

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 und Einordnung	11
3	Schmierfette	12
3.1	Historie und Definition	12
3.1.1	Zur Historie	12
3.1.2	Zur Definition der Schmierfette	13
3.2	Ausgewählte Schmierfettarten	14
3.2.1	Arten der Verdicker	14
3.2.2	Arten der Grundöle	15
	Mineralöle	16
	Syntheseöle	16
	Biologisch schnell abbaubare Grundöle	16
3.3	Klassifikation der Schmierfette	18
3.3.1	Metallseifenschmierfette	19
	Einfache Seifenfette	19
	Komplexseifenfette	21
3.4	Prüfmethode	22
3.4.1	Genormte Versuchseinrichtungen	22
	Konuspenetration (DIN 150 2137)	23
	Schmierfettgebrauchsdauer: FAG FE9 (DIN 51821)	24
	Shell-Vierkugel-Apparat (DIN 51350)	24
	Korrosionsschutzigenschaften (DIN 51802)	25
	Timken- Prüfeinrichtung	25
3.4.2	Andere Versuchseinrichtungen	26
	Axiallager-Oszillationstest (Fafnir)	26
	KSM-Kugelfischer-Spengler-Maschine	26
	SKF-ROF-Prüfeinrichtung	27
3.5	Allgemeines tribologisches Verhalten der Schmierfette	28
3.5.1	Allgemeines	28
3.5.2	Tribometrie zur Untersuchung von Schmierfetten	28
	Kugel-Scheibe Tribometer der HAW Hamburg	28
	Fadenreiß-Prüfstand der Universität Luleå	29
	Kugel-Stoß-Prüfeinrichtung der Universität Luleå	30
	Filmdicken-Prüfeinrichtung des Imperial College London	30

	Spindellagerprüfstand des IMKT der Universität Hannover . .	30
	Gelenklagerprüfstand des IMK der Universität Magdeburg . .	32
	Pendeltribometer der HAW Hamburg	32
	Gleittribometer der Universität Gdansk	32
	Vierlagerprüfstand des IWT der Fachhochschule Düsseldorf . .	33
	Modifiziertes Vierkugel-Tribometer der HAW Hamburg	34
3.5.3	Strukturuntersuchungen	35
	Strukturveränderungen bei tribologischer Beanspruchung . . .	36
	Schmierfett-Topographie	38
	Ergebnisse nach Holweger	40
3.5.4	Ausgewählte EHD-Untersuchungen	40
	Allgemeines zur Elastohydrodynamik (EHD)	40
	Elastohydrodynamischer Kontakt bei Fettschmierung	42
	Allgemeines	42
	Der fettgefüllte Spalt	44
	Schmierfilmdickenuntersuchung	44
	Einfluss der Seife auf den Filmaufbau	49
	Schmierfettfadenbildung	51
	Schmierstoffrückfluss im EHD-Kontakt	52
3.6	Rheologisches Verhalten der Schmierfette	54
3.6.1	Klassifizierung des Fließverhaltens von Stoffen	54
	Newtonsche Flüssigkeiten	55
	Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten	55
	Zeitunabhängiges Nicht-Newtonsches Fließverhalten . .	56
	Zeitabhängiges Nicht-Newtonsches Fließverhalten . . .	57
3.6.2	Beschreibung der Rheologie der Schmierfette	59
	Strukturviskoses Fließverhalten	60
	Modelle des plastisch-strukturviskosen Fließverhaltens	63
	BINGHAM-Modell	63
	Gleichung von CASSON	65
	BAUER-Gleichung von Åström/Höglund	67
	Modifiziertes BINGHAM-Modell von Bair	69
	HERSCHEL-BULKLEY-Gleichung	72
	SISKO-Gleichung	74
	STANULOV et al.-Gleichung	77
	Modelle des zeitabhängigen Fließverhaltens	79
	BAUER-Gleichung	79
	CZARNY-Gleichung	80
	SPIEGEL et al.-Gleichung	82
	Eigener empirischer Ansatz	86
3.6.3	Bemerkungen zur Rheometrie bei der Untersuchung von Schmier-	
	fetten	88
	Rotationsmessungen	88
	Oszillationsmessungen	90

4	Die Reibung im fettgeschmierten Kontakt	93
4.1	Allgemeine Reibungsbetrachtungen	93
	Lösungsalgorithmus einer tribologischen Aufgabenstellung . . .	96
4.2	Die Kontaktgeometrie	97
4.2.1	Hauptkontaktfälle	100
4.2.2	Kontaktmodelle	100
	Kontaktmodell Kugel-Ebene	103
	Kontaktmodell Kugel-Kugel	104
4.2.3	Die Kontaktgeometrie des Schmierfettfilms	107
4.3	Die Festkörperreibung	110
4.3.1	Energiebilanz bei Festkörperreibung	110
4.3.2	Grundlagen zur energetischen Festkörperreibungsberechnung .	112
	Reibungsenergie	112
	Verformungsenergiegedichten mittels Mikroprüfung	112
	Plastische Verformung	112
	Ritzvorgang	115
	Energiedichten aus makroskopischer Prüfung	117
	Aufzuwendende Energiedichte - elastische Deformation	118
	Aufzuwendende Energiedichte - plastische Deformation	120
	Spanende Deformation	121
	Trennen zwischenstofflicher Verbindungen	121
	Stoßartige plastische Deformation (Furchen)	121
	Anzahl gleichartiger Energieanteile	123
	Beanspruchte Volumina	124
4.4	Die Flüssigkeitsreibung	125
4.4.1	Energieaufwendungen bei Fettschmierung	126
	Experimentelle Möglichkeit zur Simulation des Scherprozesses	126
	Versuchseinrichtung	126
	Aufzuwendende Energiedichte beim Schervorgang	126
	Aufzuwendende Energiedichte bis zum Fließen	128
	Aufzuwendende Energiedichte bei Normalbeanspruchung . . .	130
	Möglichkeiten zur Untersuchung des Kohäsionsverhaltens . .	133
	Versuchseinrichtung	133
4.4.2	Beanspruchte Volumina	134
4.5	Die Mischreibung	135
5	Der Verschleiß im fettgeschmierten Kontakt	138
5.1	Die Erweiterung des Verschleißbegriffes	138
5.2	Der Festkörperverschleiß	141
5.2.1	Energetische Verschleißgrundgleichung	141
5.2.2	Scheinbare Reibungsenergiegedichte	143
5.2.3	Kritische Anzahl der Kontaktierungen	145
	Nutzung der Wöhlerkurve	146
	Ermittlung eines verschleißführenden Kontaktanteiles	146

	Anwendung des kumulativen stochastischen Prozesses	148
	Energieakkumulation bei der Bildung von n_k	149
5.3	Der Schmierstoffverschleiß	150
5.3.1	Rheologischer Verschleiß - allgemeine Darstellung	150
5.3.2	Verknüpfung des Reibungs- und Verschleißprozesses	152
	Viskositätsrate	152
	Scheinbare rheologische Reibungsenergiedichte e_{rheo}^*	152
	Energieakkumulationsfaktor	154
	Kritische Beanspruchungszeit	154
	Versuch der Beschreibung von e_{rheo}^*	157
	Schmierfett-Topographie und Verschleiß	157
	Kontaktmodell für den rheologischen Verschleiß	158
	Fettschmierung und Festkörperverschleiß	159
5.4	Allgemeine thermodynamische Betrachtungen	162
5.4.1	Einführende Betrachtungen	162
5.4.2	Thermodynamische Interpretation der scheinbaren Reibungs- energiedichte	164
5.4.3	Thermodynamisches Grundgesetz des tribologischen Verschleißes	165
5.4.4	Neue Interpretationen zum rheologischen Verschleißprozess	166
	Abgeleitete Betrachtungen	166
	Die scheinbare rheologische Reibungsenergiedichte e_{rheo}^*	168
6	Experimentelle Untersuchungen von Modellfetten	171
6.1	Allgemeines	171
6.2	Mischreibungsverhalten	171
	Seifengehalt der Modellfette	172
	Herstellungsparameter	174
	Schmierfett-Topographie	176
	Schlussfolgerungen	178
6.3	Flüssigkeitsreibungsverhalten	179
	Energieaufwendung beim Scheren	180
	Energieaufwendung zum Fließen	181
	Energieaufwendung bei Normalbeanspruchung	182
	Energieaufwendungen beim Trennen eines Fettfadens	185
	Schlussfolgerungen	187
6.4	Festkörperverschleißuntersuchungen	190
	Allgemeine Betrachtungen	190
	Verschleißergebnisse	190
6.5	Schmierstoffverschleißuntersuchungen	191
	Allgemeine Betrachtung	191
	Verschleißergebnisse	192
	Schlussfolgerungen	193

7 Schlussbemerkung	195
Abbildungsverzeichnis	214
Stichwortverzeichnis	219