

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Tribologische Grundlagen	3
2.1	Tribologisches System	3
2.2	Reibung	6
2.2.1	Makroskopische Betrachtung	7
2.2.2	Mikroskopische Betrachtung	7
2.2.3	Reibungsarten	10
2.2.4	Reibungszustände	11
2.2.5	Reibungszahlen	12
2.3	Verschleißarten	14
2.4	Verschleißmechanismen	14
2.4.1	Adhäsion	16
2.4.2	Abrasion	18
2.4.3	Oberflächenzerrüttung	20
2.4.4	Tribochemische Reaktion	21
2.4.5	Ablation	23
2.5	Zusammenhang zwischen Reibung und Verschleiß	24
2.6	Ausfallkriterien	28
3	Methodik der Analyse tribologischer Schäden	35
3.1	Strukturanalyse	37
3.2	Beanspruchungsanalyse	38
4	Gleitverschleiß	40
4.1	Grundlagen geschmierter Tribosysteme	40
4.1.1	Hydrodynamik	40
4.1.2	Mischreibung und Grenzreibung	42
4.2	Verschleißerscheinungsformen bei Hydrodynamik und Mischreibung	45
4.2.1	Riefen	46
4.2.2	Einbettung von Fremdpartikeln	49
4.2.3	Eindrückungen	52
4.2.4	Ausbrüche	52
4.2.5	Ungleichmäßiges Tragbild	56
4.2.6	Rattermarken	57
4.2.7	Fresser	59
4.2.8	Werkstoffübertrag	64
4.2.9	Schubrisse	67
4.2.10	Brandrisse	69
4.2.11	Gefügeänderung	72
4.2.12	Schmelzerscheinungen	78
4.2.13	Stromübergang	81

4.2.14	Tribochemische Reaktionsschicht	83
4.2.15	Plastische Oberflächenverformung	86
4.2.16	Profiländerung	88
4.3	Grundlagen ungeschmierter Tribosysteme	90
4.3.1	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	91
4.3.2	Strukturbedingte Einflüsse	96
4.4	Besonderheiten bei Trockenreibung im Vakuum	100
4.5	Verschleißerscheinungsformen bei ungeschmierter Gleitreibung	101
4.5.1	Riefen	101
4.5.2	Werkstoffübertrag	102
4.5.3	Schubrisse	103
4.5.4	Brandrisse	103
4.5.5	Gefügeänderung	106
4.5.6	Tribooxidation	110
5	Schwingungverschleiß (<i>Fretting</i>)	119
5.1	Grundlagen	119
5.1.1	Bewegungsformen	119
5.1.2	Stofftransport und Reibungszustand	119
5.1.3	Systemklassen	120
5.1.4	Verschleißmechanismen bei Schwingungverschleiß	122
5.1.4.1	Adhäsion mit Werkstoffübertrag	122
5.1.4.2	Abrasion	122
5.1.4.3	Tribooxidation	123
5.1.4.4	Oberflächenzerrüttung	124
5.1.4.5	Zeitlicher Wechsel von Verschleißmechanismen am Beispiel von Zahnwellenverbindungen und -kupplungen	124
5.2	Verschleißerscheinungsformen durch Schwingungverschleiß	127
5.2.1	Beläge (Tribooxidation, Reiboxidation, Reibrost, Passungsrost)	128
5.2.2	Narben	135
5.2.3	Mulden	138
5.2.4	Riffel	140
5.2.5	Wurmsspuren	145
5.2.6	Stillstandsmarkierungen (<i>false brinelling</i>)	149
5.2.7	Schwingungverschleiß mit überwiegend einem Verschleiß- mechanismus	157
5.3	Reibdauerbrüche (<i>fretting fatigue</i>)	160
5.4	Allgemeine Hinweise zur Minderung von Schwingungverschleiß	173
6	Wälzverschleiß	180
6.1	Grundlagen	180
6.1.1	Allgemeiner Überblick	180
6.1.2	Hertzsche Pressung ungeschmiert	181
6.1.3	Hertzsche Pressung geschmiert	185
6.1.4	Schädigungsbetrachtungen	191
6.1.5	Vergleich ertragbarer Hertzscher Pressungen	193

6.1.6	Zahnräder	194
6.1.6.1	Allgemeines	194
6.1.6.2	Beanspruchungs- und strukturbedingte Einflüsse	197
6.1.6.3	Tribochemische Reaktion	202
6.1.6.4	Adhäsion	207
6.1.6.5	Abrasion	210
6.1.6.6	Oberflächenzerrüttung	211
6.1.7	Wälzlager	224
6.1.7.1	Allgemeines	224
6.1.7.2	Beanspruchungs- und strukturbedingte Einflüsse	226
6.1.7.3	Tribochemische Reaktion	234
6.1.7.4	Adhäsion	237
6.1.7.5	Abrasion	238
6.1.7.6	Oberflächenzerrüttung	239
6.1.8	Kurvengetriebe	247
6.1.8.1	Allgemeines	247
6.1.8.2	Beanspruchungs- und strukturbedingte Einflüsse	248
6.1.9	Gleichlaufgelenke	252
6.1.10	Rad/Schiene	254
6.2	Verschleißerscheinungsformen bei vollständiger Elastohydrodynamik (EHD) ..	258
6.2.1	Gefügeänderung	259
6.2.2	Abblätterung	265
6.3	Verschleißerscheinungsformen bei Mischreibung unter Elastohydrodynamik ...	267
6.3.1	Ungleichmäßiges Tragbild	267
6.3.2	Tribochemische Reaktionsschicht	272
6.3.3	Riefen	274
6.3.4	Fresser	279
6.3.5	Profiländerung	284
6.3.6	Graufleckigkeit	293
6.3.7	Grübchen	303
6.3.8	Abblätterung	312
6.3.9	Abplatzer	320
6.3.10	Schichtbruch	323
6.3.11	Riffel	324
6.4	Verschleißerscheinungsformen bei ungeschmierter Wälzreibung	337
6.4.1	Profiländerung	337
6.4.2	Riffel	339
6.4.3	Rissbildungen und Ausbrüche	342
6.4.4	Gefügeänderung	344
7	Abrasivverschleiß	365
7.1	Grundlagen	365
7.2	Zweikörper-Abrasivverschleiß – Abrasiv-Gleitverschleiß durch gebundenes Korn	373
7.2.1	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	374
7.2.2	Strukturbedingte Einflüsse	375

7.3	Verschleißerscheinungsformen bei Abrasiv-Gleitverschleiß durch gebundenes Korn	387
7.3.1	Riefen	387
7.3.2	Einbettung	389
7.3.3	Ausbrüche	389
7.3.4	Brandrisse	390
7.3.5	Gefügeumwandlung	392
7.3.6	Profiländerung	393
7.4	Dreikörper-Abrasivverschleiß	395
7.4.1	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	397
7.4.2	Strukturbedingte Einflüsse	398
7.4.2.1	Abrasivstoff als Zwischenstoff	398
7.4.2.2	Grund- und Gegenkörper	398
7.5	Verschleißerscheinungsformen bei Dreikörper-Abrasivverschleiß	406
7.5.1	Riefen	406
7.5.2	Einbettung	408
7.5.3	Schubrisse	409
7.5.4	Erosionsformen	410
7.5.5	Riffel	411
7.5.6	Profiländerung	412
8	Erosion und Erosionskorrosion	423
8.1	Allgemeine Grundlagen	423
8.2	Grundlagen Abrasiv-Gleitverschleiß durch loses Korn (Erosion)	424
8.2.1	Allgemeines	424
8.2.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	425
8.2.3	Strukturbedingte Einflüsse	426
8.3	Verschleißerscheinungsformen bei Erosion durch loses Korn	428
8.3.1	Querwellen, Mulden	428
8.3.2	Riefen	431
8.3.3	Selektive Erosion	432
8.3.4	Profiländerung	436
8.4	Grundlagen Strahlverschleiß	437
8.4.1	Allgemeines	437
8.4.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	438
8.4.2.1	Anstrahlwinkel	438
8.4.2.2	Partikelgeschwindigkeit	442
8.4.2.3	Temperatur	443
8.4.2.4	Partikeldurchsatz	445
8.4.2.5	Partikelgröße	445
8.4.3	Strukturbedingte Einflüsse	447
8.4.3.1	Partikeleigenschaften	447
8.4.3.2	Werkstoffeigenschaften	449
8.5	Verschleißerscheinungsformen bei Strahlverschleiß	456
8.5.1	Querwellen, Mulden	456
8.5.2	Riffel	463

8.5.3	Eindrückungen	464
8.5.4	Profiländerung	466
8.6	Grundlagen hydroerosiver (hydroabrasiver) Verschleiß	471
8.6.1	Allgemeines	471
8.6.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	474
8.6.3	Strukturbedingte Einflussgrößen	478
8.6.3.1	Abrasivstoffhärte	478
8.6.3.2	Korngröße	480
8.6.3.3	Befeuchtung	485
8.6.3.4	pH-Wert	486
8.6.3.5	Werkstoffverhalten	489
8.7	Verschleißerscheinungsformen bei hydroerosivem Verschleiß	493
8.7.1	Längs- und Querwellen, Mulden, Rillen	493
8.7.2	Eindrückungen	503
8.7.3	Riefen	504
8.7.4	Selektive Erosion	505
8.7.5	Profiländerung	507
8.8	Grundlagen Erosionskorrosion	507
8.8.1	Allgemeines	507
8.8.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	510
8.8.3	Strukturbedingte Einflüsse	515
8.9	Verschleißerscheinungen durch Erosionskorrosion	518
8.9.1	Auswaschungen, Querwellen, Mulden	518
8.9.2	Riffel	524
8.9.3	Längswellen	526
8.9.4	Selektive Korrosion	527
8.10	Grundlagen Kavitationserosion	528
8.10.1	Allgemeines	528
8.10.2	Strukturbedingte Einflüsse	530
8.10.3	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	532
8.10.4	Werkstoffverhalten	534
8.10.5	Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Kavitationserosion	539
8.11	Verschleißerscheinungsformen durch Kavitationserosion	540
8.11.1	Erosion durch Schwingungs- und Strömungskavitation	540
8.11.2	Aufrauung	548
8.11.3	Ausbrüche	555
8.12	Grundlagen Tropfenschlagerosion	556
8.12.1	Allgemeines	556
8.12.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse	557
8.13	Verschleißerscheinungen bei Tropfenschlagerosion	560
8.13.1	Mulden	560
8.13.2	Aufrauung	561
8.14	Gaserosion	564

9 Anhang	579
9.1 Farbiges Bildteil	579
9.2 Gegenüberstellung von alter (DIN) und neuer (Euro-Norm) Werkstoff- bezeichnung	583
Sachwortverzeichnis	588