

Horst Czichos | Karl-Heinz Habig

Tribologie-Handbuch

Horst Czichos | Karl-Heinz Habig

Tribologie- Handbuch

Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 561 Abbildungen und 123 Tabellen

Unter Mitarbeit von

Jean-Pierre Celis, Alfons Fischer, Klaus Gerschwiler, Thomas Gradt,
Erich Kleinlein, Fritz Klocke, Gunter Knoll, Eckard Schopf,
Frank Talke, Eckart Uhlmann, Ward O. Winer und Mathias Woydt

STUDIUM



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.

1. Auflage 1992
2. Auflage 2003
- 3., überarbeitete und erweiterte 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

Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0017-6

Vorwort

Nachdem die zweite Auflage des Tribologie-Handbuches, die von unseren Fachkollegen Erich Santner und Mathias Woydt unter Mitwirkung von Erich Kleinlein, Fritz Klocke, Gunter Knoll, Eckard Schopf und Frank E. Talke bearbeitet wurde, zwischenzeitlich vergriffen war und nachgedruckt werden musste, hielt der Verlag eine dritte Auflage für sehr wünschenswert.

Das Arbeitsgebiet der Tribologie hat sich in den letzten Jahren durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse, messtechnische Instrumentarien und Anwendungen der Mikrosystemtechnik und Mechatronik erheblich erweitert. Die dritte Auflage des Tribologie-Handbuches behandelt dementsprechend die Makrotribologie, die Mikrotribologie und die Nanotribologie. Für neue Beiträge zum Tribologie-Handbuch danken wir folgenden Kollegen:

- *Tribokorrosion bei Gleitbeanspruchung*, Kap. 7.4, Jean-Pierre Celis, KU Leuven
- *Messtechnik der Mikro- und Nanoskala*, Kap. 8.4, Heinz Sturm, BAM Berlin
- *Tribomaterialien für MEMS*, Kap. 13.5, Jean-Pierre Celis, KU Leuven
- *Tribologie in der Produktionstechnik*, Kap. 14, Eckart Uhlmann, TU Berlin
- *Vakuumtribologie*, Kap. 16, Thomas Gradt, BAM Berlin
- *Tieftemperaturtribologie*, Kap. 17, Thomas Gradt, BAM Berlin
- *Hochtemperaturtribologie*, Kap. 18, Mathias Woydt, BAM Berlin

Das für Entwicklung, Konstruktion und Instandhaltung tribologischer Systeme wichtige Kapitel *Tribotechnische Werkstoffe* hat Alfons Fischer, Universität Duisburg-Essen, überarbeitet und erweitert.

Für ihren internationalen Beitrag *Machinery Diagnostics* (Kapitel 22) sind wir unseren Kollegen Ward O. Winer und Robert Cowan vom Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA dankbar. Wir danken Frau Treige-Wegener vom Deutschen Institut für Normung, DIN, für die sorgfältige Aktualisierung des Anhangs *Normen auf dem Gebiet der Tribologie*.

Ebenso herzlich gilt unserer Dank Herrn Thomas Zipsner, Frau Ellen-Susanne Klabunde und dem Lektorat Maschinenbau des Vieweg+Teubner Verlages für die wiederum ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Die Aktualisierung und interdisziplinäre Erweiterung unter Mitarbeit von Experten der BAM und Fachkollegen aus dem In- und Ausland macht das Tribologie-Handbuch auch weiterhin zu einem aktuellen Nachschlagewerk und zuverlässigen Ratgeber für Wissenschaftler und Ingenieure, die sich in den verschiedenen Bereichen der Technik mit Fragestellungen zur Reibung und zu Verschleißproblemen beschäftigen und technische Systeme optimieren müssen: Konstrukteure, Maschinenbauer, Werkstoff- und Verfahrenstechniker, Ingenieure der Produktionstechnik, der Betriebstechnik und Instandhaltung sowie Physiker, Chemiker und Studierende dieser Fachrichtungen.

Vorwort der 1. Auflage

Eine wesentliche Aufgabe der Technik – von der Feinwerktechnik, dem Maschinenbau und der Produktionstechnik bis hin zu modernen Transport-, Roboter- und Datenverarbeitungstechnologien – besteht darin, Kräfte, Energien und Informationen zu übertragen sowie Bewegungen zu ermöglichen oder zu verhindern. Die von Leonardo da Vinci, Amontons und Coulomb beobachteten Reibungsregeln haben sich zu dem interdisziplinären Fachgebiet der Tribologie entwickelt, das sich in systematischer Weise mit den Problemen von Reibung, Verschleiß und Schmierung beschäftigt.

In diesem Tribologie-Handbuch werden zunächst die systematischen Grundlagen von Reibung und Verschleiß, einschließlich der charakteristischen Merkmale tribologischer Beanspruchungen, dargestellt. Es folgen Kapitel über die Methoden der Reibungs- und Verschleißprüfung, die Grundlagen der Schmierung und die wesentlichen Schmierstoffklassen. Ein Schwerpunkt des Buches betrifft das Reibungs- und Verschleißverhalten der wichtigsten metallischen, keramischen und polymeren Werkstoffe unter Einbeziehung von Oberflächenschutzschichten. In anwendungsorientierter Darstellung werden außerdem tribotechnische Bauteile des Maschinenbaus und Werkzeuge der Fertigungstechnik behandelt. Ein umfangreicher Anhang enthält Verschleißerscheinungsbilder tribologisch beanspruchter Werkstoffe, Reibungs- und Verschleißdaten von Gleitpaarungen sowie Normen der Tribologie.

Das vorliegende Werk ist das Ergebnis einer 25jährigen Zusammenarbeit der Autoren auf diesem Gebiet. In das Buch wurden neben den internationalen Stand der Kenntnisse besonders die Ergebnisse tribologischer Forschungsarbeiten in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) einbezogen. Unser herzlicher Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen der BAM, die mit ihrer Arbeit zu diesem Werk beigetragen haben.

Das Tribologie-Handbuch wendet sich an Maschinenbauer, Werkstoff- und Verfahrenstechniker, Physiker, Chemiker sowie andere Wissenschaftler und Ingenieure, die in den verschiedenen Bereichen der Technik Reibung und Verschleißprobleme zu bearbeiten haben. Daneben soll es Studenten helfen, sich in das komplexe Gebiet der Tribologie einzuarbeiten.

Berlin, August 1992

Horst Czichos und Karl-Heinz Habig

Inhaltsverzeichnis

1 Technik und Tribologie	1
1.1 Dimensionen der Technik	1
1.2 Definition der Tribologie	2
1.3 Aufgaben und Bedeutung der Tribologie	4
2 Tribologische Systeme	8
2.1 Einführung in die systemtechnische Methodik	8
2.2 Funktion und Struktur tribologischer Systeme	9
2.3 Dimensionsbereiche tribologischer Systeme und Prozesse	12
2.3.1 Nanotribologie	13
2.3.2 Mikrotribologie	14
2.3.3 Makrotribologie	15
2.4 Methodik zur Reibungs- und Verschleißanalyse	18
3 Tribologische Beanspruchung	19
3.1 Technische Oberflächen	19
3.1.1 Aufbau technischer Oberflächen	19
3.1.2 Mikrogeometrie technischer Oberflächen	22
3.2 Kontaktvorgänge	28
3.2.1 Adhäsion	29
3.2.2 Kontaktgeometrie und Kontaktmechanik	35
3.2.3 Werkstoffanstrengung	46
3.3 Mikro/Nano-Kontakte	53
3.4 Kinematik	59
3.4.1 Bewegungsarten und Bewegungsablauf	59
3.4.2 Grenzflächendynamik	62
3.4.3 Kontakt-Eingriffsverhältnis	65
3.5 Thermische Vorgänge	67
3.5.1 Temperaturen in Tribokontakten	68
3.5.2 Blitztemperaturhypothesen	72
3.5.3 Modellrechnungen von Reibtemperaturen	75
4 Reibung	81
4.1 Grundlagen und Übersicht	81
4.2 Reibungsmessgrößen	82
4.3 Reibungsmechanismen	84
4.3.1 Adhäsion	86
4.3.2 Deformation	92
4.3.3 Furchung	94
4.3.4 Energiedissipation	95
4.4 Reibungsarten	99
4.4.1 Gleitreibung	100
4.4.2 Rollreibung	102
4.4.3 Stick-slip-Vorgänge	105
4.5 Reibung und Wirkungsgrad	108

5 Verschleiß	113
5.1 Grundlagen und Übersicht	113
5.2 Verschleißmessgrößen	115
5.3 Verschleißmechanismen	117
5.3.1 Oberflächenzerrüttung	119
5.3.2 Abrasion	122
5.3.3 Adhäsion	125
5.3.4 Tribochemische Reaktionen	127
5.3.5 Materialdissipation	129
5.4 Verschleißarten	130
5.4.1 Gleitverschleiß	131
5.4.2 Wälzverschleiß	134
5.4.3 Stoßverschleiß	135
5.4.4 Schwingungverschleiß	137
5.4.5 Furchungverschleiß	140
5.4.6 Strahlverschleiß	144
5.4.7 Erosion	146
5.5 Verschleiß und Zuverlässigkeit	150
5.6 Maßnahmen zur Verschleißminderung	161
6 Schmierung	163
6.1 Hydrodynamische Schmierungstheorie	164
6.2 Elastohydrodynamische Schmierung	168
6.2.1 Elastohydrodynamik Hertzscher Kontakte	168
6.2.2 Elastohydrodynamische Gleitlagerung	170
6.3 Grenzreibung	174
7 Tribokorrosion	182
7.1 Einfluss des Umgebungsmediums auf tribologische Systeme	182
7.2 Definition und Mechanismen der Korrosion	183
7.3 Korrosionsarten	184
7.4 Tribokorrosion bei Gleitbeanspruchung	186
7.5 Erosionskorrosion	190
8 Tribologische Mess- und Prüftechnik	193
8.1 Aufgaben und Kategorien der tribologischen Prüftechnik	193
8.2 Planung und Auswertung tribologischer Prüfungen	195
8.2.1 Versuchsplanung	196
8.2.2 Versuchsauswertung	199
8.3 Tribologische Laborprüftechnik	203
8.3.1 Prüfsysteme und Prüfmethodik	203
8.3.2 Charakterisierung tribologisch beanspruchter Oberflächen	209
8.3.3 Mechanismenorientierte Prüftechnik	214
8.3.4 Tribologische Ringversuche	218
8.4 Messtechnik der Mikro- und Nanoskala	222
8.4.1 Surface Force Apparatus (SFA)	223
8.4.2 Raster-Tunnel-Mikroskopie	224
8.4.3 Techniken im Rasterkraftmikroskop (SFM, AFM)	226
8.5 Tribologische Simulationsprüftechnik	236
8.5.1 Fallstudie Motortechnik: Tribosystem Kolbenring/Zylinderlaufbahn	239
8.6 Tribologische Betriebsprüftechnik	241

8.7	Ergebnisdarstellung tribologischer Prüfungen	245
8.7.1	Zeitabhängigkeit von Reibung und Verschleiß	245
8.7.2	Abhängigkeiten von Beanspruchungskollektiv und Systemstruktur	248
8.7.3	Tribologische Grenzbeanspruchungs-Diagramme	248
8.7.4	Tribomaps	250
9	Tribotechnische Werkstoffe	253
9.1	Tribotechnische Werkstoffe im Maschinen- und Anlagenbau	256
9.2	Stähle	259
9.3	Eisen-Kohlenstoff-Gusswerkstoffe	389
9.4	Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffe	306
9.5	Nickel- und Kobaltlegierungen	312
9.6	Kupferlegierungen	319
9.7	Aluminiumlegierungen	328
9.8	Titanlegierungen	340
9.9	Hartmetalle	343
9.10	Ingenieurkeramische Werkstoffe	357
9.11	Oberflächenschutzschichten	379
9.12	Polymere Werkstoffe	405
10	Schmierstoffe	422
10.1	Schmieröle	422
10.2	Schmierfette	429
10.3	Festschmierstoffe	431
11	Tribologie von Konstruktionselementen	440
11.1	Lager	441
11.1.1	Gleitlager	443
11.1.2	Wälzlager	464
11.2	Zahnradpaarungen	478
11.3	Axiale Gleitringdichtungen	489
11.4	Kolbenring/Zylinderlaufbahn	497
11.5	Nocken/Nockenfolger	504
12	Mikromechanische Systeme – Magnetische Datenaufzeichnung	510
12.1	Prinzipien der magnetischen Datenspeicherung	510
12.2	Tribologie des Kopf-Band-Interfaces	512
12.3	Tribologie des Kopf-Platten-Interfaces	515
13	Mikrotechnik und die Tribologie von MEMS	524
13.1	Funktion und Struktur von MEMS und MOEMS	524
13.2	Herstellungstechnologien für MEMS	525
13.3	Funktionalität und Skalierung von MEMS	527
13.3.1	Mikrosensoren	528
13.3.2	Mikroaktoren	529
13.4	Tribologie von MEMS	530
13.5	Tribomaterialien für MEMS	535
13.6	Zuverlässigkeit von MEMS	540
14	Tribologie in der Produktionstechnik	543
14.1	Tribologische Systeme in Werkzeugmaschinen	544
14.1.1	Das Tribosystem der Fertigung	545

14.1.2	Tribologische Bewegungssysteme in Werkzeugmaschinen	545
14.2	Führungen und Lagerungen in Werkzeugmaschinen	547
14.3	Optimierung tribotechnischer Werkzeugmaschinenelemente	551
14.4	Tribologie der Zerspanungstechnik	553
14.4.1	Technologien zur Verschleißminderung an Werkzeugen	553
14.4.2	Hartstoffschichten für Zerspanwerkzeuge	554
14.5	Triboinduzierte Innovationen in der Produktionstechnik	558
14.6	Verfügbarkeit von Produktionsanlagen und Instandhaltung	563
15	Tribologie von Werkzeugen	565
15.1	Zerspanwerkzeuge	565
15.2	Umformwerkzeuge	575
16	Vakuumtribologie	586
16.1	Tribosysteme in Vakuumumgebung	586
16.2	Bedingungen und Erfordernisse der Vakuumumgebung	587
16.3	Apparaturen für tribologische Untersuchungen im Vakuum	590
16.4	Werkstoffe für Tribosysteme im Vakuum	592
16.4.1	Beschichtungen, Festschmierstoffe	593
16.4.2	Flüssige Schmierstoffe, Fette	596
16.4.3	Polymere und Polymer-Komposite	596
17	Tieftemperaturtribologie	599
17.1	Tribosysteme in der Kryotechnik	599
17.2	Tribologische Prüftechnik für Temperaturen unterhalb 120 K	600
17.3	Werkstoffe für Tribosysteme bei tiefen Temperaturen	603
17.3.1	Metallische Werkstoffe	603
17.3.2	Polymere und Polymer-Komposite	605
17.3.3	Festschmierstoffe	608
18	Hochtemperaturtribologie	611
18.1	Tribosysteme in der Hochtemperaturtechnik	611
18.2	Tribologische Prüftechnik für Temperaturen oberhalb 400 °C	614
18.3	Werkstoffe für Tribosysteme bei hohen Temperaturen	615
18.3.1	Metallische Werkstoffe	615
18.3.2	Ingenieurkeramiken	616
18.3.3	Hartmetalle	618
18.3.5	Triboaktive Werkstoffe	621
19	Methodik zur Bearbeitung von Reibungs- und Verschleißproblemen	624
19.1	Tribotechnische Werkstoffauswahl	624
19.1.1	Systemmethodik zur Werkstoffauswahl	624
19.1.2	Fallstudie: wartungsfreies Feinwerktechnik-Gleitlager	627
19.2	Tribotechnische Schadensanalyse	631
19.2.1	Fallstudie: Schaden an einem Kompressor-Dichtungssystem	632
19.2.2	Methodik der Schadensanalyse	634
20	Atlas von Verschleißerscheinungsbildern	636
21	Reibungs- und Verschleißdaten	658
21.1	Methodische Grundlagen	658
21.2	Tribologische Datenbank für Reibungs- und Verschleißdaten	661

22 Machinery Diagnostics	664
22.1 Failure Prevention Strategies	664
22.1.1 Root-Cause Analysis	665
22.1.2 Statistical Control	665
22.1.3 Reliability Engineering	666
22.1.4 Asset Maintenance	668
22.1.5 Knowledge-Based Systems	670
22.2 Condition Monitoring	671
22.2.1 Vibration Monitoring	673
22.2.2 Oil Monitoring	675
22.2.3 Corrosion Monitoring	678
22.2.4 Thermal Monitoring	679
22.2.5 Electrical Signature Analysis	680
22.3 Nondestructive Evaluation	681
22.3.1 Visual Inspection	681
22.3.2 Liquid Penetrant and Magnetic Particle Inspection	681
22.3.3 Eddy Current Inspection	682
22.3.4 Radiography	682
22.3.5 Acoustic Emission and Ultrasonic Detection Inspection	683
22.4 Tribo-system Applications	684
22.4.1 Bearings	684
22.4.2 Gears	687
22.4.3 Seals	688
22.4.4 Lubricants	688
22.4.5 Hydraulic Systems	690
Anhang Normen auf dem Gebiet der Tribologie	692
Literaturverzeichnis	703
Sachwortverzeichnis	747

1 Technik und Tribologie

Die Tribologie ist eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft, die für zahlreiche Bereiche der Technik von Bedeutung ist. Nach einer Übersicht über die Dimensionen der heutigen Technik werden die Aufgaben der Tribologie in Wissenschaft, Technik und Wirtschaft dargestellt.

1.1 Dimensionen der Technik

Die Dimensionen der heutigen Technik umfassen mehr als zehn Größenordnungen und sind in exemplarischer Form in **Bild 1.1** illustriert. Die Übersicht zeigt, dass – ausgehend vom klassischen Urmeter – das Größenverhältnis Meter/Nanometer vergleichbar ist mit dem Größenverhältnis des Erddurchmessers zum Durchmesser einer Haselnuss.

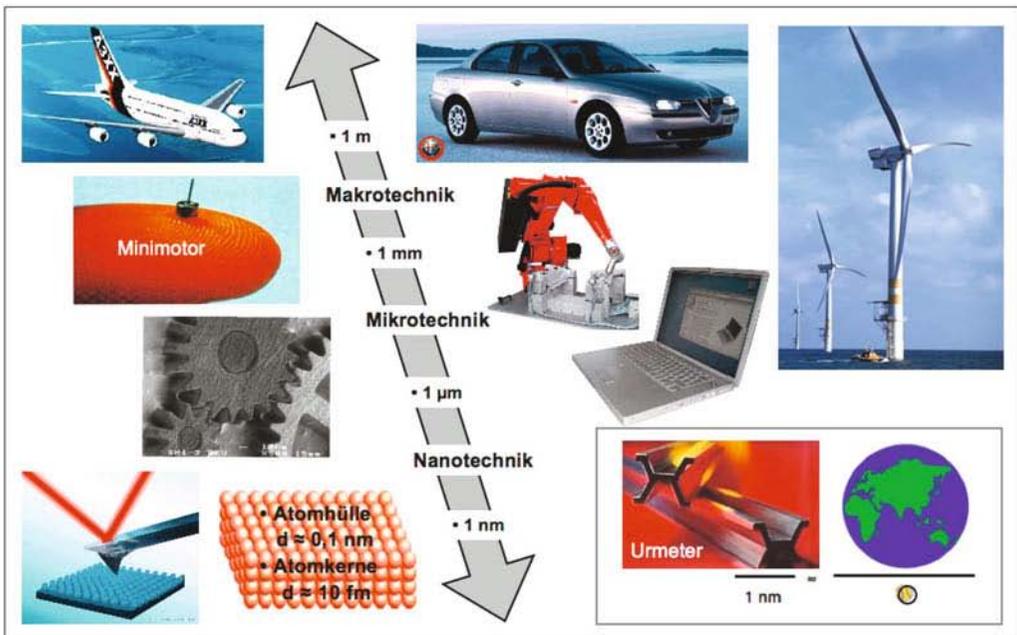


Bild 1.1 Dimensionen der heutigen Technik: Makrotechnik, Mikrotechnik, Nanotechnik

Makrotechnik ist die Technik der Maschinen, Apparate, Geräte und technischen Anlagen.

Mikrotechnik mit $\text{mm}/\mu\text{m}$ -Bauteilabmessungen ist das Gebiet der Feinwerktechnik und Mikrosystemtechnik. Ein Mikrosystem vereint mit Mikro-Fertigungstechnik und miniaturisierter Aufbau- und Verbindungstechnik Funktionalitäten aus Mikromechanik, Mikrofluidik, Mikrooptik, Mikromagnetik, Mikroelektronik.

Nanotechnik, begründet durch Richard P. Feynman, Physik-Nobelpreisträger 1965, nutzt nanoskalige Effekte der Physik und Materialwissenschaft. Ein Beispiel der nanotechnischen Gerätetechnik ist das mit seinem Prinzip in Bild 1.1 unten links illustrierte Rasterkraftmikros-

kop. Das Rasterkraftmikroskop ermöglicht durch mechatronische Piezo-Aktorik die Darstellung von Materialoberflächen im atomaren Maßstab und die Bestimmung kleinster Kräfte.

Die Aufgabenfelder der Technik lassen sich durch den *Produktionszyklus* illustrieren, siehe **Bild 1.2**. Er kennzeichnet als *Materialkreislauf* die für den Weg der Rohstoffe und Werkstoffe zu Produkten und technischen Systemen erforderlichen Technologien:

- Rohstoff/Werkstoff-Technologien zur Erzeugung von Werkstoffen und Halbzeugen,
- Konstruktionsmethoden und Fertigungstechnologien für Entwicklung, Design und Produktion von Bauteilen und technischen Systemen,
- Betriebs-, Wartungs- und Reparaturtechnologien zur Gewährleistung von Funktionalität, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit einschließlich Qualitätsmanagement,
- Recycling (notfalls Deponierung) zur ökologischen Schließung des Stoffkreislaufs.

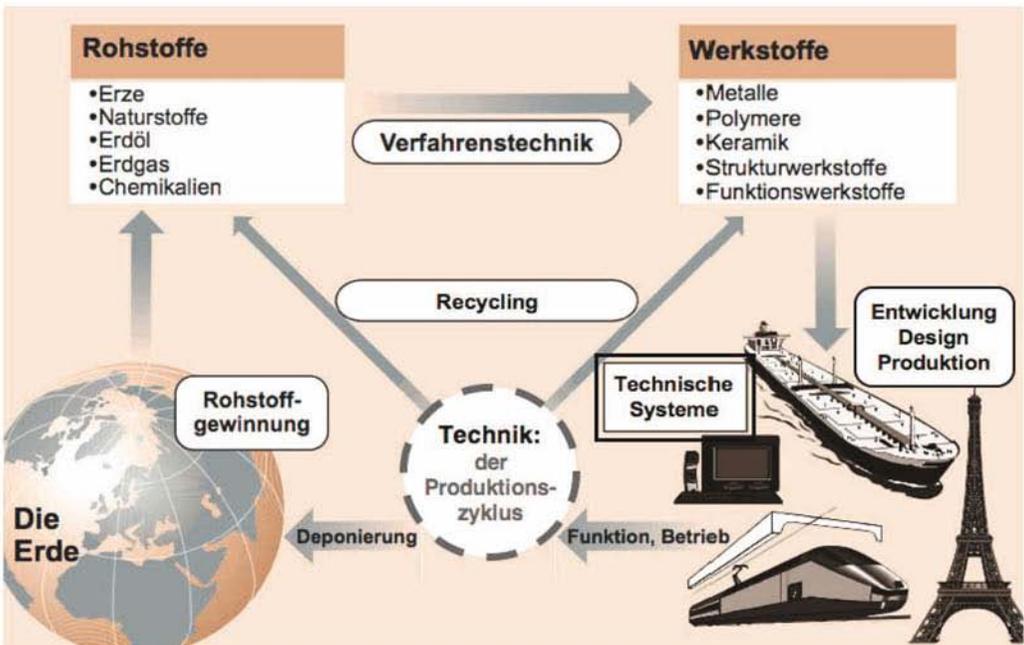


Bild 1.2 Technologien für die Produktion technischer Erzeugnisse: der Produktionszyklus

In ökonomischer Hinsicht ist der Produktionskreislauf – der von den erforderlichen Produktionsfaktoren sowie Energie-, Informations- und Kapitalflüssen begleitet sein muss – als wirtschaftliche *Wertschöpfungskette* zu betrachten (HÜTTE Das Ingenieurwissen, 2008).

1.2 Definition der Tribologie

Obwohl die heutige Technik sich in ihren Produkten und in ihren Dimensionen deutlich von der Technik früherer Zeiten unterscheidet, wurden ihre elementaren Begriffe bereits durch Aristoteles in seiner *Physica* geprägt. **Bild 1.3** gibt dazu eine kurze Übersicht. Der für dieses Buch zentrale Begriff Tribologie (griechisch *tribein*: reiben) bedeutet wörtlich Reibungslehre.

Technik: Gesamtheit der Verfahren und Produkte, die durch Nutzung von Naturgesetzen und Stoffen geschaffen werden; Technikwissen wird als *Technologie* bezeichnet.

– **Grundbegriffe** (Physica, Aristoteles, * 384 v. Chr.):
 Durch *techné* (Kunst, Technik) geschaffene Objekte werden gekennzeichnet durch:
 • *Raum* • *Zeit* • *Bewegung* (*Veränderung*)
 • *Vier-Kategorien-Schema des Ursächlichen*

Raum	Bewegung	Zeit
Bewirkendes	Objekt Stoff Form	Zweck

Kategorie	Erläuterung	Beispiel: Rad
Stoff (causa materialis)	Material eines Objekts	Holz, Eisen
Form (causa formalis)	Gestalt eines Objekts	Ring/Speichen-Struktur
Bewirkendes (causa efficiens)	Anlass einer Veränderung	Muskelkraft
Zweck (causa finalis)	Ziel, Nutzen des Objekts	Transport

Bild 1.3 Grundbegriffe der Technik nach Aristoteles

Die Erforschung der Reibung beginnt mit Leonardo da Vinci und Coulomb, siehe **Bild 1.4**.

Reibungsuntersuchungen von Leonardo da Vinci: *Der Reibungswiderstand fester Körper verändert sich entsprechend der Beschaffenheit der sich berührenden Flächen. Er ist abhängig von der Glätte der Flächen, jedoch unabhängig von der Größe der berührenden Flächen und nimmt proportional zur Last zu. Die Reibung kann durch zwischengeschobene Rollen oder Schmiermittel verringert werden* (Leonardo da Vinci, Codex Madrid I, 1492).

Reibungsexperimente von Coulomb:

Zur Bewegung eines festen Körpers ist die Überwindung einer Reibungskraft F_R erforderlich. Die Reibungskraft F_R kann experimentell durch eine gleich große Gewichtskraft G bestimmt werden $\Rightarrow |F_R| = |G|$. Die Reibungskraft ist von der Größe der Kontaktfläche unabhängig und der Belastungs-Normalkraft proportional: $F_R = f \cdot F_N$; f wird als Reibungszahl bezeichnet (Coulomb, 1785).

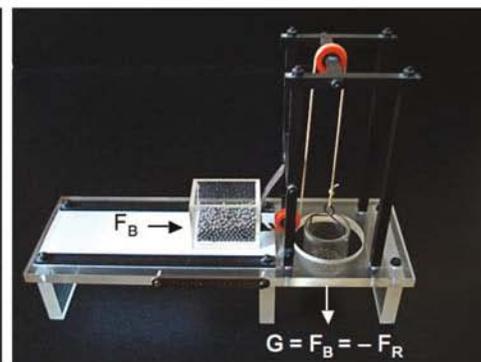
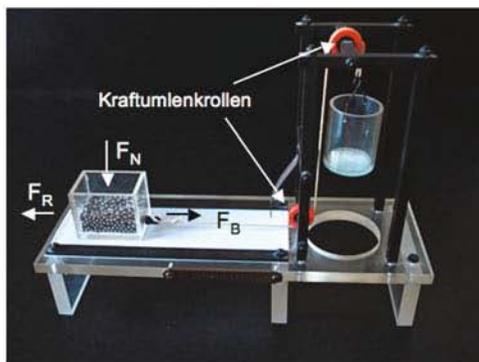
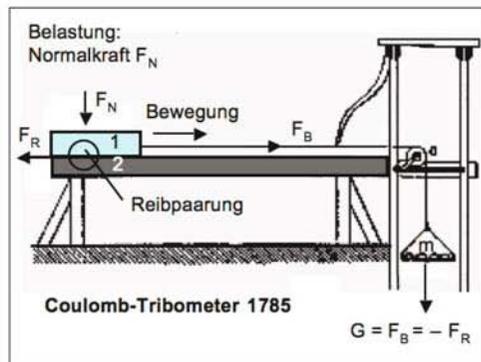


Bild 1.4 Coulomb-Tribometer zur experimentellen Bestimmung der Reibung und Modell-Nachbau (M. Gienau, Labor für Tribometrie und Tribophysik, BAM Berlin, 1987)

Das heutige Wissenschafts- und Technikgebiet Tribologie wurde erst Mitte des 20. Jahrhunderts nach einer umfassenden Studie zur volkswirtschaftlichen Bedeutung von Reibung und Verschleiß (Jost-Report, 1966) mit folgender Originaldefinition begründet:

- Tribology is the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices.

Im deutschen Sprachgebrauch kann die Wortkombination *interacting surfaces* durch den in der Konstruktionstechnik für „funktionelle Oberflächen“ gebräuchlichen Begriff *Wirkflächen* übersetzt werden, womit die Tribologie-Definition wie folgt lautet:

- Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von Wirkflächen in Relativbewegung und zugehöriger Technologien und Verfahren.

Als Ingenieurwissenschaft kann die Tribologie auch wie folgt definiert werden:

- Die Tribologie ist ein interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste.

Zielsetzung und Aufbau dieses Tribologie-Handbuchs orientieren sich an dieser Definition.

1.3 Aufgaben und Bedeutung der Tribologie

Durch die Einführung des Begriffes Tribologie wurde der Rahmen zur integrierten Bearbeitung von Reibungs- und Verschleißproblemen unter Berücksichtigung des interdisziplinären Zusammenwirkens von Physik, Chemie, Werkstoffwissenschaften und Ingenieurdisziplinen geschaffen (Göttner, 1970; Zum Gahr, 1985; Fleischer, 1989). In jüngerer Zeit haben neue wissenschaftliche Erkenntnisse, messtechnische Instrumentarien und Anwendungen der Computertechnik zu einer Erweiterung der Tribologie bis hin zur Nanotechnik geführt (Singer, 1992; Bhushan, 1997). Während in der Vergangenheit sich die einzelnen Teilgebiete separat entwickelt hatten, erfordert die Tribologie als interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft eine vereinheitlichende Terminologie und eine entsprechende Bearbeitungsmethodik unter Anwendung systemanalytischer und systemtechnischer Methoden (Wahl, 1948; Fleischer, 1970; Salomon, 1974; Czichos, 1974).

- Interdisziplinäre Aufgaben der Tribologie: Wissenschaft und Technik der mit Bewegungsvorgängen zusammenhängenden reibungs- und verschleißbedingten energetischen und stofflichen Prozesse und Optimierung von technischen Systemen, deren Funktionen *Wirkflächen in Relativbewegung* erfordern.

Zur Darstellung der Bedeutung der Tribologie in Wissenschaft, Technik und Wirtschaft werden einige grundlegende Aspekte betrachtet.

Wissenschaft

Nach den Gesetzen der Thermodynamik sind alle makroskopischen technischen Prozesse irreversibel und benötigen zu ihrer Durchführung Energie. Das gilt auch für die Funktion von Gleit- oder Rollelementen in technischen Anlagen. Kommen sich zwei Festkörper nahe genug, so treten Wechselwirkungen zwischen ihren Kontaktflächen auf, die bei der Einleitung oder Aufrechterhaltung einer Relativbewegung nichtkonservative Kräfte induzieren und so eine Dissipation von Bewegungsenergie bewirken. Je nach Art und Größe dieser Kräfte geschieht die Energiedissipation durch unterschiedliche Prozesse. Einer der wichtigsten Dissipations-

pfade führt über die Phononenerzeugung (Gitterschwingungen) und deren Ausbreitung im Festkörper, die Quelle der Reibungswärme. Größere Kräfte führen zu den makroskopisch bekannten inelastischen Prozessen wie z. B. plastisches Fließen, viskoelastische Verluste, und viskoses Fließen. Mit der Betrachtungsweise der klassischen Physik und ihren idealisierenden Vorgaben und Randbedingungen kann die Irreversibilität realer technischer Prozesse häufig nicht behandelt werden. So werden „Reibungseffekte“ oft vernachlässigt oder die Reibung wird nur als „Störung“ betrachtet. Zitat aus einem Physik-Lehrbuch von 2005:

Die Reibung spielt im täglichen Leben und bei allen technischen Geräten mit bewegten Bauteilen eine außerordentlich große Rolle. Es gibt aber für die Reibung kein einfaches Kraftgesetz, wie z. B. für die Schwerkraft. Da die Wirkung der Reibung auf die Bewegung von Körpern nur schlecht zu kontrollieren ist und damit auch schlecht zu reproduzieren ist, betrachten wir die Reibung zunächst als lästige Störung und versuchen sie zu vermeiden.

Da Reibung und Verschleiß komplexe Vorgänge sind, muss die herkömmliche Betrachtungsweise erweitert werden. Zahlreiche grundlegende Untersuchungen der Tribophysik und Trib Chemie haben gezeigt, dass die Elementarprozesse von Reibung und Verschleiß als dissipative, nichtlineare, dynamisch-stochastische Vorgänge in zeitlich und örtlich verteilten Mikrokontakten innerhalb der makroskopischen Wirkflächen ablaufen. Die in den letzten Jahren erfolgte Erweiterung der Tribologie bis in „Nano-Dimensionen“ hat 500 Jahre nach den ersten Reibungsuntersuchungen von Leonardo da Vinci zu einer „Renaissance der Reibung“ geführt (Urbakh and Meyer, 2010). Wissenschaftliche Aufgabe der Tribologie ist die Erforschung der Mechanismen und Pfade der Energiedissipationen in Reibkontakten und der auslösenden Prozesse der zum Verschleiß führenden Materialveränderungen.

Technik

Zahlreiche Aufgaben der Technik können – wie aus der Übersicht von Bild 1.1 ersichtlich – nur durch Wirkflächen in Relativbewegung, d. h. durch Tribotechnik, realisiert werden, z. B.

- Kinematik → Bewegungserzeugung, Bewegungsübertragung, Bewegungshemmung
- Dynamik → Kraftübertragung über Kontakt-Grenzflächen
- Arbeit, mechanische Energie → Übertragung, Umwandlung mechanischer Energie
- Transportvorgänge → Stofftransport fester, flüssiger oder gasförmiger Medien
- Formgebung → Spanende und spanlose Fertigung, Oberflächentechnik

Die Aufgaben der Tribologie erstrecken sich damit auf folgende wesentliche Bereiche der Technik und die zugehörigen Ingenieurwissenschaften:

- Entwicklung, Konstruktion, Fertigung, Betrieb, Wartung und Instandhaltung mechanischer Bewegungssysteme in den verschiedenen Industriezweigen, wie z. B.: Maschinenbau, Feinwerktechnik, Produktionstechnik, Antriebstechnik, Fahrzeugtechnik, Luft- und Raumfahrttechnik, Energietechnik, u. Ä.

In allen diesen Bereichen kann die Tribotechnik zur Erhöhung von Leistung und Wirkungsgrad, zur Verbesserung von Qualität, Zuverlässigkeit und Gebrauchsdauer, zur Energie- und Materialeinsparung sowie zur Verminderung von Umweltbelastungen beitragen.

Typische Aufgabengebiete der Tribologie zur Optimierung technischer Systeme gehen aus den Ergebnissen einer klassischen Studie der japanischen Gesellschaft der Maschinenbauindustrie und dem Ministry for International Trade and Industry (MITI) aus den Jahren 1980 bis 1982 hervor (Kubota, 1982). Als wichtigste Entwicklungserfordernisse wurden genannt:

(a) Fehlerdiagnostiketechniken, (b) neue Tribomaterialien, (c) verbesserte Schmieringstechniken, (d) Standardisierung der tribologischen Prüftechnik, (e) neue Tribosysteme und Schmierstoffe, (f) verbesserte tribologische Beurteilungsmethoden, (g) tribologische Datenbank.

Zielsetzungen tribologischer Maßnahmen zur Optimierung maschinentechnischer Systeme sind in **Tabelle 1.1** zusammengestellt, sie sind grundlegende Aufgabenstellungen der Tribotechnik.

Tab. 1.1 Charakteristische Aufgabenstellungen der Tribologie in der Technik

Ziele tribologischer Maßnahmen zur Optimierung maschinentechnischer Systeme	Häufigkeit der Zielnennungen von Anwendern (100 % = 978 Nennungen)
1. Lebensdauerverlängerung	 32
2. Wartungsfreiheit	 22
3. Belastungs/Drehzahl-Steigerung	 9
4. Produktionsverbesserung	 8
5. Minderung elektr. Verlustleistung	 7
6. Verminderung von Leckage, Abdichtung	 6
7. Geräuschreduzierung	 5
8. Hochtemperaturanwendung	 4
9. Vibrationsreduzierung	 4
10. Gewichtsreduzierung	 2
11. Sonstiges	 1

Wirtschaft

Die große volkswirtschaftliche Bedeutung der Tribologie und die beträchtlichen Einsparungsmöglichkeiten durch verstärkte Forschung und Anwendung tribologischer Kenntnisse werden durch Studien in verschiedenen Industrieländern aus mehreren Jahrzehnten belegt. Das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) brachte dies Mitte der 1980er Jahre wie folgt zum Ausdruck:

„Reibung, Verschleiß und Korrosion verschlingen in den Industrieländern etwa 4,5 % des Bruttosozialprodukts. Umgerechnet auf die Bundesrepublik Deutschland bedeutet dies rund 35 Milliarden € volkswirtschaftlicher Verluste (insbesondere an Rohstoffen und Energie) in jedem Jahr“ (BMFT Report 1983).

In den USA werden nach einer Studie der American Society of Mechanical Engineers (ASME) ca. 25 % des Energieverbrauchs von Industrie und Transportwesen tribologischen Verlustprozessen zugeschrieben und beträchtliche jährliche Einsparung durch verstärkte Anwendung tribologischer Erkenntnisse für möglich gehalten (Pinkus and Wilcock, 1977). **Bild 1.5** nennt für diesen Bereich ein sicher auch heute nicht unrealistisches Einsparpotential von 11 %.

Für Kanada ergab eine, im Auftrag des National Research Council Canada von einer bedeutenden kanadischen Industriefirma durchgeführte Studie, dass in fünf ausgewählten grundlegenden Industriebereichen Verluste durch Reibung auf 1,5 Mrd. € und durch Verschleiß auf 4,5 Mrd. € pro Jahr beziffert werden, wovon auf dem Verschleißsektor mehr als 20 % als potentielle Einsparmöglichkeiten angesehen werden (Brockley, 1984). Bemerkenswert ist die aus **Tabelle 1.2** ersichtliche Zuordnung der Verschleißverluste auf grundlegende tribologische Schadensprozesse.

se womit ein Ansatz für Maßnahmen zur Verschleißminderung gegeben wird (siehe Kap. 5.6). Der bedeutendste Schadensmechanismus in allen Wirtschaftszweigen ist die Abrasion – im Schienenverkehr mit den tribologisch zyklisch beanspruchten Rad/Schiene-Systemen ist es die Ermüdung. Die Schadensmechanismen werden in Kap. 5 detailliert dargestellt.

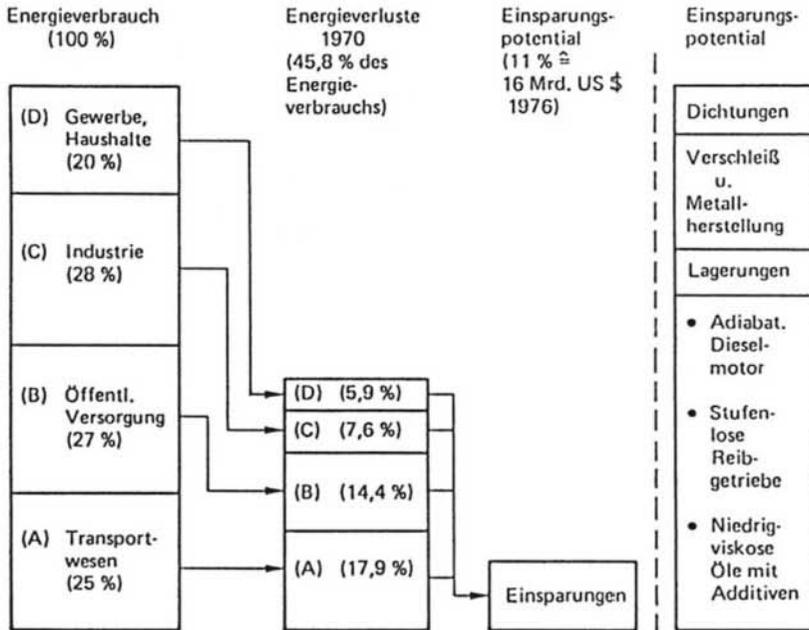


Bild 1.5 Energieverbrauch, Energieverluste und Einsparungspotential durch Tribologie, Beispiel USA

Tab. 1.2 Wirtschaftszweige und Schadensmechanismen, Beispiel Kanada

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

Neben diesen nunmehr klassischen Studien zur ökonomischen Bedeutung der Tribologie für Technik und Wirtschaft, weisen aktuelle Untersuchungen insbesondere auf die Wichtigkeit der Tribologie für die Funktion der in neuerer Zeit entwickelten Systemen der Mikrotechnik, wie z. B. der MEMS, der mikro-elektromechanischen Systeme, hin.

2 Tribologische Systeme

Die einleitende Übersicht hat deutlich gemacht, dass in der Technik zahlreiche Funktionen – von der Bewegungsmechanik bis zur Produktionstechnik – nur durch Wirkflächen in Relativbewegung realisiert werden können. Dies ist stets mit Reibung sowie häufig mit Verschleiß der betreffenden Werkstoffe, Bauteile und Konstruktionen verbunden. Reibung und Verschleiß sind keine Materialeigenschaften und können nicht durch einfache Werkstoffkenndaten (wie etwa Härte oder Elastizitätsmodul) gekennzeichnet werden. Reibung und Verschleiß sind „Systemeigenschaften“. Sie erfordern stets die Analyse und Berücksichtigung der vielfältigen Parameter und Einflussgrößen des betreffenden tribologischen Systems. Dieses Kapitel gibt zunächst eine kurze Einführung in die systemtechnische Methodik und schildert dann mit kurzen Übersichten die Themen der Tribologie, die in den Folgekapiteln detailliert behandelt werden.

2.1 Einführung in die systemtechnische Methodik

Die systemtechnische Methodik kombiniert Methoden aus Biologie, Kybernetik und Informationstheorie (begründet von Ludwig von Bertalanffy, Norbert Wiener und Claude Shannon) und wendet sie auf die Technik an. Technische Systeme sind allgemein durch die Funktion gekennzeichnet, Energie, Stoffe (Materie) und/oder Information umzuwandeln, zu transportieren und/oder zu speichern, sie gliedern sich traditionell in

- Maschinen als primär energieumsetzende technische Gebilde
- Apparate als primär stoff- oder materieumsetzende technische Gebilde
- Geräte als primär signalumsetzende technische Gebilde.

Die Kennzeichen technischer Systeme können vereinfacht wie folgt beschrieben werden:

- Jedes System besteht aus interaktiven Elementen (Komponenten).
- Die Systemelemente lassen sich durch eine zweckmäßig definierte virtuelle Systemgrenze von der Umgebung (oder von anderen Systemen) abgrenzen, um sie modellhaft isoliert betrachten zu können.
- Die in das System eintretenden Eingangsgrößen (Inputs) werden als „Prozessgrößen“ über die Systemelemente in Ausgangsgrößen (Outputs) überführt.
- Die Funktion eines Systems wird beschrieben durch Input/Output-Beziehungen zwischen operativen Eingangsgrößen und funktionellen Ausgangsgrößen; sie kann beeinflusst werden durch Störgrößen und Dissipationseffekte.
- Jeder Input und Output kann den kybernetischen Grundkategorien Energie, Stoffe (Materie), Information zugeordnet werden.
- Die bestimmungsgemäße Systemfunktion bildet die Rahmenbedingung für die zu gestaltende Systemstruktur mit ihren Elementen, Eigenschaften und Wechselwirkungen.

Für Entwicklung und Design technischer Systeme gilt die Regel *structure follows function*, d. h.: 1. Systemfunktion definieren, 2. Systemstruktur realisieren.

Die systemtechnische Methodik hat das Ziel, ein Fachgebiet der Technik in seiner „Ganzheit“ zu behandeln. Der Begriff „Ganzheit“ hat als methodischer Begriff im 20. Jahrhundert in vie-

len Wissenschaften Eingang gefunden. Ganzheit ist etwas, das nicht durch einzelne Eigenschaften seiner Bestandteile, sondern erst durch deren gefügerichteten Zusammenhang (Struktur) bestimmt ist. Die Ganzheit ist mehr als die Summe der Teile, die selbst nur aus dem Ganzen heraus zu verstehen sind. Zentrale Begriffe der systemtechnischen Methodik sind die Systemfunktion und die Systemstruktur, siehe **Bild 2.1**.

- Ein *System* ist ein Gebilde, das durch *Funktion* und *Struktur* verbunden ist und durch eine Systemgrenze von seiner Umgebung virtuell abgegrenzt werden kann.
- Die *Systemfunktion* besteht in der Überführung operativer Eingangsgrößen in funktionelle Ausgangsgrößen, sie wird getragen von der Struktur des Systems.
- Die *Systemstruktur* besteht aus der Gesamtheit der Systemelemente, ihren Eigenschaften und Wechselwirkungen.

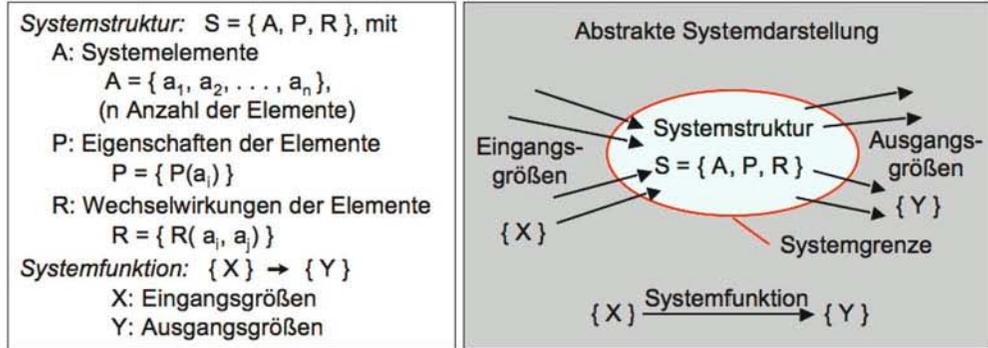


Bild 2.1 Die systemtechnische Methodik in Stichworten

2.2 Funktion und Struktur tribologischer Systeme

Tribologische Systeme, oder kurz Tribosysteme, können nach ihrer funktionellen Aufgabe – Umsetzung von mechanischer Energie, Information, Stoffen mittels bewegter Wirkflächen – gemäß der kybernetischen Grundkategorien *Energie*, *Information*, *Stoff* in primär energie-, informations- und stoffdeterminierte Funktionsklassen eingeteilt werden.

Funktion von Tribosystemen

- *Energieumsetzende* tribologische Systeme → Maschinenbau, Feinwerktechnik
 - Bewegungsübertragung ↔ Führungen, Gelenke, Lager
 - Bewegungshemmung ↔ Bremsen
 - Kraftübertragung ↔ Kupplungen
 - Energieübertragung ↔ Getriebe
- *Informationsumsetzende* tribologische Systeme → Informationstechnik
 - Speichertechnologien ↔ Computer-Festplattenlaufwerk, CD, DVD
 - Signalübertragung ↔ Nocken/Stößel-Systeme, Schaltrelais
 - Signalausgabe ↔ Typenraddrucker, Tintenstrahldrucker
- *Stoffumsetzende* tribologische Systeme → Produktionstechnik, Transportwesen
 - Urformen ↔ Gieß-, Press-, Extrudierwerkzeuge
 - Umformen ↔ Biege, Walz-, Schmiede-, Ziehwerkzeuge

→ Trennen	↔ Bohr-, Dreh-, Fräs-, Schleifwerkzeuge
→ Fügen	↔ Passungen, Reibschweißen
→ Beschichten	↔ Oberflächentechnologien
→ Stoffeigenschaftändern	↔ Erodierverfahren, Lithografie
→ Stoffabdichtung	↔ Dichtungen, Ventile, Kolben/Zylinder
→ Stofftransport	↔ Fördersysteme, Pipeline, Fluidik
→ Gütertransport	↔ Reifen/Straße, Rad/Schiene

Struktur von Tribosystemen

Tribosysteme erfordern, wie alle technischen Systeme, für ihre bestimmungsgemäßen Systemfunktionen geeignete Systemstrukturen. **Bild 2.2** zeigt mit Beispielen aus dem Maschinenbau, dass Tribosysteme stets Strukturen mit vier Strukturelementen (Bauteile und Fluide) haben:

(1)/(2) Wirkflächenpaar, (3) Zwischenstoff (z. B. Schmierstoff), (4) Umgebungsmedium.

Die Funktion von Tribosystemen wird über *Wirkflächen* realisiert. Diese sind durch die funktionellen Kräfte und Relativbewegungen *tribologischen Beanspruchungen* ausgesetzt. Die Stellen, an denen das physikalische Geschehen zur Wirkung kommt, werden nach der Terminologie der Konstruktionslehre als *Wirkorte* bezeichnet (DUBBEL, 2007). Reibung und Verschleiß resultieren aus Dissipationseffekten in örtlich und zeitlich stochastisch verteilten Mikrokontakten innerhalb der geometrischen Kontaktfläche in Abhängigkeit vom Beanspruchungskollektiv (Kräfte, Geschwindigkeit, Beanspruchungsdauer, Temperatur) und der Systemstruktur.

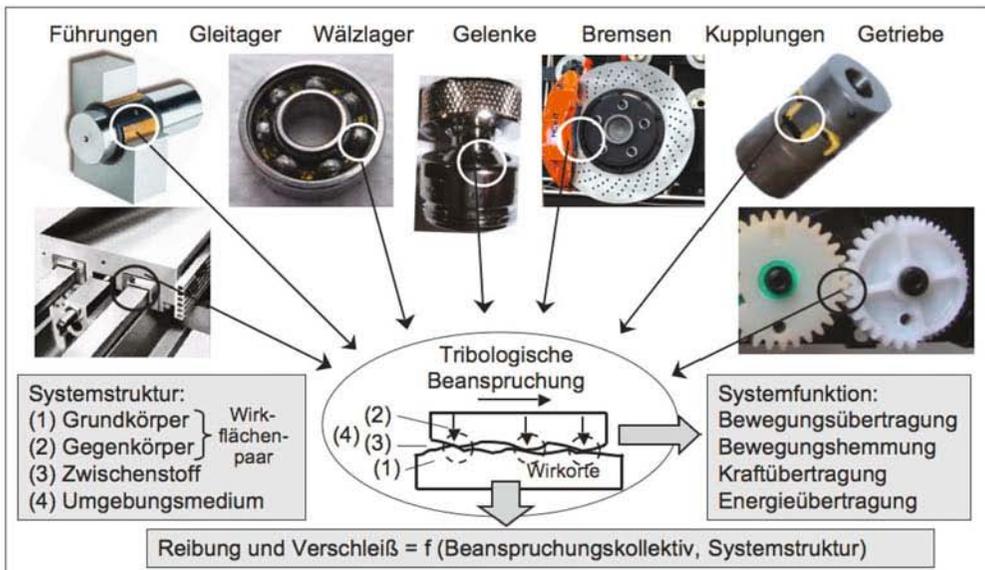


Bild 2.2 Struktur von Tribosystemen, Beispiele aus dem Maschinenbau

Bei der Struktur von Tribosystemen kann zwischen *geschlossenen* und *offenen* Systemstrukturen unterschieden werden. Geschlossene Systemstrukturen dienen funktionell hauptsächlich der Bewegungs-, Kraft-, Energie- oder Signalübertragung (wie z. B. Relais). Ihre Systemelemente unterliegen an den Wirkorten dauernd oder intermittierend den tribologischen Beanspruchungen. Tribosysteme mit offenen Systemstrukturen (z. B. Fördersysteme, Fertigungssys-

teme) sind primär stoffdeterminiert, d. h. bei ihnen findet ein ständiger „Stofffluss“ in das System hinein und aus ihm heraus statt.

Reibung und Verschleiß von Werkstoffen werden labormäßig oft mit geometrisch einfachen Tribosystemen untersucht, die auch für die tribologische Modell- und Simulationsprüftechnik verwendet werden, (vgl. Bild 3.2.6 „Wirkgeometrien und Wirkflächen tribologischer Modellsysteme“). **Bild 2.3** zeigt zwei elementare Modell-Tribosysteme und erläutert die grundlegenden Reibungszustände. Kontraforme Kontakte haben einen „punkt- oder linienförmigen“ Wirkort mit Hertzchen Kontaktmechanik-Spannungsverteilungen. Bei konformem Kontakt (Gleitlagergeometrie) können im Regime III der Stribeck-Kurve durch geeignete Fluide als Zwischenstoff und die Wirkung von Hydrodynamik (z. B. Gleitlager) oder Aerodynamik (z. B. Computer-Festplattenlaufwerk) die Wirkflächen vollständig getrennt und eine praktisch verschleißfreie Funktion mit geringer Fluidreibung realisiert werden.

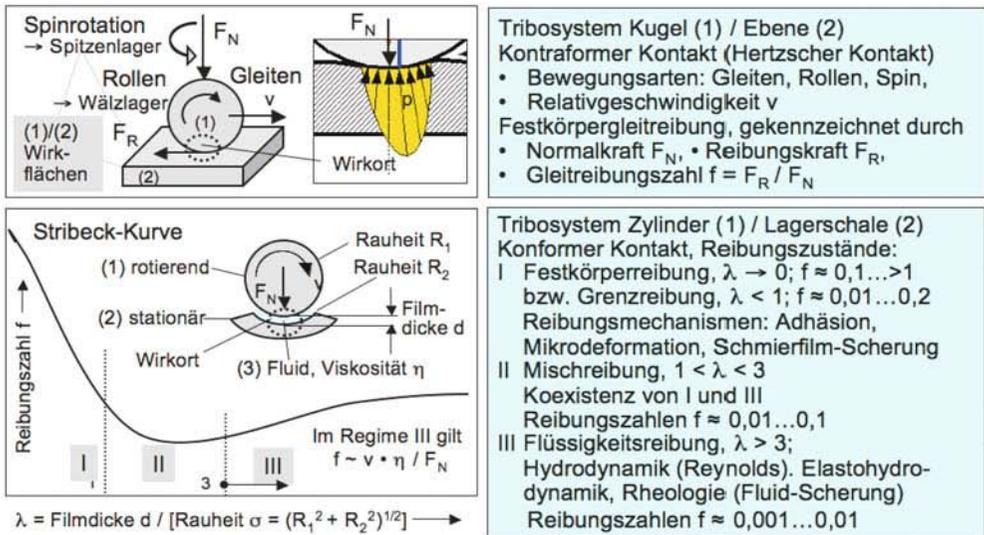


Bild 2.3 Modell-Tribosysteme mit einfachen Kontaktgeometrien, kennzeichnende Parameter

Reibung hat in der Technik eine „duale Rolle“. Einerseits ist sie als Dissipationseffekt mit Energieverlusten verbunden. Andererseits basieren ganze Wirtschaftszweige, wie Transport und Verkehr, technisch auf *Haftreibung* und *Traktion* von Reifen/Strasse- oder Rad/Schiene-Systemen. Reibung ermöglicht auch durch *Reibschluss* die Übertragung mechanischer Leistungsflüsse. **Bild 2.4** zeigt dazu Beispiele aus den Bereichen I und III der Stribeck-Kurve.

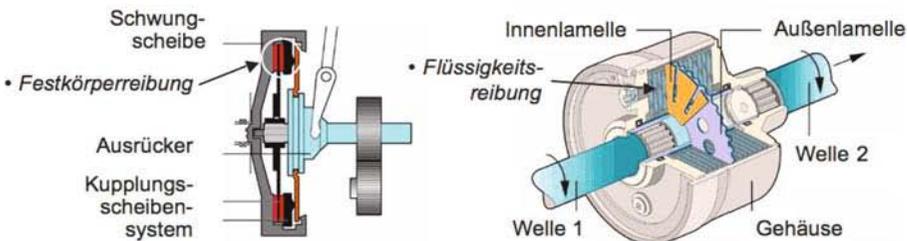


Bild 2.4 Tribotechnische Kupplungen, links Reibungskupplung, rechts Visco-Kupplung

2.3 Dimensionsbereiche tribologischer Systeme und Prozesse

Die Dimensionsbereiche tribologischer Systeme und Prozesse sind mit charakteristischen Längen- und Geschwindigkeitsbereichen in **Bild 2.5** illustriert. Für die Ingenieurwissenschaften sind die Funktionen und Strukturen von Tribosystemen im Mikrometer- bis Meterbereich von Interesse, während sich die Materialwissenschaften, Physik und Chemie mehr mit den mikro- und nanoskaligen tribologischen Prozessen beschäftigen (Williams and Le, 2006).

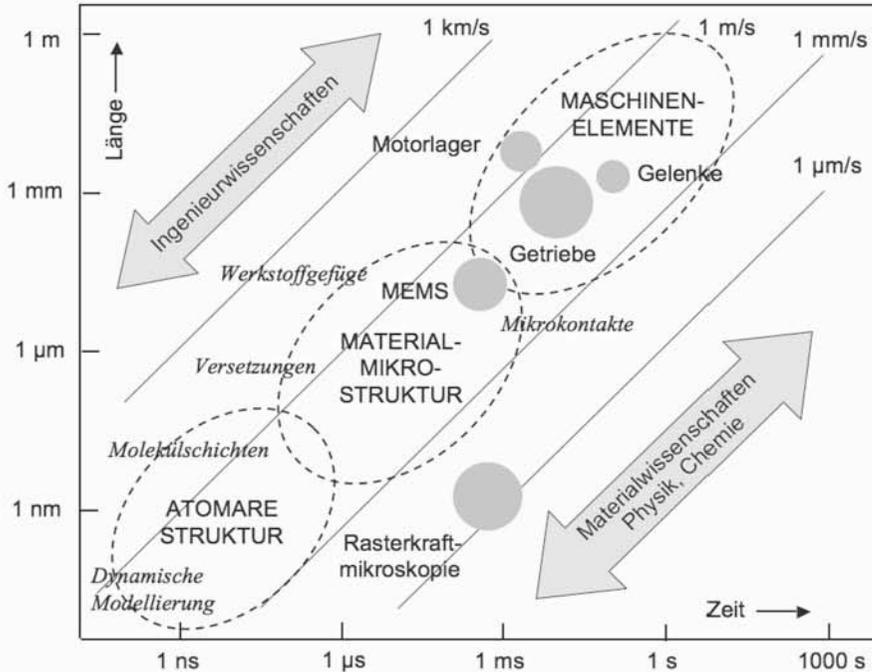


Bild 2.5 Charakteristische Dimensionsbereiche tribologischer Systeme und Prozesse

Reibung und Verschleiß in Tribosystemen resultieren aus tribologischen Prozessen in den Wirkflächen kontaktierender Triboelemente. Sie reichen von dissipativen, einer „in-situ-Beobachtung“ nicht zugänglichen *Nano/Mikro-Effekten* in submikroskopischen Wirkorten bis in den Makrobereich der Triboelemente mit messbaren Kräften, Geschwindigkeiten und den Dämpfung-Masse-Feder-Charakteristika der Triboelemente, siehe **Bild 2.6**. Die folgenden Abschnitte geben kurze Übersichten zur *Nano-, Mikro- und Makrotribologie* (Czichos, 2001).

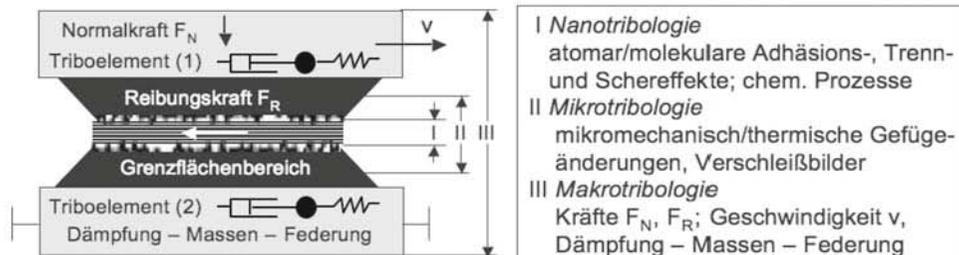
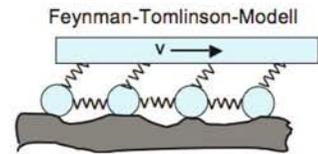


Bild 2.6 Dimensionsbereiche tribologischer Prozesse, schematische Darstellung

2.3.1 Nanotribologie

Die *Nanowissenschaft* wurde, wie bereits erwähnt (vgl. Bild 1.1), von dem Physik-Nobelpreisträger Feynman begründet (Feynman, 1960). Die Ursachen der Reibung auf der Nanoskala erklärt Feynman – in Anlehnung an eine erste „atomare Theorie der Reibung“ (Tomlinson, 1929) – in seinen berühmten *Feynman Lectures on Physics* (1963, deutsch 2007) wie folgt:

Beim Gleiten eines festen Körpers auf einem anderen wird eine Kraft benötigt, um die Bewegung aufrechtzuerhalten. Diese wird Reibungskraft genannt, und ihre Ursache ist sehr kompliziert. Beide Kontaktflächen sind in atomarer Dimension unregelmäßig. Es gibt Kontaktpunkte, an denen die Atome aneinander haften und wenn der Gleitkörper entlang gezogen wird, werden die Atome getrennt und es entstehen Schwingungen. Der Mechanismus des Leistungsverlustes ist, dass beim Bewegen des Gleitkörpers die atomaren Potentialschwellen deformiert werden, wodurch Wellen und atomare Bewegungen erzeugt werden, was sich nach einer Weile in beiden Körpern als Wärme äußert.



Die Nanotribologie führte, wie bereits im ersten Kapitel erwähnt, zu einer „Renaissance der Reibung“ (Urbakh, Meyer, 2010). Nanoskalige Reibungs- und Verschleißprozesse werden heute mit *Molecular Modelling*. Elektronenmikroskopie und Rasterkraftmikroskopie (Gnecco and Meyer, 2007) untersucht. In diesem Buch wird die Tribologie der Mikro/Nano-Kontakte in Kapitel 3.3 und die Messtechnik der Mikro- und Nanoskala in Kapitel 8.4 behandelt.

Ein Beispiel *nanoskaliger Verschleißphänomene*, wie sie bei Laboruntersuchungen an Bremsmaterialien festgestellt wurden, zeigt **Bild 2.7**. Die in der Querschnittsdarstellung des Bremsmaterials beobachteten Effekte – plastische Deformation, Rissentstehung, Nanopartikelbildung – konnten auch im Nano-Maßstab modelliert werden (Österle et al., 2007).

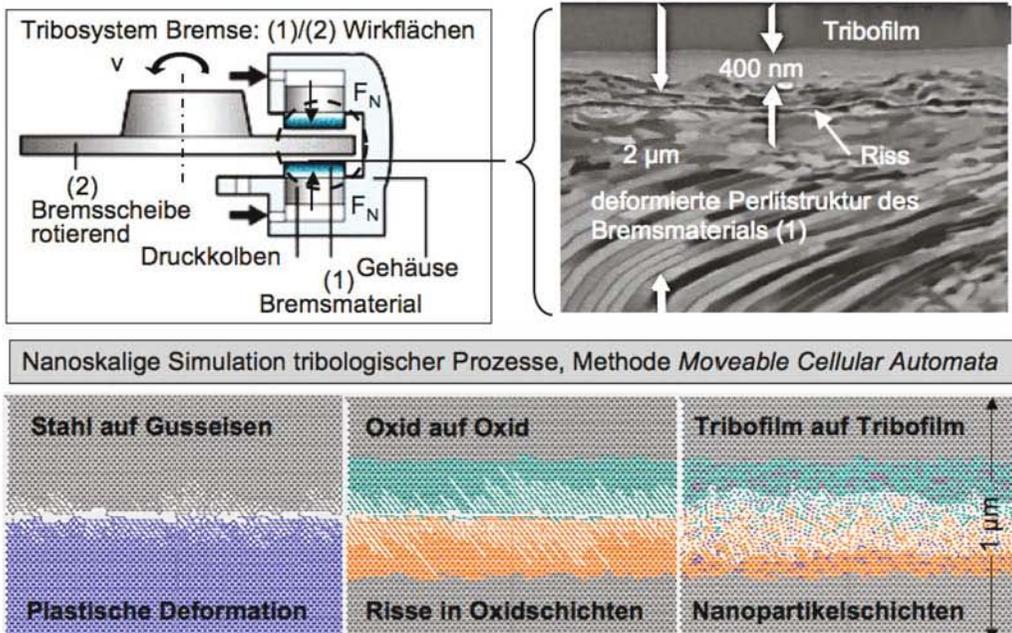


Bild 2.7 Nanoskalige Triboprozesse, experimentell beobachtet und theoretisch modelliert

2.3.2 Mikrotribologie

Die Mikrotribologie untersucht und beschreibt tribologische Prozesse im sub-mm Bereich. Dies sind Dimensionen der *Werkstoffmikrostruktur* technischer Oberflächen. **Bild 2.8** gibt eine schematische Übersicht über ihre metallphysikalischen Merkmale; sie können alle einen Einfluss auf die tribologischen Prozesse in den Mikrokontakten von Wirkflächenpaaren haben.

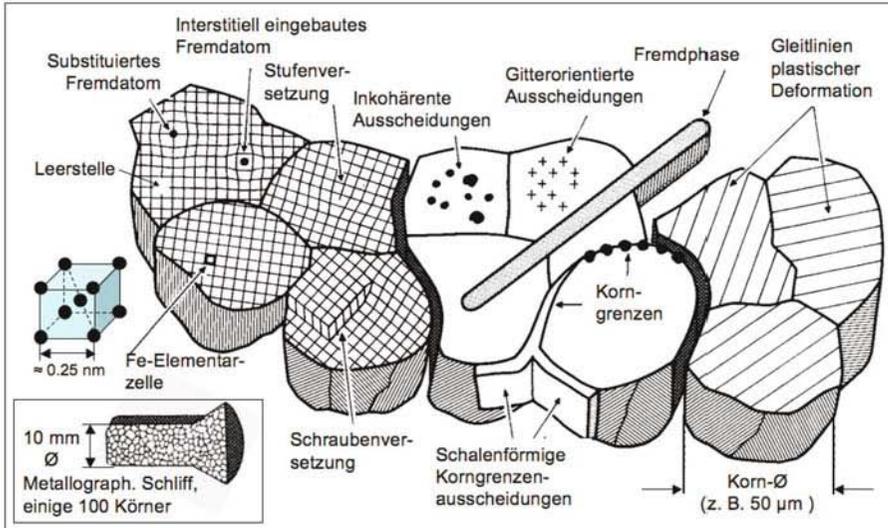


Bild 2.8 Übersicht über metallphysikalische Charakteristika der Werkstoff-Mikrostruktur

Mikro-Verschleißerscheinungsbilder konnten ab Mitte der 1960 Jahre mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) mit mehr als 10000facher Vergrößerung bei gleichzeitig hoher Schärfentiefe abgebildet und die grundlegenden Verschleißmechanismen kategorisiert werden. Sie sind in **Bild 2.9** übersichtsmäßig zusammengestellt und werden im Kapitel 5 detailliert behandelt.

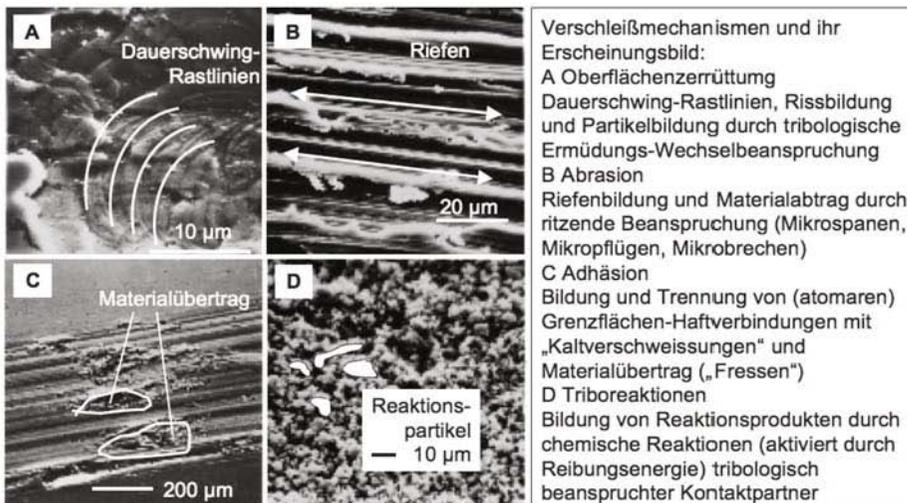


Bild 2.9 Erscheinungsbilder der grundlegenden Verschleißmechanismen

2.3.3 Makrotribologie

Während die Nano- und Mikrotribologie Dissipationseffekte im mikroskopischen Maßstab untersucht, hat die Makrotribologie die Aufgabe, in der Technik benötigte Funktionen der Kraft/Energieübertragung mittels geeigneter Wirkflächen zu realisieren und zur Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Materialverluste beizutragen, siehe **Bild 2.10**.

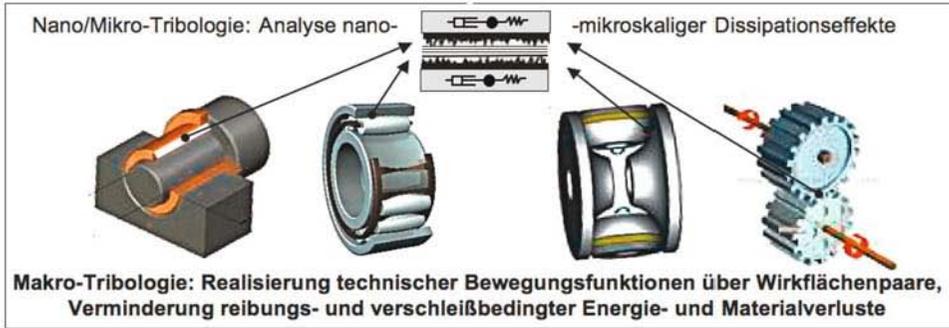


Bild 2.10 Zusammenwirken von Makro/Mikro/NanoTribologie zur Optimierung technischer Systeme

Die Makro-Tribosysteme der Technik sind außerordentlich vielfältig. **Bild 2.11** gibt dazu eine Übersicht mit kennzeichnenden Bereichen von Flächenpressungen und Geschwindigkeiten.

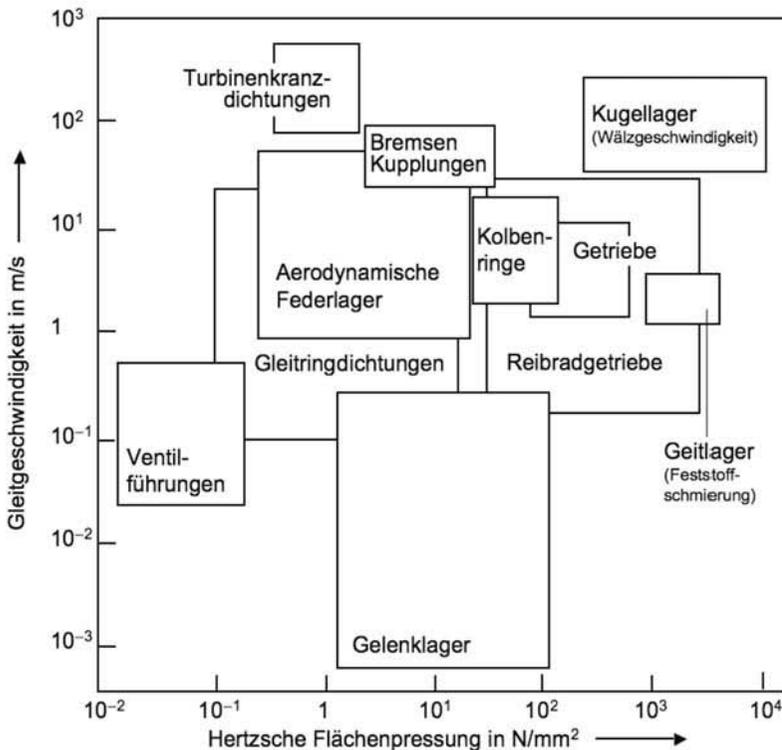


Bild 2.11 Tribotechnische Systeme mit kennzeichnenden Größenordnungen operativer Größen

Die mit ihren operativen Funktionsbereichen von Flächenpressungen und Geschwindigkeitsbereichen in Bild 2.11 gekennzeichneten Tribosysteme lassen sich wie folgt kategorisieren:

- Führungen, Gelenke, Lager → Bewegungsübertragung
- Bremsen → Bewegungshemmung
- Kupplungen → Kraftübertragung
- Getriebe → Energieübertragung

Die genannten Tribosysteme haben „geschlossene“ Systemstrukturen. Sie sind damit Bewegungssysteme, die zusammen mit Belastung und Antrieb Masse-Feder-Dämpfer-Kombinationen bilden. **Bild 2.12** zeigt dazu ein einfaches Beispiel. Die dynamischen Eigenschaften können – insbesondere durch reibungsangeregte Schwingungen – das Verhalten gesamter Tribosysteme entscheidend beeinflussen, siehe *stick-slip*, Kapitel 4 *Reibung*.

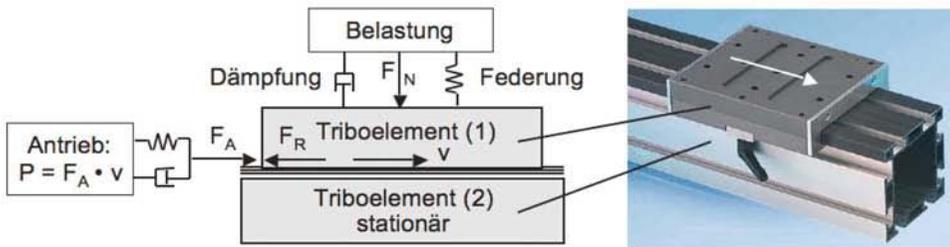


Bild 2.12 Makrotribologie eines Tribosystems mit geschlossener Systemstruktur, Beispiel Gleitführung

Bei tribologischen Systemen mit „offenen“ Systemstrukturen ist zusätzlich zu beachten, dass häufig nur ein Triboelement (mit einer rotierenden Wirkfläche) permanent am tribologischen Wirkort ist und das andere Triboelement (unter Beeinflussung durch das Umgebungsmedium) kurzzeitig den Wirkort durchläuft. **Bild 2.13** illustriert dies am Tribosystem Reifen/Straße.

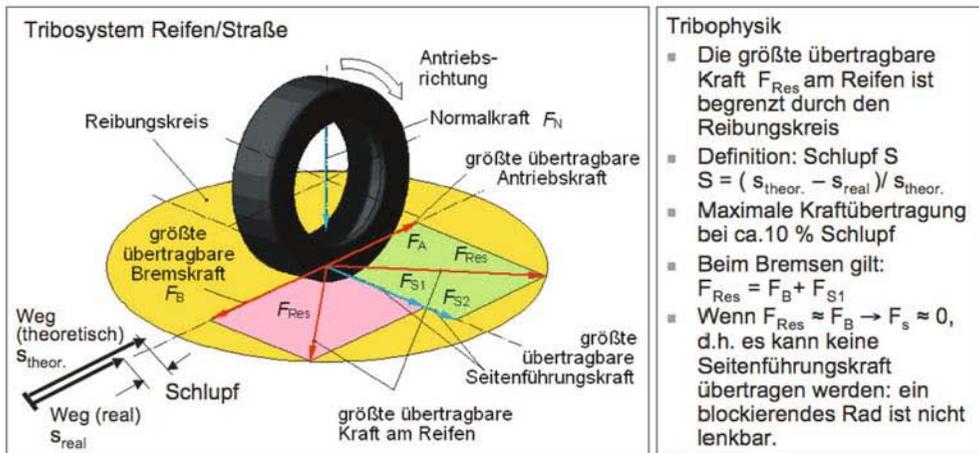


Bild 2.13 Makrotribologie eines Tribosystems mit offener Systemstruktur, Beispiel Reifen/Straße

Wie bei allen Tribosystemen mit offener Systemstruktur wird auch beim Tribosystem Reifen/Straße die Tribophysik durch die Umgebungsbedingungen beeinflusst siehe **Bild 2.14**.

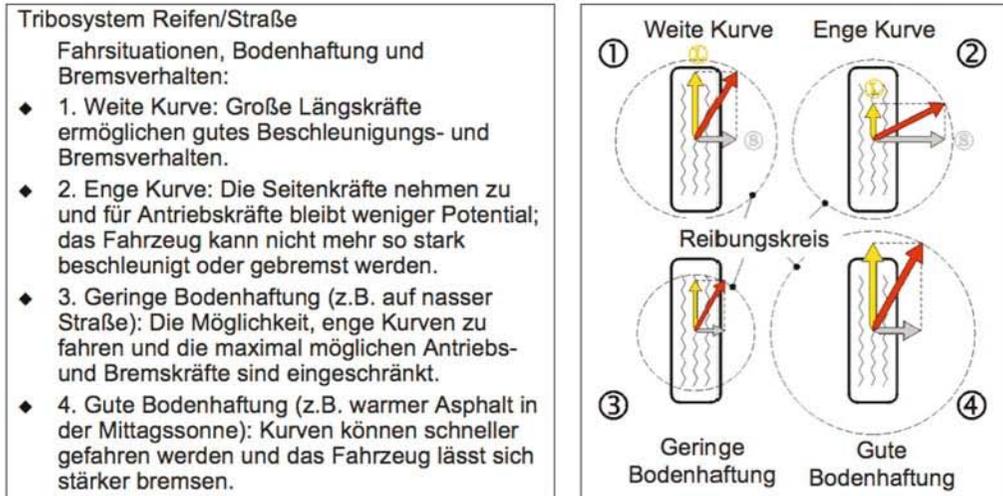


Bild 2.14 Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Tribophysik des Reifen/Straße-Systems

Tribosysteme können heute durch Mechatronik – *Mechanik-Elektronik-Informatik* + *Sensorik-Prozessorik-Aktorik-Regelung* – optimiert werden (Czichos, 2008). Als Beispiel zeigt **Bild 2.15** die Bremsoptimierung durch ABS, einer mechatronischen „Stotterbremse“. Sensoren erfassen die Kenngrößen der Fahrdynamik. Bei einer Blockiertendenz der Räder ergehen von Prozessor und Regler Stellbefehle an einen Aktor, der den Bremsdruck senkt, die Bremswirkung reduziert und die Lauffunktion jeden Rades einzeln optimiert.

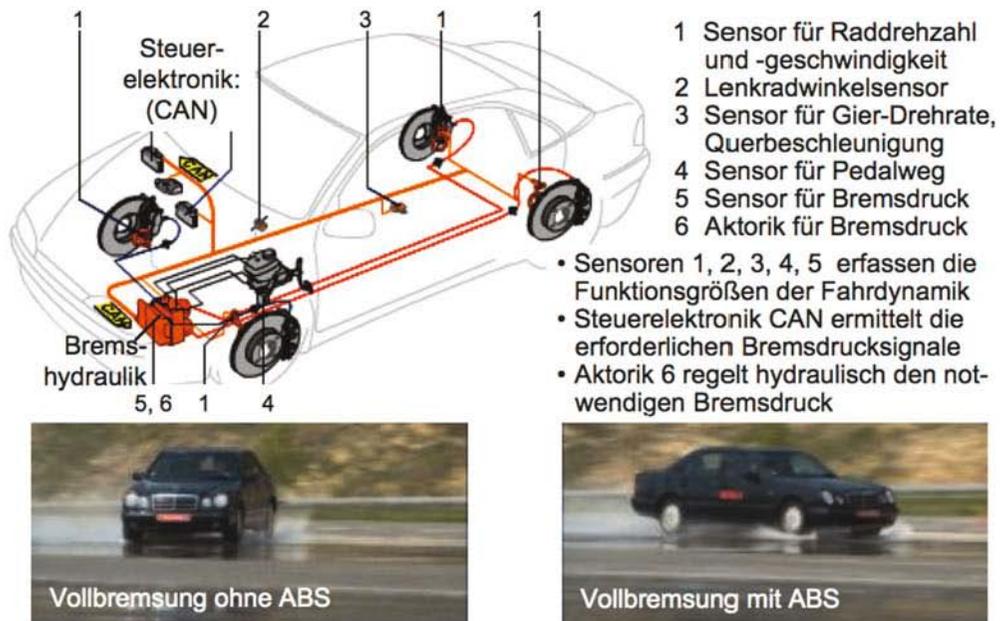


Bild 2.15 Tribologisches System Reifen/Straße, optimiert mit ABS, Anti-Blockier-System

2.4 Methodik zur Reibungs- und Verschleißanalyse

Durch Anwendung der Systemanalyse auf die Tribologie können die Parameter und Einflussgrößen tribologischer Systeme systematisch geordnet werden, siehe **Bild 2.16**.

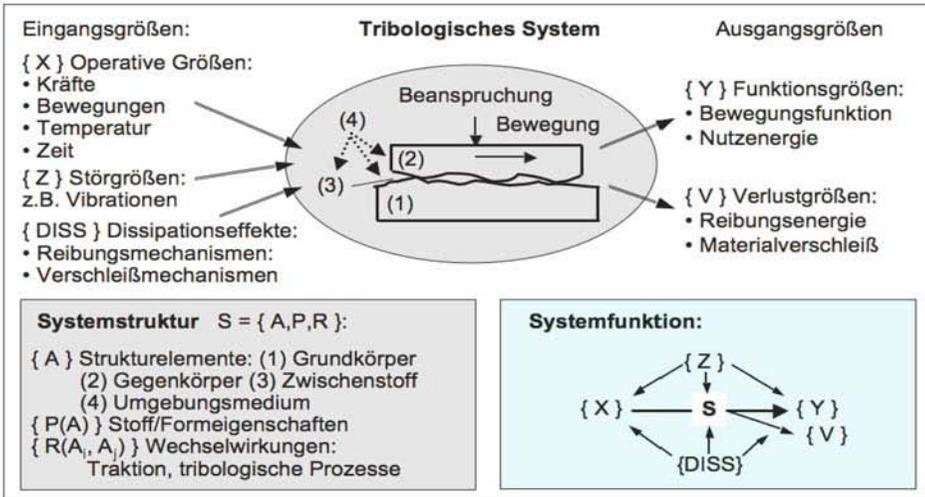


Bild 2.16 Allgemeine systemanalytische Darstellung eines tribologischen Systems

In erweiterter Analogie zur Festigkeitslehre ermöglicht die Systemanalyse die Charakterisierung von Reibung und Verschleiß als „Systemkenngrößen“ (Czichos, (1978):

- *Festigkeitslehre*: Beanspruchung (Zug, Druck, etc.) → **Werkstoff** → Festigkeitswerte
→ Materialkennwerte
- *Tribologie*: Beanspruchungskollektiv { X } → **Systemstruktur** → Reibung, Verschleiß { V }
→ Systemkennwerte

Daraus resultiert die in diesem Handbuch angewendete Methodik zur Reibungs- und Verschleißanalyse von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen, siehe **Bild 2.17**.

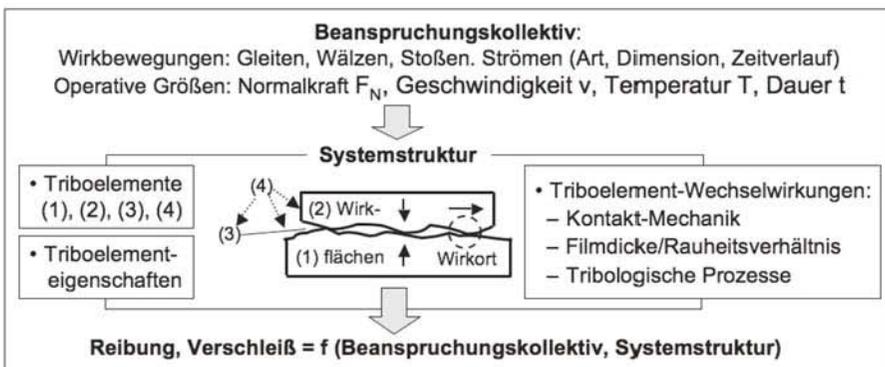


Bild 2.17 Systemmethodik zur Reibungs- und Verschleißanalyse

3 Tribologische Beanspruchung

Der Begriff tribologische Beanspruchung kennzeichnet die Beanspruchung der Oberfläche eines festen Körpers durch Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers. Wie alle tribologischen Prozesse hat auch eine tribologische Beanspruchung eine duale Natur: sie ist einerseits erforderlich für die technisch nutzbare Umsetzung von Energie-, Stoff- oder Signalgrößen über Wirkflächen in tribotechnischen Systemen; andererseits sind tribologische Beanspruchungen stets mit Reibung verbunden und können zu Verschleiß führen. Die Analyse tribologischer Beanspruchungen muss sowohl den Aufbau technischer Oberflächen und ihre Physik und Chemie als auch geometrische, kinematische, kräfte-mäßige, energetische und thermische Verhältnisse in Kontaktgrenzflächen untersuchen.

3.1 Technische Oberflächen

3.1.1 Aufbau technischer Oberflächen

Technische Oberflächen stellen die geometrische Begrenzung technischer Bauteile dar. Während Werkstoffangaben für technische Bauteile z. B. bezüglich chemischer Zusammensetzung, Gefüge, Festigkeit, sich auf den Werkstoff als ganzes beziehen, zeichnen sich Werkstoffoberflächen gegenüber dem Werkstoffinneren durch wesentliche Unterschiede aus.

Nach der Festkörperphysik lässt sich die Oberfläche kristalliner Stoffe idealisiert als Abbruch eines mehr oder weniger periodischen Kristallgitters ansehen. Hierbei verursachen die Elektronen an der Begrenzung des periodischen Gitter-Potentials bzw. die unangesättigten Bindungen der Oberflächenatome charakteristische Umordnungen. Durch Wechselwirkungen des Werkstoffs mit den Umgebungsmedien können Veränderungen der Oberflächenzusammensetzung und ein Einbau von Bestandteilen des Umgebungsmediums stattfinden. Je nach Reaktivität des Grundwerkstoffs kann eine Physisorption (Adsorptionenthalpie $< 0,4 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$) über van-der-Waals-Bindungen oder eine festere Chemisorption (Adsorptionenthalpie $> 0,4 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$) mit kovalenten oder ionischen Bindungsanteilen erfolgen (Wuttke, 1986). Bei metallischen Werkstoffen werden im allgemeinen mit Hilfe des Luftsauerstoffs Oxidschichten aufgebaut und darauf andere gasförmige oder flüssige Verunreinigungen physis- oder chemisorbiert.

Außerdem ist der Einfluss der Fertigung zu beachten. Spanend bearbeitete und umgeformte Oberflächen zeigen im Vergleich mit dem Grundwerkstoff in der Oberflächenzone folgende Änderungen:

- unterschiedliche Verfestigung,
- Aufbau von Eigenspannungen,
- Ausbildung von Texturinhomogenitäten zwischen Randzone und Werkstoffinnerem.

Der Schichtaufbau technischer Oberflächen ist für das Beispiel metallischer Werkstoffe schematisch vereinfacht in **Bild 3.1.1** wiedergegeben (Schmaltz, 1936).

Bei der Charakterisierung technischer Oberflächen werden von innen nach außen drei Bereiche unterschieden:

- Grundwerkstoff
- innere Grenzschicht
- äußere Grenzschicht

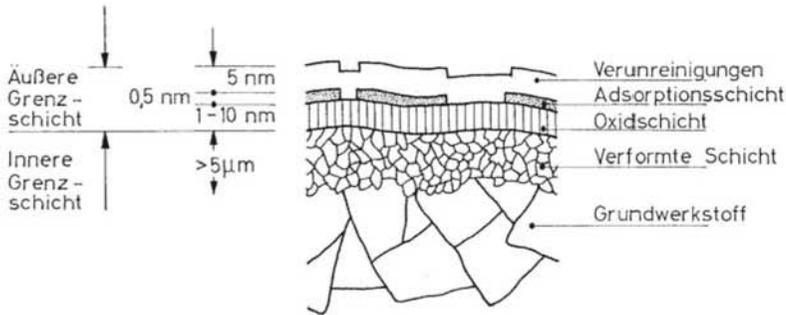


Bild 3.1.1 Aufbau technischer Oberflächen: schematische Darstellung des Querschnitts einer Metalloberfläche

Die innere Grenzschicht besteht in Abhängigkeit vom Fertigungsverfahren aus einer an den Grundwerkstoff anschließenden Verformungs- oder Verfestigungszone. Die äußere Grenzschicht besitzt meist eine vom Grundwerkstoff abweichende Zusammensetzung und kann aus Oxidschichten, Adsorptionsschichten und Verunreinigungen bestehen.

Wichtig für die Kontaktvorgänge bei tribologischen Beanspruchungen sind besonders die im folgenden kurz dargestellten Unterschiede zwischen Grundwerkstoff und Grenzschichtbereichen technischer Oberflächen. Der Begriff „Oberfläche“ umfasst dabei die in Bild 3.1.1 dargestellten Grenzschichtbereiche.

Chemische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung von Oberflächen kann sich erheblich durch den Einbau von Bestandteilen des Umgebungsmediums von der des Grundwerkstoffs unterscheiden. Zu beachten ist, dass neben den Einflüssen des Umgebungsmediums auf die Zusammensetzung technischer Oberflächen bei Legierungen auch eine Anreicherung von Legierungsbestandteilen aus dem Werkstoffinneren an der Oberfläche erfolgen kann (Oberflächensegregation). So wurde z. B. bei einer Kupfer-Aluminium-Legierung mit einem volumenbezogenen Al-Anteil von 1 % eine 6,5-fach höhere Al-Konzentration an der Oberfläche festgestellt (Buckley, 1981). Oberflächenanreicherungen von Legierungsbestandteilen, die ein Mehrfaches der Volumenkonzentration erreichen können, wurden z. B. auch in den folgenden Systemen beobachtet: Nickel in Eisen, Aluminium in Eisen, Zinn in Kupfer, Kupfer in Nickel, Gold in Kupfer, Silber in Gold, Silber in Palladium, Platin in Osmium (Buckley, 1980). **Bild 3.1.2** illustriert die Unterschiede der chemischen Zusammensetzung äußerer Grenzschichten und Grundwerkstoffe anhand von Tiefenprofilen, die mit der Auger-Elektronenspektroskopie (AES) bestimmt wurden (siehe Abschnitt 8.7.2). Das AES-Tiefenprofil-Diagramm (a) zeigt, dass z. B. bei einer Kupplungs-Druckscheibe aus Grauguss direkt auf der Oberfläche eine zum Grundwerkstoff schnell abfal-