

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur dritten Auflage	V
Vorwort zur zweiten Auflage	VII
Vorwort zur ersten Auflage	IX
1 Einleitung	1
Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen in Kapitel 1	6
Literatur zu Kapitel 1	6
2 Eigenschaften von Polymerschmelzen	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
3 Grundgleichungen für einfache Strömungsformen	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

4 Berechnung der Geschwindigkeits- und Temperaturverhältnisse in Extrusionswerkzeugen	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 Strangauweitung	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
5 Monoextrusionswerkzeuge für Thermoplaste	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
6	Coextrusionswerkzeuge für Thermoplaste	269
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
7	Kautschukextrusionswerkzeuge	303
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 Blendauslegung	323
	Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen in Kapitel 7	329
	Literatur zu Kapitel 7	331
8	Temperieren von Extrusionswerkzeugen	335
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
9 Mechanische Auslegung von Extrusionswerkzeugen	359
9.1 Mechanische Auslegung einer Siebblockplatte	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
10 Handhabung, Reinigung und Pflege von Extrusionswerkzeugen	391
Literatur zu Kapitel 10	393
11 Kalibrieren von extrudierten Rohren und Profilen	395
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
Sachwortverzeichnis	429