

Inhaltsverzeichnis

1 Technik und Tribologie	1
1.1 Dimensionen der Technik	1
1.2 Definition der Tribologie	2
1.3 Aufgaben und Bedeutung der Tribologie	4
2 Tribologische Systeme	8
2.1 Einführung in die systemtechnische Methodik	8
2.2 Funktion und Struktur tribologischer Systeme	9
2.3 Dimensionsbereiche tribologischer Systeme und Prozesse	12
2.3.1 Nanotribologie	13
2.3.2 Mikrotribologie	14
2.3.3 Makrotribologie	15
2.4 Methodik zur Reibungs- und Verschleißanalyse	18
3 Tribologische Beanspruchung	19
3.1 Technische Oberflächen	19
3.1.1 Aufbau technischer Oberflächen	19
3.1.2 Mikrogeometrie technischer Oberflächen	22
3.2 Kontaktvorgänge	28
3.2.1 Adhäsion	29
3.2.2 Kontaktgeometrie und Kontaktmechanik	35
3.2.3 Werkstoffanstrengung	46
3.3 Mikro/Nano-Kontakte	53
3.4 Kinematik	59
3.4.1 Bewegungsarten und Bewegungsablauf	59
3.4.2 Grenzflächendynamik	62
3.4.3 Kontakt-Eingriffsverhältnis	65
3.5 Thermische Vorgänge	67
3.5.1 Temperaturen in Tribokontakten	68
3.5.2 Blitztemperaturhypothesen	72
3.5.3 Modellrechnungen von Reibtemperaturen	75
4 Reibung	81
4.1 Grundlagen und Übersicht	81
4.2 Reibungsmessgrößen	82
4.3 Reibungsmechanismen	84
4.3.1 Adhäsion	86
4.3.2 Deformation	92
4.3.3 Furchung	94
4.3.4 Energiedissipation	95
4.4 Reibungsarten	99
4.4.1 Gleitreibung	100
4.4.2 Rollreibung	102
4.4.3 Stick-slip-Vorgänge	105
4.5 Reibung und Wirkungsgrad	108

5 Verschleiß	113
5.1 Grundlagen und Übersicht	113
5.2 Verschleißmessgrößen	115
5.3 Verschleißmechanismen	117
5.3.1 Oberflächenzerrüttung	119
5.3.2 Abrasion	122
5.3.3 Adhäsion	125
5.3.4 Tribochemische Reaktionen	127
5.3.5 Materialdissipation	129
5.4 Verschleißarten	130
5.4.1 Gleitverschleiß	131
5.4.2 Wälzverschleiß	134
5.4.3 Stoßverschleiß	135
5.4.4 Schwingungsverschleiß	137
5.4.5 Furchungsverschleiß	140
5.4.6 Strahlverschleiß	144
5.4.7 Erosion	146
5.5 Verschleiß und Zuverlässigkeit	150
5.6 Maßnahmen zur Verschleißminderung	161
6 Schmierung	163
6.1 Hydrodynamische Schmierungstheorie	164
6.2 Elastohydrodynamische Schmierung	168
6.2.1 Elastohydrodynamik Hertzscher Kontakte	168
6.2.2 Elastohydrodynamische Gleitlagerung	170
7.3 Grenzreibung	174
7 Tribokorrosion	182
7.1 Einfluss des Umgebungsmediums auf tribologische Systeme	182
7.2 Definition und Mechanismen der Korrosion	183
7.3 Korrosionsarten	184
7.4 Tribokorrosion bei Gleitbeanspruchung	186
7.5 Erosionskorrosion	190
8 Tribologische Mess- und Prüftechnik	193
8.1 Aufgaben und Kategorien der tribologischen Prüftechnik	193
8.2 Planung und Auswertung tribologischer Prüfungen	195
8.2.1 Versuchsplanung	196
8.2.2 Versuchsauswertung	199
8.3 Tribologische Laborprüftechnik	203
8.3.1 Prüfsysteme und Prüfmethodik	203
8.3.2 Charakterisierung tribologisch beanspruchter Oberflächen	209
8.3.3 Mechanismenorientierte Prüftechnik	214
8.3.4 Tribologische Ringversuche	218
8.4 Messtechnik der Mikro- und Nanoskala	222
8.4.1 Surface Force Apparatus (SFA)	223
8.4.2 Raster-Tunnel-Mikroskopie	224
8.4.3 Techniken im Rasterkraftmikroskop (SFM, AFM)	226
8.5 Tribologische Simulationsprüftechnik	236
8.5.1 Fallstudie Motortechnik: Tribosystem Kolbenring/Zylinderlaufbahn	239
8.6 Tribologische Betriebsprüftechnik	241

8.7	Ergebnisdarstellung tribologischer Prüfungen	245
8.7.1	Zeitabhängigkeit von Reibung und Verschleiß	245
8.7.2	Abhängigkeiten von Beanspruchungskollektiv und Systemstruktur	248
8.7.3	Tribologische Grenzbeanspruchungs-Diagramme	248
8.7.4	Tribomaps	250
9	Tribotechnische Werkstoffe	253
9.1	Tribotechnische Werkstoffe im Maschinen- und Anlagenbau	256
9.2	Stähle	259
9.3	Eisen-Kohlenstoff-Gusswerkstoffe	389
9.4	Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffe	306
9.5	Nickel- und Kobaltlegierungen	312
9.6	Kupferlegierungen	319
9.7	Aluminiumlegierungen	328
9.8	Titanlegierungen	340
9.9	Hartmetalle	343
9.10	Ingenieurkeramische Werkstoffe	357
9.11	Oberflächenschutzschichten	379
9.12	Polymere Werkstoffe	405
10	Schmierstoffe	422
10.1	Schmieröle	422
10.2	Schmierfette	429
10.3	Festschmierstoffe	431
11	Tribologie von Konstruktionselementen	440
11.1	Lager	441
11.1.1	Gleitlager	443
11.1.2	Wälzlager	464
11.2	Zahnradpaarungen	478
11.3	Axiale Gleitringdichtungen	489
11.4	Kolbenring/Zylinderlaufbahn	497
11.5	Nocken/Nockenfolger	504
12	Mikromechanische Systeme – Magnetische Datenaufzeichnung	510
12.1	Prinzipien der magnetischen Datenspeicherung	510
12.2	Tribologie des Kopf-Band-Interfaces	512
12.3	Tribologie des Kopf-Platten-Interfaces	515
13	Mikrotechnik und die Tribologie von MEMS	524
13.1	Funktion und Struktur von MEMS und MOEMS	524
13.2	Herstellungstechnologien für MEMS	525
13.3	Funktionalität und Skalierung von MEMS.	527
13.3.1	Mikrosensoren	528
13.3.2	Mikroaktoren	529
13.4	Tribologie von MEMS	530
13.5	Tribomaterialien für MEMS	535
13.6	Zuverlässigkeit von MEMS	540
14	Tribologie in der Produktionstechnik	543
14.1	Tribologische Systeme in Werkzeugmaschinen	544
14.1.1	Das Tribosystem der Fertigung	545

14.1.2 Tribologische Bewegungssysteme in Werkzeugmaschinen	545
14.2 Führungen und Lagerungen in Werkzeugmaschinen	547
14.3 Optimierung tribotechnischer Werkzeugmaschinenelemente	551
14.4 Tribologie der Zerspanungstechnik	553
14.4.1 Technologien zur Verschleißminderung an Werkzeugen	553
14.4.2 Hartstoffschichten für Zerspanwerkzeuge	554
14.5 Triboinduzierte Innovationen in der Produktionstechnik	558
14.6 Verfügbarkeit von Produktionsanlagen und Instandhaltung	563
15 Tribologie von Werkzeugen	565
15.1 Zerspanwerkzeuge	565
15.2 Umformwerkzeuge	575
16 Vakuumtribologie	586
16.1 Tribosysteme in Vakuumumgebung	586
16.2 Bedingungen und Erfordernisse der Vakuumumgebung	587
16.3 Apparaturen für tribologische Untersuchungen im Vakuum	590
16.4 Werkstoffe für Tribosysteme im Vakuum	592
16.4.1 Beschichtungen, Festschmierstoffe	593
16.4.2 Flüssige Schmierstoffe, Fette	596
16.4.3 Polymere und Polymer-Komposite	596
17 Tieftemperaturtribologie	599
17.1 Tribosysteme in der Kryotechnik	599
17.2 Tribologische Prüftechnik für Temperaturen unterhalb 120 K	600
17.3 Werkstoffe für Tribosysteme bei tiefen Temperaturen	603
17.3.1 Metallische Werkstoffe	603
17.3.2 Polymere und Polymer-Komposite	605
17.3.3 Festschmierstoffe	608
18 Hochtemperaturtribologie	611
18.1 Tribosysteme in der Hochtemperaturtechnik	611
18.2 Tribologische Prüftechnik für Temperaturen oberhalb 400 °C	614
18.3 Werkstoffe für Tribosysteme bei hohen Temperaturen	615
18.3.1 Metallische Werkstoffe	615
18.3.2 Ingenieurkeramiken	616
18.3.3 Hartmetalle	618
18.3.5 Triboaktive Werkstoffe	621
19 Methodik zur Bearbeitung von Reibungs- und Verschleißproblemen	624
19.1 Tribotechnische Werkstoffauswahl	624
19.1.1 Systemmethodik zur Werkstoffauswahl	624
19.1.2 Fallstudie: wartungsfreies Feinwerktechnik-Gleitlager	627
19.2 Tribotechnische Schadensanalyse	631
19.2.1 Fallstudie: Schaden an einem Kompressor-Dichtungssystem	632
19.2.2 Methodik der Schadensanalyse	634
20 Atlas von Verschleißerscheinungsbildern	636
21 Reibungs- und Verschleißdaten	658
21.1 Methodische Grundlagen	658
21.2 Tribologische Datenbank für Reibungs- und Verschleißdaten	661

22 Machinery Diagnostics	664
22.1 Failure Prevention Strategies	664
22.1.1 Root-Cause Analysis	665
22.1.2 Statistical Control	665
22.1.3 Reliability Engineering	666
22.1.4 Asset Maintenance	668
22.1.5 Knowledge-Based Systems	670
22.2 Condition Monitoring	671
22.2.1 Vibration Monitoring	673
22.2.2 Oil Monitoring	675
22.2.3 Corrosion Monitoring	678
22.2.4 Thermal Monitoring	679
22.2.5 Electrical Signature Analysis	680
22.3 Nondestructive Evaluation	681
22.3.1 Visual Inspection	681
22.3.2 Liquid Penetrant and Magnetic Particle Inspection	681
22.3.3 Eddy Current Inspection	682
22.3.4 Radiography	682
22.3.5 Acoustic Emission and Ultrasonic Detection Inspection	683
22.4 Tribo-system Applications	684
22.4.1 Bearings	684
22.4.2 Gears	687
22.4.3 Seals	688
22.4.4 Lubricants	688
22.4.5 Hydraulic Systems	690
Anhang Normen auf dem Gebiet der Tribologie	692
Literaturverzeichnis	703
Sachwortverzeichnis	747