

Karl Sommer | Rudolf Heinz | Jörg Schöfer

Verschleiß metallischer Werkstoffe

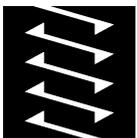
Karl Sommer | Rudolf Heinz | Jörg Schöfer

Verschleiß metallischer Werkstoffe

Erscheinungsformen sicher beurteilen

Mit 612 Abbildungen und zahlreichen Tabellen

PRAXIS



VIEWEG+
TEUBNER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Dr.-Ing. Karl Sommer, geb.1940 in Troppau. 1962-1970 Studium des Maschinenbaus an der TH Stuttgart. 1970-2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter der Staatlichen Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart in den Abteilungen Tribologie und Schadensanalyse. 1997 Promotion. Arbeitsgebiete: Tribologie, Werkstoffkunde, Schadenskunde und Wärmebehandlung.

Dr.-Ing. Rudolf Heinz, geb. 1939 in Darmstadt. 1963-1969 Studium des Maschinenbaus an der TU-Darmstadt. 1969 Diplomprüfung in Maschinenbau. 1970-1977 wiss. Ass. und Dozent im Fachgebiet Maschinenelemente. 1977 Promotion. 1977-2003 Tätigkeit bei der Robert Bosch GmbH Stuttgart in der Forschung, Arbeitsgebiet Tribologie und in der Serienentwicklung mit Arbeitsgebiet Dieseleinspritztechnik. Seit 2004 Berater bei der Robert Bosch GmbH Stuttgart.

Dr.-Ing. Jörg Schöfer, geb. 1969 in Bremen. 1990-1996 Studium der Physik an der Universität Göttingen und der University of California Santa Cruz. 1996-1998 wiss. Mitarbeiter an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Fachgruppe Tribologie. 2001 Promotion an der Universität Karlsruhe, Prof. Dr.-Ing. K.-H. Zum Gahr. Seit 1998 Tätigkeit bei der Robert Bosch GmbH Stuttgart in der zentralen Forschung und Vorausbildung, Arbeitsschwerpunkte Tribologie und Ventiltechnik.

1. Auflage 2010

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010

Lektorat: Thomas Zipsner | Ellen Klabunde

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Technische Redaktion: Stefan Kreickenbaum, Wiesbaden

Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8351-0126-5

Vorwort

„Das Volumen des Festkörpers wurde von Gott geschaffen, seine Oberfläche aber wurde vom Teufel gemacht.“ Dieser viel zitierte Ausspruch wird dem Physiker und Nobelpreisträger Wolfgang Pauli zugeschrieben. Auch wenn Pauli damals sicherlich nicht an Probleme aus dem Bereich der tribologischen Schadensanalyse dachte, dürfte das prägnante Zitat manchem Ingenieur aus der Seele sprechen, der heute versucht, anhand von Bildern der verschlissenen Oberfläche eines Produktes eindeutige Rückschlüsse auf die Schadensursache und die zu treffende Abhilfemaßnahme zu ziehen.

In der Tat ist die Menge der möglichen Erscheinungsformen des Verschleißes schwer zu überschauen, selbst wenn man sich auf eine bestimmte Materialklasse, zum Beispiel die metallischen Werkstoffe, beschränkt. Und auch die Verknüpfung eines tribologischen Schadensbildes mit seiner Ursache ist häufig nicht trivial. So können ähnliche Verschleißmechanismen zu sehr unterschiedlichen Schadensbildern führen und vergleichbare Verschleißerscheinungen verschiedene Mechanismen als Ursache haben.

Der Hauptgrund für diese Vielfältigkeit der Erscheinungsformen und die Schwierigkeit der Rückführung auf ihre Ursachen ist in der Komplexität der an der Oberfläche verschleißender Körper stattfindenden physikalischen und chemischen Vorgänge zu suchen. Diese Vorgänge, und damit der Verschleiß, hängen nicht nur von den Eigenschaften des Werkstoffs bzw. der Oberfläche ab, sondern auch von dem System, in dem sich die Oberfläche befindet. Der Verschleiß ist insofern nicht als Eigenschaft des Werkstoffes zu sehen, sondern als seine Antwort auf die im System herrschenden Beanspruchungen und Randbedingungen.

Auch wenn die tribologische Forschung in den vergangenen Jahrzehnten insbesondere im Bereich der Beanspruchungssimulation deutliche Fortschritte gemacht hat, ist es auch heute noch in vielen Fällen schwer oder unmöglich, alle Einflussparameter auf den Verschleiß richtig zu erfassen und in ihrer Wirkung auf den Verschleiß zu beschreiben. Daher ist die Schadensanalyse, die über die genaue Untersuchung der Verschleißerscheinungsformen einer Oberfläche und den Vergleich mit bekannten Schadensfällen aus der Vergangenheit die Ursache für den unerwünschten Verschleiß herausarbeitet, nach wie vor eine der wichtigsten Vorgehensweisen bei der Vermeidung tribologisch bedingter Schäden. Um so mehr verwundert es, dass die Menge an Fachliteratur, die sich mit einer Übersicht über Verschleißerscheinungsformen und ihrer Zuordnung zu Verschleißarten und Maschinenelementen befasst, vergleichsweise überschaubar ist. Diese Lücke für den Bereich der metallischen Werkstoffe zu füllen und eine solide und langfristig wirksame Grundlage für die tribologische Schadensanalyse zu schaffen, ist das Hauptanliegen dieses Buches.

Das vorliegende Werk ist vor allem für die praktische Arbeit des Ingenieurs gedacht. Es soll mit der Behandlung zahlreicher Schadensbeispiele aus den vergangenen Jahrzehnten konkrete Hilfestellung bei der Analyse und Beurteilung von Verschleißproblemen bieten und die Ableitung geeigneter Maßnahmen zur Optimierung von Sicherheit und Zuverlässigkeit beim Betrieb von Anlagen und Maschinen ermöglichen.

Eine solche Sammlung von Schadensbeispielen lebt nicht nur stark von der eigenen wissenschaftlichen Erfahrung der Autoren, sondern auch von dem beruflichen Umfeld, in dem diese Erfahrungen erworben wurden. Darüber hinaus ist sie undenkbar ohne die Einbeziehung der zahlreichen Arbeiten aus dem universitären Bereich und der Industrie, welche die Vielfalt und Geschlossenheit der Darstellung erst möglich machen. Entsprechend danke ich meinen Co-Autoren Dr.-Ing. Rudolf Heinz und Dr.-Ing. Jörg Schöfer herzlich für die Mitwirkung an diesem Werk, insbesondere für die Erarbeitung von Kapitel 5 und die vielen Anregungen zu den anderen Kapiteln. Auch gilt mein Dank den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Robert Bosch GmbH, die durch ihre wertvollen Diskussionen und ihre tatkräftige Unterstützung bei der Auswahl und Analyse aussagekräftiger Verschleißbilder zur Bereicherung des vorliegenden Buches beigetragen haben. Weiterhin danke ich den Firmen und Personen, die freundlicherweise die Genehmigung zur Veröffentlichung ihres Bildmaterials erteilten, und deren Name ich jeweils in den Bildunterschriften vermerkt habe.

Schließlich danke ich Herrn Thomas Zipsner und Frau Ellen Klabunde vom Lektorat Maschinenbau vom Verlag Vieweg+Teubner für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit und vor allem für die mir gegenüber geübte Geduld.

Besonders danke ich meiner lieben Frau Luise für ihre Unterstützung während der jahrelangen Bearbeitung des Buches, die viele Einschränkungen auf sich genommen und Opfer gebracht hat. Meine Tochter Sabine hat sich der Mühe des Korrekturlesens mit Sorgfalt unterzogen, wofür ich mich auch bei ihr bedanke.

Lorch, im August 2010

Karl Sommer

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
2 Tribologische Grundlagen	3
2.1 Tribologisches System	3
2.2 Reibung	6
2.2.1 Makroskopische Betrachtung	7
2.2.2 Mikroskopische Betrachtung	7
2.2.3 Reibungsarten	10
2.2.4 Reibungszustände	11
2.2.5 Reibungszahlen	12
2.3 Verschleißarten	14
2.4 Verschleißmechanismen	14
2.4.1 Adhäsion	16
2.4.2 Abrasion	18
2.4.3 Oberflächenzerrüttung	20
2.4.4 Tribochemische Reaktion	21
2.4.5 Ablation	23
2.5 Zusammenhang zwischen Reibung und Verschleiß	24
2.6 Ausfallkriterien	28
3 Methodik der Analyse tribologischer Schäden	35
3.1 Strukturanalyse	37
3.2 Beanspruchungsanalyse	38
4 Gleitverschleiß	40
4.1 Grundlagen geschmierter Tribosysteme	40
4.1.1 Hydrodynamik	40
4.1.2 Mischreibung und Grenzreibung	42
4.2 Verschleißerscheinungsformen bei Hydrodynamik und Mischreibung	45
4.2.1 Riefen	46
4.2.2 Einbettung von Fremdpartikeln	49
4.2.3 Eindrückungen	52
4.2.4 Ausbrüche	52
4.2.5 Ungleichmäßiges Tragbild	56
4.2.6 Rattermarken	57
4.2.7 Fresser	59
4.2.8 Werkstoffübertrag	64
4.2.9 Schubrisse	67
4.2.10 Brandrisse	69
4.2.11 Gefügeänderung	72
4.2.12 Schmelzerscheinungen	78
4.2.13 Stromübergang	81

4.2.14	Tribochemische Reaktionsschicht	83
4.2.15	Plastische Oberflächenverformung	86
4.2.16	Profiländerung	88
4.3	Grundlagen ungeschmierter Tribosysteme	90
4.3.1	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	91
4.3.2	Strukturbedingte Einflüsse	96
4.4	Besonderheiten bei Trockenreibung im Vakuum	100
4.5	Verschleißerscheinungsformen bei ungeschmierter Gleitreibung	101
4.5.1	Riefen	101
4.5.2	Werkstoffübertrag	102
4.5.3	Schubrisse	103
4.5.4	Brandrisse	103
4.5.5	Gefügeänderung	106
4.5.6	Tribooxidation	110
5	Schwingungsverschleiß (<i>Fretting</i>)	119
5.1	Grundlagen	119
5.1.1	Bewegungsformen	119
5.1.2	Stofftransport und Reibungszustand	119
5.1.3	Systemklassen	120
5.1.4	Verschleißmechanismen bei Schwingungsverschleiß	122
5.1.4.1	Adhäsion mit Werkstoffübertrag	122
5.1.4.2	Abrasion	122
5.1.4.3	Tribooxidation	123
5.1.4.4	Oberflächenzerrüttung	124
5.1.4.5	Zeitlicher Wechsel von Verschleißmechanismen am Beispiel von Zahnwellenverbindungen und -kupplungen	124
5.2	Verschleißerscheinungsformen durch Schwingungsverschleiß	127
5.2.1	Beläge (Tribooxidation, Reiboxidation, Reibrost, Passungsrost)	128
5.2.2	Narben	135
5.2.3	Mulden	138
5.2.4	Riffel	140
5.2.5	Wurmspuren	145
5.2.6	Stillstandsmarkierungen (<i>false brinelling</i>)	149
5.2.7	Schwingungsverschleiß mit überwiegend einem Verschleiß- mechanismus	157
5.3	Reibdauerbrüche (<i>fretting fatigue</i>)	160
5.4	Allgemeine Hinweise zur Minderung von Schwingungsverschleiß	173
6	Wälzverschleiß	180
6.1	Grundlagen	180
6.1.1	Allgemeiner Überblick	180
6.1.2	Hertzsche Pressung ungeschmiert	181
6.1.3	Hertzsche Pressung geschmiert	185
6.1.4	Schädigungsbetrachtungen	191
6.1.5	Vergleich ertragbarer Hertzscher Pressungen	193

6.1.6	Zahnräder	194
6.1.6.1	Allgemeines	194
6.1.6.2	Beanspruchungs- und strukturbedingte Einflüsse	197
6.1.6.3	Tribochemische Reaktion	202
6.1.6.4	Adhäsion	207
6.1.6.5	Abrasion	210
6.1.6.6	Oberflächenzerrüttung	211
6.1.7	Wälzlager	224
6.1.7.1	Allgemeines	224
6.1.7.2	Beanspruchungs- und strukturbedingte Einflüsse	226
6.1.7.3	Tribochemische Reaktion	234
6.1.7.4	Adhäsion	237
6.1.7.5	Abrasion	238
6.1.7.6	Oberflächenzerrüttung	239
6.1.8	Kurvengetriebe	247
6.1.8.1	Allgemeines	247
6.1.8.2	Beanspruchungs- und strukturbedingte Einflüsse	248
6.1.9	Gleichlaufgelenke	252
6.1.10	Rad/Schiene	254
6.2	Verschleißerscheinungsformen bei vollständiger Elastohydrodynamik (EHD) ..	258
6.2.1	Gefügeänderung	259
6.2.2	Abblätterung	265
6.3	Verschleißerscheinungsformen bei Mischreibung unter Elastohydrodynamik ...	267
6.3.1	Ungleichmäßiges Tragbild	267
6.3.2	Tribochemische Reaktionsschicht	272
6.3.3	Riefen	274
6.3.4	Fresser	279
6.3.5	Profiländerung	284
6.3.6	Graufleckigkeit	293
6.3.7	Grübchen	303
6.3.8	Abblätterung	312
6.3.9	Abplatzer	320
6.3.10	Schichtbruch	323
6.3.11	Riffel	324
6.4	Verschleißerscheinungsformen bei ungeschmierter Wälzreibung	337
6.4.1	Profiländerung	337
6.4.2	Riffel	339
6.4.3	Rissbildungen und Ausbrüche	342
6.4.4	Gefügeänderung	344
7	Abrasivverschleiß	365
7.1	Grundlagen	365
7.2	Zweikörper-Abrasivverschleiß – Abrasiv-Gleitverschleiß durch gebundenes Korn	373
7.2.1	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	374
7.2.2	Strukturbedingte Einflüsse	375

7.3	Verschleißerscheinungsformen bei Abrasiv-Gleitverschleiß durch gebundenes Korn	387
7.3.1	Riefen	387
7.3.2	Einbettung	389
7.3.3	Ausbrüche	389
7.3.4	Brandrisse	390
7.3.5	Gefügeumwandlung	392
7.3.6	Profiländerung	393
7.4	Dreikörper-Abrasivverschleiß	395
7.4.1	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	397
7.4.2	Strukturbedingte Einflüsse	398
7.4.2.1	Abrasivstoff als Zwischenstoff	398
7.4.2.2	Grund- und Gegenkörper	398
7.5	Verschleißerscheinungsformen bei Dreikörper-Abrasivverschleiß	406
7.5.1	Riefen	406
7.5.2	Einbettung	408
7.5.3	Schubrisse	409
7.5.4	Erosionsformen	410
7.5.5	Riffel	411
7.5.6	Profiländerung	412
8	Erosion und Erosionskorrosion	423
8.1	Allgemeine Grundlagen	423
8.2	Grundlagen Abrasiv-Gleitverschleiß durch loses Korn (Erosion)	424
8.2.1	Allgemeines	424
8.2.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	425
8.2.3	Strukturbedingte Einflüsse	426
8.3	Verschleißerscheinungsformen bei Erosion durch loses Korn	428
8.3.1	Querwellen, Mulden	428
8.3.2	Riefen	431
8.3.3	Selektive Erosion	432
8.3.4	Profiländerung	436
8.4	Grundlagen Strahlverschleiß	437
8.4.1	Allgemeines	437
8.4.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	438
8.4.2.1	Anstrahlwinkel	438
8.4.2.2	Partikelgeschwindigkeit	442
8.4.2.3	Temperatur	443
8.4.2.4	Partikeldurchsatz	445
8.4.2.5	Partikelgröße	445
8.4.3	Strukturbedingte Einflüsse	447
8.4.3.1	Partikeleigenschaften	447
8.4.3.2	Werkstoffeigenschaften	449
8.5	Verschleißerscheinungsformen bei Strahlverschleiß	456
8.5.1	Querwellen, Mulden	456
8.5.2	Riffel	463

8.5.3	Eindrückungen	464
8.5.4	Profiländerung	466
8.6	Grundlagen hydroerosiver (hydroabrasiver) Verschleiß	471
8.6.1	Allgemeines	471
8.6.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	474
8.6.3	Strukturbedingte Einflussgrößen	478
8.6.3.1	Abrasivstoffhärte	478
8.6.3.2	Korngröße	480
8.6.3.3	Befeuchtung	485
8.6.3.4	pH-Wert	486
8.6.3.5	Werkstoffverhalten	489
8.7	Verschleißerscheinungsformen bei hydroerosivem Verschleiß	493
8.7.1	Längs- und Querwellen, Mulden, Rillen	493
8.7.2	Eindrückungen	503
8.7.3	Riefen	504
8.7.4	Selektive Erosion	505
8.7.5	Profiländerung	507
8.8	Grundlagen Erosionskorrosion	507
8.8.1	Allgemeines	507
8.8.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	510
8.8.3	Strukturbedingte Einflüsse	515
8.9	Verschleißerscheinungen durch Erosionskorrosion	518
8.9.1	Auswaschungen, Querwellen, Mulden	518
8.9.2	Riffel	524
8.9.3	Längswellen	526
8.9.4	Selektive Korrosion	527
8.10	Grundlagen Kavitationserosion	528
8.10.1	Allgemeines	528
8.10.2	Strukturbedingte Einflüsse	530
8.10.3	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	532
8.10.4	Werkstoffverhalten	534
8.10.5	Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Kavitationserosion	539
8.11	Verschleißerscheinungsformen durch Kavitationserosion	540
8.11.1	Erosion durch Schwingungs- und Strömungskavitation	540
8.11.2	Aufrauung	548
8.11.3	Ausbrüche	555
8.12	Grundlagen Tropfenschlagerosion	556
8.12.1	Allgemeines	556
8.12.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	557
8.13	Verschleißerscheinungen bei Tropfenschlagerosion	560
8.13.1	Mulden	560
8.13.2	Aufrauung	561
8.14	Gaserosion	564

9 Anhang	579
9.1 Farbiges Bildteil	579
9.2 Gegenüberstellung von alter (DIN) und neuer (Euro-Norm) Werkstoff- bezeichnung	583
Sachwortverzeichnis	588

1 Einführung

Die Oberfläche verschlissener Bauteile und die dort sichtbaren Verschleißerscheinungsformen können als eine der entscheidenden Informationsquellen für die Aufklärung tribologischer Schadensfälle bezeichnet werden, da sie – wenn auch nur im Nachhinein – einen direkten Zugang zu der beanspruchten Zone des Werkstoffes ermöglichen. Dies gilt in besonderem Maße für unvermutet an einem Produkt auftretende Schäden, da hier in der Regel keine prophylaktischen Maßnahmen zur begleitenden Untersuchung des Schädigungsverlaufs ergriffen wurden, wie beispielsweise Reibungs-, Temperatur oder Körperschallmessungen. So geben die Erscheinungsformen des Schadens an der Oberfläche den ersten direkten visuellen Hinweis auf die Schädigungsursache, der dann durch weitere Untersuchungen von Werkstoffgefüge, Beanspruchungsbedingungen etc. ergänzt werden kann, bis ein möglichst geschlossenes Bild des Verschleißhergangs vorliegt.

Die Deutsche Gesellschaft für Tribologie definiert den Begriff der Verschleißerscheinungen als „*sich durch Verschleiß ergebende Veränderungen der Oberflächen eines Körpers sowie die Art und Form der entstandenen Verschleißpartikel.*“ [1]. Für einen Rückschluss auf die Schadensursache enthalten sowohl die Oberflächenmodifikationen als auch die Verschleißpartikel wichtige Hinweise. In der Praxis allerdings stehen die entstandenen Verschleißpartikel, wenn sie nicht gezielt gesammelt wurden, oft nicht mehr für eine genauere Untersuchung zur Verfügung, so dass der Schwerpunkt einer Schadensanalyse sich häufig auf die Betrachtung der Oberflächenveränderungen konzentriert.

Ausgehend von dieser Erfahrung sollte eine Abhandlung zu Verschleißerscheinungsformen metallischer Werkstoffe in der Hauptsache eine umfassende Übersicht über die verschiedenen Schadensbilder der verschlissenen Oberflächen enthalten. Es erscheint allerdings notwendig, einige weitere Aspekte ebenfalls zu berücksichtigen: Zum einen betrifft dies die Größe, Form und chemische Zusammensetzung der oben erwähnten Verschleißpartikel. Weiterhin ist in Erweiterung der Definition der Verschleißerscheinungsformen auch die Beschreibung von Oberflächenmodifikationen sinnvoll, die infolge eines tribologischen Prozesses zu einer Beeinträchtigung der Oberflächengrenzschicht führen, ohne bereits einen direkt wahrnehmbaren Materialverlust verursacht zu haben. Dies ist beispielsweise bei Anrissbildung in Zerrüttungszonen, Brandrissen oder Gefügeumwandlungen der Fall. Die dabei auftretenden Erscheinungen führen nicht notwendigerweise sofort zu einer Beeinträchtigung der Funktion oder gar zum Versagen, können aber oftmals als Vorstufen des Verschleißes betrachtet werden, die erst im Laufe des Betriebes eine Funktionsstörung bewirken. Wichtig ist darüber hinaus auch die Erwähnung derjenigen tribologischen Oberflächenveränderungen, die als ausgesprochen erwünscht betrachtet werden, wie die Veränderungen der Grenzschicht durch Reaktionsschichtbildung bei geschmierten Systemen, die sich verschleißmindernd auswirken. Hier ist eine Abgrenzung zu unerwünschten Verschleißerscheinungsformen notwendig, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Entsprechend dieser Vorüberlegungen haben die Autoren bei der Umsetzung dieses Buches besonderen Wert auf eine umfangreiche Sammlung von bebilderten Beispielen zu den Verschleißerscheinungsformen tribologisch beanspruchter Oberflächen gelegt, die auf Basis eige-

ner Arbeiten und einer sorgfältigen Sichtung der Literatur zusammengestellt sind. Im Sinne einer möglichst guten Anwendbarkeit, liegt der Schwerpunkt dieser beispielhaften Darstellungen auf Erzeugnissen und Maschinenelementen. Wenn dennoch Modellversuche aufgeführt sind, so gerade deshalb, weil Einflüsse auf bestimmte Verschleißprozesse wegen ihrer kontrollierten und gezielt variierbaren Beanspruchungsbedingungen klarer herausgearbeitet werden können. Eine ausführliche Kommentierung der Verschleißerscheinungsformen soll dem Entwickler helfen, diese sicher auf die eigenen Schadensfälle zu übertragen und die erforderlichen Abhilfemaßnahmen zu ergreifen.

Grundlage für die angestrebte Übersicht der Verschleißerscheinungsformen ist eine sinnvolle Ordnungsstruktur sowie die einheitliche und korrekte Anwendung von Begriffen, um Missverständnisse und Fehlinterpretationen in der Praxis zu vermeiden. Als Ordnungsrahmen der Verschleißerscheinungen wurde die Sortierung nach den verursachenden Verschleißarten gewählt, um eine direkte Verbindung zwischen dem Schadensbild und der Belastungssituation der Bauteile herzustellen und dem Leser die Ursachenfindung anhand der dargestellten Beispiele zu erleichtern. Eine einheitliche Darstellung der Begriffe ist durchaus als nicht trivial zu betrachten, da für die konkrete Bezeichnung der einzelnen Verschleißerscheinungsformen, ihrer Beschreibung und insbesondere ihrer Abgrenzung untereinander nicht in allen Fällen auf gut etablierte Definitionen zurückgegriffen werden kann. Es wurden hier in der Regel die in der Literatur am breitesten verwendeten Begriffe ausgewählt und systematisch eingesetzt, wohl wissend, dass in dem einen oder anderen Punkt insbesondere bei der Abgrenzung der Verschleißerscheinungsformen noch Klärungsbedarf besteht.

Berechnungsgrundlagen für eine Auslegung tribologisch beanspruchter Bauteile werden in diesem Buch nicht behandelt. Die in einigen Fällen angegebenen Gleichungen dienen lediglich zur Orientierung und zur Einordnung von Einflussgrößen auf den Verschleiß bzw. auf die Verschleißerscheinungsformen.

Die Gliederung dieses Buches beginnt mit einer allgemeinen Darstellung der tribologischen Grundlagen. Es folgt ein kurzer Abriss der Methodik der tribologischen Schadensanalytik, der den Leser mit den wichtigsten Aspekten der ihrer praktischen Umsetzung vertraut machen soll, ohne einen ausführlichen Lehrgang zu diesem Thema ersetzen zu können. Den Hauptteil des Buches bilden fünf nach Verschleißarten geordnete Kapitel zu den Verschleißerscheinungsformen metallischer Werkstoffe. Im Sinne der leichteren Lesbarkeit ist die Unterstruktur dieser Kapitel weitgehend identisch gehalten. Den beschriebenen Verschleißerscheinungsformen sind jeweils die Grundlagen der behandelten Verschleißarten und ggf. Maschinenelemente vorangestellt. Mögliche Abhilfemaßnahmen, die in den Grundlagenkapiteln besprochen oder direkt bei der Beschreibung der jeweiligen Verschleißerscheinungsform erwähnt werden, sollen über die Fallbeispiele hinaus Anregungen für eine kritische Auseinandersetzung mit den eigenen Schadensfällen geben und auf das Spektrum der Lösungsalternativen hinweisen.

Literaturverzeichnis

- [1] GfT-Arbeitsblatt 7: Tribologie. Verschleiß, Reibung. Definitionen, Begriffe, Prüfung. Ausgabe August 2002

2 Tribologische Grundlagen

2.1 Tribologisches System

Funktion und Fertigung eines Bauteiles erfordern Werkstoffe, die vielfältigen Anforderungen gerecht werden müssen. An den Grundwerkstoff werden häufig nicht dieselben extremen Anforderungen wie an die Oberfläche bzw. Grenzschicht gestellt [1, 2]. Während die Auslegung eines Bauteiles bei mechanischer und mechanisch-thermischer Beanspruchung nach Festigkeitsgesichtspunkten erfolgt, die sich vor allem auf das Bauteilvolumen beziehen, müssen bei tribologischer Beanspruchung, die über die Kontaktfläche durch Normal- und Tangentialkräfte wirkt, komplexe und irreversible Prozesse in der Grenzschicht berücksichtigt werden. Diese Prozesse werden von zahlreichen Parametern beeinflusst, so dass das tribologische Verhalten nur als systembedingtes Verhalten zu beschreiben ist und gerade wegen der komplexen Prozesse in vielen Fällen einer ursächlichen Beschreibung nicht zugänglich ist. Das tribologische System ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet [3]:

- I Funktion
- II Beanspruchungskollektiv
- III Struktur
 - am Verschleiß beteiligte Elemente
 - Eigenschaften der Elemente
 - Wechselwirkungen der Elemente
- IV Reibungs- und Verschleißkenngrößen.

Ein solches System ist vereinfacht in **Bild 2.1** wiedergegeben. Bereits mit der Beschreibung der Funktion (I) sind bestimmte Vorgaben hinsichtlich zu verwendender Werkstoffe und konstruktiver Gestaltung verknüpft. Einen besonderen Stellenwert nimmt die Analyse der unter dem Beanspruchungskollektiv (II) zusammengefassten Parameter – Belastung 4, Bewegung 5 und Temperatur 6 – und der strukturbildenden Elemente einschließlich ihrer Eigenschaften und ihrer Wechselwirkungen (III) – bestehend aus Grundkörper 1, Gegenkörper 2, Zwischenstoff 3a und Umgebungsmedium 3b – ein, da bereits geringe Abweichungen von der Spezifikation das tribologische Verhalten entscheidend beeinflussen und oft unbedeutend erscheinende Störfaktoren, wie z. B. Verunreinigungen oder veränderte Wärmeableitung, für einen Schaden ausschlaggebend sein können oder sogar erst eine Erklärung hierfür bieten. Während das Beanspruchungskollektiv im Sinne einer eingeleiteten Energie als Eingangsgröße zu betrachten ist, stellen Reibungs- und Verschleißkenngrößen (IV) die Ausgangsgrößen dar. Hierüber geben die Verschleißerscheinungsformen oft die einzigen Hinweise auf die im Mikrokontakt wirksam gewesenen Verschleißmechanismen (vgl. Kap. 2.4) und auf die bleibenden Veränderungen an den Elementen, die sich in meist zum Werkstoffinnern abklingenden spannungsmäßigen, strukturellen und auch chemischen Abweichungen gegenüber dem Ausgangszustand äußern. Auch Verschleißpartikel und besonders deren Größe und Form können bei der Aufklärung von Verschleißvorgängen hilfreich sein. Die stofflichen Wechselwirkungen zwischen den strukturbildenden Elementen in Verbindung mit dem Beanspruchungskollektiv haben also größte Bedeutung und bilden oft den Schlüssel für zunächst nicht erklärable Ergebnisse bzw. Schäden.

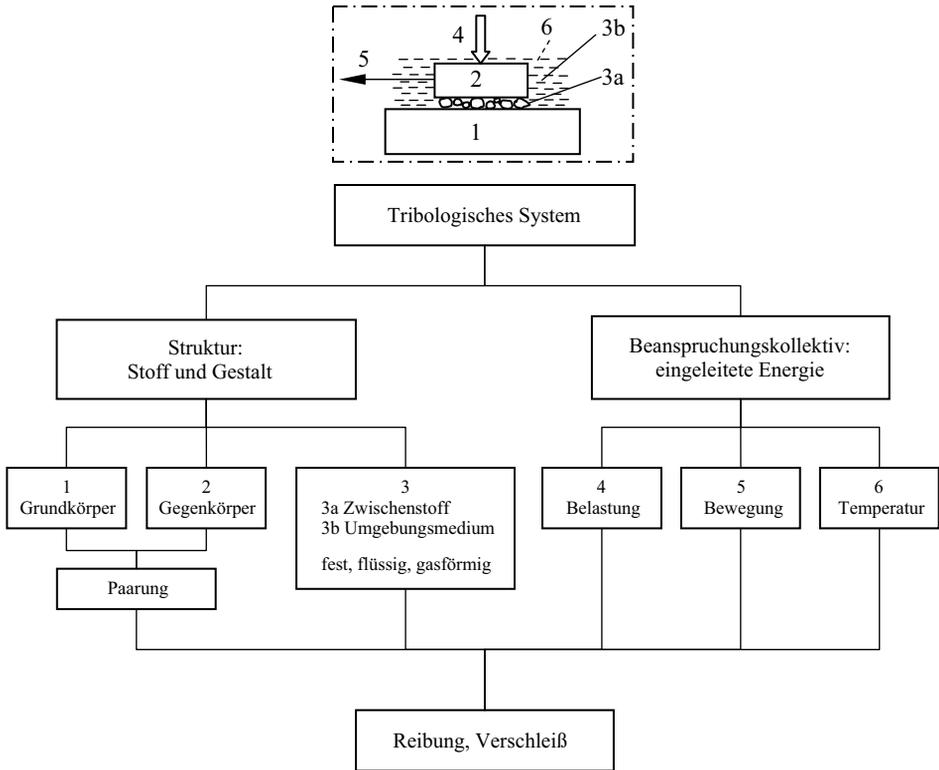


Bild 2.1: Tribologisches System mit den kennzeichnenden Elementen

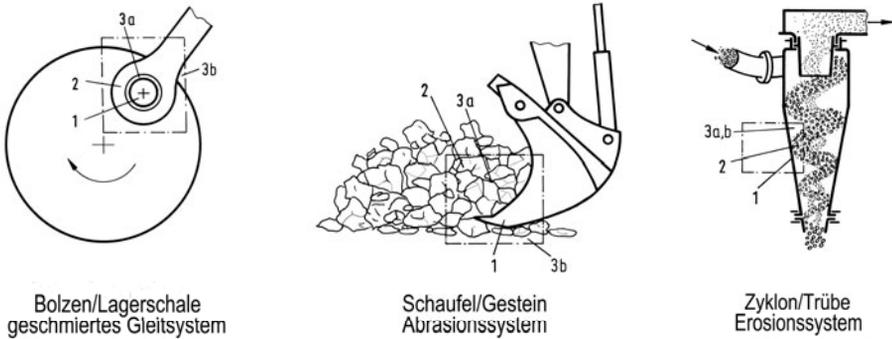
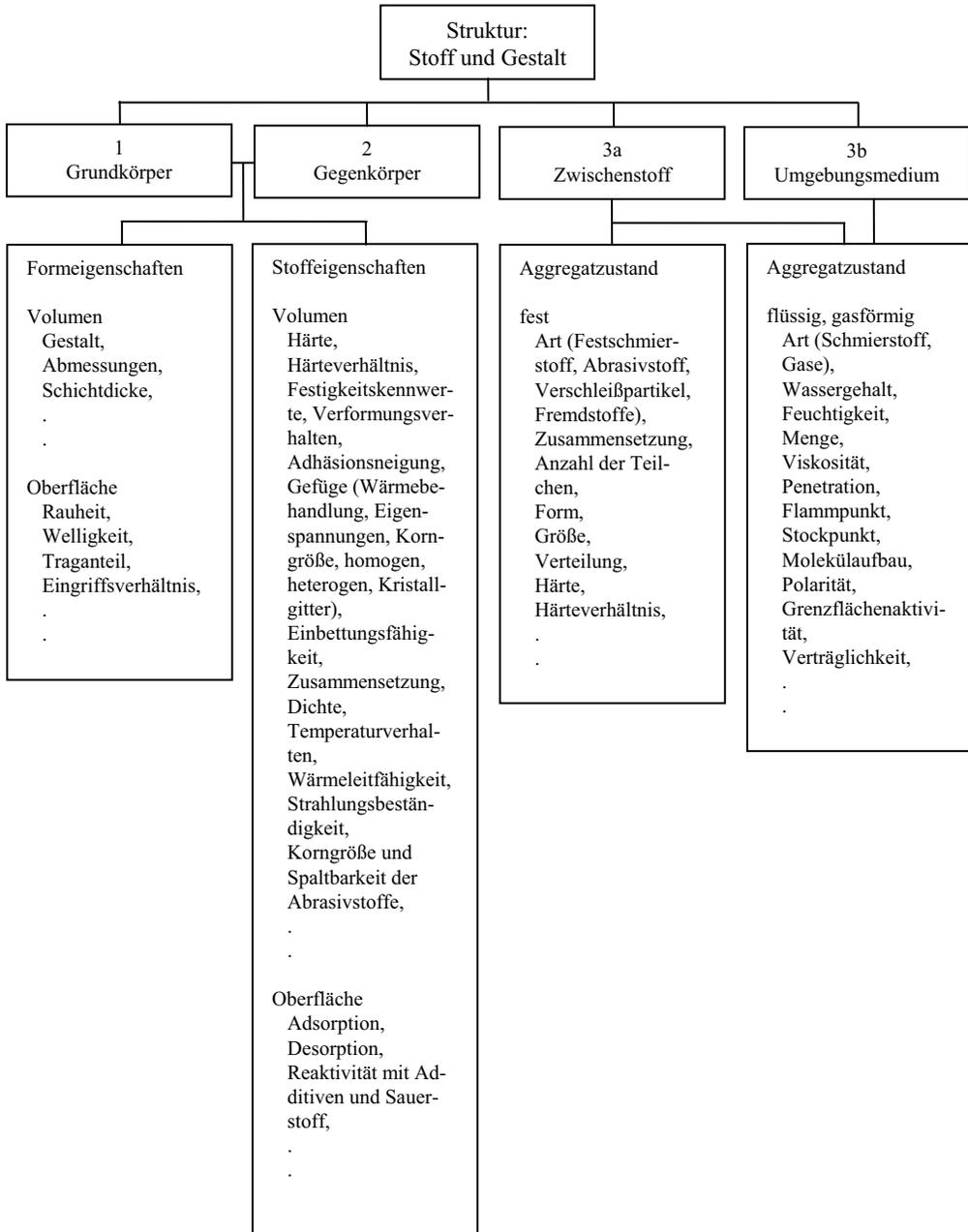


Bild 2.2: Beispiele für tribologische Systeme; Systemeinhüllende strichpunktiert

Beispiele verschiedener tribologischer Systeme sind in **Bild 2.2** aufgeführt. Die tribologische Kontaktstelle ist durch eine Systemeinhüllende (strichpunktierte Linie) von den übrigen Konstruktionsbauteilen gedanklich abgegrenzt. Das linke Beispiel steht für ein geschlossenes Sys-

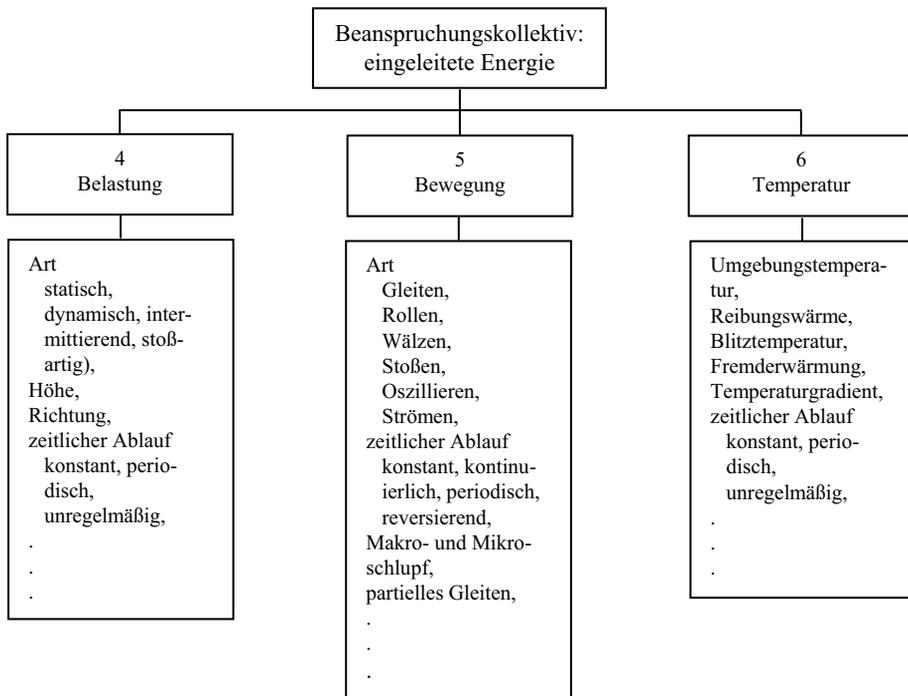
tem, während die beiden rechten Beispiele offene Systeme darstellen, die mit einem stets neuen Materialfluss beaufschlagt werden. Bei den beiden offenen Systemen stellen die abrasiv wirkenden Stoffe den Gegenkörper dar, wobei der Zwischenstoff z. B. Wasser sein kann und das Umgebungsmedium in der Regel Luft ist.

Tabelle 2.1: Auswahl struktureller Einflussgrößen auf den Verschleißprozess



Das tribologische System mit dem Beanspruchungskollektiv und den Strukturelementen stellt den ordnenden Rahmen für eine erfolgreiche Bearbeitung von Verschleißproblemen dar. Eine ausführliche Darstellung der ordnenden Gesichtspunkte und Begriffe findet man u. a. in [1, 2]. Die Kenntnis über die systemtechnischen Elemente ist deshalb von gravierender Bedeutung, weil der Konstrukteur mit ihrer Wahl das Verschleißgeschehen am Bauteil bereits weitgehend festgelegt hat. Die beim Verschleißprozess ablaufenden Wechselwirkungen sind infolge vielfältiger Einflussgrößen, **Tabelle 2.1** und **2.2**, weder durch die Werkstoff- noch durch die Oberflächeneigenschaften der beteiligten Partner allein zu charakterisieren. Aufgrund dieser Besonderheit tribologischer Systeme ist es nicht möglich, einem Werkstoff oder einer Paarung eine „Verschleißfestigkeit“ im Sinne eines Werkstoffkennwertes zuzuordnen, wie es sinngemäß bei vom Ingenieur benutzten Festigkeitskennwerten – an Normproben bestimmt – üblich ist. Die Verschleißkenngrößen sind somit, wie auch die strukturellen Eigenschaften (Form- und Stoffeigenschaften, Aggregatzustand), vom System abhängig. Es empfiehlt sich daher, von Verschleißbeständigkeit zu sprechen.

Tabelle 2.2: Auswahl beanspruchungsbedingter Einflussgrößen auf den Verschleißprozess



2.2 Reibung

Reibung zwischen zwei Körpern ist, wie der Verschleiß, keine Werkstoff- oder Werkstoffpaarungseigenschaft, sondern eine Systemeigenschaft. Sie äußert sich in Kraftwirkungen und beeinflusst nahezu alle Vorgänge in Natur und Technik. In bewegten Systemen ist wegen des

zusätzlichen Kräftebedarfs Reibung meist unerwünscht, da sie die Funktion von Maschinen beeinträchtigt und nicht nur erhebliche Energieverluste, sondern auch Temperaturerhöhung und bei fortgesetzter Bewegung Verschleiß bewirkt. Immer dort, wo sich Bewegungswiderstände störend auswirken, wird daher versucht werden, diese durch geeignete Maßnahmen wie Schmierung oder Ersatz der gleitenden Bewegung durch kraftsparende Rollbewegung zu mindern. Die Ausnutzung der Reibung ist aber auch unabdingbare Voraussetzung für eine Vielzahl von Funktionen, bei denen Kräfte „kraftschlüssig“ durch Reibung übertragen werden müssen, wie z. B. bei Reibkupplungen oder Bremsen. Dies gilt ebenso für die Funktion von Schraubenverbindungen, für das Halten von Nägeln oder von Fäden im Gewebe, für die Fortbewegung eines Fußgängers oder Fahrzeuges und für das Erklingen eines Streichinstrumentes.

2.2.1 Makroskopische Betrachtung

Reibung ist eines der am längsten bekannten Phänomene, deren wissenschaftliche Erforschung jedoch erst im 15. Jahrhundert durch Leonardo da Vinci erfolgte und von Guillaume Amontons, Leonard Euler, Charles Augustin Coulomb und Arthur-Jules Morin erweitert wurde. Ihre Untersuchungen führten phänomenologisch zu dem von Coulomb formulierten Gesetz der Festkörperreibung bei Gleitbewegungen, die von Fläche und Geschwindigkeit unabhängig ist:

$$f = F_R / F_N \quad (2.1)$$

Darin bedeuten f = Reibungszahl, F_N = Normalkraft und F_R = Reibungskraft.

Nach heutigen Erkenntnissen gelten jedoch diese Zusammenhänge nur näherungsweise und in bestimmten Grenzen. Tatsächlich hängen Reibungskraft und Reibungszahl sowohl von den Beanspruchungsparametern als auch von der tribologischen Struktur, d. h. von den beteiligten Stoffen, ab. Erstaunlich ist, dass z. B. bei einer Verdoppelung der geometrischen Kontaktfläche die Reibungskraft konstant bleiben soll, obwohl sich die nominelle Flächenpressung halbiert und sich damit die lokalen Reibungsmechanismen oft ändern. Die Erklärung, aber auch die Grenzen der Coulombschen Gesetze liegen in der Unterscheidung zwischen der geometrischen Kontaktfläche und der wahren Kontaktfläche, was in Kap. 2.2.2 näher betrachtet wird.

Reibung zwischen Festkörpern bezeichnet man als äußere Reibung. In der Regel werden darunter mechanische Widerstände (Kräfte und Momente) verstanden, die den Bewegungsablauf hemmen (Bewegungsreibung) oder verhindern (Ruhereibung). Im GfT-Arbeitsblatt 7 wird allgemeiner von einer Wechselwirkung zwischen sich berührenden Stoffbereichen von Körpern gesprochen [3]. Als Prozesse sind im Wesentlichen Adhäsions-, Abrasions-, elastisch-plastische Deformations- und Bruchvorgänge wirksam.

2.2.2 Mikroskopische Betrachtung

Die Reibung als Energieumsetzungsprozess (überwiegend in Wärmeenergie) läuft in Oberflächengrenzschichten ab, **Bild 2.3**, in denen sich physikalische und chemische Wechselwirkungen zwischen den Partnern in Form von Oberflächen- und Werkstoffveränderungen ab-

spielen. Die Grenzschichten unterscheiden sich oft grundlegend vom unbeeinflussten Grundwerkstoff. Im Gegensatz zur Volumeneigenschaft des Grundwerkstoffes sind ihre Oberflächeneigenschaften schwierig zu bestimmen, unter Umständen ist dies gar nicht möglich. Jeder Bearbeitungsvorgang und jeder tribologische Vorgang verändert die Grenzschicht und beeinflusst das tribologische Geschehen entscheidend. So weist beispielsweise die durch den Bearbeitungsprozess entstandene Polierschicht eine amorphe Struktur auf.

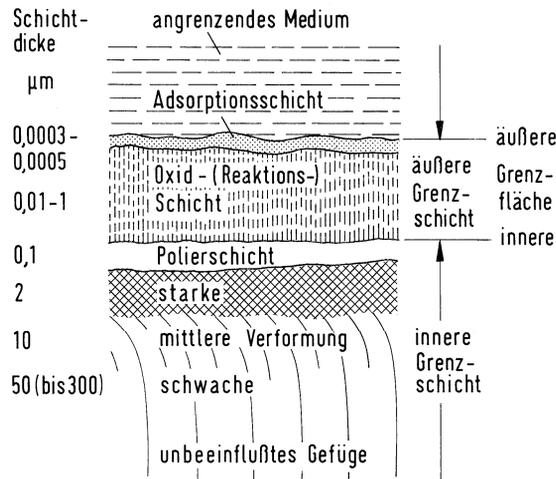


Bild 2.3: Schematischer Aufbau technischer Werkstoffgrenzschichten; die angegebenen Schichtdicken sind Orientierungswerte

Neben den stofflichen Besonderheiten der inneren und äußeren Grenzschichten spielen Oberflächengestalt und Berührungsverhältnisse der sich im Kontakt befindlichen Körper eine wichtige Rolle. Infolge eines hohen Elastizitätsmoduls und hoher Streckgrenze konzentriert sich die Beanspruchung bei metallischen Werkstoffen im allgemeinen auf relativ wenige Kontaktbereiche. Die wahre Kontaktfläche ist im Vergleich zur geometrischen Kontaktfläche selbst bei feinst bearbeiteten Körpern und hohen Lasten klein und beträgt nur Promille bzw. wenige Prozent der „scheinbaren“ Kontaktfläche [4]. Durch die Unterscheidung zwischen wahrer und „scheinbarer“, d. h. geometrischer Kontaktfläche, erfährt das Gesetz von Coulomb (Gl. 2.1) eine Bestätigung, aber auch eine Korrektur. Im ruhenden Kontakt führt das Auftreten von Normalkräften zur elastisch-plastischen Deformation der Mikroerhebungen, wodurch sich die wahre Kontaktfläche so lange vergrößert, bis diese der Belastung gerade stand hält. Bei Normalkrafterhöhung bilden sich bis zu einer Grenzlaster neue Kontaktstellen, ohne dass sich die nominelle Flächenpressung ändert. Konstante Flächenpressung bedeutet in erster Näherung konstante Reibungszustände und damit konstante Reibungszahl f . Damit ist das Coulombsche Gesetz in gewissen Lastbereichen anwendbar. Bei genauer Betrachtung deuten Experimente doch auf eine Abhängigkeit der Reibungskraft von der wahren Kontaktfläche hin. Aufgrund dieses Modells realer Oberflächen wurde die Adhäsionstheorie entwickelt und von [5, 6] zur molekular-mechanischen Theorie erweitert. Durch die Entwicklung des Rasterkraftmikrosko-

pes ist es gelungen, in den atomaren Bereich vorzudringen. Dadurch wurde es möglich, im elastischen Bereich sowohl die reale Kontaktfläche [7] als auch die Reibung [8] zu messen, was wesentlich zum Verständnis der Reibung beigetragen hat. Werden trennende Adsorptions- oder Reaktionsschichten durchbrochen, bilden sich in den Kontaktbereichen Adhäsionsbrücken. Ursache hierfür sind die gleichen Bindungskräfte, wie sie auch für den Zusammenhalt der Atome in Festkörpern verantwortlich sind. Die in Festkörpern herrschenden Bindungstypen hängen von der Elektronenstruktur (metallische, kovalente, Ionen- und van der Waalssche Bindungen) ab, die die Festigkeit der Bindung bestimmt.

Häufig treten diese Bindungen gleichzeitig und in unterschiedlichen Anteilen auf. Sind an der Oberfläche von Festkörpern die Valenzen der Atome z. B. durch Sauerstoff abgesättigt, so werden nur noch die schwachen van der Waalsschen Bindungen wirksam. Während des Reibungsvorganges werden durch die Beanspruchung die Oberflächen deformiert und die Grenzschichten (vgl. Bild 2.3) mehr oder weniger zerstört. Durch die Annäherung der Festkörper bis in atomare Bereiche entstehen Bindungen unterschiedlicher Festigkeit. Diese wird beeinflusst u. a. von der Struktur der Festkörper, von Art und Zustand der äußeren Grenzschicht (adsorbierte Gase, Reaktionsschichten) sowie von Belastung und Bewegung und damit von Anzahl und Größe der Kontaktstellen, die bei Einsetzen der Relativbewegung abgeschert, neu gebildet und wieder abgeschert werden. Die Trennung findet dabei immer in der Ebene geringster Scherfestigkeit statt, d. h. je nach Stärke von Verbindung und Verfestigungsgrad in der ursprünglichen Kontaktzone oder im Werkstoff des weicheren Partners. Die Verlagerung der Trennebene aus der ursprünglichen Kontaktzone führt zur Werkstoffübertragung von einem Partner auf den andern (vgl. Mechanismus der Adhäsion Kap. 2.4.1). Je höher die Adhäsionsbindungen, desto größere Kräfte können übertragen werden und sich auf ein größeres in die Tiefe erstreckendes Volumen beziehen. Neben dieser kraftschlüssigen Verbindung durch Adhäsionsbrücken erfolgt auch eine Kraftübertragung durch Mikroformschluss mit den Oberflächenunebenheiten. Besteht zwischen den Mikroerhebungen aufeinander gleitender Oberflächen ein Härteunterschied, z. B. durch Verfestigung oder ungleiche Ausgangshärte, so wird das weichere Material von dem härteren gefurcht. Dieser Vorgang äußert sich in einer Mikroverformung und Mikrozerspannung (vgl. Mechanismus der Abrasion Kap. 2.4.2). Die Reibung lässt sich als Energieumsetzung definieren, die sich aus einem Adhäsions- und einem Deformationsanteil zusammensetzt. Bei sich zäh verhaltenden Werkstoffen, deren Verformungsvermögen erschöpft und bei spröden Werkstoffen ist auch noch ein Anteil für Bruchvorgänge zu berücksichtigen:

$$W_R = W_{ad} + W_{def} + W_{Bruch} \quad (2.2)$$

Eine quantitative Angabe der einzelnen Anteile ist in der Regel jedoch nicht möglich, da immer von einer Überlagerung und von Änderungen der Anteile während der Beanspruchung auszugehen ist. Für Gleitreibungsprozesse kann aus der Verlustenergie W_R längs des Gleitweges s eine mittlere Reibungskraft F_R

$$W_R = \int F_R \cdot ds \quad (2.3)$$

bestimmt werden.

2.2.3 Reibungsarten

Bei der Reibung zwischen Festkörpern wird grundsätzlich zwischen Ruhereibung (Haftreibung, statische Reibung) und Bewegungsreibung (dynamische Reibung) unterschieden [3]. Haftreibung wirkt zwischen zwei ruhenden Körpern, bei denen die angreifende Kraft oder das angreifende Moment nicht ausreicht, eine Relativbewegung der Festkörper einzuleiten. Die Haftreibung ist im Gegensatz zur Gleitreibung nicht mit einem Energieumsetzungsprozess verbunden und somit entstehen auch keine Verluste. Die bei der Bewegungsreibung zwischen relativ zueinander bewegten Körpern auftretenden Reibungskräfte wirken der Bewegungsrichtung entgegen und versuchen die Bewegung zu hemmen.

Die Bewegungsreibung wird nach kinematischen Gesichtspunkten noch weiter unterteilt in Gleit-, Bohr-, Roll- und Wälzreibung. Gleitreibung entsteht z. B. bei translatorischer Bewegung eines Körpers auf einer Unterlage oder in Gleitlagern. Von Bohrreibung spricht man bei rotatorischer Relativbewegung zwischen Körpern, deren Drehachse senkrecht zur Kontaktfläche steht. Sie ist durch einen Geschwindigkeitsgradienten längs des Radius gekennzeichnet. Rollreibung ist eine Bewegungsreibung zwischen sich quasi punkt- oder linienförmig berührenden Körpern, deren Relativgeschwindigkeit in der gemeinsamen Kontaktstelle im idealisierten Fall gleich null ist. Ist der Rollreibung eine Gleitkomponente überlagert, so spricht man von Wälzreibung. Bei der Ausführung tribologischer Systeme ist die Wälzreibung der Gleitreibung im Bereich der Festkörper- und Grenzreibung und auch der Mischreibung wegen massiver Schädigung der Kontaktfläche durch höhere Energieumsetzung vorzuziehen. Allen Arten der Bewegungsreibung ist gemeinsam, dass sie mit einem Verlust an mechanischer Energie verbunden sind, die in andere Energieformen umgewandelt wird. Der weitaus größte Anteil wird in Wärme umgewandelt, während nur ein kleiner Teil z. B. als Gitterdefekte oder Eigenspannungen gespeichert wird oder als Schallemission verloren geht. Ein weiterer Teil der Reibenergie kann als Verschleiß wirksam werden.

Im Allgemeinen ist die Reibungszahl der Ruhereibung größer als die der Bewegungsreibung. Der Unterschied zwischen diesen Reibungszahlen wird nach neueren Untersuchungen [9] mit der für die Bildung von Adhäsionsverbindungen zur Verfügung stehenden Zeit und mit den während des Reibprozesses entstehenden hochfrequenten mechanischen Schwingungen begründet. Eine längere Adhäsionsbildungszeit erhöht die Adhäsionskräfte, Schwingungsanregungen verringern sie. Die Ruhereibung scheint nach [9] eine Funktion der Zeit zu sein. Eine Zeitabhängigkeit wird auch bei Schrumpfsitzen beobachtet, die erst nach einigen Tagen die volle Haftkraft erreichen, was möglicherweise primär auf die elastisch-plastische Deformation der Mikroerhebungen in der Trennfuge zurückzuführen sein dürfte, die von Relaxationsprozessen abhängt [10].

Eine wirkungsvolle Erhöhung der Haftreibung in reibschlüssigen Verbindungen wie z. B. Welle-Nabe- oder Stirnpress-Verbindungen, bieten direkt beschichtete Fügestellen von Bauteilen oder Ni-beschichtete Stahlfolien, in die feine harte Partikel aus Diamant der Korngröße 6 bis 10 μm eingebettet sind und mit ihren Spitzen überstehen [11, 12]. Die Körner drücken sich in Grund- und Gegenkörper ein und erhöhen damit den Mikroformschluss. Die Haftreibung lässt sich so bis zum 3fachen gegenüber Körpern ohne Beschichtung steigern. Maßgebend für die Höhe der Haftreibung sind neben Flächenpressung Oberflächenrauheit und

Werkstoffhärte, sowie Korngröße und Belegungsdichte der Partikel. Zur Verringerung von Schlupf bei Riemenantrieben werden Beschichtungen mit eingelagerten Partikeln aus SiC oder Si₃N₄ der Korngröße von 2,5 µm eingesetzt [13].

Schon seit langem ist bekannt, dass umgekehrt durch Einleitung von Ultraschall in tribologische Systeme Reibungskräfte verringert werden können. Bei Überlagerung von Schwingungen in Hauptrichtung der Bewegung oder quer dazu werden die Reibungskräfte kleiner. Diese Erkenntnis eröffnet der Umformtechnik ein breites Anwendungsfeld, z. B. beim Rohr- und Drahtzug [14]. Neben der Reibkraftreduktion, die höhere Umformgrade zulässt, wird auch eine Verbesserung der Oberflächengüte erzielt. Dabei ist vor allem das Verhältnis von Ziehgeschwindigkeit und Schwinggeschwindigkeit entscheidend.

Bei Festkörperreibung und unter Mischreibungsbedingungen wird häufig kontinuierliches, ruckfreies Gleiten nicht erreicht, vielmehr stellt sich ein periodisches Schwanken der Reibungskraft ein. Diese als Ruckgleiten oder *stick-slip* [15, 16] bezeichnete Erscheinung ist sehr verbreitet. Sie ist bei zahlreichen Bewegungssystemen insbesondere bei kleinen Geschwindigkeiten zu beobachten und macht sich auch durch Geräuschbildung (Quietschen von Bremsen, Rattern von Werkzeugmaschinen) bemerkbar, vgl. Kap. 4.2.6 Rattermarken. Dieses Verhalten kann durch die Bewegungsgleichung eines Feder-Masse-Dämpfungs-Systems beschrieben werden, mit der sich die beeinflussenden Größen wie Masse, Geschwindigkeit, Federkonstante und Dämpfungsmaß erfassen lassen. Dabei ist das Verhältnis von Haft- und Gleitreibungszahl, das nahe bei 1 liegen soll, von besonderer Bedeutung, wenn Ruckgleiten unterdrückt werden soll.

2.2.4 Reibungszustände

Neben der Einteilung in Reibungsarten, die in dieser Form nur für die Kinematik der Festkörperreibung gilt, wird auch eine Klassifizierung nach dem Aggregat- bzw. dem Kontaktzustand der Reibpartner vorgenommen. Danach wird unterschieden in

- Festkörperreibung
- Trockenreibung
- ungeschmierte Reibung
- Grenzreibung
- Mischreibung
- Flüssigkeitsreibung
- hydrodynamische Reibung
- elasto-hydrodynamische Reibung
- aerodynamische Reibung

Von den aufgeführten Reibungszuständen lassen sich einige anhand der Gleitreibung z. B. für Radialgleitlager im erweiterten Stribeck-Diagramm übersichtlich darstellen, **Bild 2.4**, in dem über $v \cdot \eta / p$ (v = Geschwindigkeit, η = dynamische Ölviskosität, p = Pressung) tendenzmäßig die Dicke h des sich ausbildenden Schmierfilmes und die Reibungszahl f aufgetragen sind. Man unterscheidet Trockenreibung (Bereich I) mit der höchsten Reibungszahl, ungeschmierte

Reibung (Bereich II), Grenzreibung (Bereich III), Mischreibung (Bereich IV), und die hydrodynamische Reibung HD (Bereich V). Das sich bei Radialgleitlagern ausbildende Reibungsminimum befindet sich noch im Mischreibungsgebiet. Erst nach weiterer Drehzahlerhöhung (bei p und $\eta = \text{konst}$) steigt die Reibungszahl wieder an und die Mischreibung geht dann in hydrodynamische Reibung über. Die einzelnen Zustände werden bei den entsprechenden Abschnitten in Kap. 4 behandelt.

Diese Reibungszustände gelten bei Wälzbeanspruchung (vgl. Kap. 6 Wälzverschleiß), bei der der Zustand der hydrodynamischen Reibung mit Elastohydrodynamik bezeichnet wird, vgl. Kap. 6.1 Grundlagen, nur näherungsweise, insbesondere ist in diesem Zustand mit niedrigeren Reibungszahlen zu rechnen.

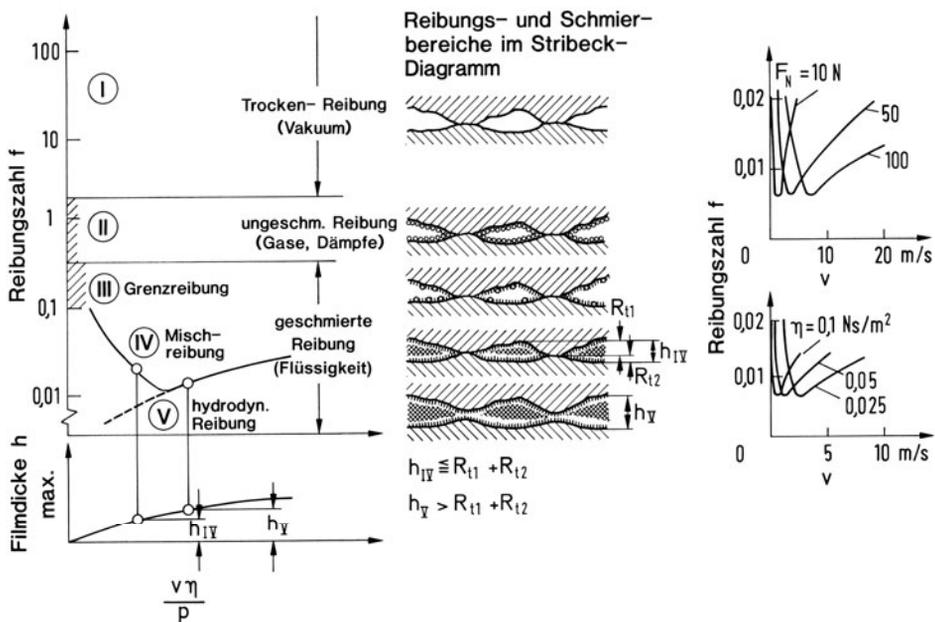


Bild 2.4: Erweitertes Stribeck-Diagramm mit den Reibungszuständen I bis V für Radialgleitlager. Rechte Teilbilder mit den Parametern Belastung F_N und dynamische Ölviskosität η

2.2.5 Reibungszahlen

Die beiden wesentlich die Reibungszahl f verursachenden Anteile – Adhäsions- und Deformationsterm – verdeutlichen, auf welche Weise die Reibungszahl beeinflusst werden kann. Während neben den Beanspruchungsparametern die Grenzschichten das Adhäsionsverhalten steuern, kommt beim Verformungsverhalten insbesondere die Kristallstruktur mit ihrem Gleitsystem (Gleitebene mal Gleitrichtung) im Gitter zum Tragen, die sich auf die Ausbildung der Größe der realen Kontaktfläche und auch auf die Adhäsionsneigung auswirkt, vgl. auch Adhäsion in Kap. 2.4.1.

Hohe Reibungszahlen aufgrund hoher Adhäsionsneigung ergeben sich vor allem bei gleichartigen Paarungen, insbesondere dann, wenn reine Metalloberflächen beim Reibungsprozess vorliegen, z. B. im Vakuum. In der Regel befinden sich jedoch Adsorptions- und/oder Reaktionsschichten auf den Gleitflächen, so dass diese für das Reibungsverhalten maßgebend sind. Bei Reibungsversuchen mit Fe/Fe im Hochvakuum von $1,33 \cdot 10^{-7}$ mbar genügt bereits eine geringe Kontamination mit Sauerstoff, um die hohe Reibungszahl von rd. 4 auf Werte von 0,30 bis 0,60 zu senken, wie sie auch im ungeschmierten Zustand bei Umgebungsatmosphäre bekannt sind, was auf die Bildung von Eisenoxiden zurückgeführt wird [17]. Von Bedeutung bei diesen Prozessen ist auch die Einwirkdauer. Dies zeigt sich bei unterschiedlich hohen Normalkräften. Bei geringen Normalkräften ist die Reibungszahl aufgrund anfänglicher Kontamination zunächst niedrig und steigt erst im Laufe der Beanspruchung bis zu einem konstanten Wert an, wenn in der Reibspur die Kontamination durch den Reibprozess entfernt ist. Bei hohen Normalkräften dagegen werden die Kontaminationsschichten durchgedrückt, so dass die Reibungszahl wegen der anfänglich hohen Adhäsion von einem hohen Wert abfällt und sich bei Fortsetzung der Gleitbewegung auf eine konstante niedrigere Reibungszahl einstellt, wenn sich z. B. Oxide gebildet haben.

Bei der Paarung ferritischer Stähle nimmt die Reibungszahl bei trockener Reibung in der Regel entsprechend dem zunehmenden Verformungsanteil mit abnehmender Härte von Martensit über Perlit zu Ferrit hin zu.

Allgemeingültige Zusammenhänge zwischen Reibungszahl und den zahlreichen Parametern bestehen nicht, so dass man bei der Ermittlung von Reibungszahlen häufig auf Versuche angewiesen ist. Daher kann der in **Tabelle 2.3** beispielhaft wiedergegebene Überblick über experimentell ermittelte Bereiche von Reibungszahlen, die sich über 5 Zehnerpotenzen erstrecken können, bei den verschiedenen Reibungsarten und -zuständen nur als Orientierung dienen. Sie

Tabelle 2.3: Größenordnungen der Gleitreibungszahlen für verschiedene Reibungsarten und -zustände

Reibungsart	Reibungszustand		Zwischenstoff	Reibungszahl f
Gleitreibung	I ¹⁾	Trockenreibung	Vakuum	$\gg 1$ ^{2, 3)}
	II	ungeschmierte Reibung	Gase, Dämpfe	0,1 bis 1 ²⁾ 1,5 bis 2 ³⁾
	III	Grenzreibung (Mangel-schmierung)	geringste Schmierstoff-mengen	0,1 bis 0,3
	IV	Mischreibung	teilweise Schmierstoff	0,01 bis 0,1
	V	hydrodynamische Reibung	Öl	$\leq 0,01$
		aerodynamische Reibung		Gas
Roll- bzw. Wälzreibung	elastohydrodynamische Reibung, Mischreibung		Öl, Fett	0,001 bis 0,005

¹⁾ römische Zahlen vgl. Bild 2.4

²⁾ Metall / Metall

³⁾ Keramik / Keramik

sind Ausdruck dafür, dass die tribologischen Kenngrößen keine Werkstoffkennwerte darstellen, sondern die Reaktion eines komplexen Systems auf von außen aufgeprägte Kräfte und Bewegungen.

2.3 Verschleißarten

In der Technik hat sich eine Gliederung des Verschleißgebietes nach Verschleißarten, die durch die Art der tribologischen Beanspruchung (vor allem durch die Kinematik) und der tribologischen Struktur gekennzeichnet sind, **Tabelle 2.4**, als vorteilhaft erwiesen. Deshalb wird auch die Hauptgliederung der folgenden Kapitel nach den Verschleißarten Gleit-, Schwingungs-, und Wälzverschleiß sowie Abrasivverschleiß und Erosion vorgenommen, die weitere Unterteilung erfolgt nach Verschleißerscheinungsformen.

Die betrachteten Verschleißerscheinungsformen bei Gleit- und Wälzbeanspruchung (unter Hydrodynamik HD, Elastohydrodynamik EHD, Mischreibung, ungeschmierter Reibung) und bei Schwingungsverschleiß (oszillierender Beanspruchung) treten meist bei den klassischen Maschinenelementen auf, also in „geschlossenen“ Systemen.

Zu den Verschleißarten in „offenen“ Systemen zählt der Abrasivverschleiß mit Abrasiv-Gleitverschleiß, Dreikörper-Abrasivverschleiß (gleitend, wälzend, stoßend) sowie die Erosion (Strömungsverschleiß). Die Erosion umfasst den Hydroerosivverschleiß (Hydroabrasivverschleiß), Strahlverschleiß, Kavitationserosion, Tropfenschlagerosion, Flüssigkeitserosion und die Gaserosion. Abrasivverschleiß und Erosion können nicht in allen Fällen scharf getrennt werden. Vor allem bei Erosion mit Beteiligung von Flüssigkeiten und Gasen ist zu berücksichtigen, dass auch Korrosionsprozesse überlagert sein können, die durch die tribologische Beanspruchung induziert werden können, was häufig den Abtrag noch verstärkt.

Details zu den Verschleißarten finden sich jeweils zu Beginn der Grundlagenkapitel.

2.4 Verschleißmechanismen

Mit der tribologischen Beanspruchung sind in der Grenzschicht Energieumsetzungsprozesse verbunden, die zu einem Materialabtrag führen können. Der Kenntnis der dabei wirkenden Verschleißmechanismen kommt bei der Werkstoffauswahl und bei der Beurteilung von Verschleißerscheinungsformen besondere Bedeutung zu. Für die Entstehung von Verschleiß sind im Wesentlichen die Grundmechanismen Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung, tribochemische Reaktion und Ablation verantwortlich, **Bild 2.5**, die nur in seltenen Fällen einzeln auftreten. In der Regel sind diese überlagert wirksam [3], vgl. Tabelle 2.4. Ihre Anteile am Verschleißprozess können sich während der Beanspruchung auch ändern.

Tabelle 2.4: Gliederung des Verschleißgebietes in Anlehnung an GFT-Arbeitsblatt 7

Elemente der Systemstruktur	Tribologische Beanspruchung		Verschleißart	Beispiele	Wirkende Mechanismen			
					● vorherrschend ○ untergeordnet			
					Adhäsion	Abrasion	Oberflächenzer-rüttung	Tribochemische Reaktionen
Grundkörper 1 Zwischenstoff 3 (Flüssigkeit) Gegenkörper 2	Gleiten Roller Wälzen		Gleitverschleiß, Wälzverschleiß	Gleitlager, Wälzlager, Zahnräder, Nockenwellen	○	○	●	○
Grundkörper 1 Zwischenstoff 3 (Verschleißpartikel, Flüssigkeitsreste, Gase oder Vakuum) Gegenkörper 2	Gleiten		Gleitverschleiß	Führungsbahnen, Zylinderbüchsen	●	○	○	●
	Roller Wälzen		Rollverschleiß, Wälzverschleiß	Wälzlager, Zahnräder, Nockenwellen, Rad/Schiene	○	○	●	●
	Oszillieren		Schwingungsverschleiß	Passflächen, Lagersitze	●	●	●	●
	Stoßen		Stoßverschleiß	Ventilnadeln	○	○	●	●
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Festgestein, Stückgut, Schüttgut)	Stoßen		Zweikörper-Abrasiveverschleiß	Prallplatten, Schlagmühlen	○	●	●	○
	Gleiten			Baggerschau-feln, Schurren, Gesteinsbohrer	○	●	○	○
Grundkörper 1 Zwischenstoff 3 (Stückgut, Partikel) Gegenkörper 2	Gleiten		Dreikörper-Abrasiveverschleiß	Verunreinigung in Lagern und Führungen	○	●	●	○
	Wälzen			Wälzmühlen	○	●	●	○
	Stoßen			Backenbrecher	○	●	●	○
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Flüssigkeit mit Partikeln)	Strömen		Hydroerosiv-(hydroabrasiv)verschleiß	Pumpen, Transportleitungen	○	●	●	○
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Gas mit Partikeln)	Strömen		Gleitstrahlverschleiß	pneumatische Förderanlagen	○	●	●	○
	Gleiten Stoßen		Schrägstrahl-, Prallstrahlverschleiß		○	●	●	○
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Flüssigkeit)	Strömen Schwingen		Kavitationserosion	Pumpen, Ventile, Wasserturbinen			●	○
	Stoßen Gleiten		Tropfenschlagerosion	Rotorblätter, Dampfturbinen			●	○
	Strömen		Flüssigkeitserosion	Pumpen, Ventile, Rohrleitungen		○	○	●
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Gas)	Strömen		Gaserosion	Gasturbinen, Hitzeschilde				●

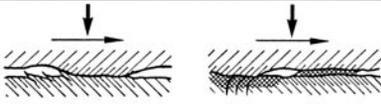
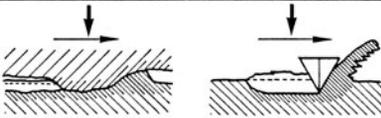
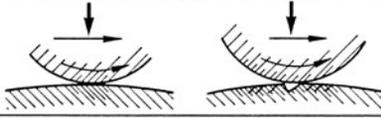
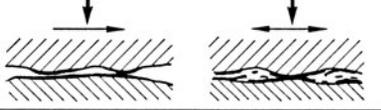
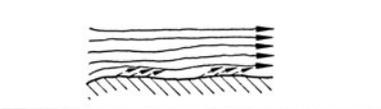
Mechanismus		Kennzeichen	Merkmal
Adhäsion			Vertiefungen, Riefen, Risse, Werkstoffübertrag, Verformung, Gefügeänderung
Abrasion			Riefen, Span, Wall, Mulden, Wellen, Verformung, Gefügeänderung
Oberflächenzerrüttung			Verformung, Risse, Grübchen, Gefügeänderung
Tribos-chemische und/oder tribo-physikalische Reaktionen	Reaktions-schicht-bildung		Schichtbildung, Oxidation
	Ablation		Verdampfen, Ausgasen, Zersetzen

Bild 2.5: Verschleißmechanismen bei tribologischer Beanspruchung

2.4.1 Adhäsion

Technische Oberflächen sind nie ideal glatt, weshalb die Kraftübertragung lokal an einzelnen Kontaktstellen erfolgt. Durch Normal- und Schubbeanspruchungen setzt eine elastisch-plastische Verformung ein, die zur Zerstörung von Adsorptions- und Reaktionsschichten führt. Die metallisch blanken Kontaktbereiche gehen durch atomare Bindungen mehr oder weniger feste Verbindungen ein. Die Bildung derartiger Haftbrücken wird als Adhäsion bezeichnet. Besonders hohe Adhäsion wird im Vakuum wirksam. Die Festigkeit der sich ausbildenden Haftbrücken entscheidet darüber, ob die Trennung in der Bindungsebene oder außerhalb davon im Grundwerkstoff einer der beiden Festkörper erfolgt. Findet die Trennung außerhalb der Bindungsebene statt, so führt dies zu einem Werkstoffübertrag und letztlich zu Verschleiß, insbesondere nach mehrfachen Übergleitungen und der Hin- und Rückübertragung von Werkstoff.

Anhand eines einfachen Modells hat Archard [18] folgenden empirischen Zusammenhang zwischen adhäsivbedingtem volumetrischen Verschleiß W und der Normalkraft F_N , dem Gleitweg s und der Härte H des weicheren Partners hergestellt:

$$W = k_{ad} \cdot \frac{F_N \cdot s}{H} \quad (2.4)$$

Der Faktor k_{ad} steht für die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Verschleißpartikeln und kann sich über mehrere Größenordnungen erstrecken.

Durch lokale Mikroverschweißungen (Fressen) rauhen sich die Oberflächen auf, wobei charakteristische Erscheinungsformen wie Riefen, plastische Verformungen, Scherwaben, Werkstoffübertrag, Schubriss, Gefügewandlungen entstehen. In **Bild 2.6** und **2.7** sind Beispiele adhäsiver Verschleißerscheinungsformen wiedergegeben.

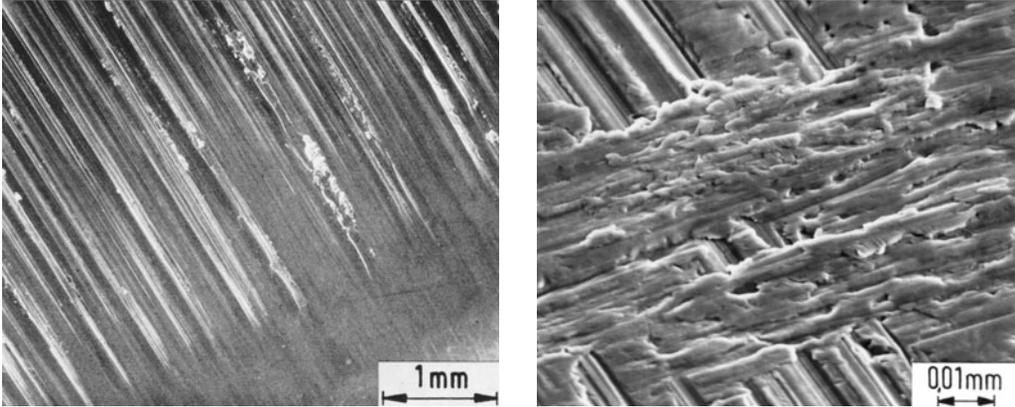


Bild 2.6: Adhäsiv bedingte Riefen im Fußbereich einer Zahnflanke aus 20MnCr5 unter Verwendung des Schmierstoffes FVA-3HL + 4,5 % Anglamol 99 bei Mischreibung (links) und Werkstoffübertragung auf einem gehärteten Schlagbolzen eines Presslufthammers bei Mangel-schmierung (rechts)

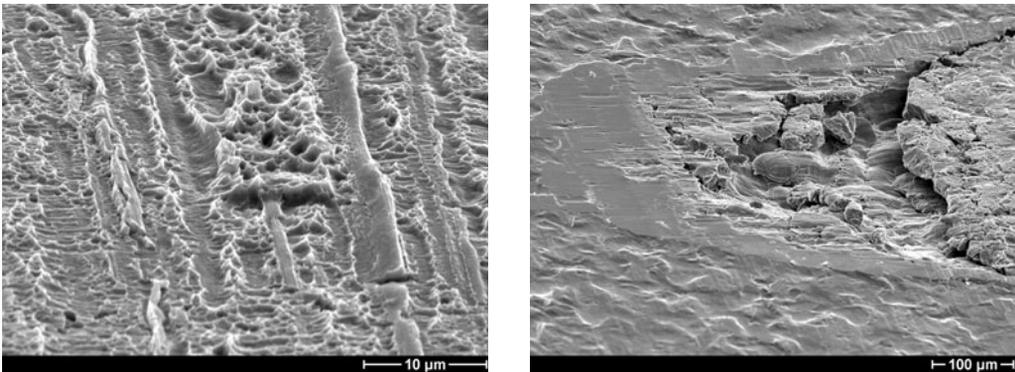


Bild 2.7: Verformungswaben auf Neusilber Cu62Ni18Zn20 (links) und Schubriss auf ZStE 300 (rechts) im Hertzschen Linienkontakt bei Ultraschallanregung einer gehärteten Scheibe aus 100Cr6 gegen eine ruhenden Flachprobe; Beanspruchungsbedingungen: Ultraschallfrequenz 20 kHz, $p = 220 \text{ N/mm}^2$, Amplitude $\pm 10 \mu\text{m}$, Dauer des Ultraschallsignals 50 ms entsprechend 1000 Schwingungen, Schmierstoff unlegiertes Ziehöl der kinematischen Viskosität $\nu = 300 \text{ mm}^2/\text{s}$

Die Adhäsion lässt sich durch den Aufbau eines trennenden Schmierfilms oder durch die Bildung von Reaktionsschichten aus der auf beide Festkörper abgestimmten Schmierstoffadditivierung verringern. Auch durch Kombination von Werkstoffen unterschiedlicher Struktur wie Metall/Kunststoff, Kunststoff/Kunststoff, Keramik/Kunststoff und Keramik/Keramik lässt sich dies erreichen [19]. Des weiteren verhalten sich heterogene Gefüge günstig, z. B. carbidreiche Werkstoffe, weil beim Zusammentreffen der Carbide beider Partner nur eine geringe Neigung zum Mikroverschweißen besteht. Wie bereits in Kap. 2.2.5 erwähnt, soll noch auf die Abhängigkeit der Adhäsion von der Gitterstruktur hingewiesen werden. Nach [20] haben gleiche Paarungen aus kfz Metallen (z. B. Al, Au, Ag, Cu, Pt, Ni) eine deutlich höhere Adhäsionsneigung als solche aus krz Metallen (z. B. Fe, Ta, Mo, W) und hexagonalen Metallen (z. B. Mg, Zn, Cd, Co, Be). Dies ist darauf zurückzuführen, dass kfz Metalle innerhalb ihres Gitters mehr Gleitmöglichkeiten besitzen als die krz und hexagonalen Metalle.

2.4.2 Abrasion

Vom Mechanismus der Abrasion spricht man, wenn Rauheitsspitzen harter Festkörper, harte Abrasivstoffe oder auch abgetrennte verfestigte Verschleißpartikel unter Last in weichere Festkörper eindringen und über deren Oberflächen gleiten. Bei duktilen Werkstoffen laufen dabei Mikroverformungs- und Mikrozerspanungsprozesse ab, die bei Anwesenheit spröder Phasen von einem Mikrobrechen begleitet sein können. Ein mehrfaches Übergleiten bereits verformter Zonen führt zusätzlich zu einem Ermüdungsprozess infolge der Erschöpfung des Verformungsvermögens. Bei spröden Werkstoffen treten die Mikroprozesse Verformen und Zerspanen in den Hintergrund, weshalb weitgehend Mikrobrechen stattfindet. Rabinowicz [5] hat für das Verschleißvolumen W bei reinem Zerspanen ein ähnliches Modell entwickelt wie Archard [18] für die Adhäsion:

$$W = k_{ab} \cdot \frac{F_N \cdot s}{H} \quad (2.5)$$

Der Faktor k_{ab} steht für die Geometrie des Abrasivkorns, das für den Querschnitt der Riefe verantwortlich ist, und für die Wahrscheinlichkeit der Partikelbildung. Die anderen Größen sind identisch mit Gleichung (2.4). Ein feineres Modell nach Zum Gahr [21] berücksichtigt neben dem Zerspanungsanteil auch noch den Verformungsanteil durch die Beziehung

$$f_{ab} = \frac{A_V - (A_1 + A_2)}{A_V} \quad (2.6)$$

Die in Gleichung (2.6) enthaltenen Flächenanteile, **Bild 2.8**, werden durch mikroskopische Auswertung von Einzelritzversuchen bestimmt. Für $f_{ab} = 0$ liegt reines Verformen vor und für $f_{ab} = 1$ reines Zerspanen.

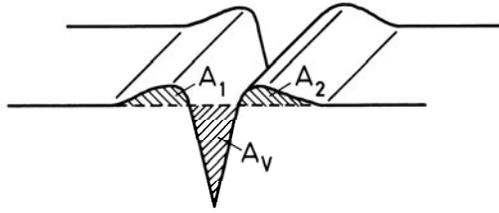


Bild 2.8: Flächenanteile bei den Teilprozessen Mikroverformen und -zerspanen [21]

Das Verschleißvolumen für duktile Werkstoffe ergibt sich dann zu

$$W = f_{ab} \cdot A_V \cdot s \quad (2.7)$$

Die Höhe des Verschleißbetrags durch harte Abrasivstoffe hängt vom Tribosystem ab, da dieses die Kinematik des Kornes und damit seinen Gleitweg bestimmt. Entscheidend dabei ist, ob die Abrasivstoffe als Gegenkörper (in gebundener oder loser Form) oder als Zwischenstoff fungieren. Gebundene Körner führen bei Tangentialbeanspruchung im Vergleich zu den anderen Systemen den längsten Gleitweg aus. Liegt dagegen der Abrasivstoff als loses Korn oder als Zwischenstoff vor, können die Körner auch Rollbewegungen ausführen, wodurch die Gleitwege bis auf reine Druckprozesse reduziert werden. Die Verschleißbeträge fallen dann deutlich geringer aus, da eine Mikrozerspanung unterbleibt und der Abtrag überwiegend durch Ermüdungsprozesse ähnlich wie bei Läppvorgängen bestimmt wird, vgl. Bild 7.30. Entsprechend dem Tribosystem fällt das Erscheinungsbild der Oberflächen aus, das vor allem durch Riefen, Druckstellen, verformte Zonen in Form von aufgeworfenen Wällen, Ausbrüchen und eingebetteten Bruchstücken von Abrasivstoffen sowie Verschleißpartikeln gekennzeichnet ist. Ein Beispiel für Riefen an einer Pressmatrize aus X155 CrVMo12-1 durch die Pressmasse SiC geht aus **Bild 2.9** hervor.

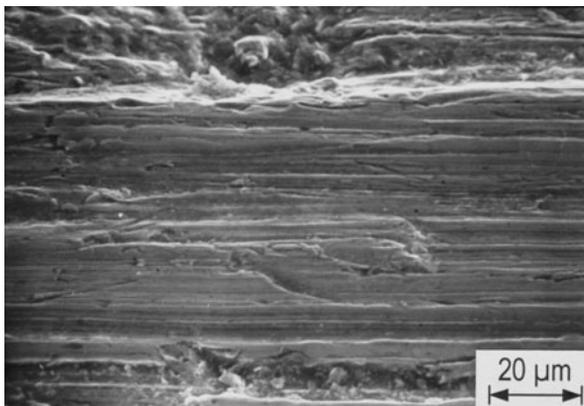


Bild 2.9: Abrasiv bedingte Riefen an einer Pressmatrize aus X155CrVMo12-1 (665 HV 10), hervorgerufen durch die Pressmasse SiC (2700 HV) bei einem Pressdruck von 90 N/mm²