

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort zur dritten Auflage</b> .....	V
<b>Vorwort zur zweiten Auflage</b> .....	VII
<b>Vorwort zur ersten Auflage</b> .....	IX
<b>1 Einleitung</b> .....	1
Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen in Kapitel 1 .....	6
Literatur zu Kapitel 1 .....	6
<b>2 Eigenschaften von Polymerschmelzen</b> .....	7
2.1 Rheologisches Verhalten .....	7
2.1.1 Viskose Schmelzeigenschaften .....	7
2.1.1.1 Viskositäts- und Fließfunktion .....	8
2.1.1.2 Mathematische Beschreibung des strukturviskosen Schmelzeverhaltens .....	10
2.1.1.3 Einfluss der Temperatur und des Drucks auf das Fließverhalten .....	16
2.1.2 Ermittlung des viskosen Fließverhaltens .....	23
2.1.3 Viskoelastische Schmelzeigenschaften .....	29
2.2 Thermodynamisches Verhalten .....	34
2.2.1 Dichte .....	35
2.2.2 Wärmeleitfähigkeit .....	36
2.2.3 Spezifische Wärmekapazität .....	37
2.2.4 Temperaturleitfähigkeit .....	38
2.2.5 Spezifische Enthalpie .....	39
Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen in Kapitel 2 .....	39
Literatur zu Kapitel 2 .....	42
<b>3 Grundgleichungen für einfache Strömungsformen</b> .....	45
3.1 Rohrströmung .....	46
3.2 Schlitzströmung .....	51
3.3 Ringspaltströmung .....	55
3.4 Zusammenstellung einfacher Werkzeuggleichungen .....	59
3.5 Phänomen des Wandgleitens .....	68
3.5.1 Modell zur Berücksichtigung des Wandgleitens .....	68
3.5.2 Unstetigkeit in der Fließfunktion – Schmelzebruch .....	73
Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen in Kapitel 3 .....	74
Literatur zu Kapitel 3 .....	76

<b>4 Berechnung der Geschwindigkeits- und Temperaturverhältnisse in Extrusionswerkzeugen</b>	79
4.1 Erhaltungsgleichungen	79
4.1.1 Kontinuitätsgleichung	79
4.1.2 Impulsgleichungen	80
4.1.3 Energiegleichung	82
4.2 Einschränkende Annahmen und Randbedingungen	85
4.3 Analytische Ansätze zur Lösung der Erhaltungsgleichungen	87
4.4 Numerische Lösung der Erhaltungsgleichungen	93
4.4.1 Finite-Differenzen-Methode (FDM)	94
4.4.2 Finite-Elemente-Methode (FEM)	97
4.4.3 Vergleich von FDM und FEM	100
4.4.4 Berechnungsbeispiele für die Finite-Differenzen-Methode	104
4.4.5 Berechnungsbeispiele für die Finite-Elemente-Methode	110
4.5 Berücksichtigung des viskoelastischen Stoffverhaltens	115
4.6 Berechnung der Strangaufweitung	118
4.7 Methoden zur Auslegung und Optimierung von Extrusionswerkzeugen	124
4.7.1 Vorgehen in der Industrie bei der Auslegung von Extrusionswerkzeugen	124
4.7.2 Parameter der Optimierung	127
4.7.2.1 Praktische Optimierungsziele	127
4.7.2.2 Praktische Randbedingungen bzw. Restriktionen bei der Fließkanalgestaltung	128
4.7.2.3 Freie Parameter bei der Werkzeugoptimierung	129
4.7.2.4 Abhängige Parameter bei einer Werkzeugoptimierung und deren Modellierung	129
4.7.3 Optimierungsmethoden	131
4.7.3.1 Ableitungsfreie Optimierungsverfahren	134
4.7.3.2 Gradientenbasierte Optimierungsmethoden	136
4.7.3.3 Stochastische Optimierungsmethoden	136
4.7.3.4 Evolutionäre Verfahren	136
4.7.3.5 Behandlung von Randbedingungen	139
4.7.4 Praktische Anwendungen von Optimierungsstrategien bei der Auslegung von Extrusionswerkzeugen	140
4.7.4.1 Optimierung einer konvergenten Kanalgeometrie	140
4.7.4.2 Optimierung von Profilwerkzeugen	142
Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen in Kapitel 4	146
Literatur zu Kapitel 4	148
<b>5 Monoextrusionswerkzeuge für Thermoplaste</b>	153
5.1 Werkzeuge mit kreisförmigem Austrittsquerschnitt	153
5.1.1 Bauformen und Anwendungen	153
5.1.2 Auslegung	159
5.2 Werkzeuge mit schlitzförmigem Austrittsquerschnitt	164
5.2.1 Bauformen und Anwendungen	165
5.2.2 Auslegung	172

5.2.2.1	T-Verteiler .....	174
5.2.2.2	Fischschwanzverteiler .....	175
5.2.2.3	Kleiderbügelverteiler .....	177
5.2.2.4	Numerische Verfahren .....	188
5.2.2.5	Berücksichtigung der Werkzeugaufweitung bei der Auslegung .....	190
5.2.2.6	Unkonventionelle Verteilersysteme .....	191
5.2.2.7	Betriebsverhalten von Breitschlitzwerkzeugen .....	194
5.3	Werkzeuge mit kreisringspaltförmigem Austrittsquerschnitt .....	197
5.3.1	Bauformen .....	198
5.3.1.1	Dornhalterwerkzeuge .....	198
5.3.1.2	Siebkorbwerkzeuge .....	201
5.3.1.3	Pinolenwerkzeuge .....	202
5.3.1.4	Wendelverteilerwerkzeuge .....	203
5.3.2	Anwendungen .....	205
5.3.2.1	Rohrwerkzeuge .....	205
5.3.2.2	Blasfolienwerkzeuge .....	207
5.3.2.3	Werkzeuge zur Herstellung des Vorformlings beim Extrusionsblasformen .....	208
5.3.2.4	Ummantelungswerkzeuge .....	214
5.3.3	Auslegung .....	217
5.3.3.1	Dornhalter- und Siebkorbwerkzeuge .....	217
5.3.3.2	Pinolenwerkzeuge .....	220
5.3.3.3	Wendelverteilerwerkzeuge .....	223
5.3.3.4	Ummantelungswerkzeuge .....	227
5.4	Ansätze zur Druckverlustberechnung für nicht rohr- oder schlitzförmige Fließkanäle .....	230
5.5	Werkzeuge mit beliebigem Austrittsquerschnitt .....	234
5.5.1	Bauformen und Anwendungen .....	234
5.5.2	Auslegung .....	243
5.6	Werkzeuge zur Herstellung geschäumter Halbzeuge .....	252
5.6.1	Schaumfolienwerkzeuge .....	253
5.6.2	Schaumprofilwerkzeuge .....	253
5.7	Sonderwerkzeuge .....	255
5.7.1	Werkzeuge zur Ummantelung beliebiger Profilquerschnitte .....	255
5.7.2	Werkzeuge zur Herstellung von Profilen mit Verstärkungseinlagen .....	256
5.7.3	Werkzeuge zur Herstellung von Netzen .....	257
5.7.4	Schneckendüse zur Herstellung von Tafeln .....	258
	Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen in Kapitel 5 .....	258
	Literatur zu Kapitel 5 .....	261
<b>6</b>	<b>Coextrusionswerkzeuge für Thermoplaste .....</b>	<b>269</b>
6.1	Bauformen .....	269
6.1.1	Werkzeuge mit Zusammenführung der Schmelzen nach dem Düsenaustritt („Zweischlitz“- bzw. „Dual-slot“-Werkzeuge) .....	269
6.1.2	Adapterwerkzeuge .....	270

6.1.3	Mehrschichtwerkzeuge .....	274
6.1.4	Schicht-Multiplikation .....	275
6.2	Anwendungen .....	276
6.2.1	Flachfolien- und Tafelwerkzeuge .....	276
6.2.2	Blasfolienwerkzeuge .....	278
6.2.3	Blasköpfe zur Vorformlingsherstellung beim Extrusionsblasformen ...	278
6.3	Strömungsberechnung und Auslegung .....	279
6.3.1	Strömungsberechnung für einfache Mehrschichtströmungen und konstante Viskosität. ....	282
6.3.2	Explizites Finite-Differenzen-Verfahren zur Berechnung von Coextrusionsströmungen .....	286
6.3.3	Berechnung von Geschwindigkeits- und Temperaturfeldern in Coextrusionsströmungen mit Finite-Differenzen-Verfahren. ....	289
6.3.4	Berechnung von Geschwindigkeitsfeldern in Coextrusionsströmungen mit der Finite-Elemente-Methode .....	292
6.4	Fließinstabilitäten in Mehrschichtströmungen .....	294
	Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen in Kapitel 6 .....	299
	Literatur zu Kapitel 6 .....	300
<b>7</b>	<b>Kautschukextrusionswerkzeuge .....</b>	<b>303</b>
7.1	Bauarten von Kautschukextrusionswerkzeugen .....	303
7.2	Grundlagen zur Auslegung von Kautschukextrusionswerkzeugen. ....	304
7.2.1	Thermodynamische Stoffwerte .....	305
7.2.2	Rheologische Stoffwerte .....	306
7.2.3	Berechnung von viskosen Druckverlusten .....	309
7.2.3.1	Isotherme Rechenansätze .....	309
7.2.3.2	Nichtisotherme Rechenansätze .....	312
7.2.4	Abschätzen von Temperaturspitzen .....	313
7.2.5	Berücksichtigung des elastischen Werkstoffverhaltens .....	314
7.3	Auslegung von Verteilerwerkzeugen für Elastomere .....	315
7.4	Auslegung von Blendenwerkzeugen für die Kautschukverarbeitung .....	316
7.4.1	Berechnung der Druckverluste .....	316
7.4.2	Strangaufweitung .....	320
7.4.3	Vereinfachte Abschätzungen zur Blendenauslegung .....	323
	Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen in Kapitel 7 .....	329
	Literatur zu Kapitel 7 .....	331
<b>8</b>	<b>Temperieren von Extrusionswerkzeugen .....</b>	<b>335</b>
8.1	Bauarten und Anwendungen .....	335
8.1.1	Flüssigtemperierte Werkzeuge .....	336
8.1.2	Elektrisch beheizte Werkzeuge .....	337
8.1.3	Regelung der Werkzeugtemperatur .....	338
8.2	Thermische Auslegung .....	339
8.2.1	Kriterien und Freiheitsgrade bei der thermischen Auslegung .....	339
8.2.2	Wärmebilanz am Werkzeug .....	341
8.2.3	Einschränkende Annahmen zur Modellbildung .....	346

8.2.4	Simulationsmöglichkeiten zur thermischen Auslegung .....	347
	Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen in Kapitel 8 .....	354
	Literatur zu Kapitel 8 .....	356
<b>9</b>	<b>Mechanische Auslegung von Extrusionswerkzeugen .....</b>	<b>359</b>
9.1	Mechanische Auslegung einer Sieblochplatte .....	359
9.2	Mechanische Dimensionierung eines Werkzeugs mit rotationssymmetrischem Fließkanalquerschnitt .....	365
9.3	Mechanische Dimensionierung eines Breitschlitzwerkzeugs .....	373
9.4	Mechanische Dimensionierung eines radialen Wendelverteilers .....	377
9.5	Allgemeine Gestaltungshinweise .....	380
9.6	Werkstoffe für Extrusionswerkzeuge .....	382
	Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen in Kapitel 9 .....	386
	Literatur zu Kapitel 9 .....	389
<b>10</b>	<b>Handhabung, Reinigung und Pflege von Extrusionswerkzeugen .....</b>	<b>391</b>
	Literatur zu Kapitel 10 .....	393
<b>11</b>	<b>Kalibrieren von extrudierten Rohren und Profilen .....</b>	<b>395</b>
11.1	Bauarten und Anwendungen .....	397
11.1.1	Rutschenkalibrierung .....	397
11.1.2	Außenkalibrierung mit Druckluft .....	398
11.1.3	Außenkalibrierung mit Vakuum .....	399
11.1.4	Innenkalibrierung .....	404
11.1.5	Präzisions-Profilziehverfahren (Technoform-Verfahren) .....	405
11.1.6	Spezialverfahren mit beweglichen Kalibratoren .....	405
11.2	Thermische Auslegung von Kalibrierstrecken .....	406
11.2.1	Analytisches Berechnungsmodell .....	407
11.2.2	Numerisches Berechnungsmodell .....	411
11.2.3	Analogie-Modell .....	416
11.2.4	Thermische Randbedingungen und Stoffwerte .....	419
11.3	Einfluss der Kühlung auf die Extrudatqualität .....	420
11.4	Mechanische Auslegung der Kalibrierung .....	421
11.5	Kühldüsen, Verfahren zur Herstellung von Vollstäben .....	421
	Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen in Kapitel 11 .....	424
	Literatur zu Kapitel 11 .....	425
	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>429</b>