

# Inhalt

<b>Vorwort zur 2. Auflage</b> .....	<b>XIII</b>
Vorwort zur 1. Auflage .....	XIV
<b>Der Autor</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Wichtige Formeln der Rheologie</b> .....	<b>XIX</b>
Die Gleichungen von <i>Hagen-Poiseuille</i> .....	XIX
Gleichungen für die repräsentative Schergeschwindigkeit .....	XX
Gleichungen für die Viskositätsberechnung .....	XX
Gleichungen für den Temperaturverschiebungsfaktor $a_T$ .....	XXI
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Wozu benötigt man die Rheologie in der Kunststofftechnik? ...	3
1.2 Computerunterstützte Simulationsprogramme zur Auslegung von Spritzgießwerkzeugen .....	7
<b>2 Rheologische Phänomene</b> .....	<b>11</b>
2.1 Strukturviskosität .....	13
2.1.1 Strukturviskoses Fließverhalten von Kunststoffen ...	14
2.2 Dilatanz .....	16
2.3 Thixotropie und Rheopexie .....	18
2.4 Grenzfließspannung .....	20
2.5 Normalspannungen .....	23
2.5.1 Herkunft, Definition und Charakterisierung .....	23
2.5.2 Viskoelastische und Normalspannungseffekte .....	24
2.5.2.1 <i>Weissenberg</i> -Effekt .....	24
2.5.2.2 Strangschwellen (engl.: die swelling effect) .....	26

<b>3</b>	<b>Rheologische Grundkörper</b> .....	<b>29</b>
3.1	Der ideal elastische Festkörper .....	30
3.2	Der ideal viskose Körper ( <i>Newtonsches Fluid</i> ) .....	31
3.3	Der viskoelastische Körper .....	32
3.3.1	Allgemeiner viskoelastischer Stoff .....	35
<b>4</b>	<b>Der Scherversuch und die Herleitung des <i>newtonschen</i> Reibungsgesetzes (Stoffgesetz)</b> .....	<b>37</b>
4.1	Der Scherversuch .....	37
4.2	Wichtige rheologische Stoffgesetze .....	43
<b>5</b>	<b>Strömungsarten</b> .....	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Rheometrie – Viskosimetrie und Stoffdatenermittlung</b> .....	<b>57</b>
6.1	Anwendungsbereich der Viskosimeter- und Rheometertypen ..	59
6.2	Voraussetzung für die Ermittlung der Stoffdaten .....	60
6.3	Fallviskosimeter .....	62
6.3.1	Die Ermittlung der Viskosität bei Fallviskosimetern über das Gesetz von <i>Stokes</i> .....	62
6.3.2	Kugelfallviskosimeter .....	64
6.3.3	Kugel im geneigten Fallrohr .....	65
6.4	Viskowaage .....	66
6.5	Rotations- und Oszillationsrheometer .....	66
6.5.1	Platte-Platte-Rheometer .....	67
6.5.2	Kegel-Platte-Rheometer .....	69
6.5.2.1	Normalspannungen und viskoelastisches Verhalten ..	70
6.5.2.2	Messung der Normalspannungen von Fluiden mittels Rotationsrheometrie .....	72
6.5.2.3	Messung der viskoelastischen Eigenschaften von Fluiden mittels Oszillationsrheometrie (Schwingungsrheometrie) .....	76
6.5.2.4	Die <i>Cox-Merz</i> -Relation und ähnliche Beziehungen ....	84
6.5.2.5	Relaxationstest mittels Rotationsrheometer .....	86
6.5.2.6	Die Large Amplitude Oscillation Theorie (LAOS) ....	88
6.6	Koaxiale Zylindersysteme .....	99
6.7	Kapillarrheometer .....	100
6.7.1	Niederdruck-Kapillarrheometer .....	101
6.7.1.1	Bestimmung des Melt-Flow-Index (MFI) und der Melt-Volume-Rate (MVR) .....	101

6.7.1.2	Ermittlung der scheinbaren Schergeschwindigkeit und der scheinbaren Viskosität mittels Niederdruck-Kapillarrheometer .....	103
6.7.1.3	Zusammenhang zwischen dem MVR/MFI-Wert und der Molmasse .....	104
6.7.2	Hochdruckkapillar-Rheometer .....	106
6.7.2.1	Ermittlung der Massestrom-Druck-Funktion .....	108
6.7.2.2	Berechnung des Volumenstroms .....	108
6.7.2.3	Berechnung der scheinbaren Wandschubspannung und der scheinbaren Wandschergeschwindigkeit ....	109
6.7.2.4	Ermittlung der wahren Wandschubspannung .....	111
6.7.2.5	Ermittlung der wahren Wandschergeschwindigkeit ..	115
6.7.2.6	Bestimmung der Einlauf- und Auslaufdruckverluste, der Normalspannungen und der Dehnviskosität mittels Inline-Druckrheometer .....	121
6.7.2.7	Ermittlung der druckabhängigen Viskosität mittels Inline-Rheometerdüse .....	125
6.8	Dehnrheologie .....	129
6.8.1	Herkunft und Definition der Dehnviskosität .....	129
6.8.2	Messung von Dehnviskositäten .....	131
6.8.2.1	Messungen mit einachsiger Dehnung .....	131
6.8.2.2	Ermittlung der Dehnviskosität mit dem Rheotensversuch .....	132
6.8.3	Ermittlung der Dehnviskosität mit dem Ansatz von <i>F. N. Cogswell</i> .....	135
6.9	Theorie und Praxis der Lösungsviskosimetrie .....	138
6.9.1	Beispielmessung der Lösungsviskosität anhand von Polyethylenterephthalat (PET), (Intrinsic Viscosity, Grenzviskositätszahl, Staudinger-Index) .....	146
6.9.1.1	Informationen von Schott Instruments zur Messung der Lösungsviskosität .....	154
6.9.1.2	Bestimmung des <i>K</i> -Werts in Lösung nach <i>Fikentscher</i> .....	154
<b>7</b>	<b>Viskosimetrie – Einflüsse auf die rheologischen Stoffdaten ..</b>	<b>157</b>
7.1	Einfluss der Dissipation .....	157
7.2	Einfluss der Temperatur auf die Fließkurve .....	160
7.2.1	Der Temperaturverschiebungsfaktor .....	162
7.2.2	Temperaturinvariante Auftragung der Fließkurven (Masterkurven) .....	163
7.2.2.1	Beispiel einer Viskositätsermittlung für eine gewählte Schergeschwindigkeit und eine weitere Temperatur ..	166

7.2.2.2	<i>Aufgabe:</i> Gesucht ist die Viskosität für eine gegebene Schergeschwindigkeit anhand einer Masterkurve ...	167
7.2.2.3	<i>Aufgabe:</i> Übung zur Temperaturverschiebung mittels Nullviskosität .....	169
7.2.3	Mathematische Beschreibung des Temperaturverschiebungsfaktors .....	169
7.2.3.1	<i>Arrhenius-Funktion</i> .....	170
7.2.3.2	Gleichungen von <i>Williams, Landel und Ferry</i> ( <i>WLF-Ansatz</i> ) .....	171
7.3	Thermorheologische Größen .....	175
7.3.1	Änderungen des morphologischen Aufbaus durch Wärme .....	176
7.3.2	Füllstoffe .....	177
7.3.3	Der Druckeinfluss .....	182
7.3.4	Einfluss der mittleren Molmasse .....	185
7.3.5	Molmassenverteilung .....	191
7.3.6	Einfluss der Molmasse und der Molmassenverteilung auf den Speicher- und Verlustmodul bei der Oszillation .....	193
7.4	Einfluss von Restfeuchte auf die Scherviskosität .....	199
7.5	<i>Aufgabe:</i> Beschreiben des Fließverhaltens mit einer „Masterkurve“ .....	200

## 8 Viskosimetrie – Mathematische Beschreibung

	<b>der Fließkurve</b> .....	<b>203</b>
8.1	Der Potenzansatz von <i>Ostwald</i> und <i>de Waele</i> ( <i>Power-Law-Model</i> )	204
8.1.1	<i>Aufgabe:</i> grafische Ermittlung der Konstanten des Potenzansatzes .....	206
8.2	Der <i>Carreau-Ansatz</i> .....	208
8.2.1	Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit im <i>Carreau-Ansatz</i> .....	211
8.3	Der <i>Cross-WLF-Ansatz</i> .....	212
8.4	Polynomansätze .....	214
8.4.1	Polynomansatz nach <i>Münstedt</i> .....	214
8.4.2	Biquadratischer Polynomansatz .....	215
8.4.3	Polynomansätze für komplexes Fließverhalten .....	215
8.5	<i>Aufgabe:</i> Ermittlung des Konsistenzfaktors und des Viskositätsexponenten .....	216
8.6	<i>Aufgabe:</i> Vergleich der Materialgesetze (Potenzansatz und <i>Carreau-Ansatz</i> ) .....	217

<b>9</b>	<b>Berechnung von Fließvorgängen</b> .....	<b>219</b>
9.1	Berechnung der Volumenstrom- und Druckfunktion für <i>newtonsche</i> Fluide .....	220
9.1.1	Annahmen zur Vereinfachung der Gleichungen .....	220
9.1.2	Strömungskanal mit Rechteckquerschnitt .....	220
9.1.3	Strömungskanal mit Kreisquerschnitt .....	225
9.1.4	Kanal mit Kreisringquerschnitt .....	228
9.2	Berechnung der Volumenstrom- und Druckfunktion für strukturviskose Fluide .....	229
9.2.1	Berücksichtigung der Strukturviskosität mittels Potenzansatz .....	229
9.2.2	Berücksichtigung der Strukturviskosität mit dem <i>Carreau</i> -Ansatz .....	231
9.3	Normierter Geschwindigkeits- und Schergeschwindigkeitsverlauf	232
9.4	<i>Aufgabe</i> : Auswirkung des Strömungskanals auf den Schmelzevolumenstrom .....	235
<b>10</b>	<b>Die Methode der repräsentativen Schergeschwindigkeit</b> ....	<b>237</b>
<b>11</b>	<b>Berechnung von Fließvorgängen beim Spritzgießen</b> .....	<b>241</b>
11.1	Modellvorstellung .....	241
11.2	Allgemeine Vorgehensweise zur Druckverlustberechnung .....	247
11.2.1	<i>Aufgabe</i> : Beispielrechnungen .....	247
11.2.1.1	Druckverlust Plattengeometrie .....	247
11.2.1.2	Druckverlust Scheibengeometrie .....	248
11.2.2	Einfluss der Materialeigenschaften auf den Verarbeitungsprozess .....	249
11.2.3	<i>Aufgabe</i> : Druckverluste beim Spritzgießen und die daraus resultierende reale Zuhaltekraft .....	250
11.2.4	<i>Aufgabe</i> : Berücksichtigung der Dissipations- und Abkühleffekte (nichtisotherme Strömung) .....	251
11.2.5	Berechnung der optimalen Füllzeit (Einspritzgeschwin- digkeit) beim Spritzgießen mittels <i>Brinkmann</i> -Zahl ..	253
11.2.5.1	<i>Aufgabe</i> : Optimale Füllzeit .....	255
<b>12</b>	<b>Berechnen von Fließvorgängen in Heißkanalsystemen und Extrusionswerkzeugen</b> .....	<b>257</b>
12.1	Grundlagen zum Druckverlauf über die Länge bei zusammengesetzten Kanalsystemen .....	257
12.1.1	Druckverlauf in parallel angeordneten Rohren .....	258

12.1.2	Druckverlauf in seriell angeordneten Rohren . . . . .	259
12.1.3	Konische Strömungskanäle . . . . .	260
12.1.4	Druckverlauf für einen beliebig zusammen- gesetzten Kanal . . . . .	261
12.2	Rheologische Auslegung von Heißkanalsystemen beim Spritzgießen . . . . .	262
12.3	<i>Aufgaben:</i> Mathematisch rheologische Balancierung von Heißkanalsystemen . . . . .	271
12.3.1	Zweifachwerkzeug mit unterschiedlichem Schmelzeverteilersystem . . . . .	271
12.3.2	Achtfachwerkzeug mit unterschiedlichem Schmelzeverteilersystem . . . . .	272
12.3.3	Sechsfachwerkzeug mit unterschiedlichem Schmelzeverteilersystem . . . . .	273
12.3.4	Zweifach-Familienwerkzeug . . . . .	274
12.4	Rheologische Auslegung von Extrusionswerkzeugen . . . . .	276
12.4.1	Mathematische Voraussetzungen zur Balancierung . .	279
12.4.2	Analytische Balancierung Fischschwanzverteiler . . . .	281
12.4.3	Analytische Balancierung Kleiderbügelverteiler . . . .	283
12.4.4	Numerische Balancierung . . . . .	287
12.4.5	<i>Aufgabe:</i> Analytische Balancierung eines Fischschwanzverteilers . . . . .	289
12.4.6	<i>Aufgabe:</i> Analytische Balancierung eines Kleiderbügelverteilers . . . . .	289
12.4.7	<i>Aufgabe:</i> Numerische Balancierung einer Breitschlitz- düse mit Kleiderbügelverteiler mit Segmenten . . . . .	290
12.4.8	<i>Aufgabe:</i> Berechnung der Austragsleistung eines Extruders . . . . .	291
12.4.9	<i>Aufgabe:</i> Auslegung einer Schlitzdüse . . . . .	292
<b>13</b>	<b>Scher- und Dehndruckverluste an Querschnittsübergängen . .</b>	<b>295</b>
13.1	<i>Aufgabe:</i> Dehn- und Scherdruckverluste . . . . .	298
<b>14</b>	<b>Die rheologische Werkzeugauslegung beim Spritzgießen mit der Füllbildmethode . . . . .</b>	<b>301</b>
14.1	Grundlagen für ein grafisches Verfahren . . . . .	301
14.2	Modellvorstellung des Formfüllvorgangs . . . . .	301
14.3	Rheologische Grundlagen . . . . .	302
14.4	Beispiel für die Füllbildmethode . . . . .	305
14.5	<i>Aufgabe:</i> Nachweis der Unabhängigkeit der Füllbildmethode von der Strukturviskosität . . . . .	307

<b>15</b>	<b>Schneckenströmungen</b> .....	<b>309</b>
15.1	Einleitung und Modelle .....	309
15.1.1	Aufschmelzmodell nach <i>Maddock</i> .....	310
15.1.2	Das Zwei-Platten-Modell der Schlepplströmung .....	310
15.2	<i>Aufgabe</i> : Berechnung des Geschwindigkeitsverlaufs einer Schneckenströmung .....	312
<b>16</b>	<b>Probleme beim Strömen von Kunststoffschmelzen und Lösungen</b> .....	<b>315</b>
16.1	Fließprobleme in Mehrschichtströmungen .....	315
16.1.1	Umlagerung der Schmelzen .....	315
16.1.2	Phänomenologie der Umlagerung .....	315
16.1.3	Modelle zur Entstehung der Umlagerung .....	316
16.2	Ausbildung der Schichtdicken beim Sandwichspritzgießen ...	326
16.3	Normalspannungseffekte, Druckverluste u. Strömungsinstabilitäten .....	335
16.3.1	<i>Aufgabe</i> : Gesamtdruckabfall in einer Extrusionsdüse	339
16.3.2	Effekte bei der Extrusion durch das Überschreiten der kritischen Grenzschubspannung .....	341
16.3.3	Effekte beim Spritzgießen durch das Überschreiten der kritischen Grenzschubspannung .....	342
16.3.4	Wandgleiten (Stick-Slip-Effekt) .....	344
<b>17</b>	<b>Materialparameter</b> .....	<b>347</b>
17.1	Potenzansatz .....	347
17.2	<i>Carreau</i> -Ansatz .....	351
17.3	<i>Cross-WLF</i> -Ansatz .....	356
<b>18</b>	<b>Lösungen</b> .....	<b>359</b>
	Abschnitt 7.2.2.2, <i>Aufgabe</i> : Gesucht ist die Viskosität für eine gegebene Schergeschwindigkeit anhand einer Masterkurve .....	359
	Abschnitt 7.2.2.3, <i>Aufgabe</i> : Übung zur Temperaturverschiebung mittels Nullviskosität .....	359
	Beispielrechnung, Abschnitt 7.2.3.2 Gleichungen von <i>Williams, Landel</i> und <i>Ferry</i> (WLF-Ansatz) .....	361
	Abschnitt 8.1.1, <i>Aufgabe</i> : grafische Ermittlung der Konstanten des Potenzansatzes .....	361
	Abschnitt 8.2, <i>Aufgabe zu</i> : Der <i>Carreau</i> -Ansatz .....	362

Abschnitt 8.5, <i>Aufgabe</i> : Ermittlung des Konsistenzfaktors und des Viskositätsexponenten .....	362
Abschnitt 8.6, <i>Aufgabe</i> : Vergleich der Materialgesetze (Potenzansatz und <i>Carreau</i> -Ansatz) .....	363
Abschnitt 9.4, <i>Aufgabe</i> : Auswirkung des Strömungskanals auf den Schmelzevolumenstrom .....	364
Abschnitt 11.2.1, <i>Aufgabe</i> : Beispielrechnungen .....	364
Abschnitt 11.2.1.2, <i>Aufgabe</i> : Druckverlust Scheibengeometrie .....	364
Abschnitt 11.2.2: Einfluss der Materialeigenschaften auf den Verarbeitungsprozess .....	365
Abschnitt 11.2.3, <i>Aufgabe</i> : Druckverluste beim Spritzgießen und die daraus resultierende reale Zuhaltekraft .....	366
Abschnitt 11.2.3.1, <i>Aufgabe</i> : Optimale Füllzeit .....	366
Abschnitt 11.2.4, <i>Aufgabe</i> : Berücksichtigung der Dissipations- und Abkühleffekte (nichtisotherme Strömung) .....	366
Abschnitt 12.3.1: Zweifachwerkzeug mit unterschiedlichem Schmelzeverteilersystem .....	367
Abschnitt 12.3.2: Achtfachwerkzeug mit unterschiedlichem Schmelzeverteilersystem .....	368
Abschnitt 12.3.3: Sechsfachwerkzeug mit unterschiedlichem Schmelzeverteilersystem .....	368
Abschnitt 12.3.4: Zweifach-Familienwerkzeug .....	368
Abschnitt 12.4.5, <i>Aufgabe</i> : Analytische Balancierung eines Fischeschwanzverteilers .....	369
Abschnitt 12.4.6, <i>Aufgabe</i> : Analytische Balancierung eines Kleiderbügelverteilers .....	369
Abschnitt 12.4.7, <i>Aufgabe</i> : Numerische Balancierung einer Breitschlitzdüse .....	370
Abschnitt 12.4.8, <i>Aufgabe</i> : Berechnung der Austragsleistung eines Extruders .....	370
Abschnitt 12.4.9, <i>Aufgabe</i> : Auslegung einer Schlitzdüse .....	371
Abschnitt 13.1, <i>Aufgabe</i> : Dehn- und Scherdruckverluste .....	371
Abschnitt 14.5, <i>Aufgabe</i> : Einfluss der Strukturviskosität auf die Füllbildmethode .....	371
Abschnitt 16.3.1, <i>Aufgabe</i> : Gesamtdruckabfall in einer Extrusionsdüse	372
<b>Index</b> .....	<b>373</b>