

WALTER HOLWEGER / JOACHIM SCHULZ



Wechselwirkung von Additiven mit Metalloberflächen

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

expert[›]

TRIBOLOGIE

SCHMIERUNG, REIBUNG, VERSCHLEIß

Wechselwirkung von Additiven mit Metalloberflächen

TRIBOLOGIE



SCHMIERUNG, REIBUNG, VERSCHLEIß

Herausgegeben von Dr. Manfred Jungk

Die Tribologie ist ein interdisziplinäres Fachgebiet, mit Schwerpunkten aus den Bereichen Maschinenbau, Chemie, Physik und Werkstoffwissenschaften. Entsprechend vielfältig sind die Forschungsthemen und Anwendungen.

Die Reihe *Tribologie – Schmierung, Reibung, Verschleiß* behandelt sowohl Grundlagen des Themengebietes für Anwender:innen, Wissenschaftler:innen und Studierende als auch moderne Trends wie Nachhaltigkeit, tribologische Aspekte der Industrie 4.0 und Herausforderungen durch die Elektromobilität.

Walter Holweger / Joachim Schulz

Wechselwirkung von Additiven mit Metalloberflächen

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

expert ›

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

DOI: <https://doi.org/10.24053/9783816985433>

© 2022 expert verlag

- ein Unternehmen der Narr Francke Attempto Verlag GmbH + Co. KG

Dischingerweg 5 · D-72070 Tübingen

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

Alle Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erstellt. Fehler können dennoch nicht völlig ausgeschlossen werden. Weder Verlag noch Autor:innen oder Herausgeber:innen übernehmen deshalb eine Gewährleistung für die Korrektheit des Inhaltes und haften nicht für fehlerhafte Angaben und deren Folgen. Diese Publikation enthält gegebenenfalls Links zu externen Inhalten Dritter, auf die weder Verlag noch Autor:innen oder Herausgeber:innen Einfluss haben. Für die Inhalte der verlinkten Seiten sind stets die jeweiligen Anbieter oder Betreibenden der Seiten verantwortlich.

Internet: www.expertverlag.de

eMail: info@verlag.expert

CPI books GmbH, Leck

ISSN 2701-603X

ISBN 978-3-8169-3543-8 (Print)

ISBN 978-3-8169-8543-3 (ePDF)

ISBN 978-3-8169-0123-5 (ePub)



Inhalt

Vorwort 1. Auflage	11
Vorwort zur 2. Auflage	13
1 Einleitung	15
1.1 Vorbemerkungen	15
1.2 Maschinenelemente – tribologischer Kontakt – Ansätze zur Beschreibung	16
2 Kontaktmechanik	19
2.1 Grundlagen	19
2.1.1 Kontaktmechanik – Spannungszustände	20
2.1.2 Vergleichsspannung und Von-Mises-Kriterium	21
3 Werkstoffe und deren Oberflächen	25
3.1 Einleitung	25
3.2 Idealer Festkörper	28
3.3 Gitterfehler und Versetzungen	30
3.3.1 Nulldimensionale Defekte	30
3.3.2 Eindimensionale Defekte: Versetzungen	31
3.4 Umformung	36
3.4.1 Ziehen, Walzen und Rollen	36
3.4.2 Spanabhebende Bearbeitung	39
3.4.3 Schneiden von Teilchen durch Versetzungen	42
3.5 Ergänzende Vorstellungen zur Metalloberfläche	44
4 Reibung – Mischreibung und Metallbearbeitung	51
4.1 Allgemeine Regeln	51
4.2 Chemische Prozesse bei Reibung und Mischreibung	53
4.3 Einfluss von Schmierstoffen	54
4.4 Neuere Untersuchungen zur Aktivität von Grenzflächen bei Mischreibung	57
4.4.1 Grundlagenergebnisse	57

4.4.2	Endbearbeitung (Schleifen – Honen) als Sonderfall der Mischreibung	63
4.4.3	Funktionale und disfunktionale Randschichten durch Endbearbeitung	64
4.5	Zusammenfassung	66
4.5.1	Prozesse in Körper und Gegenkörper	66
4.5.2	Chemische Prozesse	66
5	Hydrodynamik und Elastohydrodynamik	69
5.1	Einleitung	69
5.2	Schmierstofftransport im Spalt	69
5.2.1	Viskositätsmodell	69
5.2.2	Strömungsverhalten in einem verengenden Spalt	69
5.2.3	Reynoldssche Zahl und Prandtlsche Strömungsgrenzschicht	70
5.2.4	Stribeck-Kurve	72
5.2.5	Struktur – Wirkungsbeziehungen	73
5.2.6	Transiente EHD	75
6	Chemie der Schmierstoffe (generelle Überlegungen)	77
6.1	Einleitung	77
6.2	Reaktionen der Schmierstoffe am Beispiel der Kohlenwasserstoffe	77
6.2.1	Wechselwirkung mit metallischen Grenzflächen	78
6.2.2	Additive (Antioxidantien)	82
6.3	Zusammenfassung	84
7	Mögliche Additivmechanismen und weitere Betrachtungen zu Metalloberflächen	85
7.1	Einleitung	85
7.2	Intermolekulare Wechselwirkungen	85
7.3	Benetzung von Oberflächen durch additivierte Schmierstoffe	90
7.4	Einfluss oxidierter Oberflächen	93
7.5	Zusammenfassung	96
8	Rehbinder-Effekt	97
8.1	Einleitung	97
8.2	Allgemeine Gesetzmäßigkeiten	98
8.2.1	Grundlagen	98
8.2.2	Einfluss von Temperatur und Verformungsgeschwindigkeit	99
8.3	Spannungszustand und Adsorptionseffekt	99
8.4	Das Kriechen von Einkristallen	100
8.5	Polykristalline Systeme	100
8.6	Eigene Versuche	101
8.7	Zusammenfassung	102

9	Metall-Additiv-Kontakt (allgemeine Betrachtungen)	103
9.1	Einleitung	103
9.2	Bowden und Tabor [Bow 59]	103
9.3	Kritische Anmerkungen zum Reibzahl-Temperatur-Diagramm	106
9.4	Bearbeitungszeiten	115
9.5	Wie stark sind Adsorptionsschichten	117
9.6	Betrachtungen zu Temperaturen	118
9.6.1	Hot Spots – Blitztemperaturen	118
9.6.2	Wärmeentwicklung in der Umformung	121
9.7	Oberflächenvergrößerung im Umformvorgang	122
9.8	Wo kann ein Schmierstoff in der Bearbeitung angreifen?	123
9.9	Zusammenfassung	126
10	Chlorparaffine	127
10.1	Einleitung	127
10.2	Besonderheiten von chlorhaltigen Ölen	128
10.3	Zur Reaktionsweise von chlorhaltigen Verbindungen (Literatúrauswertung)	128
10.4	Eigene Laboruntersuchungen	136
10.4.1	Stift-Scheibe-Versuche	136
10.4.2	Beschichtungen auf den Stiften	138
10.4.3	Brugger-Werte	139
10.4.4	Stift-Scheibe-Versuche – keramischer Stift auf 1.4301-Scheibe	140
10.5	Wie funktionieren Chlorparaffine wirklich? – Versuch einer Erklärung zur Wirkungsweise	141
10.5.1	Abspaltung von Chlorwasserstoff	143
10.5.2	Radikalmechanismus	144
10.5.3	Adsorptionsmechanismus	145
10.6	Abgleich der Theorie mit den Ergebnissen aus der Literatur	147
11	Schwefelträger	149
11.1	Einleitung	149
11.2	Zur Reaktionsweise von schwefelhaltigen Verbindungen (Literatúrauswertung)	150
11.3	Phänomene in der Metallbearbeitung mit schwefelhaltigen Additiven	157
11.3.1	Verfärbung von Buntmetallen durch Schwefelverbindungen	157
11.3.2	Verfärbungen (Schwefelkorrosion) auf Eisenoberflächen	158
11.3.3	Einfluss von aktiven Schwefelverbindungen bzw. Elementarschwefel auf die Spanlänge	161
11.3.4	Schwefeladditive funktionieren nur in Gegenwart von Sauerstoff optimal	162
11.3.5	Auch inhibierte Metallbearbeitungsflüssigkeiten funktionieren	162

11.4	Laboruntersuchungen	163
11.5	Wie funktionieren Schwefeladditive? – Versuch einer Erklärung zur Wirkungsweise	169
11.6	Zusammenfassung	174
12	Überbasische Sulfonate (PEP-Additive)	175
12.1	Einleitung	175
12.2	Auswertung der Literatur	175
12.3	Laboruntersuchungen	179
12.3.1	Untersuchungen am Stift-Scheibe-Tribometer (1.4301-Scheibe) ..	180
12.3.2	Untersuchungen zum Synergismus von überbasischen Sulfonaten mit Schwefelverbindungen	183
12.4	Fazit	185
13	Verschleißschutzadditive	187
13.1	Einleitung	187
13.2	Zinkdialkyldithiophosphate (ZDDTP)	187
13.2.1	Struktur-Wirkungs-Beziehungen	187
13.2.2	Filmdicken von ZDDTP	191
13.2.3	Zersetzungstheorie von ZDDTP	192
13.2.4	Wie wirken Zinkdialkyldithiophosphate in der Metallbearbeitung	193
13.3	Andere phosphorhaltige Additive	193
13.3.1	Molybdändialkyldithiophosphate	193
13.3.2	Saure Phosphorsäure-Partialester	194
13.3.3	Neutralisierte bzw. neutrale (metallfreie) Phosphorsäure- und Thiophosphorsäureester	194
13.3.4	(Thio-)Phosphorsäureester (cresylähnliche Verbindungen)	195
13.4	Phosphorfremde Verschleißschutzadditive	196
13.5	Laboruntersuchungen	198
13.5.1	Versuche am Stift-Scheibe-Tribometer	198
13.5.2	Versuche am Brugger-Gerät	199
13.6	Zusammenfassung	205
14	Einfluss von Sauerstoff auf die Tribologie	207
14.1	Einleitung	207
14.2	Sauerstoff als tribologisch wirksames Element	208
14.3	Wie könnte Sauerstoff im Tribokontakt wirken?	210
14.4	Antioxidantien	212
14.5	Zusammenfassung	213
15	Was bleibt offen?	215

- 16 Anhang – Kurze Darstellung der Grenzflächenanalytik 217
 - 16.1 Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS) 217
 - 16.2 Sekundärneutralteilchen - Massenspektrometrie (SNMS) 218
 - 16.3 Photoelektronenspektroskopie XPS (ESCA) 218
 - 16.4 ESMA 219
 - 16.5 Rasterelektronenmikroskop REM mit energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDX) 219
 - 16.6 REM – SE und REM – BSE 219
 - 16.7 Mikrohärtemeinrichtung 219
 - 16.8 Transmissionselektronenmikroskop TEM mit Elektronen-ergieverlustspektrometer EELS 220
 - 16.9 STEM [Scanning Transmission Electron-Microscope] 220
 - 16.10 Zielpräparation mit dem fokussierten Ionenstrahl 221
 - 16.11 FIB-TEM 221

- 17 Literatur 223

- Register 232
- Abbildungsverzeichnis 239
- Tabellenverzeichnis 249

Vorwort 1. Auflage

Alle, die in die Schmierstoffbranche eintreten, gleich ob im Maschinenbau oder chemisch vorgebildet, sind erstaunt, wie schwierig es ist, ein System von Schmierstoffen und geschmierten Elementen zu finden. Der erste Eindruck geht eindeutig in Richtung Empirie. Erschwerend kommt hinzu, dass in der Ausbildung an Hoch- und Fachschulen, zumindest in Deutschland, der Gegenstand der Tribologie, speziell bei der Verwendung von Schmierstoffen, nur am Rande gestreift wird. Chemiker in der Ausbildung kommen mit Schmierstoffen in der Anwendung gar nicht in Berührung. Eine Forschung an einem chemischen Institut in Richtung Tribologie findet zurzeit nur an wenigen Hochschulen – und oft nur mit modellhaften Schmierstoffen – statt.

In der Ausbildung von Maschinenbauern und Fertigungstechnikern wird auf die Schmierstoffe nur so weit eingegangen, wie diese existieren und einen Einfluss auf die Tribosysteme haben. Eine tiefergehende Beschäftigung findet mit Hinweis auf die komplexen chemischen Zusammenhänge nicht statt.

Was macht nun der frisch ausgebildete Chemiker oder Ingenieur bei Berührung mit der Tribologie? Er versucht sich in der Literatur über bisher vorhandene Ergebnisse kundig zu machen. Diese Literatur ist zwar in Buchform nur zweimal vorhanden „Schmierstoffe in der Metallbearbeitung“ (1983) und „Lubricants and Lubrication“ (1999), erscheint aber dem tribologischen „Anfänger“ als Rettung, ähnlich wie einem Ertrinkenden das rettende Floß. Bei näherer Beschäftigung mit diesen Werken und den dort zitierten Aufsätzen werden dann früher oder später Diskrepanzen mit den Erscheinungen in der Praxis festgestellt: Die Phänomene in der Praxis stimmen nur sehr begrenzt mit der Literaturlage überein. Auch die Beschäftigung mit einzelnen Ansätzen führt nur zu begrenzten Erfolgen, da in den meisten Fällen von einer bestehenden Theorie ausgegangen, und dann versucht wird, die Messergebnisse in diese Theorie einzupassen.

Ganz besonders prekär wird die Lage, wenn versucht wird, die Erkenntnisse der Literatur in Simulationsmodelle, wie sie derzeit oft verwendet werden, mit einzubeziehen. Mit einfachen Reibungskoeffizienten, ermittelt auf einer tribologischen Testmaschine, führte bisher keine Simulation zu brauchbaren Ergebnissen.

Die Diskussion mit vielen Fachkollegen und Hochschullehrern über die Wechselwirkung von Additiven mit Metalloberflächen führte zu der Erkenntnis, dass der Zeitpunkt gekommen ist, mit überkommenen Vorstellungen aufzuräumen.

Fortschritte sind nicht durch ständiges Wiederholen von scheinbar Bekanntem zu erzielen, sondern nur durch kritisches Infragestellen und diskutieren. Das gilt auch für diese Monografie.

Das vorliegende Buch soll nun dazu dienen, Licht in die „dunkle“ Seite der Tribologie zu bringen und die Funktion des „Zwischenstoffs“ zu erklären. Dazu wird die bestehende Literatur kritisch ausgewertet. Überschneidungen mit bereits existierenden Werken, die sich mit ähnlichen Themen beschäftigen, sind daher nicht ganz zu vermeiden gewesen. In Ergänzung werden neue Modelle vorgestellt und diese anhand der vorhandenen Literatur und neuerer Experimente mit den alten Modellvorstellungen verglichen.

Letztlich soll das Buch eine Grundlage darstellen, die zu weiteren Arbeiten und Diskussionen anregt.

Die Wirkung von Schmierstoffen und deren Additiven auf Metalloberflächen ist nicht durch einfache Gleichungen (physikalisch, chemisch oder physiko-chemisch) zu beschreiben, im Gegenteil: Die Wirkungsweise ist sehr komplex. Um die einzelnen Effekte, die in der Realität nicht nebeneinander existieren, sondern miteinander verwoben sind, besser erklären zu können, wurden zum Teil starke Vereinfachungen gewählt und eine „Einzelbehandlung“ durchgeführt. Das könnte beim Leser den Eindruck einer gewissen Heterogenität entstehen lassen. Das ist zwar nicht beabsichtigt, aber aus Gründen des allgemeinen Verständnisses nicht ganz zu vermeiden.

Die ersten Kapitel befassen sich mit grundlegenden Problemen der Tribologie. In Kapitel 7, 8 und 9 werden dann Effekte und Modelle vorgestellt, die zur Erklärung von Additivwirkungen beitragen können, diese aber (jeder Effekt für sich allein betrachtet) nicht vollständig beschreiben. Kapitel 10 bis 14 widmet sich dann einzelnen Additivklassen. Zum Schluss werden Fragen diskutiert, die auch in dieser Monografie nicht abschließend geklärt werden können.

Auch wenn viele Tribometerversuche vorgestellt werden, die scheinbar oder tatsächlich mit Beobachtungen aus der Praxis korrelieren, heißt das noch lange nicht, dass ein Tribometer in der Lage ist, die Praxis wirklich wiederzugeben. Die Bruggermaschine (als Beispiel) kann wie jedes Tribometer nur sich selbst wiedergeben. Sie ist wie jedes Tribometer den Nachweis schuldig geblieben, ob man mit ihr überhaupt die Metallbearbeitung widerspiegeln kann.

Korrelationen wie in manchen Kapiteln vorgestellt suggerieren Kausalität. Korrelation ist aber nicht Kausalität.

Die vorgestellten Theorien erscheinen sicher oft faszinierend einfach und in vielen Fällen einleuchtender als bestehende. Das soll den Leser aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch diese „neuen Theorien“ nur vereinfachende Modelle darstellen und auch nichts anderes („Besseres“) sein wollen.

Uns ist vollkommen klar, dass es gerade auf dem Gebiet der Tribologie noch sehr viel zu leisten gibt, um die Zusammenhänge im Schmierpalt bzw. der Kontaktzone wirklich beschreiben zu können.

Wir hoffen, dass wir mit dieser Monografie Tribologen und Ingenieuren in den Metallverarbeitenden Unternehmen, Konstrukteuren von Maschinenelementen, Hoch- und Fachschullehrern (Fachrichtung Maschinenbau, Fertigungstechnik), Studierenden des Maschinenbaus und der Fertigungstechnik sowie Herstellern von Schmierstoffen, deren Anwendern und Wärmebehandlern ein Buch in die Hand geben können, das ihnen zumindest hilft, die Probleme ihres Arbeitsalltags besser zu verstehen und gleichzeitig Anregung und Aufmunterung ist, nicht alles als „schon erfunden und publiziert“ hinzunehmen.

Dr. Joachim Schulz und Dr. Walter Holweger

Hamburg, Epfendorf im April 2009

Vorwort zur 2. Auflage

Seit der 1. Auflage sind nun 13 Jahre ins Land gegangen. Die neuen Erkenntnisse haben inzwischen den Zugang in die Lehre gefunden. Im tribologischen Verständnis hat sich einiges getan, speziell im molekularen Verständnis zu vielen Vorgängen.

Auch sind einige Arbeiten erschienen, die das in der 1. Auflage vorgestellte neue Modell zu den Wechselwirkungen von Additiven mit Metalloberflächen weiter untermauern konnten. Die Hinweise auf die Gültigkeit des neuen Modells werden immer stärker.

Dennoch erscheinen immer noch zahlreiche Veröffentlichungen, bei denen hypothetische Reaktionsschichtmodelle postuliert werden. Wirkliche Beweise für das Modell werden aber nicht erbracht, sondern auf nicht weiter hinterfragtes „gesichertes“ Wissen verwiesen. Was Max Planck zu der Äußerung veranlasst hat, dass *„die Vertreter der alten Theorie aussterben müssen, um dem Neuen Platz zu machen. Irgendwann leben und lehren dann nur noch die Begründer der neuen Konzepte.“*

In zahllosen Gesprächen mit Fachkollegen und Anwendern konnte das neue Modell diskutiert werden. Gerade aus der Praxis erfuhren wir viel Zustimmung. Natürlich gab es auch kritische Stimmen. Das Interesse an den angeschnittenen Themen ist ungebrochen. Das war für uns Anlass die nun vorliegende 2. Auflage zu erstellen.

Die neue Auflage wurde stark überarbeitet. Ältere Ergebnisse aus Laboruntersuchungen konnten durch neue ersetzt bzw. ergänzt werden. Platzgründe zwangen allerdings dazu, einiges zu streichen. Bei Interesse an den gestrichenen Informationen können die Autoren diese gerne zugänglich machen.

Wir hoffen, dass auch die 2. Auflage auf ein reges Interesse stößt.

Prof. Dr. Joachim Schulz und Prof. Dr. Walter Holweger

Hamburg, Ependorf im August 2022

1 Einleitung

Walter Holwegger / Joachim Schulz

1.1 Vorbemerkungen

Ein wesentlicher Aspekt der Tribologie und Schmierungstechnik ist die Frage nach den Zusammenhängen und der Vorhersagbarkeit von Phänomenen im Bereich der Maschinenelemente. Dazu reduziert man sie auf die Kontaktgebiete, in denen der tatsächliche Leistungsumsatz erfolgt. Ein Kontakt ist daher zunächst nur ein abstraktes Modell für die Stellen in Maschinenelementen, in denen sowohl die gegeneinander bewegten Körper als auch der Schmierstoff Leistung umsetzen.

Die Anforderungen an erhöhte Lebensdauer dürfen jedoch nicht nur auf den Zeitpunkt der Leistungsübertragung reduziert werden. Die Lebensdauer eines Maschinenelements kann auch von Stillstandsperioden abhängen, in denen keine Bewegung erfolgt, da auch hier lebensdauerbestimmende Prozesse, wie zum Beispiel Korrosionsvorgänge, stattfinden können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Vorgeschichte der Komponenten, die vor ihrem Einsatz einen Fertigungsprozess (Wärmebehandlung, Umformung, Endbearbeitung) durchlaufen.

Die Beeinflussung der zukünftigen Eigenschaften eines Bauteils als Folge der Vorbehandlung ist heute von zentraler Bedeutung für die Lebensdauer.

Ziel dieser Einleitung ist der Versuch einige Begriffe, die innerhalb der tribologischen Wissenschaft verwendet werden, dem Themengebiet des vorliegenden Buches zuzuführen. Dabei wird erkennbar, dass viele Bereiche eine einheitliche Sichtweise erlauben, aber andere Gebiete noch einen großen Einsatz in Forschung und Technologie voraussetzen.

Speziell in der Metallbearbeitung ist es sehr schwierig, den eigentlichen Prozess, d. h., den Augenblick in welchem die Bearbeitung auf bzw. an der Metalloberfläche stattfindet, zu erfassen. Das liegt zum einen daran, dass es kaum möglich ist, Sensoren im Ziehspalt bei der Umformung oder am Schneidkeil bei der Zerspannung zu platzieren. Zum anderen laufen die meisten Prozesse in Bruchteilen von Sekunden ab. Dabei werden mehr oder weniger große hochreaktive Oberflächen erzeugt. Auch entstehen Versetzungen und Mikrorisse, in und an denen die Schmiermittel bzw. die darin enthaltenen Additive wirken (Kapitel zum Rehbinder-Effekt). Erschwerend kommt hinzu, dass in den meisten Fällen in der Praxis die Schmierstoffe über den eigentlichen Prozess der Metallbearbeitung mit den Metalloberflächen in Kontakt stehen und dort agieren bzw. reagieren können. Auch sind einige Additive durchaus in der Lage, sehr fest haftende Adsorptionsschichten zu bilden, die bei nicht hinreichender Teilereinigung für Reaktionsschichten gehalten werden. So wurden und werden bei der analytischen Untersuchung oft Resultate vorgetäuscht, die mit dem eigentlichen Prozess nichts zu tun haben. Als Beispiel sei hier nur die Chlorkorrosion erwähnt, die nicht im Prozess, sondern in der Zeit danach auftritt. Zwar sind auch die

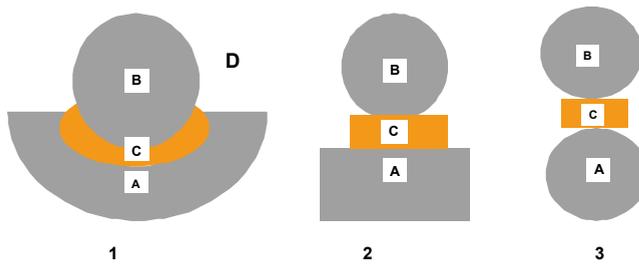


Bild 1-1: Schematische Darstellung von Kontakten. Körper [A] und Gegenkörper [B] stehen über einen Zwischenstoff [C] im Kontakt

Autoren nicht in der Lage in den Metallbearbeitungsprozess selbst hineinzuschauen, doch soll in diesem Buch versucht werden, möglichst sauber zwischen Kurz- und Langzeitreaktionen von Schmierstoffadditiven zu unterscheiden. Das kann natürlich nur durch kritische Interpretation von bekannten Ergebnissen passieren.

Darüber hinaus werden die Metalloberfläche und ihre „Reaktionsmöglichkeiten“ selbst mit in die Überlegungen einbezogen. In der publizierten Literatur werden Metalloberflächen, in den meisten Fällen, als etwas Homogenes, „Starres“ betrachtet, mit dem dann die Additive der Schmierstoffe reagieren sollen. Es wird gezeigt, dass das Verhalten der Additive von den Metalloberflächen beeinflusst wird.

In den Kapiteln werden Modelle vorgestellt und diskutiert, die sicher nicht die letzte Wahrheit darstellen, dem tribologisch interessierten Leser aber durchaus ermöglichen, sich in die Phänomene der Wechselwirkung von Additiven mit Metalloberflächen hineinzudenken. Eine Vertiefung bzw. Modifizierung dieses Modells erfolgt dann in den anderen Kapiteln für die Umlaufschmierung bzw. bei Diskussion der Wirkungsweise der einzelnen Additivklassen.

Dem Leser wird dringend empfohlen die angerissenen Fachgebiete aus der authentischen Literatur vertieft zu studieren, da hier nur in Umrissen und auch mit der eingeschränkten Sichtweise der Autoren gearbeitet werden kann.

1.2 Maschinenelemente - tribologischer Kontakt - Ansätze zur Beschreibung

Maschinen setzen über Maschinenelemente Leistung um. Ort des Umsatzes ist der Kontakt (**Bild 1-1**). Kontakte können schematisch als ein System von Körper [A] – Gegenkörper [B] – Zwischenstoff [C] (in aller Regel der Schmierstoff, aber möglicherweise auch eine Beschichtung oder eine Reaktionsschicht) – Umgebung [D] und den relativen Bewegungen aufgefasst werden. **Bild 1-1** zeigt die Sonderfälle Kugel – Platte (1), Kugel – Ring (2) oder – Buchse (3).

Die Prozesse, die im Kontakt ablaufen, werden durch unterschiedliche Wissensgebiete beschrieben (**Bild 1-2**).

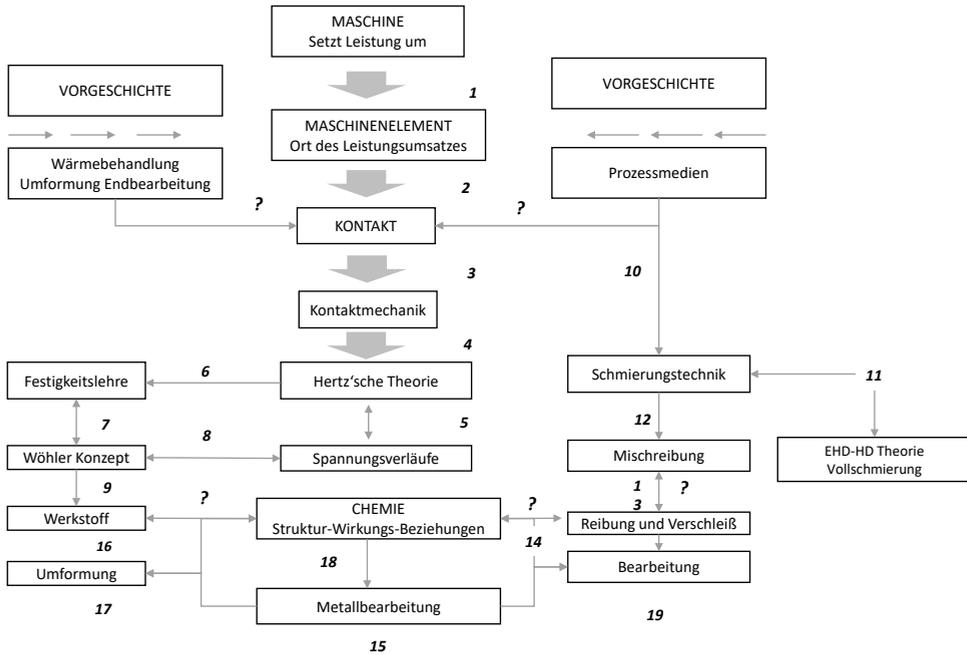


Bild 1-2: Wissenskreisläufe in der Tribologie: Für ungeschmierte (trockene) Kontakte kann die Kontaktmechanik in Verbindung mit der Festigkeitslehre Lebensdauerprognosen für Maschinenelemente herleiten (3 → 9)

Die **Kontaktmechanik** (3 → 4 → 5) beschreibt die Spannungsverläufe, die sich durch Berührung von Körper (A) und Gegenkörper (B) ohne Zwischenstoff (C) ausbilden. In der Kombination mit der Festigkeitslehre und der Werkstoffkunde (6 → 7 → 8 → 9) bildet sie die wesentliche Grundlage für die Abschätzung und Berechnung der Lebensdauer von Maschinen in Auslegungs- und Konstruktionsrichtlinien.

Die **Hydrodynamik (HD)** und die **Elastohydrodynamik (EHD)** (3 → 10 → 11) berechnen den Spalthöhen- und Druckverlauf, der sich beim Durchströmen von einem viskosen Medium im Kontakt einstellt.

Für die physikalischen Grundlagen der **Wirkungsmechanismen von Schmierstoffen** fehlen bislang geschlossene Modelle. Schmierstoffe werden in der Kontaktmechanik gar nicht und in der HD-EHD nur als strömende, viskose Medien behandelt. Über Struktur-Wirkungsmechanismen von Schmierstoffen wird jedoch in einer Vielzahl von empirischen Grundlagenversuchen berichtet.

Mischreibungszustände unter Beteiligung von Werkstoffen und Schmierstoffen können nur annähernd mit den bekannten Modellen der Kontaktdynamik und HD-EHD beschrieben werden.

Die HD- und EHD-Theorie liefern gute Vorhersagen für das Transportverhalten des Zwischenstoffs in Kontakten (4 → 10 → 11). Die Wissenskette zeigt hingegen große Lücken in den Bereichen der Struktur-Wirkungsbeziehungen zwischen Chemie in den Prozessen der Mischreibung, Reibung und Verschleiß sowie in der Vorbehandlung (speziell

Prozessmedien) (**12** → **13** → **14**). Die Metallbearbeitung (**15**) lässt sich im Bereich Umformung (**17**) den Werkstoffwissenschaften (**16**) zuordnen, im Bereich Bearbeitung (**19**) dem Themenkomplex Reibung und Schmierstoffe (**18**).

Metallbearbeitung lässt sich in diesem Schema in *Umform-* und *Bearbeitungsvorgänge* unterteilen. Für **Umformprozesse** sind die Vorgänge *im Werkstoff* maßgeblich. Sie können daher mit den Grundlagen der Werkstoffphysik und Werkstofftechnik zusammengeführt werden.

Für **Bearbeitungsprozesse** gelten in hohem Maß die Gesetze der *Mischreibung*. Daher muss für deren Verständnis die Physik und Chemie der *Oberfläche* und der *Schmierstoffe* gemeinsam betrachtet werden. Das Fehlen von einem theoretischen Modell führt dazu, dass es noch kein geschlossenes Wissen gibt und zahlreiche Zusammenhänge empirisch erforscht werden müssen. Dennoch können aus den bekannten Ergebnissen der Tribologie auch für die Bearbeitungsprozesse einige Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden.

Nachfolgend sollen in Kürze einige Zusammenhänge in den geschlossenen Wissenskreisläufen beschrieben werden, wobei nochmals dringend empfohlen wird, die Fachliteratur vertieft zu studieren.

2 Kontaktmechanik

Walter Holweger

2.1 Grundlagen

Im nachfolgenden Kapitel wird über die kurze inhaltliche Betrachtung ein Zusammenhang zwischen den Bereichen Kontaktmechanik – Festigkeitslehre und Werkstoffeigenschaften zum Bereich der Umformprozesse hergestellt. Dabei wird der in **Bild 2-1** skizzierte Weg eingeschlagen. Im Anschluss werden Arbeiten aus dem Bereich der Metallbearbeitung vorgestellt, die sich in diese Anschauungen einordnen lassen.

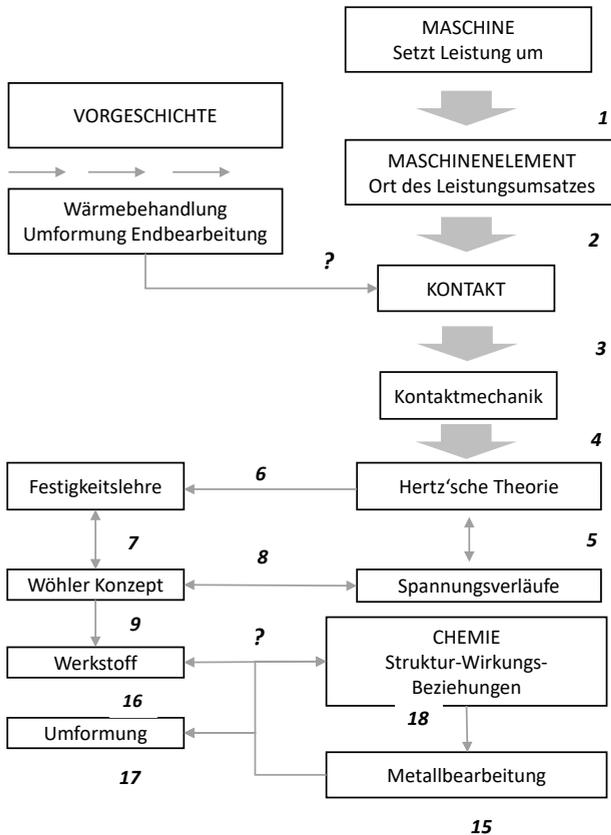


Bild 2-1: Kontaktmechanik. Ausgehend vom Kontakt (3) lässt sich über die Hertz'sche Theorie (4 → 5) eine Verbindung zur Festigkeitslehre und den Werkstoffeigenschaften herstellen (6 → 7 → 8 ↔ 9)

2.1.1 Kontaktmechanik - Spannungszustände

Grundlage der Kontaktmechanik ist eine Anschauung, die davon ausgeht, dass sich gekrümmte Oberflächen an der gemeinsamen Ebene unter Abplattung berühren.

Die Kontaktflächengeometrie und die Kontaktspannungen für diese Situation sind Gegenstand der Hertz'schen Theorie [Her 1881]. Diese Betrachtung bildet bis heute die Grundlage der Kontaktmechanik. Sie setzt homogene, in alle Raumrichtungen gleichartig zusammengesetzte Körper voraus, die keine inneren Spannungen besitzen und sich reibungsfrei berühren.

Diese Situation führt an der Berührfläche zur Ausprägung einer Kontaktellipse (Bild 2-2).

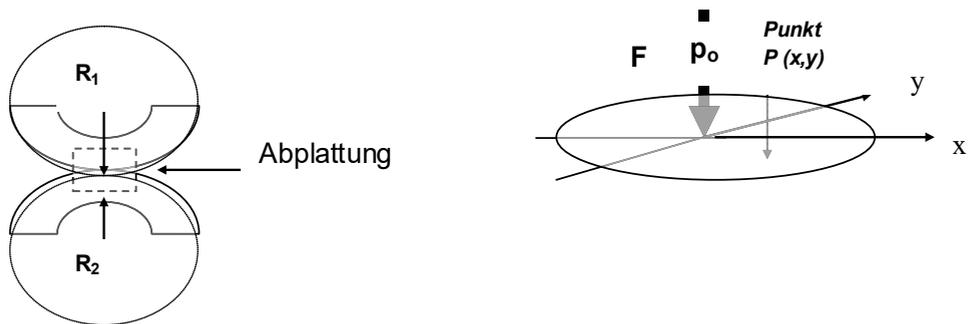


Bild 2-2: Schematische Darstellung der Situation im trockenen Kontakt. Die Berührung von elastischen Körpern (z. B. Kugeln mit den Radien R_1 und R_2) führt zur Abplattung im Kontakt. Die Pressungsverteilung an einem Punkt $P(x, y)$ kann berechnet werden

Die belastende **Kraft F** führt nach Hertz zu einer Pressungsverteilung $p(x, y)$ an einem beliebigen Punkt $P_{(x,y)}$ im Kontakt

$$p_{(x,y)} = p_0 [1 - (x/b)^2 - (y/a)^2]^{1/2}$$

mit der maximalen Pressungsverteilung in der Mitte der Kontaktellipse ($x = 0$ und $y = 0$)

$$p_0 = [3/(2\pi ab)] F,$$

wobei a und b die Halbachsen der Kontaktellipse sind.

Die Größe der Halbachsen a und b der Kontaktellipse hängen von der Kontaktgeometrie, dem **Elastizitätsmodul E** und der **Querkontraktionszahl ν** ab.

$$a = n [[3^*(1 - \nu^2)] / (E\rho)^* F]^{1/3}$$

$$b = (m/n)^* a$$

$$\rho = (1/R) = (1/R_1) + (1/R_2) + (1/R_3) + (1/R_4)$$

Die Radien (R_1, R_2) sind die Hauptkrümmungsradien des oberen (R_1) und des unteren Körpers (R_2) (ρ). m und n sind Konstanten, die von der jeweiligen Kontaktgeometrie abhängen.

Die Hertz'sche Theorie ist für statische Berührung zweier (unendlich langer) zylindrischer Körper und für Kugeln mit beliebigen Radien erweiterbar (**Bild 2-3**) [Fö 36].

In der Mitte des Kontakts herrscht (analog zur Hertz'schen Theorie) der Druck:

$$p_0 = 2F^* / (\pi a)$$

F^* ist die Kraft bezogen auf die Längeneinheit. Die halbe Druckbreite ist durch

$$a = [8^*(1-\nu^2)] [RF^*] / (\pi E)]^{1/2}$$

gegeben.

Unter der Annahme eines ebenen Dehnungszustandes lassen sich die Hauptnormalspannungen $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ im Kontakt berechnen. Dabei ergibt sich, dass alle Spannungszustände proportional zum **Druck** p_0 sind und mit z/a abnehmen, allerdings in unterschiedlicher Weise.

Denkt man sich würfelförmige Volumenelemente direkt unter der Kontaktmittellinie ($y = 0$) so liegen sie genau auf dem Hauptkoordinatensystem. Die maximale Hauptschubspannung liegt in 45° Richtung, als Folge der unterschiedlich abnehmenden Spannungszustände $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ und besitzt in einer Tiefe von $z = 0.78a$ einen Wert von

$$\tau_{45^\circ, \max} = 0.3p_0$$

Für Volumenelemente links und rechts der Kontaktmittellinie ($y \neq 0$) existieren Schubspannungskomponenten, die senkrecht zur Hauptspannung liegen. Für diese Schubspannungen wird der Maximalwert in einer Tiefe $z = 0.5*a$ (also der halben Kontaktbreite) erreicht (**Bild 2-4**): Die Annahmen zur Ableitung von Spannungszuständen elastischer Körper lassen sich in der Praxis auch auf periodische Abwälzvorgänge übertragen.

p_0 ist dann eine periodische Funktion die sinusförmig von 0 über $\pi/2$ (Maximalwert) nach π (Wert: null) an- und abschwilt. Die Überrollung ist eine fortgesetzte Wiederholung dieses Vorgangs.

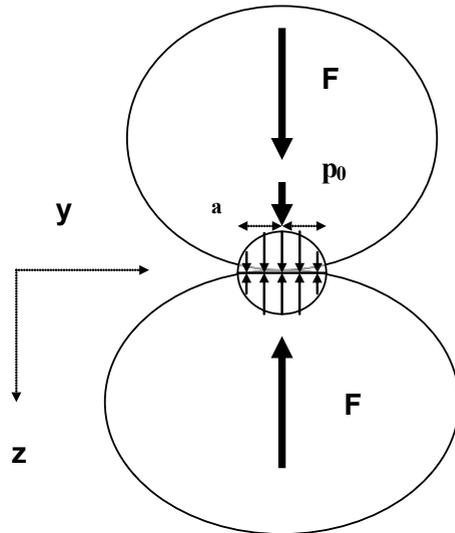


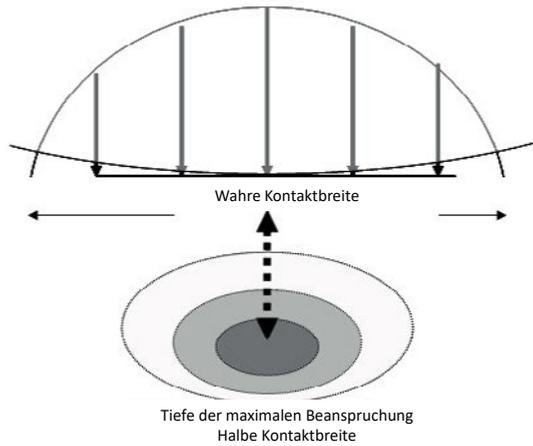
Bild 2-3: Grundmodell der statischen Berührung von abrollenden Körpern

2.1.2 Vergleichsspannung und Von-Mises-Kriterium

Wirkt auf ein Volumenelement ein mehrachsiger Spannungszustand, dann kann man sie nach der *Vergleichsspannungshypothese* zu *einer* Spannung (Vergleichsspannung) zusammenfassen.

Die Vergleichsspannung hat dieselbe Wirkung wie die auf das Volumenelement wirkenden mehrachsigen Spannungszustände (**Bild 2-5**).

Die Vergleichsspannung ermöglicht es, die in alle Raumrichtungen wirkenden Normal- und Tangenzialspannungen zusammenzufassen und mit den Ergebnissen von Materialtests der Zugfestigkeit und Streckversuchen zu vergleichen.



Skizze:

Ersatzmodell : Kontaktbeanspruchung : Die Tiefe der maximalen Beanspruchung entspricht ungefähr der halben „wahren“ Kontaktbreite

Bild 2-4: Schematische Darstellung des Spannungsmaximums im Kontakt (Quelle: FVA Bericht 35)

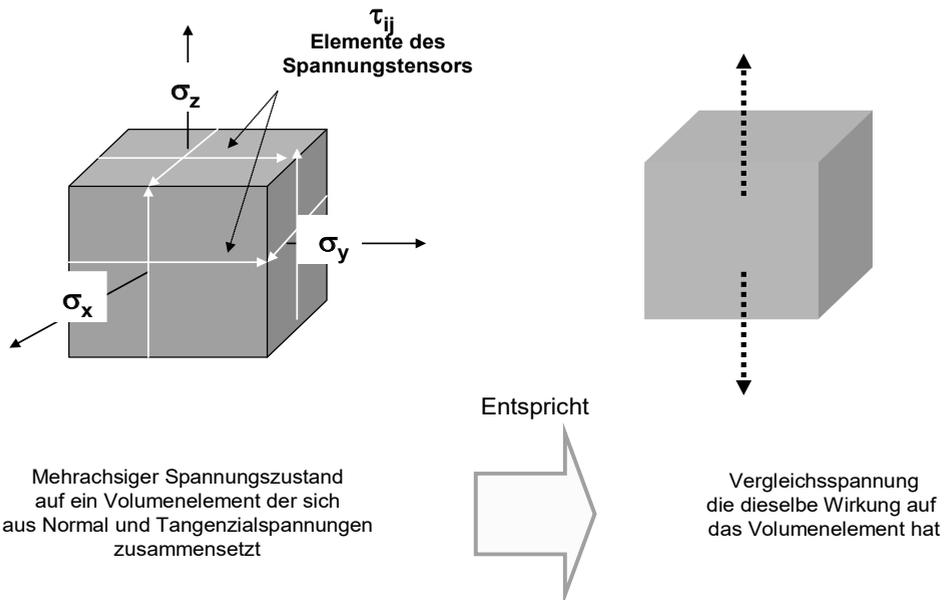


Bild 2-5: Vergleichsspannung: Die Vergleichsspannung hat auf ein Volumenelement dieselbe Wirkung wie die Normal- und Tangenzialspannungen

Das Versagen eines Bauteils tritt dann ein, wenn die *Gestaltsänderungsenergie* infolge der Vergleichsspannung einen Grenzwert überschreitet (*von Mises-Spannung*).

Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (**Bild 2-6**) zeigt sich, dass die Spannung eines Festkörpers infolge einer Dehnung zunächst dem Hook'schen Gesetz (*A*) folgt, bei dem die Dehnung proportional zur äußeren Spannung ist, jedoch bei Überschreiten der Dehnungsgrenze ein abweichendes – nicht mehr lineares – Verhalten (*B*) zeigt und beim plastischen Fließen in ein Abfallen der Kurve übergeht (*C*), wobei der Bereich (*C*) nicht mehr von der äußeren Spannung σ abhängig ist.

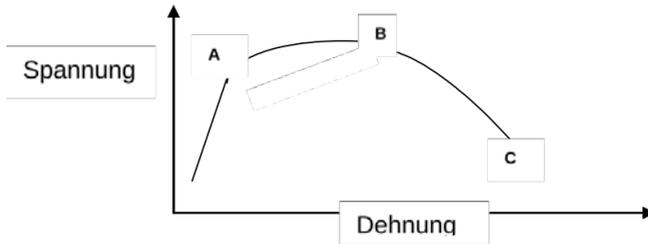


Bild 2-6: Spannungs-Dehnungsdiagramm

Unter dem Einfluss einer Zugspannung σ folgt die relative Längenänderung zunächst dem Hook'schen Gesetz (*A*) und geht mit Beginn der plastischen Verformung (*B*) in Fließen (*C*) über. Die Verformung wirkt unabhängig von der äußeren Spannung.

