

# Inhaltsverzeichnis

## Teil A Einführung

|          |                                                                 |          |
|----------|-----------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Overview of Tribology</b>                                    | <b>3</b> |
|          | Horst Czichos                                                   |          |
| 1.1      | Definition and Scope of Tribology                               | 3        |
| 1.2      | Tribological Systems and Basic Tribological Parameters          | 4        |
| 1.2.1    | Function of Tribosystems                                        | 4        |
| 1.2.2    | Structural Parameters                                           | 5        |
| 1.2.3    | Operational Parameters                                          | 6        |
| 1.2.4    | Interaction Parameters                                          | 6        |
| 1.2.5    | Contact Mechanics                                               | 6        |
| 1.2.6    | Friction                                                        | 8        |
| 1.2.7    | Wear                                                            | 11       |
| 1.2.8    | Friction, Wear and Lubrication                                  | 11       |
| 1.2.9    | Tribotronics – Technology to Avoid Friction and Wear            | 14       |
| 1.3      | Tribometry: Application of Measurement and Testing to Tribology | 15       |
| 1.3.1    | Categories of Tribometry                                        | 15       |
| 1.3.2    | Laboratory Tribometry                                           | 16       |
| 1.3.3    | Investigations of Worn Surfaces                                 | 18       |
| 1.4      | Presentation of Friction and Wear Characteristics and Tribodata | 21       |
| 1.4.1    | Dependence of Friction Data on Time                             | 21       |
| 1.4.2    | Dependence of Wear Data on Time                                 | 22       |
| 1.4.3    | Dependence of Tribodata on Operational Parameters               | 23       |
| 1.4.4    | Dependence of Tribodata on Structural Parameters                | 24       |
| 1.4.5    | Influence of Ambient Media on Tribodata                         | 24       |
| 1.4.6    | Transition Diagrams                                             | 25       |
| 1.4.7    | Tribomaps                                                       | 26       |

|                              |                                                                  |            |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>2</b>                     | <b>Technik und Tribologie</b> . . . . .                          | <b>31</b>  |
|                              | Horst Czichos                                                    |            |
| 2.1                          | Dimensionen der Technik . . . . .                                | 31         |
| 2.2                          | Definition der Tribologie . . . . .                              | 33         |
| 2.3                          | Aufgaben und Bedeutung der Tribologie . . . . .                  | 35         |
| <b>3</b>                     | <b>Tribologische Systeme</b> . . . . .                           | <b>41</b>  |
|                              | Horst Czichos                                                    |            |
| 3.1                          | Einführung in die systemtechnische Methodik . . . . .            | 41         |
| 3.2                          | Funktion und Struktur tribologischer Systeme . . . . .           | 43         |
| 3.3                          | Dimensionsbereiche tribologischer Systeme und Prozesse . . . . . | 45         |
|                              | 3.3.1 Nanotribologie . . . . .                                   | 47         |
|                              | 3.3.2 Mikrotribologie . . . . .                                  | 47         |
|                              | 3.3.3 Makrotribologie . . . . .                                  | 49         |
| 3.4                          | Methodik zur Reibungs- und Verschleißanalyse . . . . .           | 53         |
| <br><b>Teil B Grundlagen</b> |                                                                  |            |
| <b>4</b>                     | <b>Tribologische Beanspruchung</b> . . . . .                     | <b>57</b>  |
|                              | Horst Czichos und Erich Santner                                  |            |
| 4.1                          | Technische Oberflächen . . . . .                                 | 57         |
|                              | 4.1.1 Aufbau technischer Oberflächen . . . . .                   | 57         |
|                              | 4.1.2 Mikrogeometrie technischer Oberflächen . . . . .           | 61         |
| 4.2                          | Kontaktvorgänge . . . . .                                        | 66         |
|                              | 4.2.1 Adhäsion . . . . .                                         | 67         |
|                              | 4.2.2 Kontaktgeometrie und Kontaktmechanik . . . . .             | 73         |
|                              | 4.2.3 Werkstoffanstrengung . . . . .                             | 84         |
| 4.3                          | Mikro/Nano-Kontakte . . . . .                                    | 91         |
| 4.4                          | Kinematik . . . . .                                              | 97         |
|                              | 4.4.1 Bewegungsarten und Bewegungsablauf . . . . .               | 98         |
|                              | 4.4.2 Grenzflächendynamik . . . . .                              | 101        |
|                              | 4.4.3 Kontakt-Eingriffsverhältnis . . . . .                      | 104        |
| 4.5                          | Thermische Vorgänge . . . . .                                    | 107        |
|                              | 4.5.1 Temperaturen in Tribokontakten . . . . .                   | 107        |
|                              | 4.5.2 Blitztemperaturhypothesen . . . . .                        | 111        |
|                              | 4.5.3 Modellrechnungen von Reibtemperaturen . . . . .            | 114        |
| <b>5</b>                     | <b>Reibung</b> . . . . .                                         | <b>121</b> |
|                              | Horst Czichos                                                    |            |
| 5.1                          | Grundlagen und Übersicht . . . . .                               | 121        |
| 5.2                          | Reibungsmessgrößen . . . . .                                     | 122        |

|          |                                                  |            |
|----------|--------------------------------------------------|------------|
| 5.3      | Reibungsmechanismen . . . . .                    | 124        |
| 5.3.1    | Adhäsion . . . . .                               | 127        |
| 5.3.2    | Deformation . . . . .                            | 133        |
| 5.3.3    | Furchung . . . . .                               | 135        |
| 5.3.4    | Energiedissipation . . . . .                     | 136        |
| 5.4      | Reibungsarten . . . . .                          | 140        |
| 5.4.1    | Gleitreibung . . . . .                           | 141        |
| 5.4.2    | Rollreibung . . . . .                            | 143        |
| 5.4.3    | Stick-slip-Vorgänge . . . . .                    | 146        |
| 5.5      | Reibung und Wirkungsgrad . . . . .               | 149        |
| <b>6</b> | <b>Verschleiß . . . . .</b>                      | <b>155</b> |
|          | Horst Czichos                                    |            |
| 6.1      | Grundlagen und Übersicht . . . . .               | 155        |
| 6.2      | Verschleißmessgrößen . . . . .                   | 155        |
| 6.3      | Verschleißmechanismen . . . . .                  | 160        |
| 6.3.1    | Oberflächenzerrüttung . . . . .                  | 161        |
| 6.3.2    | Abrasion . . . . .                               | 165        |
| 6.3.3    | Adhäsion . . . . .                               | 168        |
| 6.3.4    | Tribochemische Reaktionen . . . . .              | 170        |
| 6.3.5    | Materialdissipation . . . . .                    | 172        |
| 6.4      | Verschleißarten . . . . .                        | 174        |
| 6.4.1    | Gleitverschleiß . . . . .                        | 175        |
| 6.4.2    | Wälzverschleiß . . . . .                         | 178        |
| 6.4.3    | Stoßverschleiß . . . . .                         | 179        |
| 6.4.4    | Schwingungverschleiß . . . . .                   | 182        |
| 6.4.5    | Furchungverschleiß . . . . .                     | 184        |
| 6.4.6    | Strahlverschleiß . . . . .                       | 188        |
| 6.4.7    | Erosion . . . . .                                | 190        |
| 6.5      | Verschleiß und Zuverlässigkeit . . . . .         | 195        |
| 6.6      | Maßnahmen zur Verschleißminderung . . . . .      | 206        |
| <b>7</b> | <b>Schmierung . . . . .</b>                      | <b>211</b> |
|          | Karl-Heinz Habig und Gunter Knoll                |            |
| 7.1      | Hydrodynamische Schmierungstheorie . . . . .     | 212        |
| 7.2      | Elastohydrodynamische Schmierung . . . . .       | 216        |
| 7.2.1    | Elastohydrodynamik Hertzscher Kontakte . . . . . | 217        |
| 7.2.2    | Elastohydrodynamische Gleitlagerung . . . . .    | 217        |
| 7.3      | Grenzreibung . . . . .                           | 222        |

**8 Tribokorrosion . . . . . 231**  
Horst Czichos und Jean-Pierre Celis  
8.1 Einfluss des Umgebungsmediums auf tribologische Systeme . . . . . 231  
8.2 Definition und Mechanismen der Korrosion . . . . . 233  
8.3 Korrosionsarten . . . . . 234  
8.4 Tribokorrosion bei Gleitbeanspruchung . . . . . 236  
8.5 Erosionskorrosion . . . . . 240

**9 Tribologische Mess- und Prüftechnik . . . . . 245**  
Horst Czichos und Heinz Sturm  
9.1 Aufgaben und Kategorien der tribologischen Prüftechnik . . . . . 245  
9.2 Planung und Auswertung tribologischer Prüfungen . . . . . 248  
9.2.1 Versuchsplanung . . . . . 248  
9.2.2 Versuchsauswertung . . . . . 252  
9.3 Tribologische Laborprüftechnik . . . . . 257  
9.3.1 Prüfsysteme und Prüfmethodik . . . . . 257  
9.3.2 Charakterisierung tribologisch beanspruchter Oberflächen . . . . . 262  
9.3.3 Mechanismenorientierte Prüftechnik . . . . . 268  
9.3.4 Tribologische Ringversuche . . . . . 273  
9.4 Messtechnik der Mikro- und Nanoskala . . . . . 277  
9.4.1 Surface Force Apparatus (SFA) . . . . . 278  
9.4.2 Raster-Tunnel-Mikroskopie . . . . . 279  
9.4.3 Techniken im Rasterkraftmikroskop (SFM, AFM) . . . . . 281  
9.5 Tribologische Simulationsprüftechnik . . . . . 292  
9.5.1 Fallstudie Motortechnik: Tribosystem  
Kolbenring/Zylinderlaufbahn . . . . . 295  
9.6 Tribologische Betriebsprüftechnik . . . . . 298  
9.7 Ergebnisdarstellung tribologischer Prüfungen . . . . . 302  
9.7.1 Zeitabhängigkeit von Reibung und Verschleiß . . . . . 302  
9.7.2 Abhängigkeiten von Beanspruchungskollektiv und Systemstruktur 305  
9.7.3 Tribologische Grenzbeanspruchungs-Diagramme . . . . . 306  
9.7.4 Tribomaps . . . . . 308

**Teil C Tribomaterialien**

**10 Tribotechnische Werkstoffe . . . . . 313**  
Karl-Heinz Habig und Alfons Fischer  
10.1 Tribotechnische Werkstoffe im Maschinen- und Anlagenbau . . . . . 316  
10.2 Stähle . . . . . 320  
10.3 Eisen-Kohlenstoff-Gusswerkstoffe . . . . . 341  
10.4 Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffe . . . . . 354

|                                |                                                                         |            |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.5                           | Nickel- und Kobaltlegierungen . . . . .                                 | 360        |
| 10.6                           | Kupferlegierungen . . . . .                                             | 365        |
| 10.7                           | Aluminiumlegierungen . . . . .                                          | 372        |
| 10.8                           | Titanlegierungen . . . . .                                              | 381        |
| 10.9                           | Hartmetalle . . . . .                                                   | 383        |
| 10.10                          | Ingenieurkeramische Werkstoffe . . . . .                                | 391        |
| 10.11                          | Oberflächenschutzschichten . . . . .                                    | 413        |
| 10.12                          | Polymere Werkstoffe . . . . .                                           | 430        |
| <b>11</b>                      | <b>Schmierstoffe . . . . .</b>                                          | <b>447</b> |
|                                | Karl-Heinz Habig und Theo Mang                                          |            |
| 11.1                           | Schmieröle . . . . .                                                    | 448        |
| 11.2                           | Schmierfette . . . . .                                                  | 456        |
| 11.3                           | Festschmierstoffe . . . . .                                             | 458        |
| 11.4                           | Bioschmierstoffe . . . . .                                              | 465        |
|                                | 11.4.1 Objektive Kriterien der besonderen Umweltverträglichkeit . . . . | 467        |
|                                | 11.4.2 Basisöle und Additive für Bioschmierstoffe . . . . .             | 467        |
|                                | 11.4.3 Tribologische Eigenschaften . . . . .                            | 468        |
|                                | 11.4.4 Einsatzbeispiel Hydrauliköle . . . . .                           | 469        |
| <br><b>Teil D Tribotechnik</b> |                                                                         |            |
| <b>12</b>                      | <b>Tribologie von Konstruktionselementen . . . . .</b>                  | <b>473</b> |
|                                | Karl-Heinz Habig                                                        |            |
| 12.1                           | Lager . . . . .                                                         | 475        |
|                                | 12.1.1 Gleitlager . . . . .                                             | 475        |
|                                | 12.1.2 Wälzlager . . . . .                                              | 496        |
| 12.2                           | Zahnradpaarungen . . . . .                                              | 510        |
| 12.3                           | Axiale Gleitringdichtungen . . . . .                                    | 520        |
| 12.4                           | Kolbenring/Zylinderlaufbahn . . . . .                                   | 528        |
| 12.5                           | Nocken/Nockenfolger . . . . .                                           | 535        |
| <b>13</b>                      | <b>Tribologie im Computer . . . . .</b>                                 | <b>541</b> |
|                                | Frank E. Talke                                                          |            |
| 13.1                           | Prinzipien der magnetischen Datenspeicherung . . . . .                  | 542        |
| 13.2                           | Tribologie des Kopf-Band-Interfaces . . . . .                           | 545        |
| 13.3                           | Tribologie des Kopf-Platten-Interfaces . . . . .                        | 549        |
| 13.4                           | Nano Interface-Technologie in Computer-Festplattenlaufwerken . . . .    | 556        |

|           |                                                         |            |
|-----------|---------------------------------------------------------|------------|
| <b>14</b> | <b>Tribologie in der Mikrotechnik</b>                   | <b>563</b> |
|           | Horst Czichos                                           |            |
| 14.1      | Funktion und Struktur von MEMS und MOEMS                | 563        |
| 14.2      | Herstellungstechnologien für MEMS                       | 565        |
| 14.3      | Funktionalität und Skalierung von MEMS                  | 567        |
| 14.3.1    | Mikrosensoren                                           | 567        |
| 14.3.2    | Mikroaktoren                                            | 568        |
| 14.4      | Tribotechnik von MEMS                                   | 570        |
| 14.5      | Tribometrie und Beanspruchungsanalyse von MEMS          | 573        |
| 14.6      | Tribomaterialien für MEMS                               | 576        |
| 14.7      | Zuverlässigkeit von MEMS                                | 581        |
| <b>15</b> | <b>Tribologie in der Produktionstechnik</b>             | <b>585</b> |
|           | Eckart Uhlmann                                          |            |
| 15.1      | Tribologische Systeme in Werkzeugmaschinen              | 586        |
| 15.1.1    | Das Tribosystem der Fertigung                           | 587        |
| 15.1.2    | Tribologische Bewegungssysteme in Werkzeugmaschinen     | 588        |
| 15.1.3    | Koppel- und Fügestellen                                 | 589        |
| 15.2      | Führungen und Lagerungen in Werkzeugmaschinen           | 590        |
| 15.3      | Optimierung tribotechnischer Werkzeugmaschinenelemente  | 594        |
| 15.4      | Tribologie der Zerspanungstechnik                       | 596        |
| 15.4.1    | Technologien zur Verschleißminimierung an Werkzeugen    | 597        |
| 15.4.2    | Technologien zur Verschleißminimierung am Bauteil       | 603        |
| 15.5      | Triboinduzierte Innovationen in der Produktionstechnik  | 607        |
| 15.6      | Verfügbarkeit von Produktionsanlagen und Instandhaltung | 610        |
| <b>16</b> | <b>Tribologie von Werkzeugen</b>                        | <b>613</b> |
|           | Peter Groche                                            |            |
| 16.1      | Reibung                                                 | 615        |
| 16.2      | Werkzeugverschleiß                                      | 619        |
| 16.3      | Tribologische Prüfverfahren                             | 625        |
| 16.4      | Umformwerkzeuge                                         | 628        |
| 16.5      | Zerspanwerkzeuge                                        | 630        |
| <b>17</b> | <b>Vakuumtribologie</b>                                 | <b>635</b> |
|           | Thomas Gradt                                            |            |
| 17.1      | Tribosysteme in Vakuumumgebung                          | 636        |
| 17.2      | Bedingungen und Erfordernisse der Vakuumumgebung        | 637        |
| 17.3      | Apparaturen für tribologische Untersuchungen im Vakuum  | 640        |
| 17.4      | Werkstoffe für Tribosysteme im Vakuum                   | 643        |
| 17.4.1    | Beschichtungen, Festschmierstoffe                       | 643        |
| 17.5      | Flüssige Schmierstoffe, Fette                           | 646        |
| 17.5.1    | Polymere und Polymer-Komposite                          | 647        |

|                            |                                                                               |     |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>18</b>                  | <b>Tieftemperaturtribologie</b> . . . . .                                     | 649 |
|                            | Thomas Gradt                                                                  |     |
| 18.1                       | Tribosysteme in der Kryotechnik . . . . .                                     | 650 |
| 18.2                       | Tribologische Prüftechnik für Temperaturen unterhalb 120 K . . . . .          | 651 |
| 18.3                       | Werkstoffe für Tribosysteme bei tiefen Temperaturen . . . . .                 | 654 |
|                            | 18.3.1 Metallische Werkstoffe . . . . .                                       | 655 |
|                            | 18.3.2 Polymere und Polymer-Komposite . . . . .                               | 657 |
|                            | 18.3.3 Festschmierstoffe . . . . .                                            | 660 |
| <b>19</b>                  | <b>Hochtemperaturtribologie</b> . . . . .                                     | 663 |
|                            | Mathias Woydt                                                                 |     |
| 19.1                       | Tribosysteme in der Hochtemperaturtechnik . . . . .                           | 663 |
| 19.2                       | Tribologische Prüftechnik für Temperaturen oberhalb 400 °C . . . . .          | 666 |
| 19.3                       | Werkstoffe für Tribosysteme bei hohen Temperaturen . . . . .                  | 667 |
|                            | 19.3.1 Metallische Werkstoffe . . . . .                                       | 668 |
|                            | 19.3.2 Ingenieurkeramiken . . . . .                                           | 669 |
|                            | 19.3.3 Hartmetalle . . . . .                                                  | 671 |
|                            | 19.3.4 Triboaktive Werkstoffe . . . . .                                       | 675 |
| <br><b>Teil E Methodik</b> |                                                                               |     |
| <b>20</b>                  | <b>Methodik zur Bearbeitung von Reibungs- und Verschleißproblemen</b> . . . . | 681 |
|                            | Horst Czichos                                                                 |     |
| 20.1                       | Tribotechnische Werkstoffauswahl . . . . .                                    | 681 |
|                            | 20.1.1 Systemmethodik zur Werkstoffauswahl . . . . .                          | 682 |
|                            | 20.1.2 Fallstudie: wartungsfreies Feinwerktechnik-Gleitlager . . . . .        | 684 |
| 20.2                       | Tribotechnische Schadensanalyse . . . . .                                     | 689 |
|                            | 20.2.1 Fallstudie: Schadensanalyse eines Kompressor-Dichtungssystems          | 689 |
|                            | 20.2.2 Methodik der tribologischen Schadensanalyse . . . . .                  | 691 |
| <b>21</b>                  | <b>Atlas von Verschleißerscheinungsbildern</b> . . . . .                      | 695 |
|                            | Karl-Heinz Habig                                                              |     |
| <b>22</b>                  | <b>Reibungs- und Verschleißdaten</b> . . . . .                                | 717 |
|                            | Horst Czichos                                                                 |     |
| 22.1                       | Methodische Grundlagen . . . . .                                              | 718 |
| 22.2                       | Tribologische Datenbank für Reibungs- und Verschleißdaten . . . . .           | 721 |

**Teil F Zustandsüberwachung**

**23 Machinery Diagnostics: Fundamentals and Tribosystem Applications . . . 727**  
Richard S. Cowan and Ward O. Winer

23.1 Failure Prevention Strategies . . . . . 728

23.1.1 Root-Cause Analysis . . . . . 728

23.1.2 Statistical Control . . . . . 729

23.1.3 Reliability Engineering . . . . . 730

23.1.4 Asset Maintenance . . . . . 732

23.1.5 Knowledge-Based Systems . . . . . 735

23.2 Condition Monitoring . . . . . 736

23.2.1 Vibration Monitoring . . . . . 738

23.2.2 Oil Monitoring . . . . . 740

23.2.3 Corrosion Monitoring . . . . . 743

23.2.4 Thermal Monitoring . . . . . 744

23.2.5 Electrical Signature Analysis . . . . . 746

23.3 Nondestructive Evaluation . . . . . 747

23.3.1 Visual Inspection . . . . . 747

23.3.2 Liquid Penetrant and Magnetic Particle Inspection . . . . . 748

23.3.3 Eddy Current Inspection . . . . . 748

23.3.4 Radiography . . . . . 749

23.3.5 Acoustic Emission and Ultrasonic Detection Inspection . . . . . 749

23.4 Tribosystem Applications . . . . . 751

23.4.1 Bearings . . . . . 751

23.4.2 Gears . . . . . 754

23.4.3 Seals . . . . . 756

23.4.4 Lubricants in tribosystems . . . . . 757

23.4.5 Hydraulic Systems . . . . . 758

**Literatur . . . . . 761**

**Stichwortverzeichnis . . . . . 809**

**Index of English Terms . . . . . 823**