

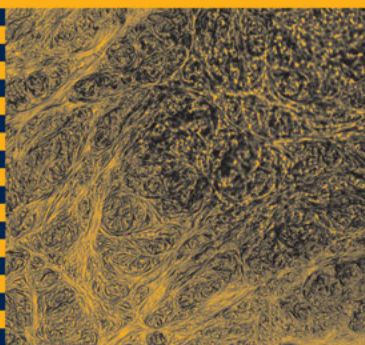
Erik Kuhn

Zur Tribologie der Schmierfette

Eine energetische
Betrachtungsweise des Reibungs-
und Verschleißprozesses

2., neu bearbeitete
und erweiterte Auflage

Mit 183 Bildern



expert  verlag®

Erik Kuhn

Zur Tribologie
der Schmierfette

Dieses Buch ist in Dankbarkeit für die vielen, vielen geführten Diskussionen

meiner Frau Kerstin

*und unseren Kindern
Josepha und Leonhard*

gewidmet.

Erik Kuhn

Zur Tribologie der Schmierfette

Eine energetische Betrachtungsweise
des Reibungs- und Verschleißprozesses

Prof. Dr.-Ing. Erik Kuhn

2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 183 Bildern

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://www.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the internet at <http://www.dnb.de>

ISBN 978-3-8169-3339-7

2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2017

1. Auflage 2009

Bei der Erstellung des Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen; trotzdem lassen sich Fehler nie vollständig ausschließen. Verlag und Autoren können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen. Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autoren dankbar.

© 2009 by expert verlag, Wankelstr. 13, D-71272 Renningen
Tel.: +49 (0) 71 59-92 65-0, Fax: +49 (0) 71 59-92 65-20
E-Mail: expert@expertverlag.de, Internet: www.expertverlag.de
Alle Rechte vorbehalten
Printed in Germany

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. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Preface to the second edition

Despite lubricating greases are widely used in many specific applications, their market only constitutes a very low percentage of the total amount of lubricants processed in the world. This fact may be one of the reasons why, up to now, innovation and research on lubricating grease formulations and related functional properties are still limited. On the other hand, it is worth to mention that the mechanical response of greases in a lubricated contact is not yet fully understood. This is probably due to its complex rheological behaviour, in comparison with other liquid lubricants, which decisively determines the tribological process. In this process, the highly-structured multi-phase grease microstructures play a key role, where different energetic phenomena may arise.

In the 2nd edition of this book, *On the Tribology of Lubricating Greases: An energetic approach of friction and wear*, which I am very pleased to introduce, the general idea is to consider the tribological process in a grease lubricated contact an energy determined process. In this sense, the classical definitions for friction and wear have been overcome to be expanded and supported on energy transformations. For this reason, not only wear and friction in the surface of lubricated materials must be taken into account but also internal lubricating grease wear and friction, which lead to a disturbance in the energy equilibrium. The innovative concepts introduced and the efforts to apply Thermodynamics to such complex systems like microstructured lubricants under friction make this book especially interesting to scientists, technologists and experts, in general, devoted to the study of Tribology and lubricating greases in particular. The book starts with a brief introduction and energy-based definitions of several tribological terms (chapters 1 & 2), which are followed by a historical overview of lubricating greases, from the traditional ones to the most recent advances in formulation, including biogenic greases, as well as most common tribological and rheological techniques and methods to characterize these particular lubricants (chapter 3). An introduction to the energetic approach to describe friction and wear in traditional tribological contacts and an extension of this approach to cover novel concepts and different contacts or flows are exposed in chapters 4 and 5, respectively. Finally, two new chapters (6 & 7) appear in this 2nd edition, where the author introduces a more-in-deep thermodynamic interpretation of the frictional and wear processes, essentially supported in the entropy concept, and goes through the more recent investigation in this field.

I do not have any doubt that this book will enhance the interest of the scientific and technical community for the Tribology of lubricating greases and will contribute to elucidate the understanding of the energetic processes arisen in a grease-lubricated contact.

Jose' M. Franco
University of Huelva

Preface to the second edition

Friction influences many of our daily activities both at the individual, as well as, at the industrial level. At the dawn of time, man attempted taming the phenomenon. A highlight of success was learning to make fire by rubbing bark. Despite that singular success, humans still encounter considerable difficulty in dealing with the negative influence of friction. To date, the struggle against friction-induced resistance to motion and the associated phenomenon, wear, continues.

Our modern world depends on conventional sources of energy. This dependency highlights the crucial need to mitigate the detrimental consequences of friction and wear. Friction continues to deplete a considerable portion of the gross national product of many advanced industrial nations. It is responsible for around 20% of total fuel consumption in engines, close to 50% within the rail road industry, and as high as 80% of power consumed in textile industry. Considerable scientific effort, therefore, continues to target the essence of the phenomenon and to devise pathways toward mitigating its detrimental effects.

Investigation of friction and wear, i.e. what came to be coined as Tribology, has developed along two principal routes. The first is the material approach, whereas the second is the lubrication approach. The material approach advocates the development of material structures (alloys, coatings, surface treatments, etc.) capable of reducing friction and withstanding wear upon application. The second approach meanwhile looks into how to formulate and enhance lubricants, and greases, capable of achieving complete separation of complying surfaces, while themselves being resistant to degradation due to friction energy dissipation and wear particle contamination. Often both approaches find application upon developing practical engineering systems entailing relative motion between surfaces (e.g. engines, transmissions, knee replacements, bearings, etc.).

Around the second half of the twentieth century, an alternative view of friction and wear started to emerge. This view, which has its roots in the science of thermodynamics, considers that changes within the volume affected by rubbing are a response to the work introduced due to friction. Wear also is considered a response that initiates energy dissipation. The exact origin of this view is not clear. One, however, can trace the essence of that view to the works of German and Russian physicists and engineers in the early decades of the twentieth century. One advantage of an energy formulation of friction and wear is the possibility of linking damage observed in rubbing systems to transport properties of the materials involved. Consequently, behaviour of rubbing solids may be interpreted in light of their intrinsic properties. Such interpretation is an important step toward prognostic mapping of performance of tribo-systems.

Being of relatively recent origin, the energy approach while being a subject of many archival papers is not yet a subject of textbooks or research monographs. No book, to date, offers comprehensive exposure of the energetic description of tribological phenomena. Additionally, manuscripts that discuss friction and wear as they relate to functional integrity of greases are yet to be authored. This book, *Tribology of Lubrication Greases*, therefore, is a welcomed addition to tribology literature.

The book treats degradation of greases due to friction from an energy perspective.

In doing so, the author adopts the view that tribo-systems are energy driven entities. Accordingly, the evolutionary path of such systems is essentially a quest for stable equilibrium. That is, rates, intensities, and order of events and reactions during operation progress towards stable equilibrium (or at least a stable steady state). Friction and wear under these provisions assume an alternative significance that stems from their thermodynamic impact on reaching an equilibrium state. They specify the building blocks of an activation-passivation scheme that defines the evolution of the rubbing process under the particular loading constraints. Friction, within this view is, therefore, a mechanism of supplying energy which alter the stable equilibrium position of a system, while wear represents an energy dissipation mechanism that leads to entropy generation whence contributing to passivation (and eventually stable equilibrium if possible).

Unique to the current manuscript is its departure from conventional exposure of the theory of wear. Rather than discussing wear within the context of surface damage and mass loss, the book considers wear from the point of view of the structural integrity of the lubricant. This rather unique view provides for comprehensive system-analysis of rubbing pairs. Additional interesting and novel features are present within the manuscript. These are left for the reader to discover.

In closing, I would like to commend Professor Kuhn for his valuable effort and to express my thanks for providing the opportunity to introduce this worthy contribution to tribology literature.

Hisham A. Abdel-Aal
Drexel University, Philadelphia
September 27, 2016

Vorwort zur ersten Auflage

Das vorliegende Buch trägt den Titel : “Zur Tribologie der Schmierfette“ und unterscheidet sich damit grundsätzlich von jeder früheren klassischen Rheologie der Schmierfette, obwohl deren Erkenntnisse auch eine entsprechende Beachtung bzw. Darstellung finden. Mit dem Begriff der Tribologie ist das Schmierfettverhalten erstmalig einbezogen in die umfassende Sicht des Verhaltens eines tribologischen Systems mit den Aspekten der Reibung und des Verschleißes bei Anwendung eines Schmierfettes.

Es werden eingangs einige Definitionen geboten, die die Tribologie als solche, das tribologische System und, vom Autor neu formuliert, den tribologischen Kontakt beschreiben. Es folgen die bekannten Begriffserklärungen zur Reibung und deren Zuständen und zum Verschleiß, und weiter, wieder vom Autor neu formuliert, zum sogenannten rheologischen Verschleiß bezogen auf einen strukturviskosen Schmierstoff als Bestandteil des tribologischen Systems, welches einem tribologischen Prozess unterliegt.

Im Rahmen der Beschreibung der Schmierfette und der bekannten Testverfahren geht der Autor dann auf spezielle Prüfverfahren ein, um dem übergeordneten tribologischen Aspekten gerecht werden zu können. Die Nutzung der von HOLWEGGER entwickelten Schmierfett-Topographie erlaubt die Erfassung der sich besonders auf die Dichteverteilung des Verdickers auswirkende tribologische Beanspruchung des strukturviskosen Schmierstoffes. Die Betrachtung des Geschehens im fettgefüllten Schmierspalt konzentrierter Kontakte entspricht dem Anliegen des Buches, wird aber auch umfassend ergänzt durch die Beschreibung des rheologischen Verhaltens von Schmierfetten.

Mit den Abschnitten Reibung und Verschleiß im fettgeschmierten Kontakt analysiert und beschreibt der Autor Grundlagenwissen mit dem er während seiner Assistentenzeit am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie der Magdeburger Universität direkt in Verbindung stand und das er als Doktorand auch selbst bereicherte.

Besonders erkannte er das Potential, welches in der im Buch auch dargestellten energetischen Betrachtungsweise tribologischer Prozesse steckt, denn er erfasste wohl erstmalig die Energieaufwendungen beim Scheren des Schmierfettes im Schmierspalt, welche entsprechend der eintretenden Strukturveränderung zum rheologischen Verschleiß führen. Mit diesem schöpferischen Beitrag, der durch eine Reihe experimenteller Untersuchungen untermauert wird, bietet der Autor auch neue rechnerische Ansätze zu einer quantitativen Bewertung des tribologischen Geschehens im fettgeschmierten tribologischen System.

Möge das Buch, welches progressive Erkenntnisse einschlägiger Wissenschaftler aufgreift, sowohl interessierte Leser als auch tatkräftige Mitstreiter finden.

G. Fleischer, ehemals Lehrstuhlinhaber in Magdeburg

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	6
2	Definitionen und Systembetrachtungen	7
2.1	Definitionen	7
2.1.1	Allgemeine Begriffe	7
2.1.2	Reibung	8
2.1.3	Verschleiß	9
2.2	Systembetrachtungen	10
2.2.1	Terminologie, Einordnung und Abgrenzung	11
3	Schmierfette	14
3.1	Historie und Definition	14
3.1.1	Zur Historie	14
3.1.2	Zur Definition der Schmierfette	16
3.2	Ausgewählte Schmierfettarten	18
3.2.1	Arten der Verdicker	18
3.2.2	Arten der Grundöle	19
	Mineralöle	19
	Syntheseöle	20
	Biologisch schnell abbaubare Grundöle	20
3.3	Komplett biogene Schmierfette	22
3.4	Klassifikation der Schmierfette	23
3.4.1	Metallseifenschmierfette	24
	Einfache Seifenfette	24
	Komplexseifenfette	26
3.5	Prüfmethoden	27
3.5.1	Genormte Versuchseinrichtungen	27
	Konuspenetration (DIN 150 2137)	28
	Schmierfettgebrauchsdauer: FAG FE9 (DIN 51821)	28
	Shell-Vierkugel-Apparat (DIN 51350)	29
	Korrosionsschutzeigenschaften (DIN 51802)	29
	Timken- Prüfeinrichtung	30
3.5.2	Andere Versuchseinrichtungen	30
	Axiallager-Oszillationstest (Fafnir)	31
	KSM-Kugelfischer-Spengler-Maschine	31
	SKF-ROF-Prüfeinrichtung	31
3.6	Allgemeines tribologisches Verhalten der Schmierfette	32
3.6.1	Allgemeines	32
3.6.2	Tribometrie zur Untersuchung von Schmierfetten	33
	Kugel-Scheibe Tribometer der HAW Hamburg	34
	Fadenreiß-Prüfstand der Universität Luleå	34
	Kugel-Stoß-Prüfeinrichtung der Universität Luleå	34

	Filmdicken-Prüfeinrichtung des Imperial College London	35
	Spindellagerprüfstand des IMKT der Universität Hannover	35
	Gelenklagerprüfstand des IMK der Universität Magdeburg	36
	Pendeltribometer der HAW Hamburg	36
	Tribomodul am Rheometer	37
	Adhäsions- und Kohäsionsverhalten von Schmierfetten	37
3.6.3	Strukturuntersuchungen	37
	Beispiele für die unterschiedliche Struktur ausgewählter Verdicker (Feststoffe)	38
	Schmierfett-Topographie	39
3.6.4	Ausgewählte EHD-Untersuchungen	42
	Allgemeines zur Elastohydrodynamik (EHD)	42
	Elastohydrodynamischer Kontakt bei Fettschmierung	44
	Allgemeines	44
	Der fettgefüllte Spalt	47
	Schmierfilmdickenuntersuchung	48
	Einfluss der Seife auf den Filmaufbau	53
	Schmierfettfadenbildung	55
	Schmierstoffrückfluss im EHD-Kontakt	56
	Filmdicke bei Schmierfettalterung	59
3.7	Rheologisches Verhalten der Schmierfette	59
3.7.1	Klassifizierung des Fließverhaltens von Stoffen	60
	Newtonsche Flüssigkeiten	60
	Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten	61
	Zeitunabhängiges Nicht-Newtonisches Fließverhalten	61
	Zeitabhängiges Nicht-Newtonisches Fließverhalten	63
3.7.2	Beschreibung der Rheologie der Schmierfette	65
	Strukturviskoses Fließverhalten	65
	Modelle des plastisch-strukturviskosen Fließverhaltens	69
	BINGHAM-Modell	69
	Gleichung von CASSON	71
	BAUER-Gleichung von Åström/Höglund	73
	Modifiziertes BINGHAM-Modell von Bair	75
	HERSCHEL-BULKLEY-Gleichung	78
	SISKO-Gleichung	80
	STANULOV et al.-Gleichung	82
	Modelle des zeitabhängigen Fließverhaltens	84
	BAUER-Gleichung	86
	CZARNY-Gleichung	86
	SPIEGEL et al.-Gleichung	88
	Eigener empirischer Ansatz	93
3.7.3	Bemerkungen zur Rheometrie bei der Untersuchung von Schmier- fetten	94
	Rotationsmessungen	95

	Oszillationsmessungen	97
	Zum Verlauf der Module ausserhalb des LVE-Bereiches	99
4	Die tradierte Energetische Betrachtungsweise	101
4.1	Allgemeine Reibungsbetrachtungen	101
	Lösungsalgorithmus einer tribologischen Aufgabenstellung	104
4.2	Die Kontaktgeometrie	105
4.2.1	Hauptkontaktfälle	108
4.2.2	Kontaktmodelle	108
	Kontaktmodell Kugel-Ebene	110
	Kontaktmodell Kugel-Kugel	112
4.3	Die Festkörperreibung	115
4.3.1	Energiebilanz bei Festkörperreibung	116
4.3.2	Grundlagen zur energetischen Festkörperreibungsberechnung	117
	Reibungsenergie	117
	Verformungsenergie dichten mittels Mikroprüfung	118
	Plastische Verformung	118
	Ritzvorgang	120
	Energiedichten aus makroskopischer Prüfung	123
	Aufzuwendende Energiedichte - elastische Deformation	124
	Aufzuwendende Energiedichte - plastische Deformation	125
	Spanende Deformation	126
	Trennen zwischenstofflicher Verbindungen	126
	Stoßartige plastische Deformation (Furchen)	127
	Anzahl gleichartiger Energieanteile	128
	Beanspruchte Volumina	129
4.4	Die Flüssigkeitsreibung	131
4.5	Der Festkörperverschleiß	131
4.5.1	Energetische Verschleißgrundgleichung	131
4.5.2	Scheinbare Reibungsenergie dichte	133
4.5.3	Kritische Anzahl der Kontaktierungen	136
	Nutzung der Wöhlerkurve	136
	Ermittlung eines verschleißführenden Kontaktanteiles	137
	Anwendung des kumulativen stochastischen Prozesses	138
	Energieakkumulation bei der Bildung von n_k	140
5	Die Erweiterung der energetischen Betrachtungsweise	141
5.1	Kontaktgeometrie des fettgefüllten Spaltes	141
5.2	Flüssigkeitsreibung im Fettfilm	143
5.2.1	Energieaufwendungen bei Fettschmierung	143
	Experimentelle Möglichkeit zur Simulation des Scherprozesses	143
	Versuchseinrichtung	143
	Aufzuwendende Energiedichte beim Schervorgang	144
	Aufzuwendende Energiedichte bis zum Fließen	146

	Aufzuwendende Energiedichte bei Normalbeanspruchung	148
	Möglichkeiten zur Untersuchung des Kohäsionsverhaltens	150
	Versuchseinrichtung	151
5.2.2	Beanspruchte Volumina	151
5.3	Die Mischreibung	153
5.4	Die Erweiterung des Verschleißbegriffes	156
5.5	Der Schmierstoffverschleiß	159
5.5.1	Historische Betrachtung	159
5.5.2	Rheologischer Verschleiß - allgemeine Darstellung	160
5.5.3	Verknüpfung des Reibungs- und Verschleißprozesses	161
	Viskositätsrate	161
	Scheinbare rheologische Reibungsenergiedichte e_{Rrheo}^* - eine Ana-	
	logiebetrachtung	162
	Energieakkumulationsfaktor	164
	Kritische Beanspruchungszeit	164
	Schmierfett-Topographie und Verschleiß	167
	Kontaktmodell für den rheologischen Verschleiß	167
	Fettschmierung und Festkörperverschleiß	169
5.6	Experimentelle Arbeiten zum rheologischen Verschleiß	172
5.6.1	Allgemeines	172
5.6.2	Die entwickelte Versuchsprozedur	173
5.6.3	Versuchsergebnisse	174
5.7	Empirischer Ansatz zur energetischen Beschreibung des	
	Schmierfettverschleißes	176
6	Thermodynamische Untersuchungen in der Tribologie	178
6.1	Arbeiten mit dem ersten Hauptsatz	178
6.1.1	Allgemeine Betrachtungen	178
6.1.2	Thermodynamische Interpretation der scheinbaren Reibungsener-	
	giedichte	180
6.1.3	Thermodynamisches Grundgesetz des tribologischen Verschleißes .	181
6.1.4	Triboergodynamik	182
6.2	Die Nutzung der irreversiblen Thermodynamik zur Modellierung des Ver-	
	schleissprozesses	183
6.2.1	Einführung	183
6.2.2	Bilanzgleichung	186
6.2.3	Verschleiß und irreversible Thermodynamik	187
6.2.4	Das Entropieproduktions-Verschleiß Theorem	189
7	Thermodynamische Untersuchungen zum Schmierstoffverschleiß	193
7.1	Thermodynamische Untersuchungen am	
	beanspruchten Schmierfett - Volumenelement	193
7.1.1	Allgemeine Betrachtungen	193
7.1.2	Modellvorstellungen	193

7.1.3	Experimentelle Untersuchungen zur energetischen Situation des beanspruchten Schmierfettes	195
7.1.4	Anwendung des Verschleiß-Entropieproduktions-Theorems auf den Schmierfettverschleiß	198
	Abbildungsverzeichnis	219
	Stichwortverzeichnis	224

1 Einführung

Reibungs- und Verschleißphänomene gehören zu den uns begleitenden Naturerscheinungen und werden von den Menschen schon immer beobachtet und erfahren. Seit langer Zeit ist diese Beobachtung und bloße Erfahrung einem fragenden Ergründen gewichen und nicht selten haben daraus gewonnene Erkenntnisse der Menschheitsentwicklung spürbare Impulse gegeben.

Die lange Tradition dieses fragenden Ergründens auch in der Tribologie hat auf der einen Seite zur Herausbildung einer Vielzahl von wissenschaftlichen Auffassungen, unterschiedlicher Schwerpunktsetzungen und Herangehensweisen bei der Behandlung der Phänomene *Reibung* und *Verschleiß* geführt. Dies verwundert nicht, wenn man den Versuch unternimmt sich die Komplexität ablaufender Prozesse im tribologischen Kontakt zu verdeutlichen

Auf der anderen Seite sind eine unüberschaubare Anzahl technischer Entwicklungen durch die tribologische Forschung möglich geworden.

Für die Betrachtung des Reibungs- und Verschleißprozesses, insbesondere für den fettgeschmierten Kontakt, werden in diesem Buch eine Reihe von Vorschlägen unterbreitet, Vorstellungen erläutert und Überlegungen dargestellt. Sie vertreten die Auffassung, dass wir in tribologischen Systemen Systeme beobachten, die den der Natur immanenten Bestrebungen energetisch stabile Zustände zu erlangen oder wiederzuerlangen folgen [1]. D.h. Systeme, die einen (unter Umständen) gesteuerten Energieeintrag erfahren und dieser in eine kaum kontrollierbare Wandlung gestreut wird. [2] leitet einen Grundsatzartikel mit der Feststellung ein *Als ein am wenigsten umstrittenes Ergebnis der gesamten Entwicklung der Wissenschaft über Reibung und Verschleiß gilt die Schlussfolgerung, dass ... die Reibung ein irreversibler thermodynamischer Prozess ist ...*

Untersuchungsgegenstand der hier publizierten Ausführungen ist das Verhalten des allgemeinen tribologischen Systems bei Anwesenheit des Zwischenstoffes *Schmierfett* und das Verhalten des tribologischen Sub-Systems *beanspruchtes Schmierfett*. Beobachtet werden die Energieaufwendungen beim Reibungsprozess und die darin resultierenden Verschleißwirkungen. Die Komplexität des Geschehens und die möglichen Wechselwirkungen im System, lassen (zunächst) nur eine sehr begrenzte Anzahl berücksichtigter Einflussgrößen zu.

Neben der Darstellung von Forschungsergebnissen einer Vielzahl von Wissenschaftlern, möchte das Buch Ideen aufzeigen, neue Wege bei der Behandlung einer anspruchsvollen Aufgabe ebnen, grundsätzliche Fragestellungen formulieren und den Versuch unternehmen, deren Beantwortung zu beginnen.

2 Definitionen und Systembetrachtungen

2.1 Definitionen

2.1.1 Allgemeine Begriffe

Zur Behandlung des tribologischen Prozesses und mit Blick auf den Untersuchungsgegenstand dieses Buches, werden unter diesem Punkt einige wichtige Definitionen aufgeführt und den nachfolgenden Kapiteln vorangestellt. Dabei sollen nicht automatisch die in den DIN-Blättern (wenngleich nicht mehr gültig, sind die Inhalte in die Arbeitsblätter der Gesellschaft für Tribologie übernommen worden) festgelegten Definitionen wiedergegeben werden, sondern es erfolgt eine Abwägung zwischen den aus der Literatur bekannten Erklärungen und eigenen Formulierungen.

So unterschiedlich und vielfältig die Herangehensweisen der einzelnen Forscher an den Reibungs- und Verschleißprozess sind, so unterschiedlich sind auch die entwickelten Definitionen und gebrauchten Begriffe. Für die wissenschaftliche Aufklärung von Reibung und Verschleiß hat sich Mitte der sechziger Jahre (Jost-Report 1966 [3]) der Begriff *Tribologie* (vom griechischen *tribos*= reiben) durchgesetzt. Je nach Erkenntnisstand und Sichtweise werden sich natürlich auch bislang gebräuchliche Definitionen und Interpretationen ändern müssen.

Für die Bezeichnung der Wissenschaftsdisziplin ist die nach DIN 50323 gegebene Definition gebräuchlich. Danach gilt :

Definition 2.1 (*Tribologie-GfT*) *Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung.*

Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein.

Grundsätzlich untersucht man Ursache und Wirkung im tribologischen Prozess, d.h. eine Analyse teilt sich in die Reibungsmechanismen und den Verschleißprozess. Eine für die Intention dieses Buches wohl noch wichtigere begriffliche Festlegung der Tribologie ist von KOSTJETZKI[2] vorgenommen worden und lautet:

Definition 2.2 (*Tribologie -Kosjetzki*) *Die theoretische Grundlage der Tribologie ist eine strukturenergetische Konzeption, die auf den modernen Erkenntnissen der theoretischen Physik im Bereich der Selbstorganisation und Bildung neuer Phasen dissipativer Strukturen beruht.*

Aus den im Buch dargestellten und erläuterten Arbeiten folgt auch

Definition 2.3 (*Tribologie*) *Die Wissenschaftsdisziplin Tribologie untersucht das Bestreben energetisch beanspruchter und aus dem thermodynamischen Gleichgewicht gebrachter tribologischer Systeme, eine stabile Situation (stationäres-Nichtgleichgewicht) wiederzuerlangen.*

Die Abstraktion einer beliebigen Reibpaarung zur Untersuchung der beteiligten Elemente und deren Wechselwirkungen, stellt das vereinfachte tribologische System nach [4] dar (Abb.4 und auch Abb.2).

Definition 2.4 (*Tribologisches System (Auszug)*) Die am Verschleißmittelbar beteiligten Bauteile und Stoffe werden als Elemente des Tribosystems bezeichnet. Sie charakterisieren zusammen mit ihren tribologisch wichtigen Eigenschaften und Wechselwirkungen die Struktur des Tribosystems . . .

Dieses vereinfachte tribologische System besitzt 4 Systemelemente: Reibkörper 1, Reibkörper 2, den Zwischenstoff und das Umgebungsmedium. Ausarbeitungen zur Systemanalyse tribologischer Prozesse findet man unter anderem bei CZICHOS [5] [6], FLEISCHER [7], [8], SALOMON [9] Für eine Reibungs- und Verschleißanalyse sind in vielen Fällen kontaktgeometrische Untersuchungen unerlässlich. Es wird definiert [10]

Definition 2.5 (*Tribologischer Kontakt*) Ein tribologischer Kontakt beschreibt die geometrische Lage von Reibkörpern zueinander, bei denen im Sinne des tribologischen Prozesses Wechselwirkungen auftreten.

2.1.2 Reibung

Die Betrachtung eines tribologischen Systems aus der Sicht der hier angestellten Untersuchungen liefert [11]:

Definition 2.6 (*Reibung*) Reibung ist eine Energiezufuhr (und damit eine Energieaufwendung) in ein tribologisches System .

Eine sehr hilfreiche und nachvollziehbare Vorstellung liefert eine Definition nach FLEISCHER [7] .

Definition 2.7 (*Reibung*) Reibung ist der Verlust an mechanischer Energie beim Ablaufen, Beginnen oder Beenden einer Relativbewegung sich berührender Stoffbereiche.

Eine grundsätzliche Definition für die Reibung ist damit gegeben. Es sollen nun die vor dem Hintergrund der Untersuchungsproblematik relevanten detaillierteren Begriffe erläutert werden.

Es wird prinzipiell zwischen Reibungszuständen und Reibungsarten unterschieden. Für die Einteilung in Zustände der Reibung ist nach DIN 50323 der Aggregatzustand der beteiligten Stoffbereiche das Kriterium. Damit ergeben sich die Festkörperreibung, die Flüssigkeitsreibung und die Gasreibung. Definitionsgemäß sind auch alle Mischformen dieser Zustände möglich. Hier soll in besonderem Maße die Mischreibung aus den Zuständen der Festkörperreibung und Flüssigkeitsreibung behandelt werden.

Die Definition der Festkörperreibung nach der DIN, engt die betrachteten Mechanismen auf den Umstand eines direkten, unmittelbaren Kontaktes ein. Auch hier soll die Definition nach [7] vorgezogen werden.

Definition 2.8 (*Festkörperreibung*) *Reibungszustand bei dem der maßgebende Stoffbereich Festkörpereigenschaften besitzt.*

Hinter dieser Definition steckt das Bemühen, Verformungs- und Trennvorgänge als Energieaufwendungen zusammenzuführen. Die sehr detailliert vorgenommene Differenzierung in *Reine Festkörperreibung* und *Haftschichtenreibung*, erscheint sinnvoll, wird hier aber nicht weiter ausgeführt.

Sind am tribologischen Prozess nicht nur zwei Festkörper beteiligt, sondern ist die Kontaktbildung durch das Vorhandensein eines Zwischenstoffes (Schmierstoff) beeinflusst, so wird sich der Zustand der Flüssigkeitsreibung oder Mischreibung ausbilden. Ganz in Anlehnung an die vorstehende Definition folgt

Definition 2.9 (*Flüssigkeitsreibung*) *Reibungszustand bei dem der maßgebende Stoffbereich Flüssigkeitseigenschaften aufweist (ebenfalls [7]).*

Der in der DIN gegebene Zusatz, dass dieser Zustand auch für eine die Festkörper trennende Schmierstoffschicht zutreffend ist, soll hier als zum Verständnis nicht erforderlich interpretiert werden.

Der Zustand der Gasreibung ist aus den aufgeführten Definitionen ableitbar und wird nicht näher beschrieben. Als ein gerade für die praktische Applizierung von großer Relevanz sich einstellender Reibungszustand wird die Mischreibung nachfolgend definiert. Die DIN weist hier allgemein auf Mischformen hin. FLEISCHER gibt in [12] eine Mischreibungsdefinition mit weitreichender Konsequenz.

Definition 2.10 (*Mischreibung*) *Mischform von mindestens zwei Reibungszuständen, die gleichzeitig nebeneinander auftreten.*

Die Interpretation dieser Definition liefert die Aussage, dass der Festkörperreibungsanteil bei der Mischreibung örtlich nicht alternativ zur Flüssigkeitsreibung, sondern neben- bzw. übereinander auftritt. Diese Modellvorstellung setzt somit einen Schmierfilmdurchbruch nicht notwendigerweise voraus. In der Argumentation stützt sich diese Definition u.a. auf den von GNILKE [13] nachgewiesenen Umstand, dass ein mechanisches Durchdrücken des Schmierfilmes bei Berücksichtigung des Druck-Zähigkeits-Effektes unmöglich ist (es existiert eine endliche Schmierschichtdicke).

Im Gegenteil der Zustand der Mischreibung bei geschlossenem Schmierfilm ist der bei geschmierten Paarungen am häufigsten anzutreffende Reibungszustand und ist dem *normalen* Betriebszustand zuzuordnen.

2.1.3 Verschleiß

Im Zusammenhang mit der gegebenen Reibungsdefinition 2.6 kann ausgeführt werden

Definition 2.11 (*Verschleiß*) *Verschleiß ist die Dissipation der im Reibungsprozess zugeführten Energie bei gleichzeitiger Produktion von Entropie.*

Oder anders ausgedrückt und der obigen Definition folgend gilt im tribologischen System [14]

Definition 2.12 (*Allgemeiner Verschleiß*) *Verschleiß ist eine infolge einwirkender Reibungsenergie auftretende Produktion von Irreversibilität und umfasst alle Elemente eines tribologischen Systems.*

Die Verschleißdefinition nach der früheren DIN 50323-2 legt bei der begrifflichen Bestimmung allgemeiner Art den Verschleiß als *fortschreitenden Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers . . . fest*

Für die Einbeziehung des Zwischenstoffes in eine Verschleißbeschreibung wird die Einführung eines Verschleißzustandes vorgeschlagen [15]:

Definition 2.13 (*Rheologischer Verschleiß oder Schmierstoffverschleiß*) *Infolge tribologischer Beanspruchung eintretende irreversible Strukturänderung beanspruchter Stoffbereiche eines strukturviskosen Schmierstoffes.*

Es sei noch einmal hervorgehoben:

- *Reibung ist eine Energiezufuhr in ein tribologisches System (und damit eine Energieaufwendung)*
- *Verschleiß ist die Dissipation der im Reibungsprozess zugeführten Energie bei gleichzeitiger Produktion von Entropie*

2.2 Systembetrachtungen

Eine umfassende Darstellung der Tribologie, sozusagen eine *ganzheitliche Betrachtung* zur Strukturierung dieser Wissenschaftsdisziplin wird mit den Arbeiten von [8] und [6] bzw. [5] versucht.

Sie geben mit Methoden der Systemanalyse eine Beschreibung des tribologischen Prozesses an und formulieren u.a. Aussagen zu dessen inhaltlicher Struktur. [8] bemüht zur Charakterisierung des Systembegriffes [16] und gibt folgende Merkmale an :

Ein System

- ist ein abgeschlossenes natürliches oder künstliches Gebilde, das sich aus einer Menge von Elementen zusammensetzt.
- besitzt eine bestimmte Struktur. Man versteht darunter die Kopplung der Elemente untereinander.
- besitzt eine Umgebung. Man versteht darunter die Menge der Systeme, die mit dem zu untersuchenden System gekoppelt sind.
- empfängt aus seiner Umgebung konkrete Größen (Input - Ursache).
- sendet an seine Umgebung konkrete Größen (Output - Wirkung).

Es wird deutlich, dass diese Merkmale auch auf ein tribologisches System zutreffen und [8] begründet, dass der Umstand zweier Grundgrößen wie Stoff und Energie (die empfangen, transformiert und abgegeben werden), tribologische Systeme als energetische Systeme charakterisieren. Eine graphische Umsetzung der aufgeführten Merkmale finden wir in Abb. 1 und CZICHOS führt aus, dass zwei wesentliche Unterschiede bei der Systembeschreibung mittels der Begriffe *Struktur* und *Funktion* beachtet werden müssen.

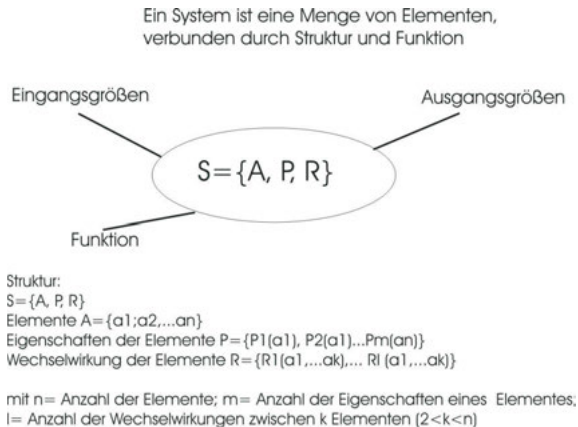


Abbildung 1: Systembegriff nach [5]

- Die Strukturbeschreibung ist eine interne Beschreibung, d.h. ein Versuch, das Verhalten des Systems aus den Elementen, ihren Eigenschaften und ihren gegenseitigen Wechselwirkungen zu verstehen.
- Die Funktionsbeschreibung ist dagegen eine externe Beschreibung, da sie das Verhalten des Systems in seinem Zusammenwirken mit der Außenwelt kennzeichnet.

Schwierigkeiten bei der Beschreibung der Korrelation von Eingangs- und Ausgangsgrößen bereitet der Umstand, dass die Struktur des System sich während des ablaufenden Prozesses (durch die Verschleißentstehung) als veränderlich zeigt. Dabei ist die Struktur eines tribologischen Systems charakterisiert durch die beteiligten Elemente, deren Eigenschaften und Wechselwirkungen .

2.2.1 Terminologie, Einordnung und Abgrenzung

Den bislang gegebenen Definitionen und Erläuterungen stellt FLEISCHER [7] noch weitere Betrachtungen zur Seite. Er unterscheidet die Begriffe *Tribotechnisches System*, *Tribologisches System* und *Tribologisches Modell*. Dabei erörtert er folgende Differenzierungen:

- **Tribotechnisches System** - ist ein technisches Teilsystem das in der Regel mehrere Reibstellen aufweist
- **Tribologisches System** - ist ein integrierter Bestandteil technischer oder biologischer Funktionsgruppen und verkörpert eine Reibstelle
- **Tribologisches Modell** - ist ein zum Erkenntnisgewinn ideell oder materiell realisiertes Tribologisches System, das eine Reibstelle mit ausgewählten Parametern widerspiegelt

Mit Blick auf den hier bearbeiteten Untersuchungsgegenstand erscheinen die ebenfalls in [7] gegebenen Überlegungen zu Sonderfällen des *Tribologischen Systems* interessant. Wenngleich nach Definition für ein Tribologisches System (Abb.4) zwei aktive Reibkörper vorliegen müssen, ist auch der Fall denkbar, dass ein Reibkörper als Stoffstrom auf den anderen einwirkt und dabei mit dem Umgebungsmedium eine Einheit bildet (gemeint ist z.B. die Tragfläche eines Flugzeuges während des Fluges). Ebenso in die Betrachtungen zum *Tribologischen System* einbeziehbar ist die Vorstellung, dass beide Reibkörper einen anderen als den festen Aggregatzustand aufweisen und Stoffbereiche eines z.B. Flüssigkeitsvolumens sind.

Dies träge für die u.a. in dem vorliegenden Buch angestellten Betrachtungen zur Flüssigkeitsreibung im Schmierfettfilm zu.

Es sei nun weiter ausgeführt:

Folgt man den Vorstellungen zu den Reibungszuständen und wird z.B. die Mischreibung als Vorhandensein von Festkörperreibungs- und Flüssigkeitsreibungsanteilen, die gleichzeitig aber nicht alternierend auftreten gemäß (Def.2.10) beschrieben, entsteht die Notwendigkeit der Formulierung eines *Subsystems* (Abb.(3)). Es ist die kleinste, die Basiseinheit der Systemmodellierung des tribologischen Prozesses.

Definition 2.14 (*Tribologisches Subsystem*) *Das tribologische Subsystem besteht aus zwei in Relativbewegung befindlichen, definierten Reibkörpern, die einen tribologischen Kontakt (gemäß Def. 2.5) bilden. Es ist innerhalb eines allgemeinen tribologischen Systems situiert und erhält aus ihm die Beanspruchung. Es wird erforderlich beim Vorhandensein beliebiger Mischreibungszustände.*

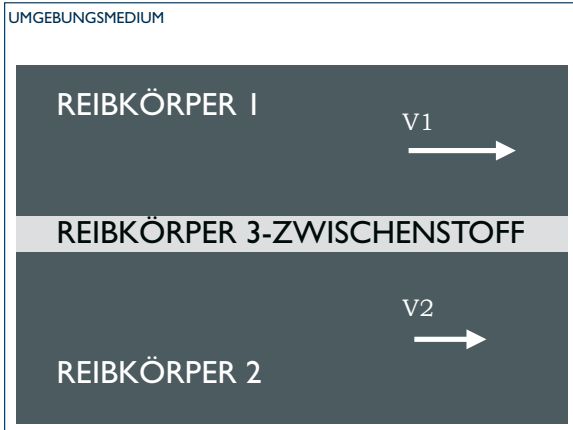


Abbildung 2: Struktur eines vereinfachten allgemeinen tribologischen Systems

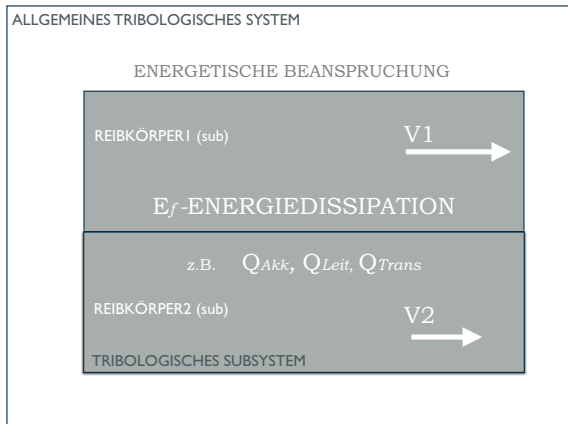


Abbildung 3: Das tribologische Subsystem (z.B Zwischenstoff)

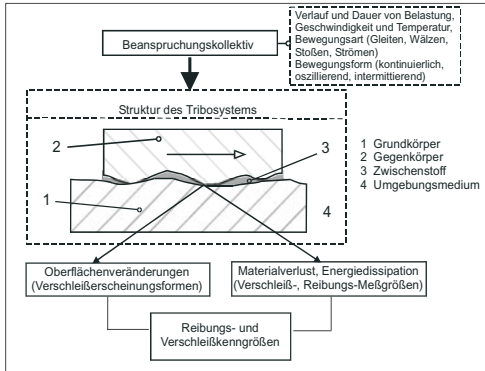


Abbildung 4: Schema eines tribologischen Systems nach [4]

3 Schmierfette

3.1 Historie und Definition

3.1.1 Zur Historie

Die ersten Anwendungen von Schmierfetten in der *technischen* Entwicklung sind kaum datierbar. Es ist zu vermuten, dass bereits um 2400 v.Chr. Schmierstoffe zu Reibungsminderung beim Transport großer Steinblöcke eingesetzt wurden. Aus der Zeit des Beginns der Zeitrechnung sind griechische und römische Wagen bzw. Streitwagen bekannt (Abbildung 5), deren Radlagerung unbedingt einer Schmierung bedurften. Diese Schmierstoffe, Öle wie Fette, waren wahrscheinlich tierischen oder pflanzlichen Ursprungs, also Olivenöle oder Schaf- bzw. Rindertalg [17].

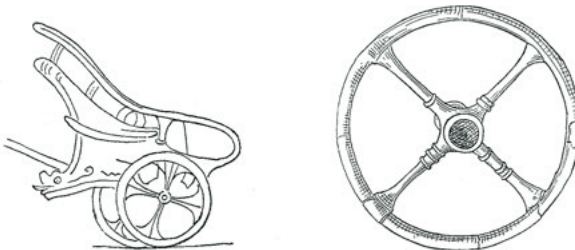


Abbildung 5: Griechischer Wagen und Rad aus Bronze (Beginn der Zeitrechnung) [18]

Wahrscheinlich wurden Öle und konsistentere Stoffe nebeneinander verwendet und weiterentwickelt. So waren die Achsen ägyptischer Wagen bereits um 1400 v. Chr. mit

Fett geschmiert. Eine Probe aus dem Kairoer Museum soll in überraschender Weise nicht nur auf ein pflanzliches oder tierisches Fett hingewiesen haben, sondern auf eine Kalkseife [19].

In der südspanischen Unversitätsstadt Huelva (Andalusien) ist ein im Durchmesser ca. 6m großes Schaufelrad aus em 2.Jhdt. aufgebaut, dass beim Eisenerzabbau unter Tage zur Entwässerung eingesetzt wurde (Abbildungen (6) und (7)). Die Förderräder



Abbildung 6: Anordnung von Förderrädern zur Entwässerung im Bergbau im 2. Jhdt., Modell Museo De Huelva, Andalusien

waren gleitgelagert (Metall/Holz) und vermutlich mit Wasser oder ähnlich den beschriebenen Radnaben mit einem visko-elastischen Schmierstoff versehen. Interessant ist auch der Umstand, dass die direkte Lagerstelle im Holztragwerk austauschbar war. Also eine gezielte Führung des Festkörperverschleißes auf den weicheren Reibpartner mit der Möglichkeit eines montagegünstigen Austausches des Verschleißteiles.

Eine interessante Ausarbeitung zur Geschichte der Schmierung finden wir bei [20]. Sie zeigt, dass im 17. Jhd. Holzteer für die Wagenschmierung benutzt wurde. Die Autoren deuten den in einem Stich von *Lucas Chranach d.Ä.* abgebildeten Behälter am hinteren Teil eines Holzwegens, als Schmierstoffbehälter. Dort wurden die zum Schmieren der Wagenachsen notwendigen Mittel mit sich geführt (siehe Bild 8).

Dies war eben eine *Schmiere*, die neben dem Hauptbestandteil Holzteer noch Zusätze wie Kienöl, Leinöl, Bienenwachs und wahrscheinlich verdorbenes tierisches Fett enthielt (Wolf, P.: Land und Leute der mittleren Ostmark u.a. erwähnt in [20]).

Mit dem Beginn des Industriezeitalters begann auch für die Schmierstoffe eine rasante Entwicklung. Die moderne Schmierfettentwicklung verlief über Natriumfette (1872), Kalk-, Aluminiumfette (1882), Lithiumfette (1942) und Kalziumkomplexseifenfette (1940). 1952 wurden die ersten Aluminium-, Barium- und Lithiumkomplexseifenfette patentiert [21].



Abbildung 7: Historische Lagerung eines Förderrades und Metallachsen (Museo De Huelva, Andalusien)

3.1.2 Zur Definition der Schmierfette

Es existieren eine Vielzahl von Definitionen und Beschreibungen von Schmierfetten. Auch darin widerspiegelt sich deren historische Betrachtung und Entwicklung. Es seien einige Beispiele hier aufgeführt.:

- Schmierfette sind konsistente Schmierstoffe, die aus Mineralöl und/oder Syntheseöl sowie einem Dichtungsmittel bestehen. Sie können Wirkstoffe und/oder Festschmierstoffe enthalten [22].
- Ein Schmierfett ist ein fester oder halbflüssiger Stoff, der aus einer Dispersion eines Dichtungsmittels in einem flüssigen Schmierstoff resultiert; andere Bestandteile, die besondere Eigenschaften vermitteln, können enthalten sein [23]
- Schmierfette sind salbenartige, plastisch verformbare Stoffe, bei denen in ein Metallseifengerüst oder in gequollenen Verdickungsstoffen Öle eingearbeitet sind. Diese bewirken die eigentliche Schmierung. Die Verdicker oder auch Eindicker sind aber zum größten Teil ebenfalls schmierungsunterstützend [24].
- Schmierfett ist ein System aus einem festen Verdickungsmittel und einem flüssigen Grundöl [25].