

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
	Komplexeifenfette	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	V 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