

Horst Czichos
Karl-Heinz Habig

Tribologie - Handbuch

Reibung und Verschleiß

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 471 Abbildungen und 115 Tabellen

Bearbeitet von Erich Santner und
Mathias Woydt.

Unter Mitarbeit von Klaus Gerschwiler,
Erich Kleinlein, Fritz Klocke, Gunter Knoll,
Eckard Schopf und Frank E. Talke



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----|
| 1 | Einführung und Übersicht | 1 |
| 1.1 | Definition und Aufgabe der Tribologie..... | 1 |
| 1.2 | Bedeutung der Tribologie..... | 2 |
| 2 | Tribotechnische Systeme | 10 |
| 2.1 | Funktion tribotechnischer Systeme..... | 11 |
| 2.2 | Struktur tribotechnischer Systeme..... | 12 |
| 2.3 | Parametergruppen tribotechnischer Systeme..... | 14 |
| 2.4 | Datenblatt tribotechnischer Systeme..... | 17 |
| 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 | Kinematik..... | 53 |
| 3.3.1 | Bewegungsarten und Bewegungsablauf..... | 53 |
| 3.3.2 | Grenzflächendynamik..... | 56 |
| 3.3.3 | Kontakt-Eingriffsverhältnis..... | 59 |
| 3.4 | Thermische Vorgänge..... | 61 |
| 3.4.1 | Temperaturen in Tribokontakten..... | 62 |
| 3.4.2 | Blitztemperaturhypothesen..... | 66 |
| 3.4.3 | Rechnerprogramme zur Reibtemperaturberechnung..... | 69 |
| 3.5 | Mikrokontakte..... | 74 |
| 4 | Reibung | 81 |
| 4.1 | Grundlagen und Übersicht..... | 81 |
| 4.2 | Reibungsmessgrößen..... | 83 |
| 4.3 | Reibungsmechanismen..... | 85 |
| 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..... | 136 |
| 5.4.4 | Schwingungverschleiß..... | 137 |
| 5.4.5 | Furchungverschleiß..... | 140 |
| 5.4.6 | Strahlverschleiß..... | 144 |
| 5.4.7 | Erosion..... | 146 |
| 5.5 | Verschleiß und Zuverlässigkeit..... | 150 |
| 5.6 | Maßnahmen zur Verschleißminderung..... | 160 |
| 6 | Reibungs- und Verschleißprüftechnik..... | 162 |
| 6.1 | Aufgaben und Kategorien der tribologischen Prüftechnik..... | 162 |
| 6.2 | Planung und Auswertung tribologischer Prüfungen..... | 165 |
| 6.2.1 | Statistische Versuchsplanung..... | 165 |
| 6.2.2 | Statistische Versuchsauswertung..... | 168 |
| 6.3 | Tribologische Laborprüftechnik..... | 172 |
| 6.3.1 | Grundlagen der Tribometrie..... | 172 |
| 6.3.2 | Prüftechnik für die Mikro/Nanotribologie..... | 177 |
| 6.3.3 | Mechanismenorientierte Verschleißprüftechnik..... | 181 |
| 6.4 | Tribologische Modell- und Simulationsprüftechnik..... | 185 |
| 6.4.1 | Methodik der Simulationsprüftechnik..... | 186 |
| 6.4.2 | Fallstudie: Verschleißsimulation von Baumaschinenkomponenten..... | 194 |
| 6.4.3 | Fallstudie: Kolbenring/Zylinderlaufbahn..... | 199 |
| 6.5 | Tribologische Betriebsprüftechnik..... | 202 |
| 6.6 | Tribologische Ringversuche..... | 206 |
| 6.7 | Oberflächenmesstechnik und -analytik..... | 212 |
| 6.7.1 | Oberflächenrauheitsmesstechnik..... | 212 |
| 6.7.2 | Oberflächenanalytik..... | 214 |
| 6.8 | Ergebnisdarstellung tribologischer Prüfungen..... | 217 |
| 6.8.1 | Zeitabhängigkeit von Reibung und Verschleiß..... | 217 |
| 6.8.2 | Reibung und Verschleiß als Funktion von Beanspruchungs- und Strukturparametern..... | 220 |
| 6.8.3 | Tribologische Versagens-Diagramme..... | 221 |
| 6.8.4 | Tribomechanismen-Diagramme..... | 224 |
| 7 | Schmierung..... | 225 |
| 7.1 | Hydrodynamische Schmierungstheorie..... | 226 |
| 7.2 | Elastohydrodynamische Schmierung..... | 230 |
| 7.2.1 | Elastohydrodynamik Hertzscher Kontakte..... | 230 |
| 7.2.2 | Elastohydrodynamische Gleitlagerung..... | 232 |
| 7.3 | Grenzreibung..... | 236 |
| 8 | Schmierstoffe..... | 246 |
| 8.1 | Schmieröle..... | 246 |

| | | |
|----------------------------------|---|------------|
| 8.2 | Schmierfette..... | 258 |
| 8.3 | Festschmierstoffe..... | 262 |
| 9 | Tribotechnische Werkstoffe..... | 270 |
| 9.1 | Stähle..... | 273 |
| 9.2 | Eisen-Kohlenstoff-Gusswerkstoffe..... | 304 |
| 9.3 | Hartlegierungen..... | 321 |
| 9.4 | Nickel- und Kobaltlegierungen..... | 326 |
| 9.5 | Kupferlegierungen..... | 333 |
| 9.6 | Aluminiumlegierungen..... | 342 |
| 9.7 | Titanlegierungen..... | 354 |
| 9.8 | Hartmetalle..... | 357 |
| 9.9 | Ingenieurkeramische Werkstoffe..... | 371 |
| 9.10 | Oberflächenschutzschichten..... | 395 |
| 9.11 | Polymere Werkstoffe..... | 422 |
| 10 | Tribologie von Konstruktionselementen..... | 437 |
| 10.1 | Lager..... | 437 |
| 10.1.1 | Gleitlager..... | 439 |
| 10.1.2 | Wälzlager..... | 459 |
| 10.2 | Zahnradpaarungen..... | 474 |
| 10.3 | Axiale Gleitringdichtungen..... | 485 |
| 10.4 | Kolbenring/Zylinderlaufbahn..... | 493 |
| 10.5 | Nocken/Nockenfolger..... | 500 |
| 10.6 | Mikromechanische Systeme - Magnetische Datenaufzeichnung..... | 505 |
| 10.6.1 | Tribologie des Kopf-Band-Interfaces..... | 507 |
| 10.6.2 | Tribologie des Kopf-Platten-Interfaces..... | 510 |
| 10.6.3 | Zukunftstrends in der Magnetspeicherung..... | 518 |
| 11 | Tribologie von Werkzeugen..... | 520 |
| 11.1 | Zerspanwerkzeuge..... | 520 |
| 11.2 | Umformwerkzeuge..... | 530 |
| 12 | Methodik zur Bearbeitung von Reibungs- und Verschleißproblemen..... | 542 |
| 12.1 | Tribotechnische Werkstoffauswahl..... | 542 |
| 12.1.1 | Systemmethodik zur Werkstoffauswahl..... | 542 |
| 12.1.2 | Fallstudie: Werkstoffauswahl für ein wartungsfreies Feinwerk- technik-Gleitlager..... | 545 |
| 12.2 | Tribotechnische Schadensanalyse..... | 550 |
| 12.2.1 | Fallstudie: Schaden an einem Kompressor-Dichtungssystem..... | 550 |
| 12.2.2 | Methodik der Schadensanalyse..... | 553 |
| Anhang A | Verschleißatlas - Erscheinungsbilder tribologisch beanspruchter Oberflächen..... | 555 |
| Anhang B | Ausgewählte Reibungs- und Verschleißdaten von Werkstoffpaarungen bei Festkörpergleitreibung..... | 577 |
| Anhang C | Normen auf dem Gebiet der Tribologie..... | 601 |
| Literaturverzeichnis..... | | 614 |
| Sachwortverzeichnis..... | | 648 |