

---

Karl Sommer · Rudolf Heinz · Jörg Schöfer

# Verschleiß metallischer Werkstoffe

Erscheinungsformen sicher beurteilen

2., korrigierte und ergänzte Auflage

Mit 621 Abbildungen und zahlreichen Tabellen

 Springer Vieweg

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	V
Die Autoren .....	XIII
<b>1 Einführung</b> .....	1
Literaturverzeichnis .....	2
<b>2 Tribologische Grundlagen</b> .....	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
Literaturverzeichnis .....	31
<b>3 Methodik der Analyse tribologischer Schäden</b> .....	35
3.1 Strukturanalyse .....	37
3.2 Beanspruchungsanalyse .....	38
Literaturverzeichnis .....	39
<b>4 Gleitverschleiß</b> .....	41
4.1 Grundlagen geschmierter Tribosysteme .....	41
4.1.1 Hydrodynamik .....	41
4.1.2 Mischreibung und Grenzreibung .....	43
4.2 Verschleißerscheinungsformen bei Hydrodynamik und Mischreibung .....	46
4.2.1 Riefen .....	47
4.2.2 Einbettung von Fremdpartikeln .....	50
4.2.3 Eindrückungen .....	53
4.2.4 Ausbrüche .....	53
4.2.5 Ungleichmäßiges Tragbild .....	57
4.2.6 Rattermarken .....	58

4.2.7	Fresser .....	60
4.2.8	Werkstoffübertrag .....	65
4.2.9	Schubrisse .....	68
4.2.10	Brandrisse .....	70
4.2.11	Gefügeänderung .....	73
4.2.12	Schmelzerscheinungen .....	79
4.2.13	Stromübergang .....	82
4.2.14	Tribochemische Reaktionsschicht .....	84
4.2.15	Plastische Oberflächenverformung .....	87
4.2.16	Profiländerung .....	89
4.3	Grundlagen ungeschmierter Tribosysteme .....	91
4.3.1	Beanspruchungsbedingte Einflüsse .....	92
4.3.2	Strukturbedingte Einflüsse .....	97
4.4	Besonderheiten bei Trockenreibung im Vakuum .....	101
4.5	Verschleißerscheinungsformen bei ungeschmierter Gleitreibung .....	102
4.5.1	Fresser .....	102
4.5.2	Riefen .....	103
4.5.3	Werkstoffübertrag .....	104
4.5.4	Schubrisse .....	105
4.5.5	Brandrisse .....	105
4.5.6	Gefügeänderung .....	108
4.5.7	Tribooxidation .....	113
	Literaturverzeichnis .....	114
<b>5</b>	<b>Schwingungsverschleiß (<i>Fretting</i>) .....</b>	<b>122</b>
5.1	Grundlagen .....	122
5.1.1	Bewegungsformen .....	122
5.1.2	Stofftransport und Reibungszustand .....	122
5.1.3	Systemklassen .....	123
5.1.4	Verschleißmechanismen bei Schwingungsverschleiß .....	125
5.1.4.1	Adhäsion mit Werkstoffübertrag .....	125
5.1.4.2	Abrasion .....	125
5.1.4.3	Tribooxidation .....	126
5.1.4.4	Oberflächenzerrüttung .....	127
5.1.4.5	Zeitlicher Wechsel von Verschleißmechanismen am Beispiel von Zahnwellenverbindungen und -kupplungen .....	127
5.2	Verschleißerscheinungsformen durch Schwingungsverschleiß .....	130
5.2.1	Beläge (Tribooxidation, Reiboxidation, Reibrost, Passungsrost) .....	131
5.2.2	Narben .....	140
5.2.3	Mulden .....	143
5.2.4	Riffel .....	145
5.2.5	Wurmspuren .....	150
5.2.6	Stillstandsmarkierungen ( <i>false brinelling</i> ) .....	154
5.2.7	Schwingungsverschleiß mit überwiegend einem Verschleißmechanismus .....	162

5.3	Reibdauerbrüche ( <i>fretting fatigue</i> ) .....	165
5.4	Allgemeine Hinweise zur Minderung von Schwingungsverschleiß .....	178
	Literaturverzeichnis .....	181
<b>6</b>	<b>Wälzverschleiß</b> .....	<b>185</b>
6.1	Grundlagen .....	185
6.1.1	Allgemeiner Überblick .....	185
6.1.2	Hertzsche Pressung ungeschmiert .....	186
6.1.3	Hertzsche Pressung geschmiert .....	190
6.1.4	Schädigungsbetrachtungen .....	196
6.1.5	Vergleich ertragbarer Hertzscher Pressungen .....	198
6.1.6	Zahnräder .....	199
6.1.6.1	Allgemeines .....	199
6.1.6.2	Beanspruchungs- und strukturbedingte Einflüsse .....	202
6.1.6.3	Tribochemische Reaktion .....	207
6.1.6.4	Adhäsion .....	212
6.1.6.5	Abrasion .....	215
6.1.6.6	Oberflächenzerrüttung .....	216
6.1.7	Wälzlager .....	229
6.1.7.1	Allgemeines .....	229
6.1.7.2	Beanspruchungs- und strukturbedingte Einflüsse .....	231
6.1.7.3	Tribochemische Reaktion .....	239
6.1.7.4	Adhäsion .....	242
6.1.7.5	Abrasion .....	243
6.1.7.6	Oberflächenzerrüttung .....	244
6.1.8	Kurvengetriebe .....	252
6.1.8.1	Allgemeines .....	252
6.1.8.2	Beanspruchungs- und strukturbedingte Einflüsse .....	253
6.1.9	Gleichlaufgelenke .....	257
6.1.10	Rad/Schiene .....	259
6.2	Verschleißerscheinungsformen bei vollständiger Elastohydrodynamik (EHD) ..	263
6.2.1	Gefügeänderung .....	264
6.2.2	Abblätterung .....	270
6.3	Verschleißerscheinungsformen bei Mischreibung unter Elastohydrodynamik ...	272
6.3.1	Ungleichmäßiges Tragbild .....	272
6.3.2	Tribochemische Reaktionsschicht .....	277
6.3.3	Riefen .....	279
6.3.4	Fresser .....	284
6.3.5	Profiländerung .....	289
6.3.6	Graufleckigkeit .....	298
6.3.7	Grübchen .....	308
6.3.8	Abblätterung .....	317
6.3.9	Abplatzer .....	325
6.3.10	Schichtbruch .....	328
6.3.11	Riffel .....	329

6.4	Verschleißerscheinungsformen bei ungeschmierter Wälzreibung .....	342
6.4.1	Profiländerung .....	342
6.4.2	Riffel .....	344
6.4.3	Rissbildungen und Ausbrüche .....	347
6.4.4	Gefügeänderung .....	349
	Literaturverzeichnis .....	351
<b>7</b>	<b>Abrasivverschleiß .....</b>	<b>370</b>
7.1	Grundlagen .....	370
7.2	Zweikörper-Abrasivverschleiß – Abrasiv-Gleitverschleiß durch gebundenes Korn .....	378
7.2.1	Beanspruchungsbedingte Einflüsse .....	379
7.2.2	Strukturbedingte Einflüsse .....	380
7.3	Verschleißerscheinungsformen bei Abrasiv-Gleitverschleiß durch gebundenes Korn .....	392
7.3.1	Riefen .....	392
7.3.2	Einbettung .....	394
7.3.3	Ausbrüche .....	394
7.3.4	Brandrisse .....	395
7.3.5	Gefügeänderung .....	397
7.3.6	Profiländerung .....	398
7.4	Dreikörper-Abrasivverschleiß .....	400
7.4.1	Beanspruchungsbedingte Einflüsse .....	402
7.4.2	Strukturbedingte Einflüsse .....	403
	7.4.2.1 Abrasivstoff als Zwischenstoff .....	403
	7.4.2.2 Grund- und Gegenkörper .....	403
7.5	Verschleißerscheinungsformen bei Dreikörper-Abrasivverschleiß .....	411
7.5.1	Riefen .....	411
7.5.2	Einbettung .....	414
7.5.3	Schubrisse .....	414
7.5.4	Mulden .....	415
7.5.5	Riffel .....	416
7.5.6	Profiländerung .....	417
	Literaturverzeichnis .....	422
<b>8</b>	<b>Erosion und Erosionskorrosion .....</b>	<b>427</b>
8.1	Allgemeine Grundlagen .....	427
8.2	Grundlagen Abrasiv-Gleitverschleiß durch loses Korn (Erosion) .....	428
8.2.1	Allgemeines .....	428
8.2.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse .....	429
8.2.3	Strukturbedingte Einflüsse .....	430
8.3	Verschleißerscheinungsformen bei Erosion durch loses Korn .....	432
8.3.1	Querwellen, Mulden .....	432
8.3.2	Riefen .....	435
8.3.3	Selektive Erosion .....	436
8.3.4	Profiländerung .....	440

8.4	Grundlagen Strahlverschleiß .....	441
8.4.1	Allgemeines .....	441
8.4.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse .....	442
8.4.2.1	Anstrahlwinkel .....	442
8.4.2.2	Partikelgeschwindigkeit .....	446
8.4.2.3	Temperatur .....	447
8.4.2.4	Partikeldurchsatz .....	449
8.4.2.5	Partikelgröße .....	449
8.4.3	Strukturbedingte Einflüsse .....	451
8.4.3.1	Partikeleigenschaften .....	451
8.4.3.2	Werkstoffeigenschaften .....	453
8.5	Verschleißerscheinungsformen bei Strahlverschleiß .....	460
8.5.1	Querwellen, Mulden .....	460
8.5.2	Riffel .....	467
8.5.3	Eindrückungen .....	468
8.5.4	Profiländerung .....	470
8.6	Grundlagen hydroerosiver (hydroabrasiver) Verschleiß .....	475
8.6.1	Allgemeines .....	475
8.6.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse .....	478
8.6.3	Strukturbedingte Einflussgrößen .....	482
8.6.3.1	Abrasivstoffhärte .....	482
8.6.3.2	Korngröße .....	484
8.6.3.3	Befeuchtung .....	489
8.6.3.4	pH-Wert .....	490
8.6.3.5	Werkstoffverhalten .....	493
8.7	Verschleißerscheinungsformen bei hydroerosivem Verschleiß .....	497
8.7.1	Längs- und Querwellen, Mulden, Rillen .....	497
8.7.2	Eindrückungen .....	507
8.7.3	Riefen .....	508
8.7.4	Selektive Erosion .....	509
8.7.5	Profiländerung .....	511
8.8	Grundlagen Erosionskorrosion .....	511
8.8.1	Allgemeines .....	511
8.8.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse .....	514
8.8.3	Strukturbedingte Einflüsse .....	519
8.9	Verschleißerscheinungen durch Erosionskorrosion .....	522
8.9.1	Auswaschungen, Querwellen, Mulden .....	522
8.9.2	Riffel .....	528
8.9.3	Längswellen .....	530
8.9.4	Selektive Korrosion .....	531
8.10	Grundlagen Kavitationserosion .....	532
8.10.1	Allgemeines .....	532
8.10.2	Entstehung und Wirkung von Kavitation .....	534
8.10.3	Beanspruchungsbedingte Einflüsse .....	536
8.10.4	Werkstoffverhalten .....	538
8.10.5	Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Kavitationserosion .....	543

---

8.11	Verschleißerscheinungsformen durch Kavitationserosion .....	544
8.11.1	Erosion durch Schwingungs- und Strömungskavitation .....	544
8.11.2	Aufrauung .....	552
8.11.3	Ausbrüche .....	559
8.12	Grundlagen Tropfenschlagerosion .....	560
8.12.1	Allgemeines .....	560
8.12.2	Beanspruchungsbedingte Einflüsse .....	561
8.13	Verschleißerscheinungen bei Tropfenschlagerosion .....	564
8.13.1	Mulden .....	564
8.13.2	Aufrauung .....	565
8.14	Gaserosion .....	568
	Literaturverzeichnis .....	569
9	Anhang .....	583
9.1	Farbiger Bildteil .....	583
9.2	Gegenüberstellung von alter (DIN) und neuer (Euro-Norm) Werkstoffbezeichnung .....	588
	Sachwortverzeichnis .....	593