

Inhalt

I Einführung	1
1 Entwicklung der Verschleißproblematik	1
2 Wirtschaftliche Bedeutung	5
II Tribologische Grundlagen	9
1 Allgemeine Prinzipien der Tribologie	11
1.1 Charakterisierung tribologisch relevanter Eigenschaften	11
1.1.1 Topographie	12
1.1.1.1 Rauheitskenngrößen	12
1.1.1.2 Charakterisierungsmethoden der Oberflächentopographie	14
1.1.2 Mechanische Eigenschaften: Härte und Elastizität	23
1.1.3 Chemische Zusammensetzung von Oberflächen	25
1.1.4 Kontaktwinkelmessungen an Oberflächen	28
1.2 Kontaktmechanik	30
1.2.1 Kontaktmodelle für den elastischen Einzelkontakt	30
1.2.2 Elastischer Kontakt von rauen Oberflächen (Mehrfachkontakt)	34
1.2.3 Plastischer Kontakt	36
1.2.4 Bindungs- und Nahwirkungskräfte	37
1.2.4.1 Bindungskräfte	37
1.2.4.2 Wechselwirkungskräfte	38
1.3 Reibung	40
1.3.1 Definition von Reibung	40
1.3.2 Klassifizierung von Reibungstypen	41
1.3.3 Reibung in ungeschmierten Kontakten	42
1.3.4 Reibung in geschmierten Kontakten	46
1.3.5 Reibung in Mikrosystemen	47
1.3.6 Reibung und Werkstoffe	50
1.3.7 Reibungsprüfung	53
1.3.8 Reibungstheorie	54
1.4 Verschleiß	56
1.4.1 Definition von Verschleiß	56
1.4.2 Verschleißarten	56

1.4.3	Verschleißmechanismen	57
1.4.3.1	Adhäsionsverschleiß	57
1.4.3.2	Abrasionsverschleiß	60
1.4.3.3	Ermüdungsverschleiß	64
1.4.3.4	Tribochemischer Verschleiß	66
1.4.3.5	Weitere Verschleißmechanismen und Verschleißarten	67
1.4.4	Verschleißprüfungen	69
1.4.5	Verschleißmodelle	70
2	Tribosysteme in der Kunststoffverarbeitung	73
2.1	Verschleißrelevante Verfahrensbereiche	73
2.1.1	Feststoffbereich	74
2.1.2	Umwandlungsbereich	75
2.1.3	Schmelzebereich	77
2.1.3.1	Strömungen mit bewegter Wand	77
2.1.3.2	Einfache Druckströmung	79
2.2	Definition des Tribosystems	80
2.3	Verschleißmechanismen und -arten in der Kunststoffverarbeitung	83
2.3.1	Abrasiv	83
2.3.2	Adhäsion	91
2.3.3	Weitere Mechanismen	92
2.3.3.1	Schichtverschleiß	92
2.3.3.2	Ermüdungsverschleiß	93
2.3.4	Überlagerte Verschleißmechanismen	94
2.4	Tribochemische Reaktionen	95
2.5	Werkstoffspezifischer Einfluss auf den Verschleiß	96
2.6	Weitere triborheologische Anforderungen	101
3	Korrosion in der Kunststoffverarbeitung	103
3.1	Einleitung	103
3.2	Korrosionserscheinungen durch plastifizierte Kunststoffe	104
3.3	Korrosionsbeständigkeit der Stähle	109
3.4	Korrosive Eigenschaften ausgesuchter Kunststoffe	111
3.4.1	Thermoplaste	111
3.4.2	Duroplaste	114
3.5	Abrasiv-korrosive Komplexbeanspruchung	116
III	Verschleißpartner	119
1	Kunststoff-Formmassen, Füllstoffe und Additive	120
1.1	Aufbau der Kunststoffe	120
1.2	Ausgewählte Kunststoff-Formmassen	121
1.3	Das Verhalten von Polymerschmelzen	122
1.3.1	Fließeigenschaften	122

1.3.2	Schmelzen unter Langzeitbelastung	132
1.3.3	Verschleiß und Korrosion durch Rezyklate	133
1.4	Kunststoff-Additive.	133
1.4.1	Ausgewählte Materialien	138
1.4.1.1	Silikate	138
1.4.1.2	Carbonate und Sulfate	140
1.4.1.3	Kohlenstoff.	142
1.4.1.4	Oxide und Hydroxide	142
1.4.1.5	Metalle und anorganische Fasern	144
1.4.1.6	Organische Fasern.	144
1.4.2	Funktionsstoffe	145
1.4.3	Farbmittel	148
1.5	Einfluss der Formmasse auf den Verschleiß.	149
1.5.1	Polymerspezifische Einflussgrößen	150
1.5.2	Zusatzstoffspezifische Einflussgrößen	152
1.5.3	Feststoffbereich	154
1.5.4	Schmelzebereich	156
2	Metallische Werkstoffe und Verschleißschutzschichten	160
2.1	Stähle für die Kunststoffverarbeitung.	163
2.1.1	Werkstoffauswahl für Plastifiziereinheiten	164
2.1.1.1	Nitrierstähle	164
2.1.1.2	Durchhärtende Stähle	166
2.1.1.3	Korrosionsbeständige Stähle	171
2.1.1.4	Martensitaushärtbare Stähle	173
2.1.1.5	Schnellarbeitsstähle	173
2.1.2	Werkstoffauswahl für Kunststoffformen.	173
2.1.2.1	Einsatzstähle	174
2.1.2.2	Vergütete Stähle	176
2.1.2.3	Korrosionsbeständige Stähle	176
2.1.2.4	Durchhärtende und martensitaushärtbare Stähle	177
2.1.3	Wärmebehandlung der Werkzeugstähle	177
2.1.3.1	Weichglühen und Spannungsarmglühen	179
2.1.3.2	Härten	180
2.1.3.3	Anlassen	181
2.1.4	Härtbare Werkstoffe auf Fe-Cr-V-C-Basis	181
2.2	Hartlegierungen	183
2.2.1	Hartlegierungen auf Fe-Cr-C- und Fe-Cr-C-B- und Fe-V-Cr-C-Basis	187
2.2.2	Hartlegierungen auf Nickel- und Kobalt-Basis	190
2.2.3	Hartstoff-Hartlegierung-Verbundwerkstoffe	193
2.3	Zerspanbare Hartstoffe.	196
2.4	Hartmetall.	201
2.4.1	Hartstoffe und Bindertypen	201
2.4.2	Herstellung von Hartmetall.	202
2.4.2.1	Pulverherstellung	202

2.4.2.2	Formgebung und Sinterverfahren	203
2.4.3	Gefüge und Eigenschaften	205
2.5	Oberflächenbehandlungs- und Beschichtungsverfahren	206
2.5.1	Oberflächenbehandlungsverfahren	208
2.5.1.1	Nitrieren und Nitrocarburieren	208
2.5.1.2	Borieren	211
2.5.2	Beschichtungsverfahren	212
2.5.2.1	Verchromen	212
2.5.2.2	Vernickeln	213
2.5.2.3	CVD-Verfahren	213
2.5.2.4	PVD-Verfahren	215
2.5.2.5	Kombinationsbehandlung Plasmanitrieren und PVD-Beschichten	220
2.5.2.6	Thermisches Spritzen	221
2.6	Panzern	223
2.6.1	Schneckenstegpanzern durch Auftragschweißen	225
2.6.2	Zentrifugalschleudergießen von Zylinderdecken	230
2.6.3	Thermisches Spritzen	235
2.6.4	Heiß-Isostatisches-Pressen (HIP)	237
3	Keramik	242
3.1	Stand der Technik	243
3.1.1	Mechanisch-Thermische Eigenschaften Technischer Keramiken	246
3.1.2	Mechanische Eigenschaften	248
3.1.3	Thermische Eigenschaften	249
3.2	Verschleißverhalten von Keramiken	250
3.2.1	Grundlagen	250
3.2.2	Trockengleitverschleiß	252
3.2.3	Verschleiß im Schmelzkontakt	253
3.3	FEM-gestützte Konstruktion und Anwendungsbeispiele	256
3.3.1	Keramisches Meteringzonensegment in der Plastifiziereinheit	256
3.3.2	Einsatzrelevante Lötverbunde	259
3.4	Zusammenfassung und Ausblick	263
IV	Verschleißprüfung	265
1	Der Kategoriedanke	266
2	Verschleißmessgrößen	270
3	Prüfmethoden	274
3.1	Betriebsnahe Prüfmethoden	274
3.1.1	Verschleißuntersuchungen in der Praxis	274
3.1.2	Praxisgerechte Labormethoden	275

3.2	Prüfung am Modellsystem	280
3.2.1	Prüfverfahren für plastifizierte Formmassen	281
3.2.2	Prüfverfahren für feste Formmassen	284
3.2.4	Prüfverfahren für adhäsiven Verschleiß	286
3.2.5	Prüfverfahren zur Analyse von Korrosionserscheinungen	287
4	Messen mit Modellprüfverfahren	294
4.1	Modifizierte Plättchenapparaturen	297
4.2	Untersuchung der Korrosion mittels modifizierter Verschleißmessstände	298
5	Übertragung auf die Praxis	300
V	Verschleiß in der betrieblichen Praxis	303
1	Aufbereiten	305
1.1	Charakterisierung des Verfahrens	305
1.1.1	Verfahrensschritte beim Aufbereiten	306
1.1.2	Aufbereitungsmaschinen	306
1.1.2.1	Kontinuierliches Aufbereiten	308
1.1.2.2	Diskontinuierliches Aufbereiten	310
1.1.3	Anwendungsbeispiele	311
1.1.3.1	Aufbereiten von PVC	311
1.1.3.2	Füllen und Verstärken von Technischen Kunststoffen	313
1.1.3.3	Herstellen von Pigment-Konzentraten	315
1.1.3.4	Entgasen von Polysulfon (PSU)	316
1.1.3.5	Aufbereiten von Härtbaren Formmassen	317
1.1.3.6	Aufbereiten von Kautschuk auf Innenmischern	317
1.2	Verschleißerscheinungen an Aufbereitungsmaschinen	318
1.2.1	Beanspruchungsanalyse	318
1.2.2	Abrasiver Verschleiß	323
1.2.3	Adhäsiver Verschleiß	326
1.2.4	Korrosiver Verschleiß	327
1.3	Verschleißschutzmaßnahmen	328
1.3.1	Konstruktive Lösungen	328
1.3.1.1	Schneckengehäuse-Baukasten	329
1.3.1.2	Schnecken-Baukasten	330
1.3.2	Beanspruchungsgerechte Werkstoffauswahl	331
1.3.2.1	Werkstoffe für Schneckengehäuse	331
1.3.2.2	Werkstoffe für Schneckensatzelemente	335
1.3.2.3	Werkstoffe für diskontinuierliche Maschinen	338
1.3.3	Verfahrenstechnische Maßnahmen	340
1.4	Ausblick	342

2	Granulieren und Fördern	343
2.1	Granulieren	343
2.1.1	Charakterisierung des Verfahrens	343
2.1.2	Einsatzbereich	344
2.1.3	Granulieren aus der Schmelze	345
2.1.3.1	Verfahrensspezifische Systematisierung der Granuliervorrichtungen	345
2.1.3.2	Verschleißproblematik	349
2.1.3.3	Werkstoffauswahl	353
2.1.3.4	Entwicklungstendenzen	356
2.1.4	Granulieren von Formkörpern aus festem Kunststoff	356
2.1.4.1	Einsatzbereich	356
2.1.4.2	Aufbau und Wirkungsweise von Feststoffgranulatoren	356
2.1.4.3	Verschleißproblematik	357
2.1.4.4	Werkstoffauswahl	358
2.1.5	Neue Verfahren	358
2.2	Pneumatische Förderung	358
2.2.1	Verschleißarten in pneumatischen Förderungen	359
2.2.1.1	Prall- und Strahlverschleiß	359
2.2.1.2	Verschleißschutzmaterialien	360
2.2.2	Verschleiß bei der pneumatischen Förderung von Kunststoffgranulat	361
2.2.2.1	Druckförderverfahren	361
2.2.2.2	Aufbau einer pneumatischen Förderung mit gekennzeichneten Verschleißstellen	363
2.2.2.3	Verschleißstellen und Schutzmaßnahmen	364
2.2.2.4	Verschleißmechanismen in pneumatischen Granulatförderanlagen	369
2.2.3	Verschleiß bei der pneumatischen Förderung von Kunststoffpulvern	372
2.2.3.1	Verschleißintensive Pulver im Kunststoffbereich	372
2.2.3.2	Förderverfahren	375
2.2.3.3	Aufbau einer pneumatischen Förderung mit gekennzeichneten Verschleißstellen	375
2.2.3.4	Verschleißstellen und Schutzmaßnahmen	377
2.2.3.5	Verschleißmechanismen in pneumatischen Pulverförderungen	381
2.2.3.6	Verschleißschutzmaterialien	383
3	Pressen und Spritzpressen	384
3.1	Das Verfahren	384
3.1.1	Pressen	385
3.1.2	Spritzpressen	386
3.1.3	Verfahrensablauf	386
3.2	Werkzeuge zum Pressen und Spritzpressen	389
3.2.1	Pressformen	390

3.2.2	Spritzpressformen	391
3.3	Besonderheiten beim Pressen und Spritzpressen von Duroplasten	392
3.3.1	Aufbau Härtbarer Formmassen	392
3.3.2	Übliche Verschleißprüfung	392
3.4	Einfluss von Rezepturbestandteilen auf den Verschleiß bei duroplastischen Formmassen	396
3.4.1	Einfluss des Bindemittels	396
3.4.2	Einfluss der Füllstoffe	397
3.4.3	Einfluss von Verstärkungsstoffen	399
3.4.4	Einfluss sonstiger Rezepturbestandteile	400
3.4.5	Einfluss des Fließ-Härtungsverhaltens der Formmasse	401
3.5	Verfahren zur Verschleißminderung	401
3.5.1	Wahl der Stahlqualität	401
3.5.2	Oberflächenveredelung	404
3.6	Ausblick	405
4	Spritzgießen	407
4.1	Die Verschleißproblematik beim Spritzgießen	407
4.2	Das Spritzgießverfahren	410
4.3	Prozess- und verfahrensbedingte Beanspruchungen	413
4.3.1	Vorbereitung, Unterbrechung und Beendigung der Fertigung	413
4.3.2	Der Einfluss der Prozessparameter	414
4.4	Verschleiß an der Plastifiziereinheit	415
4.4.1	Spritzgießschncke	416
4.4.2	Rückstromsperrre	423
4.4.3	Schneckenzylinger	426
4.4.4	Zylinderkopf	427
4.5	Spritzgießwerkzeug	428
5	Verschleiß an Spritzgießwerkzeugen	429
5.1	Einleitung	429
5.2	Abrasionsverschleiß	429
5.2.1	Schadensformen an Werkzeugen und Heißkanälen und dadurch hervorgerufene Formteilfehler	430
5.2.2	Abhilfemaßnahmen	433
5.2.2.1	Konstruktive Maßnahmen	433
5.2.2.2	Oberflächen- und Schichttechnologien	433
5.3	Korrosionsverschleiß	433
5.3.1	Ursachen und Schadensformen an Werkzeugen und dadurch hervorgerufene Formteilfehler	435
5.3.2	Abhilfemaßnahmen	436
5.3.2.1	Werkstoffauswahl	436
5.3.2.2	Oberflächen- und Schichttechnologien	437
5.4	Reibverschleiß an Werkzeugelementen	437
5.4.1	Schadensformen an Werkzeugelementen	438
5.4.2	Abhilfemaßnahmen	438

5.4.2.1	Konstruktive Maßnahmen	438
5.4.2.2	Oberflächen- und Schichttechnologien.	439
5.5	Ausblick und Entwicklungstrends.	442
6	Extrudieren	445
6.1	Einführung	445
6.1.1	Einschneckenextruder	446
6.1.1.1	Bauformen der Einzugszone	449
6.1.1.2	Schneckenbauformen	450
6.1.1.3	Zweistufen-Schnecke.	451
6.1.1.4	Barriere-Schnecke	452
6.1.1.5	Entgasungsschnecken	454
6.1.1.6	Scher- und Mischteile.	454
6.1.1.7	Verschleißreduzierung durch geeignete Werkstoffauswahl	456
6.1.2	Gegendrall-Doppelschneckenextruder	457
6.1.2.1	Maschinenbauformen	457
6.1.2.2	Verschleißfeste Zylinder und Schnecken für hohe Wirtschaftlichkeit	459
6.1.3	Gleichdrall- Doppelschneckenextruder für die Direktextrusion	461
6.1.3.1	Maschinenkonzept	462
6.1.3.2	Einsatzgebiete	463
6.1.3.3	Stand der Technik bei der Direktextrusion	464
6.1.3.4	Aspekte der Direktextrusion	466
6.2	Beanspruchung der Plastifiziereinheit	467
6.3	Praxiserfahrungen und Lösungsansätze zur Verschleißreduzierung	468
6.3.1	Werkstoffauswahl	468
6.3.2	Konstruktion und Fertigungstechnik	469
6.3.3	Richtige Rohstoffauswahl beim In-line Dispergieren	471
6.3.4	Verfahrenstechnische Entwicklung	475
6.3.4.1	Schnelllaufende Extruder in Verbindung mit Schmelzepumpen	475
6.3.4.2	Nutbuchsenextruder mit 30D- bzw. 33D-Schnecken.	477
6.3.4.3	Erhöhter Durchsatz ohne Anwachsen des Verschleißes	478
6.4	Reparieren von Plastifiziereinheiten	483
6.4.1	Zylinder	483
6.4.2	Schnecken	484
6.5	Einflüsse auf die Standzeiten von Zylindern und Schnecken	484
6.6	Check-Liste zur Verschleißanalyse	485
6.7	Ausblick	485
7	Schadensanalyse	487
7.1	Grundlagen der Schadensanalyse	487
7.2	Ablauf der Schadensanalyse	488
Anhang		494