

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 Prüfmethoden	22
3.4.1 Genormte Versuchseinrichtungen	22
Konuspenetration (DIN 150 2137)	23
Schmierfettgebrauchsdauer: FAG FE9 (DIN 51821)	24
Shell-Vierkugel-Apparat (DIN 51350)	24
Korrosionsschutz-eigenschaften (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 Gdańsk	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
Newtonscche Flüssigkeiten	55
Nicht-Newtonscche Flüssigkeiten	55
Zeitunabhängiges Nicht-Newtonscches Fließverhalten	56
Zeitabhängiges Nicht-Newtonscches 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 Schmierfetten	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
Verformungsenergielichten 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 Reibungsenergielichte	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_{Rrheo}^*	152
	Energieakkumulationsfaktor	154
	Kritische Beanspruchungszeit	154
	Versuch der Beschreibung von e_{Rrheo}^*	157
	Schnierfett-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 Reibungsenergiedichte	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_{Rrheo}^*	168
6	Experimentelle Untersuchungen von Modellfetten	171
6.1	Allgemeines	171
6.2	Mischreibungsverhalten	171
	Seifengehalt der Modellfette	172
	Herstellungsparameter	174
	Schnierfett-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