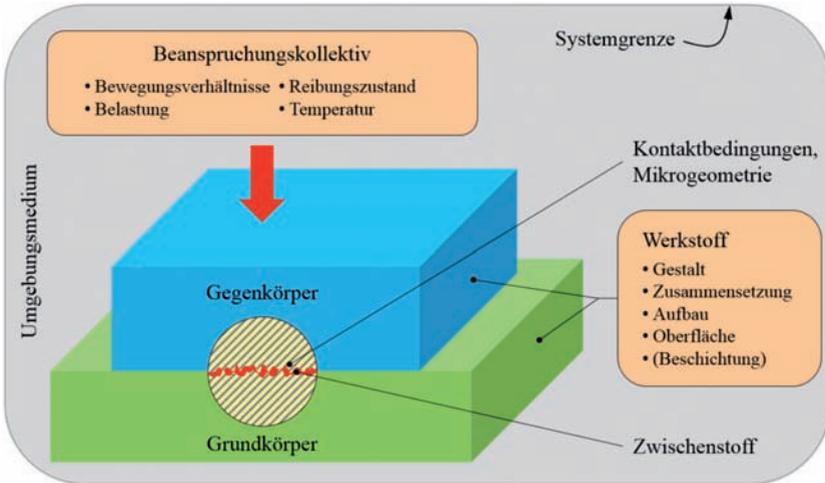


Abb. 3: Tribologisches System (in Anlehnung an die zurückgezogene DIN 50320 [7])

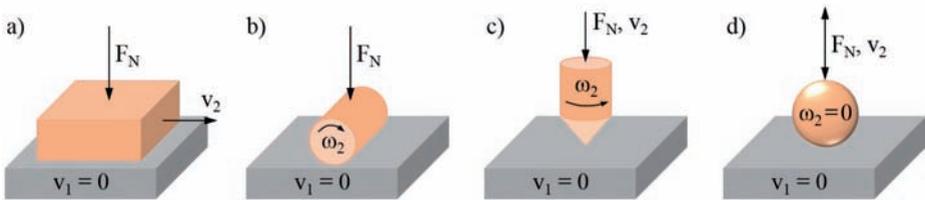


Abb. 4: Elementarformen der Kinematik von Festkörpern: a) Gleiten, b) Rollen (Wälzen), c) Bohren, d) Stoßen / Prallen

während beim Rollen eine Rotation um eine parallel zur Kontaktfläche orientierte Momentanachse stattfindet. Beim Bohren hingegen rotiert der Gegenkörper senkrecht zur Grenzfläche. Ein intermittierender Kontakt senkrecht zur Kontaktfläche wird als Stoßen oder Prallen bezeichnet [2]. Reale Verschleißfälle sind häufig durch eine Kombination dieser elementaren Bewegungsformen gekennzeichnet. So besitzen zum Beispiel Rollbewegungen fast immer mikroskopische oder makroskopische Gleitanteile, so dass stattdessen der Begriff Wälzen verwendet wird.

Bezüglich des Reibungszustandes wird zwischen drei Grundarten unterschieden. *Festkörperreibung* bezeichnet die Reibung zwischen zwei, in unmittelbarem Kontakt stehenden festen Körpern (sind die Oberflächen der Reibpartner hierbei mit einem molekularen Grenzschichtfilm bedeckt, ist auch der Begriff Grenzschichtreibung üblich) [2]. Sind Grund- und Gegenkörper durch einen flüssigen Film lückenlos voneinander

getrennt, liegt *Flüssigkeitsreibung* vor (bzw. Gasreibung bei einem gasförmigen Film). Trennt der flüssige Film die Reibpartner nur teilweise, so dass noch Bereiche mit Festkörperreibung vorhanden sind, handelt es sich um *Mischreibung* [2]. Im praktischen Einsatzfall wie zum Beispiel in Wälzlagern wird üblicherweise die Flüssigkeitsreibung angestrebt. Realisiert wird dies mithilfe von Flüssigschmierstoffen. Der Begriff *Schmierung* bezeichnet folgerichtig die Verringerung von Reibung und Verschleiß zwischen zwei sich relativ zueinander bewegenden Reibpartnern [6]. Wie in den folgenden Kapiteln noch näher ausgeführt werden wird, ist die Schmierung trotz ihrer großen praktischen Bedeutung nur eine der zahlreichen Möglichkeiten des Verschleißschutzes.

Autoren: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lampe, Dipl.-Ing. Rico Drehmann; Technische Universität Chemnitz, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik

Literatur

- [1] BMFT Report: Damit Rost und Verschleiß nicht Milliarden fressen: Fortschritt durch Forschung. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn, 1983
- [2] H. Czichos, K.-H. Habig: Tribologie -Handbuch – Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. 3. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010. – ISBN 978-3-8348-0017-6
- [3] J.R. Davis (Hrsg.): Surface engineering for corrosion and wear resistance. Materials Park: ASM International, 2001. – ISBN 0-87170-700-4
- [4] C.A. Brockley (Hrsg.): Economic losses due to friction and wear – Research and development strategies. National Research Council of Canada, Ottawa, 1984
- [5] V. Esslinger, R. Kieselbach, R. Koller, B. Weisse: The railway accident of Eschede – technical background. Eng. Failure Anal. 11 (2004), S. 515–535
- [6] V.L. Popov: Kontaktmechanik und Reibung – Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik. 3. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2015. – ISBN 978-3-662-45974-4
- [7] Norm DIN 50320:1979-12: Verschleiß – Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Berlin: Beuth Verlag, 1997 zurückgezogen
- [8] GfT-Arbeitsblatt 7: Tribologie – Verschleiß, Reibung – Definitionen, Begriffe, Prüfung. Aachen: Gesellschaft für Tribologie e.V., 2002
- [9] G. Fleischer, H. Gröger, H. Thum: Verschleiß und Zuverlässigkeit. Berlin: VEB Verlag Technik, 1980
- [10] E. Kuhn: Zur Tribologie der Schmierfette – Eine energetische Betrachtungsweise des Reibungs- und Verschleißprozesses. Renningen: Expert Verlag, 2009. – ISBN 978-3-8169-2869-0
- [11] A.A. Rasch: Erfolgspotential Instandhaltung – Theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagem.; Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2000. – ISBN 3-503-05811-7
- [12] J. Heck: Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, Dissertation, 2016. – ISBN 978-3-7315-0443-6
- [13] W. Bunk, J. Hansen, M. Geyer: Tribologie – Reibung, Verschleiß, Schmierung – Band 1: Abrasivverschleiß, Schwingungverschleiß, Oberflächenbehandlung, Bearbeitungsverfahren. B. Heidelb./Springer, 1981. – ISBN 978-3-540-10800-9

VERSCHLEISS – BEGRIFFE – In der 1997 zurückgezogenen DIN 50320 wird Verschleiß als der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers (Grundkörper), hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers, also den Masseverlust (Oberflächenabtrag) einer

Stoffoberfläche durch schleifende, rollende, schlagende, kratzende, chemische und thermische Beanspruchung bezeichnet. Im Arbeitsblatt 7 der Gesellschaft für Tribologie [14] werden innerhalb des Tribosystems (Abb. 5) folgende Größen für die Betrachtung des Themas Verschleiß definiert:

- Verschleißmechanismen,
- Verschleißarten,
- Verschleißerscheinungsformen und
- Verschleißmessgrößen.

Allgemeinsprachlich wird der Begriff *Verschleiß* für den Vorgang des Verschleißens sowie das Ergebnis verwendet. Zur Unterscheidung können für den Vorgang der Begriff *Verschleißvorgang* und das Ergebnis die Begriffe *Verschleißerscheinungsformen* und/oder die *Verschleißmessgrößen* verwendet werden [14].

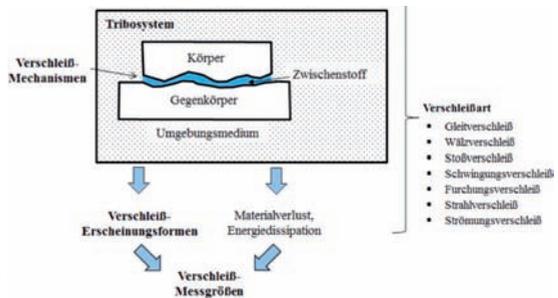


Abb. 5: Schema eines tribologischen Systems [14]

VERSCHLEISSERSCHEINUNGSFORMEN – Unter *Verschleißerscheinungsformen* wird die sich durch Verschleiß ergebenden Veränderungen der Oberflächen eines Körpers sowie die Art und Form der entstandenen Verschleißpartikel verstanden [14]. In Anlehnung an DIN ISO 4785 ergeben sich folgenden wesentlichen Verschleißerscheinungsform:

- Ohne Materialverlust:
 - Riefen, Kratzer*: Linienförmige Vertiefung mit gerundetem oder flachem Grund
 - Risse, Mikrorisse*: Oberflächlich durch Ritzen sichtbar, teilweise als Rissnetzwerk ausgebildet
 - Mulden*: Plastische kreisförmige Deformationen der Oberfläche, gegebenenfalls periodenförmig
 - Riffeln*: Wellenförmige Vertiefungen in Folge plastischer Deformation der Oberfläche
- Mit Materialverlust:
 - Löcher, Grübchen*: Kleine örtliche Fehlstellen durch Materialverlust
- Mit Materialübertrag:
 - Schuppen*: Durch Materialübertrag entstandene Überschichtung

VERSCHLEISSMESSGRÖSSEN – Die Verschleißmessgrößen beschreiben 1D-, 2D- und 3D-Veränderungen der Geometrie und sind Maßzahlen für die Änderung der Geometrie von Körper und/oder Gegenkörper. Diese Größen werden insbesondere bei tribologischen Tests (Kapitel 3) zur Bewertung herangezogen. Hiermit können Verschleiß/Zeit-Diagramme erstellt werden.

VERSCHLEISSMECHANISMEN – Alle Verschleißarten lassen sich auf vier Grundmechanismen zurückführen. Diese Verschleißmechanismen werden in mechanische und mechanisch/chemische unterteilt [15].

Mechanische Verschleißmechanismen – Abrasion: Die Rauheitsspitzen des härteren Körpers dringen in den Gegenkörper ein. Die mikroskopischen und makroskopischen Formänderungen der Reibkörper werden durch Mikrozerstörung, -brechen, -pflügen verursacht. Handelt es sich bei dem härteren Körper um lose Partikel, wird von Drei-Körper-Abrasion gesprochen.

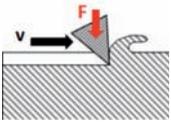


Abb. 6: Abrasion

Wichtiges Charakteristikum des abrasiven Verschleißes ist die Tieflage-Hochlage-Charakteristik (Abb. 7), d.h. die Auswirkungen der Härte­differenz zwischen Abrasivstoff H_A und der des beanspruchten Materials H_M .

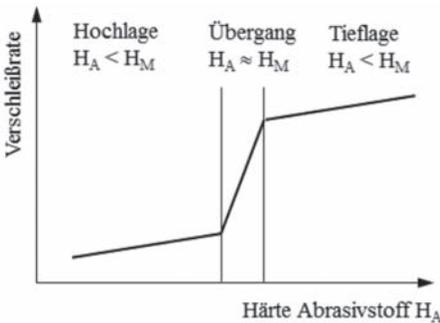


Abb. 7: Tieflage-Hochlage-Charakteristik Abrasionsverschleiß



Abb. 8: Riefen und Partikelbildung in Folge Abrasionsverschleiß

Dabei wird zwischen drei Verschleißbereichen unterschieden [15].

Mechanische Verschleißmechanismen – Oberflächenermüdung: Oberflächenermüdung (Abb. 9) wird durch wechselnde Druck-Schubbeanspruchung verursacht. Es werden Versetzungen unterhalb der Oberflächen im Bereich des Schubmaximums gebildet. Infolgedessen entstehen Fehlstellen und Mikrorissen, bevorzugt an nichtmetallischen Einschlüssen. Es kommt zur makroskopischen Rissbildung und -ausbreitung (Abb. 10). Diese wandern in einem flachen Winkel zur Oberfläche und es kommt zum Ausbrechen von Stoffteilchen mit Grübchenbildung (Pitting).

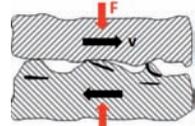


Abb. 9: Oberflächen­ermüdung

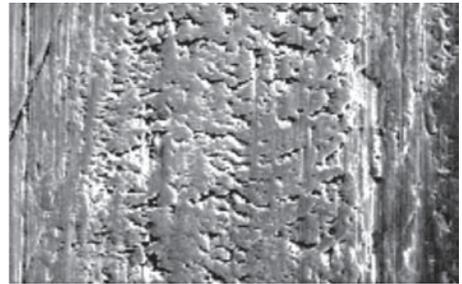


Abb. 10: Rissnetzwerk in Folge Oberflächen­ermüdung

Mechanisch/chemische Verschleißmechanismen – Tribochemische Reaktion: Durch Tribooxidation (Abb. 11) mit dem Umgebungsmedium (z.B. Wasser) entstehen Reaktionsschichten in Form von Oxid- und Hydroxidschichten an der Oberfläche. Der Verschleiß setzt ab dem Vorhandensein einer bestimmten Schichtdicke in Verbindung mit einer mechanischen Beanspruchung mit Tangentialbelastung ein. Es kommt zum Abtrag der spröden Reaktionsschichten.

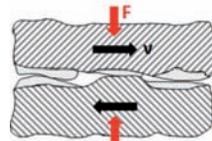
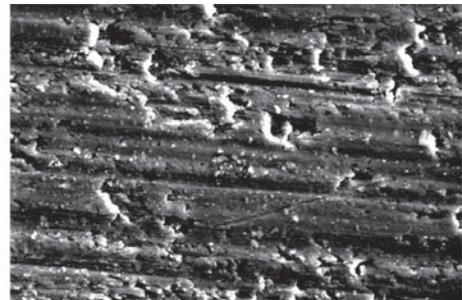


Abb. 11: Tribochemische Reaktion



Grundlagen

Die Entstehung von Reaktionsschichten bei Eisen und dem Umgebungsmedium Wasser läuft im Wesentlichen in zwei Phasen ab:

- Reaktion von Eisen mit Wasser zu Hydroxiden (kann unter Sauerstoffausschluss stattfinden)
 - Eisen(II)hydroxid*: verschleißungünstig, keine Schutzschicht
 - Eisen(III)hydroxid*: verschleißungünstig, keine Schutzschicht
- Reaktion von Eisenhydroxid zu hydratisierten Oxiden (Gegenwart von Sauerstoff erforderlich)
 - a) Hohes Sauerstoffangebot:
 - Eisen(III)oxid*: verschleißungünstig, keine Schutzschicht
 - Eisen(II)oxid*: verschleißungünstig, keine Schutzschicht
 - b) Geringes Sauerstoffangebot bzw. hohe Temperatur (> 180 °C):
 - Eisen(II,III)oxid*: verschleißungünstig, stabile Schutzschicht

Passungsrost ist eine Sonderform von Reaktionsschichten und entsteht durch wiederholtes Reiben der Kontaktflächen mit einer sehr kleinen Amplitude entsteht.

Er besteht hauptsächlich aus Eisen(III)hydroxid (rotbraun) und aus Eisen(II, III)oxid (tiefschwarz) und bildet Verschleißpartikel.

Mechanisch/chemische Verschleißmechanismen – Adhäsion: Voraussetzung für den adhäsiven Verschleiß ist das Durchbrechen der Reaktionsschichten durch ausreichend große Normalkräfte, um die metallische Oberfläche freizulegen (Abb. 13). Bei einem Abstand unter 100 nm bilden sich so große Anziehungskräfte zwischen den Oberflächen aus, dass diese verschweißen. Ist die Zugfestigkeit in der Bindung größer als die der beteiligten Kontaktpartner kommt es zum Ausreißen von Material.

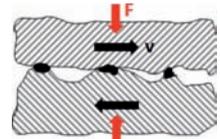


Abb. 12: Adhäsion

AUSFALLVERHALTEN / VERSCHLEISSVERHALTEN – Verschleiß ist praktisch in den meisten Fällen unvermeidbar. *Abbildung 15* zeigt den zeitlichen Verlauf der Verschleißgröße für den jeweiligen Verschleißmechanismus. Das Lebensdauerende ist erreicht, wenn die Verschleißgröße einen Maximalwert überschreitet, es zum Funktionsverlust oder Bauteilbruch kommt.

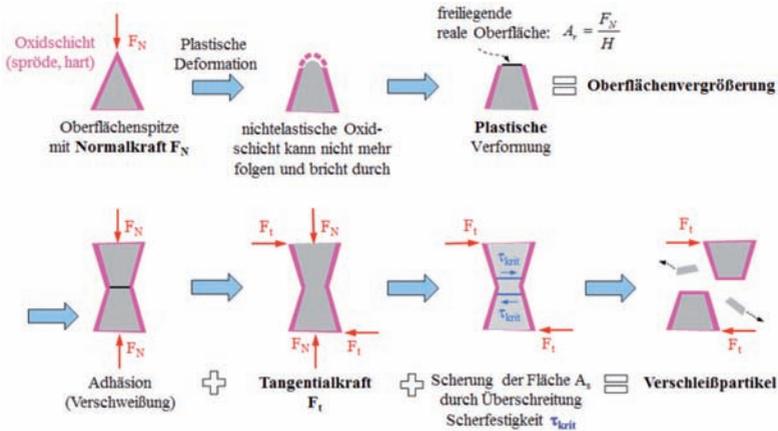


Abb. 13: Ablauf adhäsiver Verschleiß

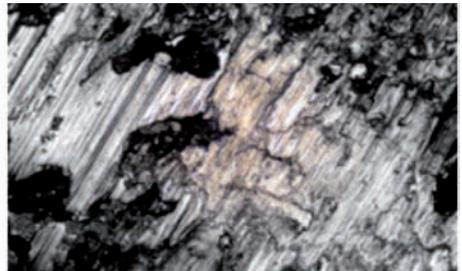
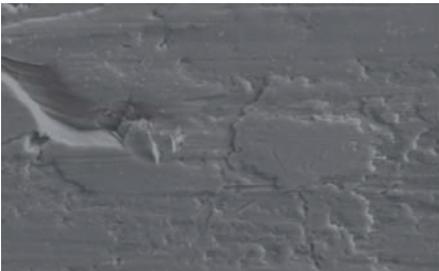


Abb. 14: Materialübertrag und überlagerte Oberflächenermüdung in Folge adhäsivem Verschleiß

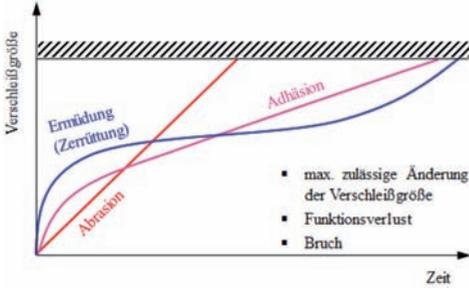


Abb. 15: Verschleißverläufe der Verschleißmechanismen

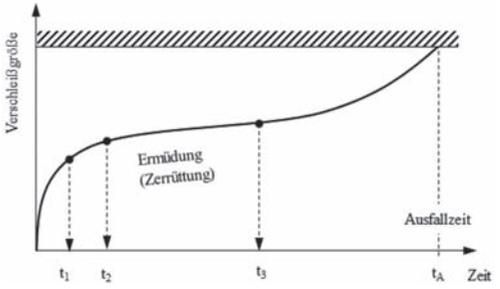
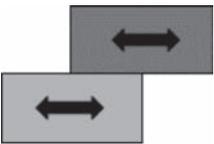


Abb. 16: Berechnung Ausfallzeitpunkt für Ermüdung

Durch photothermische Untersuchungen (Abschnitt 6) der Gefügedichte von dynamisch beanspruchten Bauteilen konnte nachgewiesen werden, dass bei Ermüdung zu Beginn eine starke Veränderung auftritt, dann lange Zeit das Gefüge sich nur sehr wenig verändert bis es dann wieder zu einer deutlichen Zunahme der Veränderungen bis zum Funktionsverlust kommt (Abb. 16). Ist aus Versuchen der zeitliche Verlauf der Gefügeänderungen bis zum Ausfall bekannt, so kann durch photothermische zerstörungsfreie Zwischenmessungen der Ausfallzeitpunkt durch Extrapolation bestimmt und die Erprobungszeit verkürzt werden.

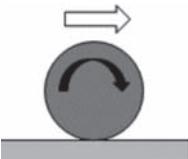
VERSCHLEISSARTEN – Gleitverschleiß – Ein Gleitverschleiß tritt auf, wenn sich zwei ebene oder gekrümmte



Flächen tangential gegeneinander relativ bewegen und unter dem Einfluss einer Normalkraft stehen. Der Verschleiß wird hier entscheidend vom Schmierstoff in Menge und Zusammensetzung bestimmt; unterschieden werden Festkörperreibung, Grenzflächenreibung, Mischreibung und Flüssigkeitsreibung.

Es können bei dieser Verschleißart alle Verschleißmechanismen beteiligt sein. Bei großer Pressung und hohen Geschwindigkeiten kann es zur Glanzstellenbildung als Verschleißerscheinungsform kommen. Diese beruht auf der Reibmartensitbildung.

VERSCHLEISSARTEN – Wälzverschleiß – Beim Wälzen handelt es sich um eine Rollen und Gleiten gleichzeitig, wodurch im Kontaktgebiet Deformations- und Gleitschlupf vorliegen. Es handelt sich hierbei in der Regel um kontroforme Kontakte. Der wesentliche Verschleißmechanismus bei diesem Reibkontakt ist die



Oberflächenzerrüttung, die zu Rissen und Grübchen (Pitting) führt.

Durch die Hertzschen Pressungen entsteht ein Spannungsfeld mit

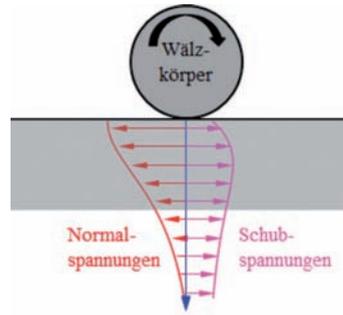


Abb. 17: Spannungsverteilung Wälzkontakt

einer Überlagerung aus Normal- und Schubspannungen mit dem Spannungsmaximum unterhalb der Oberfläche (Abb. 17).

VERSCHLEISSARTEN – Stoßverschleiß – Der Stoßverschleiß tritt in Folge des Zusammenstoßens zweier Körper auf. Der Verschleiß hängt hauptsächlich vom Impuls ab und somit in welcher Zeitspanne die Bewegungsenergie in die Körper eingeleitet wird. Hierbei ist die Makrogeometrie und die Mikrostruktur der Oberfläche wichtig. Des Weiteren natürlich der Elastizitätsmodul in Oberflächennähe, der durch die instrumentierte Eindringprüfung bestimmt werden kann (Abschnitt 6). Diese Verschleißart spielt bei Ventilen im Sitzbereich eine wichtige Rolle. Beim Stoßverschleiß kommt es hauptsächlich zu plastischen Deformationen und zur Rissbildung infolge Ermüdung.

VERSCHLEISSARTEN – Schwingungverschleiß (FRETTING) – Der Schwingungverschleiß, auch Fretting genannt, entsteht, wenn die Kontaktpartner eines tribologischen Systems wechselnde Relativbewegungen mit kleinen Bewegungsamplituden ausführen. In [17] wird die Verschleißart bei einer Schwingweite zur Unterscheidung in reversierenden Gleitverschleiß und in Schwingverschleiß mit 3 mm angegeben. Es kann sich hierbei um Gleit-, Wälz- und Bohrbewegungen

handeln. Dabei kann Passungsrost (Eisen(III)hydroxid und Eisen(II,III)oxid) entstehen. Das Problem bei dieser Verschleißart ist, dass die Verschleißpartikel nur sehr schwer oder gar nicht aus der Kontaktstelle heraus transportiert werden.

VERSCHLEISSARTEN – FURCHUNGSVERSCHLEISS – Wird ein harter Körper oder harter Partikel in einen weichen Kontaktpartner eindringt, entsteht Furchungsverschleiß. Der hauptsächliche Verschleißmechanismus ist die Abrasion. In [15] wird unterschieden in Gegenkörperfurchung / Abrasiv-Gleitverschleiß (Zwei-Körper-Abrasion) und Teilchenfurchung (Drei-Körper-Abrasion).

VERSCHLEISSARTEN – STRAHLENSCHLEISS – Beim Strahlverschleiß (Abb. 18) treffen wiederholt Partikel oder kleine Teile auf eine Oberfläche. Die Partikel treffen unter der Strahlwinkel α auf und je nach Winkel wird in Gleit-, Prall- und Schrägstrahlverschleiß unterschieden. Damit verbunden ist das Auftreten unterschiedlicher Verschleißmechanismen oder deren Kombination (Tab. 1). Infolgedessen treten auch verschiedene Verschleißerscheinungsformen auf, d.h. Riefen, Riffeln (Abb. 19) und Mulden (Abb. 20)

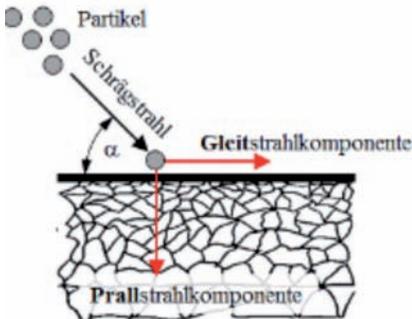


Abb. 18: Strahlverschleiß

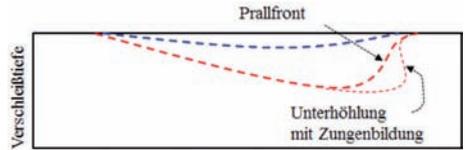


Abb. 19: Riffeln

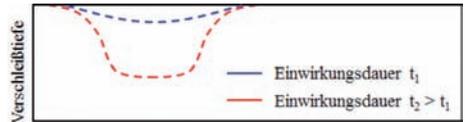


Abb. 20: Mulden

VERSCHLEISSARTEN – STRÖMUNGSVERSCHLEISS – Der Strömungsverschleiß ist ein Oberbegriff für alle Verschleißarten, die in Folge von Flüssigkeitsströmung ohne oder mit darin enthaltenen Festkörperteilchen. Typische Verschleißerscheinungsformen sind Mulden sonstige großflächige Gestaltänderungen.

Autor: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schorr, Steinbeis-Transferzentrum Tribologie, DHBW Karlsruhe

Literatur

- [14] GfT-Arbeitsblatt 7: Tribologie – Verschleiß, Reibung – Definitionen, Begriffe, Prüfung. Aachen: Gesellschaft für Tribologie e.V., 2002
- [15] H. Czichos, K.-H. Habig: Tribologie -Handbuch – Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. 3. Aufl., Vieweg + Teubner, 2010. – ISBN 978-3-8348-0017-6
- [16] G. Lange, M. Pohl: Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle, 6. Auflage, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2014 – ISBN 978-3-527-32530-6
- [17] K. Sommer, R. Heinz, J. Schöfer: Verschleiß metallischer Werkstoffe, Erscheinungsformen sicher beurteilen, 2. Auflage, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 978-3834824639

Tab. 1: Verschleißmechanismen und Kombinationen

Strahlwinkel	Verschleißart	Verschleißmechanismen	Verschleißerscheinungsformen
$\alpha = 0^\circ$	Gleitstrahlverschleiß	Abrasion	Riefen
$0^\circ < \alpha < 90^\circ$	Schrägstrahlverschleiß	Abrasion, Plastische Deformation, Ermüdung	Riefen (für $\alpha < 20^\circ$), Riffeln (für $20^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$), Mulden (für $\alpha > 60^\circ$)
$\alpha = 90^\circ$	Prallstrahlverschleiß	Plastische Deformation, Ermüdung	Mulden