

Inhalt

1	Einleitung	1
	Walter Holweger, Joachim Schulz	
1.1	Vorbemerkungen	1
1.2	Maschinenelemente – tribologischer Kontakt – Ansätze zur Beschreibung	2
2	Kontaktmechanik	5
	Walter Holweger	
2.1	Grundlagen	5
2.1.1	Kontaktmechanik – Spannungszustände	6
2.1.2	Vergleichsspannung und von Mises Kriterium	8
3	Werkstoffe und ihre Oberflächen	10
	Walter Holweger, Joachim Schulz	
3.1	Einleitung	10
3.2	Idealer Festkörper	13
3.3	Gitterfehler und Versetzungen	15
3.3.1	Nulldimensionale Defekte	16
3.3.2	Eindimensionale Defekte: Versetzungen	16
3.4	Umformung	23
3.4.1	Ziehen – Walzen und Rollen	23
3.4.2	Spanabhebende Bearbeitung	25
3.4.3	Schneiden von Teilchen durch Versetzungen	29
3.5	Ergänzende Vorstellungen zur Metalloberfläche	31
4	Reibung – Mischreibung und Metallbearbeitung	37
	Walter Holweger	
4.1	Allgemeine Regeln	37
4.2	Chemische Prozesse bei Reibung und Mischreibung	39
4.3	Einfluss von Schmierstoffen	41
4.4	Neuere Untersuchungen zur Aktivität von Grenzflächen bei Mischreibung	44
4.4.1	Grundlagenergebnisse	44
4.4.2	Endbearbeitung (Schleifen – Honen) als Sonderfall der Mischreibung	51
4.4.3	Funktionale und disfunktionale Randschichten durch Endbearbeitung	52
4.5	Zusammenfassung	54
4.5.1	Prozesse in Körper und Gegenkörper	54
4.5.2	Chemische Prozesse	54
4.5.2.1	Oxidation	54
4.5.2.2	Matrixcarbide	54
4.5.2.3	Ausbildung von Reaktionsschichten in der Umlaufschmierung	55

5	Hydrodynamik und Elastohydrodynamik Walter Holweger	56
5.1	Einleitung	56
5.2	Schmierstofftransport im Spalt	57
5.2.1	Viskositätsmodell	57
5.2.2	Strömungsverhalten in einem verengenden Spalt	57
5.2.3	Reynold'sche Zahl und Prandtl'sche Strömungsgrenzschicht	58
5.2.4	Stribeck Kurve	59
5.2.5	Struktur-Wirkungsbeziehungen	62
5.2.6	Transiente EHD	63
6	Chemie der Schmierstoffe (generelle Überlegungen) Walter Holweger	65
6.1	Einleitung	65
6.2	Überblick	66
6.3	Reaktionen der Schmierstoffe am Beispiel der Kohlenwasserstoffe	67
6.3.1	Wechselwirkung mit metallischen Grenzflächen	68
6.3.2	Additive (Antioxidanzien)	72
6.4	Zusammenfassung	74
7	Mögliche Additivmechanismen auf unbeschichteten und beschichteten Metalloberflächen Thomas Maßmann	76
7.1	Einleitung	76
7.2	Bindungsarten und intermolekulare Wechselwirkungen	76
7.3	Physikalische Additivmechanismen	79
7.4	These und Modellbildung	80
7.5	Analysen der physikalischen Wirkmechanismen	83
7.5.1	Adsorptionsfähigkeit von Schmierstoffadditiven	83
7.5.2	Einfluss der Werkzeugoberfläche auf die Adsorption	87
7.5.3	Benetzung von Beschichtungen durch additivierte Schmierstoffe	88
7.5.4	Zwischenfazit	94
7.6	Ermittlung von Reibquotienten im Stift-Scheibe-Versuch	96
7.7	Übertragung der Erkenntnisse auf Additivmischungen	99
7.8	Zusammenfassung	101
8	Rehbinder Effekt Joachim Schulz	102
8.1	Einleitung	102
8.2	Allgemeine Gesetzmäßigkeiten	103
8.2.1	Grundlagen	103
8.2.2	Einfluss von Temperatur und Verformungsgeschwindigkeit	103
8.3	Spannungszustand und Adsorptionseffekt	104

8.4	Das Kriechen von Einkristallen	105
8.5	Polykristalline Systeme	105
8.6	Eigene Versuche	106
8.7	Zusammenfassung	107
9	Metallbearbeitung (Allgemeine Betrachtungen)	108
	Joachim Schulz	
9.1	Einleitung	108
9.2	Bowden und Tabor	108
9.3	Bearbeitungszeiten	111
9.4	Wie stark sind Adsorptionsschichten?	113
9.5	Betrachtungen zu Temperaturen	114
9.5.1	Hot Spots – Blitztemperaturen	114
9.5.2	Wärmeentwicklung in der Umformung	116
9.6	Oberflächenvergrößerung im Umformvorgang	118
9.7	Zusammenfassung	119
10	Chlorparaffine	121
	Joachim Schulz	
10.1	Einleitung	121
10.2	Besonderheiten von chlorhaltigen Ölen	121
10.3	Zur Reaktionsweise von chlorhaltigen Verbindungen (Literaturauswertung)	122
10.4	Eigene Laboruntersuchungen	130
10.4.1	Stift-Scheibe-Versuche 1.2379-Stift (unbeschichtet / beschichtet) auf 16MnCr5-Scheibe	130
10.4.2	Beschichtungen auf den Stiften	132
10.4.3	Brugger-Werte	133
10.4.4	Stift-Scheibe-Versuche keramischer Stift auf 1.4301-Scheibe	135
10.5	Wie funktionieren Chlorparaffine wirklich? – Versuch einer Erklärung zur Wirkungsweise	137
10.5.1	Abspaltung von Chlorwasserstoff	138
10.5.2	Radikalmechanismus	139
10.5.3	Adsorptionsmechanismus	141
10.6	Abgleich der Theorie mit den Ergebnissen aus der Literatur	143
11	Schwefelträger	144
	Joachim Schulz	
11.1	Einleitung	144
11.2	Zur Reaktionsweise von schwefelhaltigen Verbindungen (Literaturauswertung)	144
11.3	Phänomene in der Metallbearbeitung mit schwefelhaltigen Additiven	152
11.3.1	Verfärbung von Buntmetallen durch Schwefelverbindungen	152
11.3.2	Verfärbungen (Schwefelkorrosion) auf Eisenoberflächen	153

11.3.3	Einfluss von aktiven Schwefelverbindungen bzw. Elementarschwefel auf die Spanlänge	156
11.3.4	Schwefeladditive funktionieren nur in Gegenwart von Sauerstoff optimal	157
11.3.5	Auch inhibierte Metallbearbeitungsflüssigkeiten funktionieren	157
11.4	Laboruntersuchungen	158
11.4.1	Brugger-Werte	158
11.4.2	Stift-Scheibe-Tribometer (HSS-Stift / 16MnCr5-Scheibe)	160
11.5	Wie funktionieren Schwefeladditive? – Versuch einer Erklärung zur Wirkungsweise	162
11.6	Zusammenfassung	168
12	Überbasische Sulfonate (PEP – Additive) Joachim Schulz	169
12.1	Einleitung	169
12.2	Auswertung der Literatur	169
12.3	Laboruntersuchungen	173
12.3.1	Untersuchungen am Stift-Scheibe-Tribometer (1.4301-Scheibe)	174
12.3.2	Untersuchungen zum Synergismus von überbasischen Sulfonaten mit Schwefelverbindungen	177
12.3.2.1	Stift-Scheibe-Versuche (1.2379 Stift / 16MnCr5(GKZ)-Scheibe)	177
12.3.2.2	Untersuchungen an der Brugger-Maschine	178
12.4	Fazit	181
13	Verschleißschutzadditive Joachim Schulz	183
13.1	Einleitung	183
13.2	Zinkdialkyldithiophosphate (ZDDTP)	183
13.2.1	Struktur-Wirkungs-Beziehungen	183
13.2.2	Filmdicken von ZDDP	187
13.2.3	Zersetzungstheorie von ZDDTP	188
13.2.4	Wie wirken Zinkdialkyldithiophosphaten in der Metallbearbeitung?	189
13.3	Andere Phosphor-haltige Additive	189
13.3.1	Neutralisierte (metallfreie) Phosphorsäure- und Thiophosphorsäureester	190
13.3.2	Phosphorsäureester (Cresyl-ähnliche Verbindungen)	191
13.4	Andere Verschleißschutzadditive	193
13.5	Zusammenfassung	196
14	Einfluss von Sauerstoff auf die Tribologie Joachim Schulz	197
14.1	Einleitung	197
14.2	Sauerstoff als tribologisch wirksames Element	198
14.3	Wie könnte Sauerstoff im Tribokontakt wirken?	201

14.4	Antioxidantien	202
14.5	Zusammenfassung	204
15	Was bleibt offen?	205
	Joachim Schulz, Walter Holweger	
16	Anhang –	
	Kurze Darstellung der Grenzflächenanalytik	207
16.1	Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS)	207
16.2	Sekundärneutralteilchen-Massenspektrometrie (SNMS)	208
16.3	Photoelektronenspektroskopie XPS (ESCA)	208
16.4	ESMA	209
16.5	Rasterelektronenmikroskop REM	
	mit energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDX)	209
16.6	REM-SE und REM-BSE	209
16.7	Mikrohärtemesseinrichtung	209
16.8	Transmissionselektronenmikroskop TEM	
	mit Elektronen-Energieverlustspektrometer EELS	210
16.9	STEM [Scanning Transmission Electron-Microscope]	210
16.10	Zielpräparation mit dem fokussierten Ionenstrahl	
	Focused Ion Beam (FIB)	211
16.11	FIB-TEM	211
17	Literatur (Schrifttum)	213
	Sachregister	224