

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einführung	19
(THOMAS HOCHREIN)	
1.1 Gliederung des Buches	20
1.2 Bedeutung der Prozessmesstechnik	21
1.3 Begriffsdefinitionen	23
1.3.1 Prozessmesstechnik und Kennwerte	23
1.3.2 Kunststoffaufbereitung und Produkte	24
1.4 Taxonomie der Messmethoden	26
1.4.1 Offline-Methoden	27
1.4.2 Atline-Methoden	28
1.4.3 Online-Methoden	29
1.4.4 Inline-Methoden	30
1.5 Anforderungen an Prozessmesstechnik	31
1.5.1 Anforderungen an die Prozessmessmethoden	32
1.5.2 Wichtige Prozess- und Qualitätskennwerte	34
1.5.3 Einsatzbereiche und Verbreitungsgrad	36
2 Massedruckaufnehmer	37
(THOMAS HOCHREIN)	
2.1 Anwendungen	37
2.1.1 Schneckengehäuse	41
2.1.2 Schmelzepumpe	42
2.1.3 Schmelzefilter	42
2.1.4 Düse	43
2.2 Kennwerte und Auswahlkriterien	45
2.2.1 Kennwerte	45
2.2.2 Messfehler	45
2.2.3 Auswahlkriterien	48
2.3 Massedruckaufnehmertypen	48
2.3.1 Gehäuse und Einbauräume	49
2.3.2 Kapillar- und Stößeldruckaufnehmer	51
2.3.2.1 Aufbau und Funktionsprinzip	51
2.3.2.2 Messumformer	54
2.3.2.3 Eigenschaften	57

2.3.3	Piezoresistive Massedruckaufnehmer	58
2.3.3.1	Aufbau und Funktionsprinzip	59
2.3.3.2	Messumformer	61
2.3.3.3	Eigenschaften	62
2.3.4	Piezoelektrische Massedruckaufnehmer	62
2.3.4.1	Aufbau und Funktionsprinzip	63
2.3.4.2	Messumformer	65
2.3.4.3	Eigenschaften	66
2.3.5	Optische Massedruckaufnehmer	67
2.3.5.1	Aufbau und Funktionsprinzip	67
2.3.5.2	Eigenschaften	69
2.3.6	Kombinierte Massedruck- und Temperatursensoren	69
2.3.7	Pneumatische Massedruckaufnehmer	69
2.3.8	Kolbendruckaufnehmer	70
2.3.9	Druckmessung mit Farbstoffen	71
2.3.10	Ultraschallmesstechnik	72
2.3.11	Nichtelektrische Massedruckaufnehmer	72
2.4	Praktischer Einsatz von Massedruckaufnehmern	73
2.4.1	Einbauraum	73
2.4.2	Ein- und Ausbau	74
2.4.3	Elektrischer Anschluss	76
2.4.3.1	Ausgangssignale	76
2.4.3.2	Anschlüsse und Kabelverbindung	79
2.4.4	Messinstrumente	79
2.4.5	Pflege und Wartungsmaßnahmen	81
2.4.6	Kalibrierung	82
2.4.6.1	Kalibrierung nach erfolgtem Einbau	82
2.4.6.2	Regelmäßige Funktionsüberprüfung und Kalibrierung	83
2.4.6.3	Überprüfung von Messverstärkern	86
3	Temperaturmesstechnik	87
	(THOMAS HOCHREIN)	
3.1	Anwendungen	87
3.1.1	Temperaturmessung in Gehäuseelementen	88
3.1.1.1	Charakteristische Kennwerte zur Temperaturerfassung	88
3.1.1.2	Messabweichungen	89
3.1.1.3	Temperaturregelung und Positionierung der Messfühler	91
3.1.1.4	Duale Temperaturerfassung	92
3.1.2	Massetemperatur	93

3.1.2.1	Temperaturmessung im Schneckenkanal	93
3.1.2.2	Massetemperatur im Schmelzkanal	94
3.1.3	Profilmessungen	95
3.1.4	Strangtemperatur	96
3.2	Elektrische Temperaturmessung	97
3.2.1	Fühlerarten	97
3.2.1.1	Gehäusetemperaturfühler	98
3.2.1.2	Wandbündige Schmelzefühler	98
3.2.1.3	Eintauchfühler	99
3.2.1.4	Eintauchfühler mit variabler Eindringtiefe	101
3.2.2	Widerstandsthermometer	103
3.2.2.1	Funktionsprinzip	103
3.2.2.2	Widerstandsmaterialien und Kennlinien	104
3.2.2.3	Messumformer und Signalleitungskompensation . .	105
3.2.2.4	Eigenschaften der Widerstandsthermometer . . .	109
3.2.3	Thermoelemente	109
3.2.3.1	Funktionsprinzip	110
3.2.3.2	Thermoelementtypen und Genauigkeitsklassen . .	111
3.2.3.3	Messumformer	113
3.2.3.4	Kontaktierung und Messleitungen	114
3.2.4	Gegenüberstellung von Thermoelement und Widerstandsthermometern	116
3.2.5	Messinstrumente	118
3.3	Strahlungsthermometer	118
3.3.1	Funktionsprinzip	118
3.3.2	Aufbau eines IR-Thermometers	120
3.3.3	IR-Eigenschaften von Kunststoffen	123
3.3.4	Anwendung von Strahlungsthermometern	125
3.3.4.1	Handhabung von IR-Schmelzethermometern . . .	125
3.3.4.2	Eigenschaften und Einsatzbereiche	125
3.3.4.3	Messabweichungen	126
3.3.4.4	Kalibrierung	128
3.4	Temperaturmessung mit Ultraschallwellen	129
3.4.1	Funktionsprinzip	130
3.4.2	Charakteristik des Messverfahrens	132
3.4.3	Praktische Anwendung	133
3.4.4	Kalibrierung	134
3.5	Temperaturmesstechniken zur Prozessanalyse	135
3.5.1	Thermoelementgitter	135
3.5.2	Temperaturmesskämme und -kreuze	137
3.5.3	Temperatursensitive Farbstoffe	138

4	Rheologische Prozessmesstechnik	143
(KARSTEN KRETSCHMER)		
4.1	Grundlagen der Rheologie	143
4.2	Messverfahren zur Ermittlung der Fließeigenschaften	147
4.2.1	Oszillations- und Rotationsrheometer	149
4.2.1.1	Koaxiale Anordnung	149
4.2.1.2	Kegel-Platte-Anordnung	150
4.2.1.3	Platte-Platte-Anordnung	151
4.2.1.4	Instationäre Versuche mit Rotationsrheometern ..	151
4.2.2	Hochdruckkapillarrheometer	152
4.2.3	Schmelzeflussindex-Prüfgeräte	154
4.3	Prozessmessmethoden	155
4.3.1	Online-Kapillarrheometer	155
4.3.1.1	Vollwertige Online-Rheometer	156
4.3.1.2	Vereinfachte Online-Rheometer	159
4.3.2	Inline-Kapillarrheometer-Messdüsen	160
4.3.3	Online-Rotationsrheometer	161
4.3.4	Weitere Methoden	162
4.3.4.1	Modifizierte Schneckenspitzen	162
4.3.4.2	Indirekte Verfahren – Softsensoren	164
5	Online-Druckfiltrertest	165
(MARTINA SCHUBERT, THOMAS HOCHREIN)		
5.1	Füllstoffe	165
5.2	Dispergiergüte	167
5.2.1	Mikroskopische und Bildverarbeitungsverfahren ..	168
5.2.2	Anwendungsnahe Prüfungen	169
5.3	Prinzip und Aufbau des Druckfiltratests	170
5.3.1	Funktionsweise und Normung	170
5.3.2	Anwendung	172
5.3.3	Siebpakete	173
5.3.4	Beschreibung von Filtrievorgängen	176
5.4	Online-Druckfiltrertest	178
5.4.1	Aufbau und Funktionsweise	178
5.4.2	Durchführung	180
5.4.3	Auswertung	180
5.4.4	Typische Kurvenverläufe	182
5.5	Einflussfaktoren	183
5.5.1	Prüftemperatur	183
5.5.2	Wahl des Siebpaketes	184
5.5.3	Schmelzepumpendrehzahl	185
5.6	Erfassung weiterer Kenngrößen	185

5.6.1	Dosierschwankungen	186
5.6.2	Korrelation mit mechanischen Eigenschaften	186
5.7	Zusammenfassung	187
6	Ultraschallmesstechnik	189
	(DIRK LELLINGER, INGO ALIG, BERND STEINHOFF, THOMAS HOCHREIN)	
6.1	Funktionsprinzip	190
6.2	Kenngrößen der Ultraschallausbreitung	191
6.2.1	Basisgrößen der Schallausbreitung	191
6.2.2	Abgeleitete Größen	191
6.3	Messtechnik	193
6.3.1	Ultraschallmesssonden	194
6.3.2	Elektronik zur Signalerzeugung und -erfassung	196
6.4	Signalauswertung	197
6.4.1	Analyse mit Triggerschwelle	197
6.4.2	Analyse der Intensität	198
6.4.3	Analyse mit Fourier-Transformationsverfahren	199
6.4.4	Weitere Verfahren	199
6.5	Kalibrierung	200
6.5.1	Kalibrierung des Messsystems	200
6.5.2	Druck- und Temperaturkompensation	201
6.5.3	Kompensation des Transmissionskoeffizienten	203
6.6	Anwendungen	203
6.6.1	Blendzusammensetzung und -morphologie	204
6.6.2	Compoundzusammensetzung	207
6.6.2.1	Gefüllte Compounds	207
6.6.2.2	Additivierte Compounds	210
6.6.3	Dispergiergüte	211
6.6.4	Detektion von Treibmitteln und Blasenbildung	213
6.6.5	Dichtemessung	213
6.6.6	Ermittlung der Viskosität und von Polymerabbaureaktionen	213
6.6.7	Verweilzeitmessungen	214
6.6.8	Verschleißdetektion und Schneckenstatus	215
6.6.9	Temperaturmessung	216
6.6.10	Vernetzungsgradanalyse	216
6.6.11	Aufschmelzverhalten	216
7	Optische Spektroskopie	217
	(WOLFGANG BECKER, THOMAS HOCHREIN)	
7.1	Messtechnische Grundlagen	217
7.1.1	Wechselwirkung von Licht mit Materie	220
7.1.2	Messanordnungen	221

7.1.2.1	Transmission	221
7.1.2.2	Reflexion	223
7.1.2.3	Abgeschwächte Totalreflexion	224
7.1.2.4	Weitere Messanordnungen	225
7.1.3	Spektrale Anregung	225
7.1.3.1	Zustandekommen der Absorptionsbanden	226
7.1.3.2	Raman-Streuung	228
7.1.3.3	Fluoreszenz	229
7.1.3.4	Streueffekte	229
7.2	Messsysteme	230
7.2.1	Lichtquellen	231
7.2.2	Detektoren	232
7.2.3	Monochromatortechniken und Spektrometertypen	232
7.2.3.1	Filter	233
7.2.3.2	Gittermonochromatoren	233
7.2.3.3	Fourier-Spektrometer	234
7.2.3.4	Weitere Spektrometertypen und neue Entwicklungen	234
7.2.4	Lichtwellenleiter	235
7.2.5	Messonden	236
7.3	Messtechnische Realisierung an der Verfahrenseinheit	240
7.4	Kalibrierung	243
7.4.1	Kalibrationserstellungen	243
7.4.2	Feuchteeinfluss	246
7.4.3	Einfluss von Prozessparametern	246
7.4.4	Kalibrationsübertragung	248
7.4.5	Umsetzung einer Kalibrationsübertragung	249
7.5	Anwendungen	253
7.5.1	IR- und Raman-Spektroskopie	253
7.5.1.1	Blends	254
7.5.1.2	Gefüllte Compounds	255
7.5.1.3	Additivierte Compounds	256
7.5.1.4	Bestimmung rheologischer Kenngrößen	257
7.5.1.5	Weitere Anwendungen	257
7.5.2	UV- und VIS-Spektroskopie	257
7.5.2.1	UV/VIS-Spektroskopie	258
7.5.2.2	Fluoreszenz-Spektroskopie	258
7.5.3	Dispergiergüteermittlung bei Nanopartikeln	259
8	Farbmessung	263
	(BERNHARD ULMER, THOMAS HOCHREIN)	
8.1	Farbermittlung und Farbmodelle	264
8.1.1	Farbwirkung und Beleuchtung	264

8.1.2	XYZ-Normfarbwerte	266
8.1.3	CIE-L [*] a [*] b [*] -Farbraum	267
8.2	Messtechnik	269
8.2.1	Bedienung und Einflussfaktoren	270
8.2.1.1	Kalibrierung	271
8.2.1.2	Thermochromie	271
8.2.2	Schmelzefarbmessung	272
8.2.2.1	Messsonden	272
8.2.2.2	Detektoren und Beleuchtungsquellen	275
8.2.2.3	Kalibrierung, Stabilität und Einflussfaktoren	278
8.2.3	Aline-Messung am Granulat	281
8.2.3.1	Messprinzip	282
8.2.3.2	Auswertung	283
8.2.3.3	Einflussfaktoren	284
8.2.3.4	Anwendung	285
8.2.4	Farbmessung am Strang	286
8.3	Auswahl- und Entscheidungskriterien	287
8.4	Zusammenfassung und Ausblick	288
9	Extinktionsmessmethoden	291
	(MICHAEL STEPHAN, STEPHAN GROSSE)	
9.1	Kunststoffschmelzen als disperse Systeme	291
9.2	Laseroptische Extinktionsanalyse	293
9.2.1	Grundlagen und Einordnung der Messmethode	293
9.2.2	Signalauswertung	294
9.2.2.1	Fotometrische Partikelanalyse	294
9.2.2.2	Einzelpartikelanalyse	296
9.2.3	Grenzen und Messfehler	297
9.3	Geräteentwicklungen	298
9.3.1	Stand der Technik	298
9.3.2	Schmelzepartikelsensor	299
9.3.3	Anpassung der Gerätekonfiguration an die Messaufgabe	300
9.4	Kalibrierung	301
9.4.1	Sensorinstallation	302
9.5	Anwendungen	304
9.5.1	Hochkonzentrierte disperse Schmelzesysteme	304
9.5.1.1	Blends	304
9.5.1.2	Geschäumte Polymere	305
9.5.1.3	Nanocompounds	306
9.5.2	Einzelpartikelanalyse niedrig konzentrierter disperser Schmelzesysteme	310
9.5.2.1	Untersuchungen mit Modellpartikeln	310

9.5.2.2	Bestimmung des Reinheitsgrades	311
9.5.2.3	Referenzanalytische Validierung	313
9.5.3	Industrielle Sensoranwendungen	314
9.6	Zusammenfassung	316
10	Kleinwinkel-Lichtstreuung	317
	(BERND STEINHOFF, INGO ALIG)	
10.1	Grundlagen	317
10.1.1	Phänomenologie	317
10.1.2	Mie-Theorie	318
10.1.3	Streuung an Tropfen und Fäden in Polymerblends	321
10.2	Kleinwinkel-Lichtstreuung am Extruder	324
10.2.1	Messaufbauten und praktische Untersuchungen	324
10.2.2	Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen	326
11	Laserinduzierte Plasmaspektroskopie	327
	(THOMAS HOCHREIN)	
11.1	Funktionsprinzip	327
11.2	Prozessmesssystem für die Kunststoffaufbereitung	328
11.3	Datenauswertung und Einflussfaktoren	330
11.4	Anwendungen	335
12	Dielektrische Spektroskopie und Leitfähigkeitsmessung	339
	(INGO ALIG, DIRK LELLINGER, THOMAS HOCHREIN)	
12.1	Grundlagen	339
12.2	Messgrößen und Messsysteme	342
12.2.1	Messgrößen	342
12.2.2	Messanordnung und Sensoren	344
12.2.3	Messgeräte	349
12.2.4	Kalibrierung	349
12.3	Anwendungen	350
12.3.1	Kunststoffschmelzen mit geringer Leitfähigkeit	351
12.3.1.1	Blendzusammensetzung	351
12.3.1.2	Compoundzusammensetzung	352
12.3.1.3	PVC-Viskosität	353
12.3.1.4	Dispergiergüte und Morphologie	353
12.3.2	Leitfähige Compoundschmelzen	354
12.3.2.1	Ruß-Compounds	354
12.3.2.2	Compounds mit Kohlenstoffnanoröhren	355
12.3.2.3	Metallgefüllte Compounds	356
12.4	Zusammenfassung	357

13	Terahertz-Spektroskopie	359
(THOMAS HOCHREIN)		
13.1	Grundlagen	359
13.1.1	Eigenschaften der THz-Strahlung	359
13.1.2	Erzeugung und Detektion von THz-Wellen	360
13.1.3	Aufbau von THz-Systemen	361
13.1.4	THz-Kennwerte	363
13.2	Prozessmesssystem	365
13.2.1	THz-Spektrometer	365
13.2.2	Messdüse und Sonden	367
13.2.3	Systemeigenschaften	368
13.2.4	Weitere technische Entwicklung	368
13.3	Mess- und Auswerteverfahren	370
13.3.1	Vollständige Pulsaufnahme und Auswerteverfahren	370
13.3.2	Einzelpunktmessung	371
13.3.3	Volumetrischer Füllstoffgehalt	372
13.3.4	Kalibrierung	373
13.4	Anwendungsmöglichkeiten	375
13.4.1	Überwachung der Zusammensetzung	376
13.4.1.1	Blends	376
13.4.1.2	Gefüllte Compounds	376
13.4.1.3	Compounds mit leitfähigen Füllstoffen	379
13.4.2	Zerstörungsgrad von Hohlglaskugelcompounds	380
13.4.3	Dispergiergüte	381
14	Softsensorik	383
(THOMAS HOCHREIN, THOMAS FROESE)		
14.1	Grundlagen	383
14.1.1	Einführung anhand eines Beispiels	383
14.1.2	Definition von Softsensorik	384
14.1.3	Beispiel für die Struktur eines Softsensors	384
14.2	Methoden zur Entwicklung von Softsensoren	385
14.2.1	Rigorose Modellierung	386
14.2.2	Statistische Regressionsverfahren und Chemometrie	387
14.2.2.1	Vorteile von Regressionsverfahren	388
14.2.2.2	Nachteile von Regressionsverfahren	388
14.2.3	Künstliche Neuronale Netze	389
14.2.3.1	Vorteile Künstlicher Neuronaler Netze	390
14.2.3.2	Nachteile Künstlicher Neuronaler Netze und deren Vermeidung	391
14.2.4	Datenvorverarbeitung	392
14.2.4.1	Beschränkung der Wertebereiche	393
14.2.4.2	SPC-Methoden	394

14.2.4.3	Clusterverfahren	395
14.2.4.4	SOM-Verfahren	396
14.2.4.5	Validierung mit rekursiver Modellierung	396
14.2.5	Optimale Lösungsansätze	397
14.3	Praktische Anwendungen und Beispiele	398
14.3.1	Berechnung von Umsätzen und Ausbeuten	398
14.3.2	Schmelzeflussindex-Softsensor	400
14.3.2.1	Überlegungen zur Ermittlung des MFR	401
14.3.2.2	Umsetzung eines MFR-Softsensors	401
14.3.2.3	Praktische Erfahrungen mit virtuellen MFR-Softsensoren	402
14.3.3	Künstliche Neuronale Netze bei komplexen Messsystemen	405
14.3.4	Praxisbeispiele zur Chemometrie in der Spektroskopie	406
14.4	Vorteile intelligenter Softsensoren	406
15	Weitere Prozessmessmethoden	409
15.1	Schmelzepumpen als Messinstrument (THOMAS HOCHREIN)	409
15.1.1	Messprinzip	410
15.1.2	Kalibrierung der Schmelzepumpe	410
15.1.3	Umsetzung	411
15.1.4	Untersuchungen	412
15.2	Röntgenmethoden (THOMAS HOCHREIN)	413
15.3	Magnetische Kernresonanz (BERNHARD BLÜMICHE)	414
15.3.1	Physikalische Grundlagen	414
15.3.2	Arten von NMR-Messungen	415
15.3.2.1	Spektroskopie	415
15.3.2.2	Relaxometrie	417
15.3.2.3	Bildgebung	418
15.3.3	Anwendungen	420
15.3.3.1	Vernetzungsdichte	420
15.3.3.2	Qualitätskontrolle	421
15.3.3.3	Prozessnahe Messungen in der Kunststoffaufbereitung	423
15.3.4	Zusammenfassung und Ausblick	424
16	Vergleich der Messmethoden und Auswahlhilfen	425
	(THOMAS HOCHREIN)	
16.1	Vorbemerkungen zur Messmethodenanwendung	425
16.2	Kernmerkmale der vorgestellten Messmethoden	428
16.3	Gegenüberstellung der Messmethoden	431
16.3.1	Qualitätskenngrößen	432
16.3.2	Anwendungsbereich	433

16.3.3 Bedienung und Auswertung	433
16.3.4 Verfügbarkeit	434
16.3.5 Systemeigenschaften	435
16.4 Abschlussbemerkung und Ausblick	435
Anhang	439
Herstellerliste kommerzieller Prozessmesssysteme	439
Polymerbezeichnungen	444
Weitere Abkürzungen	445
Quellenverzeichnis	447
Stichwortverzeichnis	470