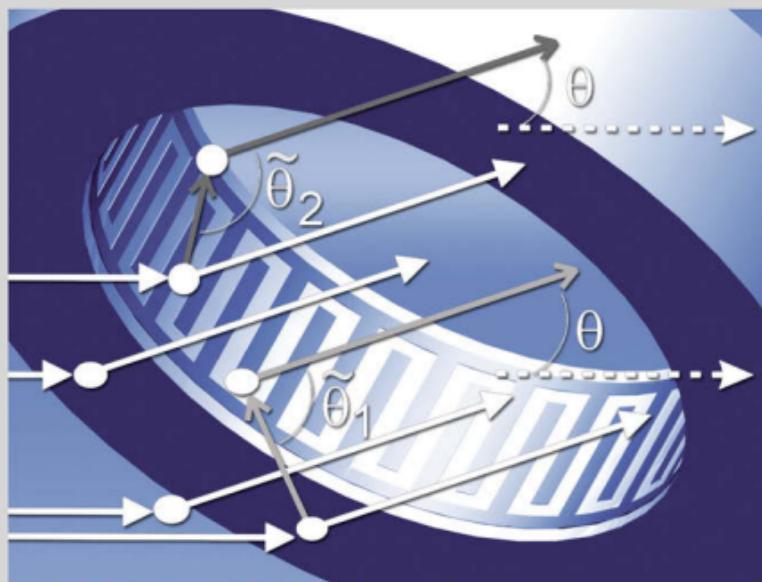


Thomas Hochrein / Ingo Alig

Prozessmesstechnik in der Kunststoff- aufbereitung



Thomas Hochrein / Ingo Alig
Prozessmesstechnik in der Kunststoffaufbereitung

Dipl.-Phys. Thomas Hochrein (Herausgeber)
Ingo Alig (Mitherausgeber)

Prozessmesstechnik in der Kunststoffaufbereitung

Vogel Buchverlag

THOMAS HOCHREIN

Jahrgang 1979, studierte an der FH Nürnberg Feinwerk- und Mikrosystemtechnik und absolvierte 2004 an der Universität Würzburg das Diplom in Physik.

Assistent der Geschäftsleitung und Verantwortlicher für die F&E in einem mittelständischen Unternehmen.

Anfang 2007 Wechsel in die F&E des Süddeutschen Kunststoff-Zentrums Würzburg (SKZ). Dort forscht er als Projektleiter an neuen prozessnahen Messtechnologien für die Extrusion und Compoundierung. Seine Promotion am Institut für Hochfrequenztechnik in Braunschweig befasst sich mit der Umsetzung der Terahertz-Technologie in der Kunststoffindustrie. 2009 Auszeichnung für seine Forschungsleistungen mit dem Otto-von-Guericke-Preis der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen.

2010 Leitung der neu gegründeten Gruppe Messtechnik am SKZ.

Der Fokus liegt in der Entwicklung und Erprobung neuer Prozessmesstechnologien für die Kunststoffverarbeitung sowie innovativer Verfahren zur Bauteil- und Materialprüfung.

Viele seiner Entwicklungen in den Bereichen Messtechnik, Sensorik und Optik schlugen sich in Patentanmeldungen nieder.

Die Autoren:

INGO ALIG

WOLFGANG BECKER

BERNHARD BLÜMICH

THOMAS FROESE

STEPHAN GROSSE

THOMAS HOCHREIN

KARSTEN KRETSCHMER

DIRK LELLINGER

MARTINA SCHUBERT

BERND STEINHOFF

MICHAEL STEPHAN

BERNHARD ULMER

Weitere Informationen:

www.vogel-buchverlag.de

ISBN 978-3-8343-3117-5

1. Auflage. 2011

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2011 by

Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Vorwort

Vor allem in den letzten zwei Jahrzehnten konnten wesentliche Fortschritte in der Entwicklung von Prozessmessmethoden für die Kunststoffaufbereitung erzielt werden. Dies geschah jedoch fast unbemerkt von vielen industriellen Anwendern. Viele relevante und für den Nutzer interessante Kenngrößen können heute bereits mittels geeigneter Messtechnik im Prozess bestimmt werden und viele Methoden weisen bereits eine beträchtliche Praxisreife auf. Die Erkenntnisse liegen zwar in internationalen ingenieur- oder naturwissenschaftlichen Publikationen und Entwicklungsberichten vor, sind jedoch für die industriellen Anwender meist sehr schwer zugänglich. Eine umfängliche Zusammenfassung fehlt vollends.

Somit wären wir bereits bei der Motivation für dieses Buch. Es soll einen einfachen Zugang zu der Thematik der gegenwärtig verfügbaren Messmethoden zur Prozess- und Qualitätsüberwachung in der Kunststoffaufbereitung bieten. Aber auch zu den Standards Druck- und Temperaturmessung ist bis dato kein auf die hier vorherrschenden Bedürfnisse zugeschnittenes und umfassendes Werk bekannt. Bei der Zusammenstellung der jeweiligen Methoden war es uns wichtig, abseits der häufig üblichen Praxis bei der Beschreibung neuer Methoden den Praxisbezug nicht aus den Augen zu verlieren. Dennoch lag es in meinem Interesse, dass auch sich in der Entwicklung befindliche oder akademische Methoden vorgestellt werden, die einerseits eine Prognose zukünftiger Möglichkeiten erlauben und andererseits in einigen speziellen Anwendungsfällen ihre Berechtigung haben. Ich hoffe, dass dieses Buch einen Beitrag zur Erleichterung des Zugangs zur Prozessmesstechnik in der Kunststoffaufbereitung liefert.

Meine Ideenkeimzelle für dieses Buch war eine Studie, die vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie finanziert wurde und von mir in den Jahren 2007 und 2008 im Rahmen meiner Tätigkeit am Süddeutschen Kunststoff-Zentrum (SKZ) angefertigt wurde. Darin wurden erstmals die Potenziale neuer Messmethoden für die Verbesserung der Marktposition kleiner und mittelständischer Unternehmen beurteilt.

Ich freue mich, dass ich meinen Kollegen Dr. Ingo Alig vom Deutschen Kunststoff-Institut als Mitherausgeber gewinnen konnte. Auch er befasst sich bereits viele Jahre mit dieser Thematik und trägt sicherlich zur Reputation dieses Werkes bei. Mein Dank gilt auch allen Autoren, deren Beiträge wesentlich für die Qualität dieses Werkes sind. Auch möchte ich mich bei meinen Kollegen vom SKZ, meinen

Projektpartnern und den Messtechnikfirmen für die rege Unterstützung bedanken, die für das Gelingen eines solchen Buchprojektes unerlässlich ist. Dies gilt in gleichem Maße auch für mein privates Umfeld und das mir entgegengebrachte Verständnis für die zusätzliche Arbeitsbelastung.

In einem Buch können sicherlich nicht alle Fragen beantwortet werden bzw. tauchen häufig beim Lesen neue Gedanken auf, die diskussionswürdig sind. Der schriftliche Rahmen bietet zudem nur einen begrenzten Raum für die Vermittlung von Wissen und Know-how. Ich möchte Sie daher ermuntern, bei spezifischen Fragestellungen oder Diskussionsbedarf mit den jeweiligen Autoren oder mir Kontakt aufzunehmen. Ich denke, dass ich hier im Sinne aller meiner Kollegen spreche. Dies eröffnet uns die Möglichkeit, dass wir uns bei weiteren Veröffentlichungen und Entwicklungsarbeiten kontinuierlich verbessern können und nahe an den Praxisanforderungen bleiben.

Würzburg

Thomas Hochrein

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 Schmelzekanal	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-Schmelzthermometern	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	Schmelzflussindex-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-Druckfiltertest	165
	(MARTINA SCHUBERT, THOMAS HOCHREIN)	
5.1	Füllstoffe	165
5.2	Dispergiertgüte	167
5.2.1	Mikroskopische und Bildverarbeitungsverfahren	168
5.2.2	Anwendungsnahe Prüfungen	169
5.3	Prinzip und Aufbau des Druckfiltertests	170
5.3.1	Funktionsweise und Normung	170
5.3.2	Anwendung	172
5.3.3	Siebpakete	173
5.3.4	Beschreibung von Filtriervorgängen	176
5.4	Online-Druckfiltertest	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	Kenngößen 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	Dispergiertgüte	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	Streuungseffekte	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	Messsonden	236
	7.3	Messtechnische Realisierung an der Verfahrenseinheit	240
	7.4	Kalibrierung	243
	7.4.1	Kalibrationserstellung	243
	7.4.2	Feuchteinfluss	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	Dispergiertgütermittlung 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	Atline-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	Dispergiertgüte 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 Dispergiertgüte	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	Schmelzflussindex-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 BLÜMICH)	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

Der Onlineservice InfoClick bietet unter www.vbm-fachbuch.de nach Codeeingabe eventuell zusätzliche Informationen und Aktualisierungen. Fordern Sie für Ihr E-Book den Code unter info@vbm-fachbuch.de an!

1 Einführung

Kunststoffverarbeitende Betriebe sehen sich in einem immer stärker werdenden Wettbewerb zu nationalen und internationalen Unternehmen. Viele ausländische Firmen können aufgrund der geringeren Personalkosten meist deutlich kostengünstiger produzieren und dadurch in vielen Fällen die Kostenführerschaft erlangen. Der verstärkte Einsatz von Prozessmesstechniken ermöglicht im Vergleich zu den heute noch weit verbreiteten Tests abseits der Produktionslinie in Laboren oder Prüfabteilungen, Prozess- und Qualitätskennwerte direkt an der Produktionslinie zu messen. Damit ist es möglich, zeitnahe Aussagen über die Produkteigenschaften zu erzielen.

Der Verbreitungsgrad innovativer Prozessmessmethoden in der Kunststoffaufbereitung kann heute noch als sehr gering eingestuft werden. Eine Ursache liegt in einem Informationsdefizit über die verfügbaren Technologien. Die meisten neuen oder innovativen Messmethoden, aber auch der volle Informationsgehalt konventioneller Messgrößen wie z.B. jener der Druck- und Temperaturkennwerte (vgl. Kapitel 2 und 3) sind zum Teil in der Industrie unbekannt. In den letzten 20 Jahren konnten in den Forschungseinrichtungen der Kunststoff verarbeitenden Industrie und bei Messtechnikfirmen viele Methoden zur Prozess- und Qualitätsüberwachung in der Kunststoffaufbereitung neu oder weiterentwickelt und erprobt werden.

Im Bereich der Prozessmesstechnik in der Kunststoffaufbereitung sind im deutschsprachigen Raum vor allem das *Süddeutsche Kunststoff-Zentrum (SKZ)* in Würzburg, das *Deutsche Kunststoff-Institut (DKI)* in Darmstadt und das *Leibniz Institut für Polymerforschung (IPF)* in Dresden sowie im Bereich der optischen Spektroskopie das *Fraunhofer Institut für chemische Technologien (ICT)* in Pfinztal führend.

Dieses Buch soll unter anderem einen wesentlichen Beitrag zur besseren Information über den heutigen Stand der Technik und den vorhandenen Möglichkeiten der Prozessmesstechnik in der Kunststoffaufbereitung liefern.

1.1 Gliederung des Buches

Wie die folgenden Abschnitte noch zeigen werden, eignen sich insbesondere Inline- und Online- sowie in einigen Fällen auch Atline-Messmethoden zur Prozess- und Qualitätsüberwachung in der Kunststoffaufbereitung (vgl. Abschnitt 1.4). Daher wird in diesem Buch vor allem auf diese Verfahren eingegangen. Das Buch gliedert sich im Wesentlichen nach den unterschiedlichen Messmethoden, die in den nachfolgenden Kapiteln detailliert vorgestellt werden. Es käme auch eine Gliederung auf Basis der unterschiedlichen erzielbaren Kennwerte in Betracht. Da sich jedoch häufig mehrere Messverfahren für die Quantifizierung der gleichen Messgrößen wie z.B. Füllstoffgehalt oder Dispergiertgüte eignen, würde es aufgrund dessen zu einer Vielzahl an Überschneidungen kommen. Daher wurde die beschriebene Gliederung nach Messverfahren gewählt.

In den Messmethodenkapiteln wird jeweils auf die Funktionsprinzipien, den Stand der Technik, verfügbare Messsysteme, mögliche Einsatzbereiche und Referenzanwendungen eingegangen. Im Schlussteil dieses Buchs ist eine Auflistung von kommerziellen Anbietern der im Buch beschriebenen Prozessmesstechnik beigefügt. Der Umfang der jeweiligen Kapitel richtet sich in etwa nach der Relevanz für den Praxiseinsatz in einer industriellen Anwendung. Es werden jedoch auch akademische und sich noch in der Entwicklung befindliche Prozessmesstechniken vorgestellt, die z.B. für spezielle Problemstellungen oder die Prozessentwicklung und -analyse von Interesse sein können. Einen entsprechenden Literatur- und Quellennachweis gibt es am Ende des Buches zu jedem Kapitel, der für eine Vertiefung des jeweiligen Themengebiets geeignet ist.

Zuvor wird in diesem ersten Kapitel noch einmal auf die Anforderungen, die Prozessmesstechnik allgemein sowie auf einige Begriffsdefinitionen eingegangen. Im Buch werden durchgehend die üblichen Abkürzungen für Kunststoffbezeichnungen verwendet. Ein Abkürzungsverzeichnis ist am Ende des Buches im Anhang zu finden.

Auf eine allgemeine und kapitelübergreifende Nomenklatur für Formelzeichen wurde verzichtet. Die verschiedenen Messmethoden bedienen sich ganz unterschiedlicher Messprinzipien aus verschiedenen Bereichen der Ingenieur- und Naturwissenschaften. Einige Formelzeichen haben sich in einigen Themenbereichen fest etabliert, können jedoch in unterschiedlichen Disziplinen verschiedene Bedeutungen besitzen. Daher werden die Formelzeichen in jedem Kapitel einzeln eingeführt und besitzen nur innerhalb eines Kapitels ihre entsprechende Bestimmung.

Im abschließenden Kapitel 16 werden die verschiedenen Prozessmessmethoden in der Kunststoffaufbereitung noch einmal zusammengefasst und gegenübergestellt. Vor allem die in Tabelle 16.1 dargestellte Übersichtsmatrix bietet geordnet nach unterschiedlichen Kriterien einen direkten Vergleich für die verschiedenen Messverfahren und kann so als schnelle Entscheidungshilfe bei einer spezifischen Problemstellung dienen.

1.2 Bedeutung der Prozessmesstechnik

Der zunehmend verschärfte Wettbewerb zwingt viele Firmen, die entstehenden Nachteile durch intelligente Lösungen auszugleichen. Folglich sind der Fortbestand und die Konkurrenzfähigkeit der heimischen Kunststoffaufbereiter neben der Entwicklung neuer Werkstoffe direkt mit der Einführung neuer Technologien, aber auch mit der Verbesserung bewährter Prozesse und einer Optimierung der Effizienz verknüpft.

Die Bewertung der Produktqualität während der Kunststoffaufbereitung unmittelbar an der Aufbereitungsanlage verspricht eine deutliche Steigerung der Produktivität, die mit der Verminderung von Produktionsabfällen und der allgemeinen Senkung von Fertigungskosten einhergeht. Besonders die hohen Kosten und das Risiko von Kundenreklamationen könnten deutlich reduziert werden. Obgleich heute bereits verschiedene Möglichkeiten zur prozessnahen Ermittlung der Produktqualität verfügbar sind, kommen diese Methoden in der Praxis kaum zur Anwendung. Ein wesentlicher Grund hierfür ist neben der begrenzten Kenntnis der Methoden ein Vorbehalt zum praktischen Nutzen – insbesondere im Verhältnis zu den notwendigen Investitionen und dem Aufwand in der Installation und dem Betrieb.

Einerseits sind Kunststoffaufbereiter heute gezwungen, jede sich bietende Chance aufzugreifen und – wenn möglich – gewinnbringend zu nutzen. Andererseits sind sie aber häufig personell, zeitlich oder finanziell nicht in der Lage, die notwendigen Leistungen für den Einsatz von Prozessmesstechnik zu erbringen. Der Einsatz von Prozessmessmethoden ist zwar äußerst wünschenswert, deren Entwicklung und Einführung wird aber vor dem Hintergrund hoher Kosten und/oder anderer Prioritäten aus dem Tagesgeschäft oftmals zurückgestellt.

Die Erfahrung verschiedener Kunststoffaufbereiter unterschiedlicher Größe zeigen, dass etwa 1% des compoundierten Materials nicht den Spezifikationen entspricht [1.1]. Dieses Material wird auch als Fehlcharge oder sogenanntes «Off-Spec»-Material bezeichnet. Hierbei muss es sich nicht zwangsweise um Abfall im eigentlichen Sinn handeln. Das Material kann häufig in einem erneuten Verarbeitungsschritt wiederaufbereitet werden, um trotzdem die erforderlichen Eigenschaften aufzuweisen. Hierdurch entstehen jedoch zusätzlich erhebliche Material-, Personal- und Energiekosten. Zudem wird die Maschinenverfügbarkeit reduziert und damit die Wirtschaftlichkeit der produzierenden Betriebe geschwächt.

Dieser relativ hohe Ausschussanteil liegt an der meist bis heute praktizierten Vorgehensweise bei der Qualitätssicherung in der Kunststoffaufbereitung: Hierbei wird eine Probe aus der Produktion entnommen und dann z.B. in einer weiteren Maschine (z.B. Spritzgießmaschine, Folienextrusionsanlage, Plattenpresse) zur Probekörperherstellung transportiert. Diese werden anschließend in einem weiteren Schritt geprüft. Dieses Vorgehen wird auch als Offline-Methodik bezeichnet, die in Abschnitt 1.4.1 noch näher beschrieben wird. Von der Probenentnahme bis

zum Messergebnis können auf diese Weise durchaus 45 bis 60 Minuten vergehen. In diesem Zeitraum könnte unter Umständen bereits unbemerkt Ausschussware produziert werden. Erst nach zeitlich versetzter und erfolgter Prüfung steht fest, ob das Compound den Spezifikationen entspricht oder verworfen werden muss.

Ein weiterer Grund für die hohen Ausschussquoten liegt in der häufig praktizierten Vorgehensweise beim Anfahren einer Anlage bzw. beim Materialwechsel in einer laufenden Produktion. Bei beiden Vorgängen erfüllt das Material erst nach einiger Zeit die Anforderungen. Bis heute ist man bei der Ermittlung der Anfahr- bzw. der Materialwechselzeit meist auf Erfahrungswerte angewiesen. Hierbei bleibt eine Unsicherheit bei der Abwägung bestehen, ob ein Compound noch verworfen werden muss, es bereits den Spezifikationen entspricht oder aber die Produktion mit einem Compound begonnen wird, das die Spezifikationen nicht erfüllt. Eine schnelle Messtechnik zur Inline- oder Online-Beurteilung der Materialeigenschaften und des Prozesses bietet hier einen wesentlichen Angriffspunkt, um die Rentabilität und Ressourceneffizienz in der Kunststoffaufbereitung merklich zu steigern.

Die Industrie stellt zudem immer höhere Anforderungen an die Qualität der Produkte. Haupttreiber dieser Entwicklung sind vor allem die Automobil- und Medizintechnik-Kunden. Dort wird verstärkt ein Denken in Prozessen sowie eine lückenlose 100%-Kontrolle eingefordert. Diesem Druck können sich zunehmend auch kleinere Kunststoffaufbereiter nicht mehr entziehen. Eine Lösung zur langfristigen und rentablen Erfüllung dieser Anforderungen liegt im verstärkten Einsatz von Prozessmesstechniken.

Von den Kunden der Kunststoffaufbereiter werden immer mehr maßgeschneiderte Werkstoffe verlangt und die gestiegenen Anforderungen verlangen nach einer Maximierung der Eigenschaftsprofile von Compounds. Daher existieren Bestrebungen, sogenannte High-Throughput-Screening Verfahren auch im Compoundierungsbereich zu etablieren [1.2–1.5]. In der chemischen und Pharmaindustrie haben sich solche Verfahren zur Entwicklung neuer Produkte bereits vor vielen Jahren durchgesetzt. High-Throughput-Screening erlaubt eine schnelle und kostengünstige Materialentwicklung. Um die spätere Übertragbarkeit in die Praxis und Massenfertigung zu gewährleisten, bedeutet dies für den Bereich der Compoundentwicklung, dass derartige Screeningverfahren auf produktionsnahen Extrudern durchgeführt werden müssen. Dies setzt jedoch schnelle Messmethoden in Form von Inline- oder Online-Verfahren voraus, um die erzielten Werkstoffe schnell charakterisieren zu können.

1.3 Begriffsdefinitionen

1.3.1 Prozessmesstechnik und Kennwerte

Die *Prozessmesstechnik* hat in der Kunststoffaufbereitung zur Aufgabe, direkte Prozesskenngrößen wie z.B. Temperaturen und Drücke zu ermitteln. In der Kunststoffverarbeitung sind diese Kenngrößen meist stark mit den Werkstoffeigenschaften wie z.B. den rheologischen Kennwerten und der Materialzusammensetzung verknüpft. Daher erfolgt im Rahmen dieses Buches keine Trennung zwischen den häufig in der Literatur verwendeten Begriffen Prozess- und Analysemesstechnik.

Zudem kann eine Unterscheidung zwischen Prozess- und Qualitätskennwerten erfolgen. *Prozesskenngrößen* sind Parameter, die den Fertigungsprozess charakterisieren. Dazu gehören z.B. Drücke, Temperaturen, Drehmoment, Durchsatz und Verweilzeit. Diese Werte können – müssen aber nicht zwingend – sich auf die Qualitätskenngrößen auswirken. Die *Qualitätskenngrößen* beziehen sich ausschließlich auf die Eigenschaften von Zwischenprodukten oder dem Endprodukt wie z.B. das fertige Granulat. Typische Qualitätskenngrößen sind z.B. die Compoundzusammensetzung, Dispergiertüte oder Farbe.

Die Aufgaben der Prozessmesstechnik lassen sich durch folgende Hauptpunkte festmachen:

- Dokumentation der Produktqualität und des Fertigungsprozesses,
- Überwachung der Produktqualität und des Fertigungsprozesses,
- Erzeugung von Eingangsgrößen zur Prozessregelung und -steuerung.

Hierbei muss zwischen den Begriffen Steuerung und Regelung differenziert werden (Bild 1.1). Bei der *Regelung* wird in Systemen versucht, bei denen Wechselwirkungen bestehen, eine veränderliche Größe automatisch konstant zu halten. Bei der *Steuerung* ist keine direkte Rückkopplung vorhanden. Im Englischen wird der Unterschied dieser beiden Begrifflichkeiten deutlicher: Hier wird für Regelung der Begriff «closed-loop control» (geschlossener Regelkreis) und für Steuerung der Begriff «open-loop control» (offener Steuerkreis) verwendet.

In der Prozessmesstechnik gehören eindimensionale Messgrößen wie z.B. Temperatur, Druck und Schmelzflussindex zur Gruppe der *univariaten Messgrößen*. Viele Messmethoden liefern komplexere Informationen, die als *multivariate Daten* bezeichnet werden. Insbesondere spektroskopische Methoden wie beispielsweise die Ultraschallmesstechnik, die Farbmessung, die optische und dielektrische Spektroskopie bieten eine derartige Informationsvielfalt.

Die multivariaten Daten müssen für die weitere Nutzung zur Prozessregelung meist durch eine entsprechende Datenaufbereitung in eine oder wenige eindimensionale Messgrößen umgesetzt werden. Diese liefern dann dem Nutzer oder Regelkreis eine spezifische Aussage zu einem eindimensionalen Prozess- oder Qualitäts-

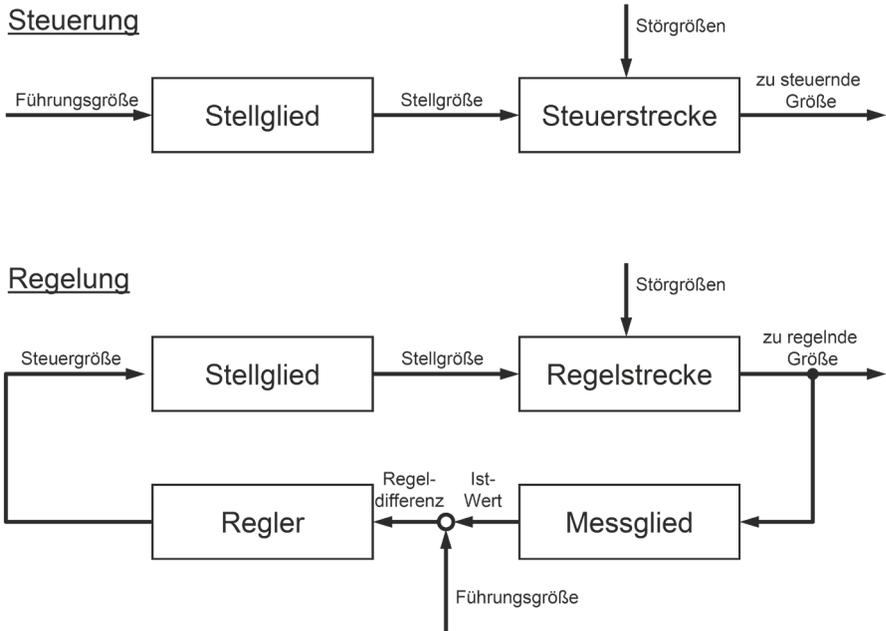


Bild 1.1 Blockschaltbild für eine Steuerung und Regelung: Der Soll-Wert wird jeweils durch die Führungsgröße vorgegeben.

kennwert wie z.B. die Farbabweichung eines bestimmten Farbtons, die Konzentration eines bestimmten Compoundbestandteils oder ein Maß für die Dispergiergüte. Diese Datenaufbereitung erfolgt meist mittels sogenannter multivariater Methoden (vgl. Kapitel 15).

1.3.2 Kunststoffaufbereitung und Produkte

Im Rahmen dieses Buches werden unter dem Schlagwort *Kunststoffaufbereitung* diejenigen Prozesse behandelt, die sich kontinuierlicher Verfahren bedienen und sich mit der Herstellung von Rohstoffen befassen. Batchprozesse wie etwa die Herstellung von Dry-Blends bei PVC in diskontinuierlichen Heiz-/Kühlmischern werden daher nicht eingehend behandelt. Auch die Extrusion von Halbzeugen wie Rohre, Profile, Kabel oder Folien gehört nicht zur Gruppe der Kunststoffaufbereitung, da hier fertige, ausgeformte Produkte und nicht Rohstoffe am Ende der Prozesskette stehen. Jedoch können die meisten hier vorgestellten Prozessmessmethoden auch bei diesen Verfahren zur Überwachung des Prozesses oder der Materialeigenschaften benutzt werden.

Als kontinuierliche Verfahren kommen in der Kunststoffaufbereitung vorwiegend Extruder und Knetter zum Einsatz. Am verbreitetsten sind hier die Einschnecken- und Gleichdrall-Doppelschneckenextruder. Letztere kommen insbesondere bei der Herstellung von Masterbatches oder Compounds zum Einsatz. Aber auch Planetwalzen-, Ring- und Gegendrall-Doppelschneckenextruder sowie Ko-Knetter sind in diesem Bereich vorzufinden.

Kunststoffe erschließen immer neue Anwendungen, die noch vor wenigen Jahren anderen Werkstoffen wie Glas, Keramik oder Metallen vorbehalten waren. Ein Grund für diesen Siegeszug ist die Möglichkeit, das Eigenschaftsprofil von Kunststoffen durch gezielte Modifizierung schnell an ein vorgegebenes Anforderungsprofil anzupassen. Die Kunststoffindustrie hat heutzutage erkannt, dass der wirtschaftlich attraktivste Weg zur Erschließung neuer Märkte nicht in der Synthese neuer Basispolymere, sondern in der Verstärkung, Füllung, Additivierung und dem Blenden bereits verfügbarer Polymere liegt.

Diese Eigenschaftsveränderungen finden in einem weiteren Schritt im Anschluss an die Polymersynthese im chemischen Reaktor statt. Nach der Polymerisation liegt meist Pulver als Zwischenprodukt vor. Dieses wird beispielsweise auf Gleichdrall-Doppelschneckenextrudern aufgeschmolzen, mit Additiven (z.B. Stabilisatoren) versetzt und anschließend granuliert.

Beim *Compoundieren* werden Kunststoffe mit weiteren Füllstoffen oder Additiven versetzt. Verstärkungsstoffe wie Fasern werden häufig zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften eingesetzt. Andere Füllstoffe können z.B. als Flammenschutzmittel verwendet werden. Preisgünstige Füllstoffe können bei hochpreisigen Basispolymeren auch zu einer Preisreduzierung trotz des zusätzlichen Verfahrensschrittes führen. Additive werden meist in geringeren Konzentrationen zur Stabilisierung oder Funktionalisierung den Kunststoffen beigefügt. Typische Vertreter hierfür sind z.B. Stabilisatoren, Nukleierungsmittel, Triboadditive und Verarbeitungshilfen. Organische oder anorganische Farbstoffe werden gezielt zum Einfärben von Kunststoffen eingesetzt.

Compounds sind Gemische aus mindestens zwei Grundstoffen, wie z.B. einem Polymer und einer zusätzlichen Komponente wie beispielsweise einem Füllstoff oder Additiv. Die einzelnen Grundstoffe werden hierbei nicht ineinander aufgelöst. Der Einarbeitungsprozess wird *Compoundierung* genannt. Hierbei werden die Ausgangsstoffe zu einer makroskopisch homogenen Mischung verbunden. Das Ziel der Compoundierung ist eine Verbesserung der Materialeigenschaften im Vergleich zu den Ausgangsprodukten oder eine Preisreduzierung beim Einsatz preisgünstiger Füllstoffe und hochpreisiger Polymere.

Es kann zwischen Compounds und Masterbatches unterschieden werden. *Compounds* sind in der Regel finale Rohstoffe, die in formgebenden Folgeprozessen wie z.B. der Extrusion oder dem Spritzguss zu finalen Halbzeugen oder Bauteilen weiterverarbeitet werden. *Masterbatches* sind Füllstoff- oder Additivkonzentrate, die in kleinen Mengen einem Basiskunststoff bei der weiteren Schmelzverarbeitung beigemischt werden können, jedoch alleine nicht zu fertigen Produkten verar-

beitet werden. Man kann zwei Gruppen von Masterbatches unterscheiden: *Farb-Masterbatches* werden zum Einfärben von Kunststoffzeugnissen benutzt; *Additiv-Masterbatches* verbessern bestimmte Eigenschaften eines Endproduktes. Als *Blends* werden Mischungen aus mindestens zwei unterschiedlichen Polymeren bezeichnet. Blends werden z.B. häufig zur Verbesserung der Schlagzähigkeitseigenschaften oder zur Einstellung der Härte bei TPE verwendet.

Zum Recycling von Kunststoffen werden ebenfalls Kunststoffaufbereitungsprozesse eingesetzt. Als Eingangsprodukte werden hier meist Granulate, Mahlgut, Flakes oder Folienschnipsel verwendet. Als Ausgangsprodukt steht dann wieder ein aufbereiteter Rohstoff zur Weiterverarbeitung meist in Granulatform zur Verfügung. Häufig werden bei dieser Aufbereitung dem Material noch zusätzliche Additive zur Stabilisierung oder Geruchsreduktion zugesetzt.

1.4 Taxonomie der Messmethoden

In der Prozessmesstechnik erfolgt eine übergeordnete Differenzierung der unterschiedlichen Messverfahren aufgrund der Prozessnähe. Es haben sich die vier Begriffe *inline*, *online*, *atline* und *offline* etabliert, die in den nachfolgenden Abschnitten eingehend erläutert und differenziert werden.

Ein in der Anwendung wesentliches Kriterium ist die Totzeit. Diese beschreibt das Intervall zwischen der Probenentnahme bzw. dem Initiieren der Messung und dem Vorliegen der Messergebnisse. In Bild 1.2 sind die Inline-, Online-, Atline- und

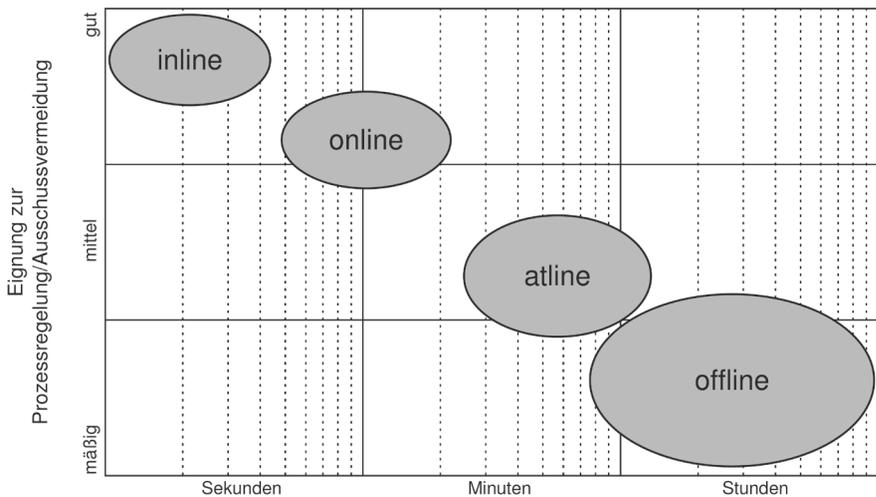


Bild 1.2 Einordnung von Inline-, Online-, Atline- und Offline-Methoden bzgl. ihrer Totzeit und die resultierende Eignung zur Prozessregelung und der effektiven Vermeidung von Ausschuss

Offline-Messmethoden bzgl. ihrer typischen Totzeiten in der Kunststoffaufbereitung in einem Diagramm dargestellt. Als zweite qualitative Kenngröße wird die Eignung zur Prozessregelung und -überwachung bzw. zur Vermeidung von Ausschuss aufgetragen. In anderen Anwendungsbereichen außerhalb der Kunststoffverarbeitung können sich die Absolutwerte unterscheiden, jedoch bleibt die Tendenz dieser Zuordnung bestehen. Die Inline-Messmethoden eignen sich somit am besten für eine Prozessregelung und Offline-Verfahren somit am wenigsten. Die Ursache für das schlechte Abschneiden der Offline-Verfahren liegt darin, dass z.B. Qualitätskennwerte erst sehr spät vorliegen und somit ein zeitnaher Eingriff etwa zur Ausschussminimierung nicht möglich ist.

1.4.1 Offline-Methoden

Zu den Offline-Methoden gehören die klassischen Prüfungen, die an dem finalen Produkt wie etwa den produzierten Granulaten praktiziert werden. Dazu gehören beispielsweise die Bestimmung des Schmelzflussindex im Kapillarrheometer, die Ermittlung mechanischer Eigenschaften an spritzgegossenen Probekörpern oder die Farbmessung an gepressten Platten.

Bei den Offline-Messmethoden erfolgen immer eine manuelle Probenentnahme und der Transport zu einem Prüfgerät, in dem die Messung durchgeführt wird (Bild 1.3). Dieses befindet sich meist in einem Labor oder Prüfraum, in dem qualifiziertes Personal die Messungen durchführt. Dadurch ist nur eine diskontinuierliche Probennahme und Ermittlung der Kennwerte möglich.

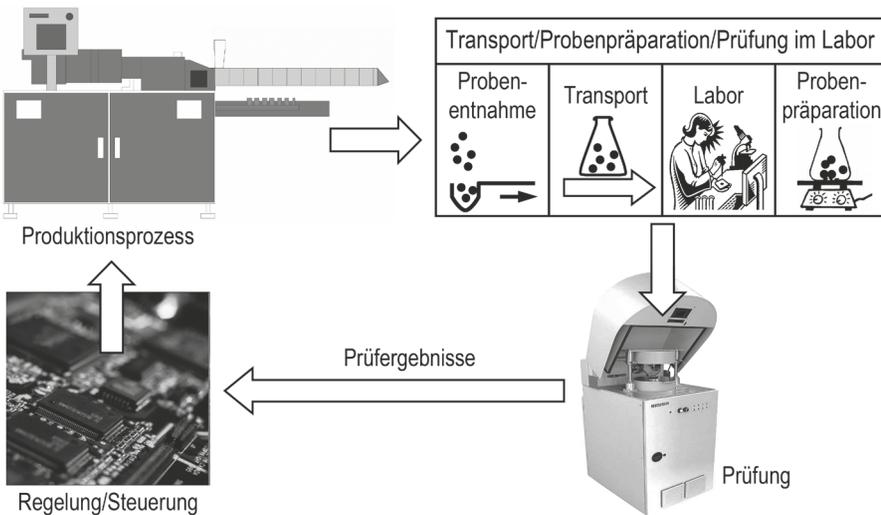


Bild 1.3 Schematische Darstellung einer Offline-Messmethode mit Steuerung/Regelung eines Prozesses

Die wesentlichen Vorteile sind, dass die Messungen meist von Experten durchgeführt werden und durch den Einsatz standardisierter oder genormter Messverfahren absolute und leicht vergleichbare Kennwerte zur Verfügung stehen. Zudem können je nach Bedarf sehr flexibel Einzelmessungen oder Prüfungen mit unterschiedlichen Verfahren durchgeführt werden. Offline-Methoden eignen sich nicht für eine direkte Prozessregelung oder -steuerung, da die Ergebnisse erst nach einem langen Zeitraum zur Verfügung stehen (vgl. Bild 1.2). In den meisten Fällen müssen die Messergebnisse manuell mit dem Produkt und den dazugehörigen Prozessparametern verknüpft werden, weshalb häufig darauf verzichtet wird und es eine zusätzliche Fehlerquelle darstellt.

1.4.2 Atline-Methoden

Bei Atline-Messmethoden erfolgt die Probenentnahme manuell oder automatisiert aus dem Prozessstrom (Bild 1.4). Das Messgerät ist prozessnah angeordnet und die Messung erfolgt somit ebenfalls prozessnah. Ein Vertreter der Atline-Verfahren ist z.B. die Farbmessung am Granulat, bei der dem Prozessstrom automatisiert eine Granulatprobe entnommen werden kann, dem Prüfgerät zugeführt und dort analysiert wird (vgl. Abschnitt 8.2.3).

Ein Vorteil von Atline-Messmethoden ist, dass in einigen Fällen leicht modifizierte Offline-Prüfvorrichtungen genutzt werden können und damit Messresultate in Anlehnung an standardisierte oder genormte Prüfungen vorliegen. Nachteile

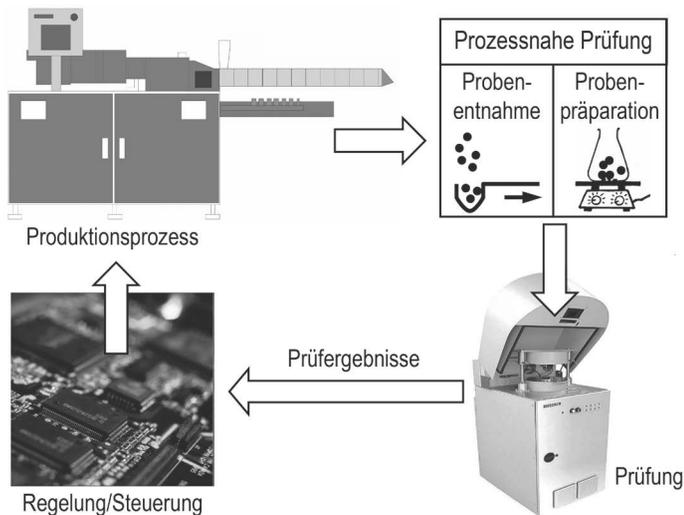


Bild 1.4 Schematische Darstellung einer Atline-Messmethode mit Steuerung/Regelung eines Prozesses

können in einigen Fällen eine geringe Geräteauslastung und durch die Prozessnähe und den Einsatz in einer Produktionsumgebung eine höhere erforderliche Geräte-robustheit sein. Die Messergebnisse liegen zeitnah zum Produktionsprozess vor, so dass eine Ausschussminimierung häufig bereits effektiver im Vergleich zu den Offline-Methoden möglich ist. Jedoch eignen sich die Verfahren aufgrund ihrer Totzeit meist nicht zur direkten Prozessregelung (vgl. Bild 1.2).

1.4.3 Online-Methoden

Bei den Online-Methoden erfolgt eine meist kontinuierliche Messung in einem Bypasssystem (Bild 1.5). In der Compounding wird hierzu oft ein kleiner Teil des Hauptschmelzstroms in einen kleineren Bypassschmelzstrom abgezweigt und dem Messsystem zugeführt. Hierbei kommen häufig spezialisierte Messsonden und Prozessmessgeräte zum Einsatz. Ein Merkmal der Online-Methoden ist, dass der Zeitraum zwischen dem Vorliegen der Informationen (inklusive Probenentnahme, Materialförderung, Messung, Informationsaufbereitung) kleiner als der Zeitraum ist, in dem sich der Prozess oder das Produkt stabil und stationär ändern kann.

In der Literatur erfolgt häufig eine unzureichende Differenzierung zwischen den Begriffen inline und online, so dass diese Bezeichnungen häufig fälschlicherweise als Synonym gebraucht werden. Hier ist dann durch ein detailliertes Studium der Literaturinhalte und des dort beschriebenen Messaufbaus zu hinterfragen, ob eine Inline- oder Online-Konfiguration vorliegt.

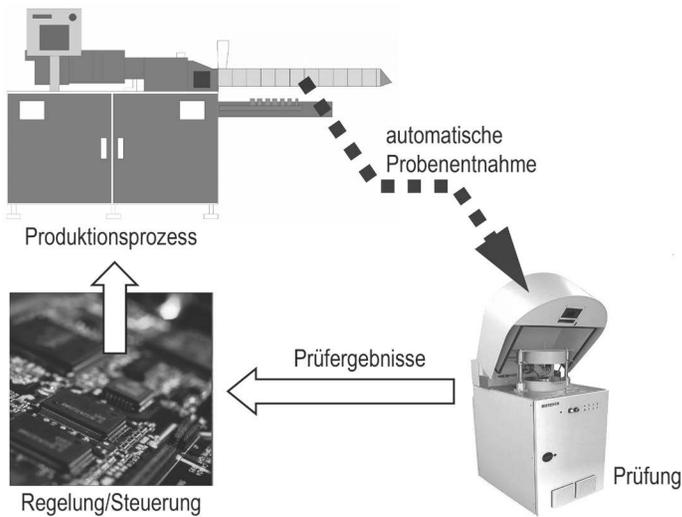


Bild 1.5 Schematische Darstellung einer Online-Messmethode mit Steuerung/Regelung eines Prozesses

Typische Vertreter der Online-Messmethoden sind die Online-Rheometer aus Kapitel 4. Aber auch die Anwendung spektroskopischer Methoden und Extinktionsmessungen können in Bypasssystemen erfolgen. Die Vorteile der Online-Methoden sind die schnelle und automatische Probennahme z.B. durch einen Bypass. Daher können die so ermittelten Kennwerte meist gut für eine Prozessregelung herangezogen werden (vgl. Bild 1.2) und ermöglichen eine wirksame Ausschussminimierung. Viele Methoden benötigen jedoch eine aufwendige Kalibrierung, da häufig eine Messwertkompensation mit Prozessparametern wie Massedruck und -temperatur erforderlich ist.

1.4.4 Inline-Methoden

Inline-Methoden werden in einigen Fällen auch als «in situ» (lateinisch für «am Ursprungsort», «an Ort und Stelle») bezeichnet. Die Messstelle befindet sich hier direkt im Produktionsstrom (Bild 1.6). Eine Probenentnahme ist hier nicht mehr erforderlich. Da direkt im Produktionsstrom gemessen wird, sind meist eine hoch spezialisierte Messtechnik und entsprechend geeignete Messsonden für den unmittelbaren Einsatz in der direkten industriellen Fertigungsumgebung erforderlich.

Die kommerziell verfügbaren Inline-Verfahren sind in der Regel störunanfällig, da keine manuellen Schritte bei den Messungen notwendig sind. Der Kalibrieraufwand ist jedoch in vielen Fällen sehr hoch und aufwendiger als bei den Online-Methoden zu bewerten, weil alle Einflüsse des Hauptproduktionsstroms berücksichtigt werden müssen. Da die Messungen direkt im Produktionsstrom erfolgen

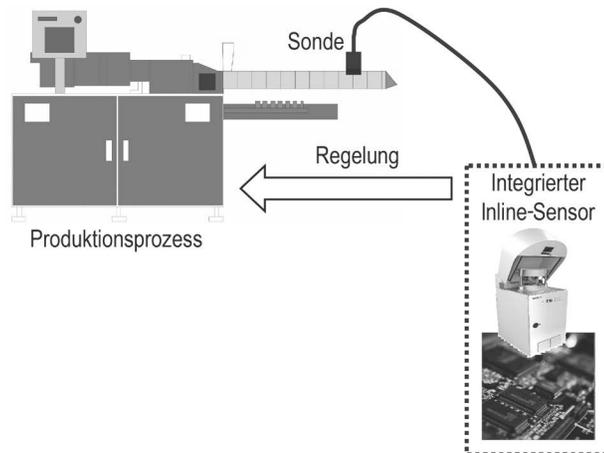


Bild 1.6 Schematische Darstellung einer Inline-Messmethode mit Regelung des Prozesses