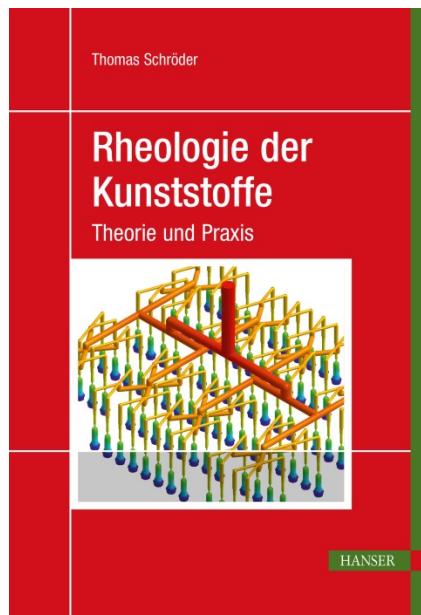


# HANSER



## Leseprobe

zu

### „Rheologie der Kunststoffe“

von Thomas Schröder

ISBN (Buch): 978-3-446-45405-7

ISBN (E-Book): 978-3-446-45722-5

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45405-7>  
sowie im Buchhandel

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Der Autor</b> .....	<b>VII</b>
<b>Wichtige Formeln der Rheologie</b> .....	<b>XV</b>
Die Gleichungen von <i>Hagen-Poiseuille</i> .....	XV
Gleichungen für die repräsentative Schergeschwindigkeit .....	XVI
Gleichungen für die Viskositätsberechnung .....	XIV
Gleichungen für den Temperaturverschiebungsfaktor $a_T$ .....	XIV
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Wozu benötigt man die Rheologie in der Kunststofftechnik? .....	3
1.2 Computerunterstützende 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 und <i>Bingham</i> -Verhalten .....	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 Rheologische Grundkörper</b> .....	<b>31</b>
3.1 Der ideal elastische Festkörper .....	32
3.2 Der ideal viskose Körper ( <i>Newtonsches Fluid</i> ) .....	33
3.3 Der viskoelastische Körper .....	34
3.3.1 Allgemeiner viskoelastischer Stoff .....	37

<b>4</b>	<b>Der Scherversuch und die Herleitung des <i>Newtonischen Reibungsgesetzes (Stoffgesetz)</i> .....</b>	<b>39</b>
4.1	Der Scherversuch .....	39
4.2	Wichtige rheologische Stoffgesetze .....	45
<b>5</b>	<b>Strömungsarten .....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>Rheometrie-Viskosimetrie und Stoffdatenermittlung .....</b>	<b>61</b>
6.1	Anwendungsbereich der Viskosimetertypen .....	62
6.2	Voraussetzung für die Ermittlung der Stoffdaten .....	63
6.3	Fallrheometer .....	65
6.3.1	Die Ermittlung der Viskosität bei Fallrheometern über das Gesetz von <i>Stokes</i> .....	65
6.3.2	Kugelfallviskosimeter .....	67
6.3.3	Kugel im geneigten Fallrohr .....	68
6.4	Viskowaage .....	69
6.5	Rotationsviskosimeter .....	69
6.5.1	Platte-Platte Rheometer .....	70
6.5.2	Kegel-Platte Rheometer .....	72
6.5.2.1	Normalspannungen und viskoelastisches Verhalten .....	73
6.5.2.2	Messung der Normalspannungen von Fluiden mittels Rotationsrheometrie .....	75
6.5.2.3	Messung der viskoelastischen Eigenschaften von Fluiden mittels Oszillationstheometrie (Schwingungsrheometrie) .....	79
6.5.2.4	Die <i>Cox-Merz</i> -Relation und ähnliche Beziehungen .....	86
6.5.2.5	Relaxationstest mittels Rotationsrheometer .....	89
6.6	Koaxiale Zylindersysteme .....	91
6.7	Kapillarrheometer .....	92
6.7.1	Niederdruck-Kapillarrheometer .....	93
6.7.2	Hochdruckkapillarrheometer .....	96
6.7.2.1	Ermittlung der Massestrom Druckfunktion .....	98
6.7.2.2	Berechnung des Massestroms .....	98
6.7.2.3	Berechnung der scheinbaren Wandschubspannung und der scheinbaren Wandschergeschwindigkeit .....	100
6.7.2.4	Ermittlung der wahren Wandschubspannung .....	102
6.7.2.4.1	Die <i>Bagley</i> -Korrektur .....	102
6.7.2.5	Ermittlung der wahren Wandschergeschwindigkeit .....	106
6.7.2.5.1	Die <i>Weissenberg-Rabinowitsch</i> -Korrektur .....	107
6.7.2.6	Bestimmung Einlauf- und Auslaufdruckverluste, der Normalspannungen und der druckabhängigen Viskosität mittels Inline-Druckrheometer .....	111
6.7.2.7	Ermittlung der druckabhängigen Viskosität mittels Inline-Rheometerdüse .....	115

6.8	Dehrheologie .....	119
6.8.1	Herkunft und Definition der Dehnviskosität .....	119
6.8.2	Messung von Dehnviskositäten .....	121
6.8.2.1	Messungen mit einachsiger Dehnung .....	121
6.8.2.2	Ermittlung der Dehnviskosität mit dem Rheotensversuch .....	122
6.8.2.3	Ermittlung der Dehnviskosität mit dem Ansatz von <i>F.N. Cogswell</i> .....	126
6.9	Theorie und Praxis der Lösungsviskosimetrie .....	130
6.9.1	Beispielmessung der Lösungsviskosität anhand von Polyethylenterephthalat (PET), (Intrinsic Viscosity, Grenzfließzahl) .....	138
6.9.1.1	Informationen von Schott Instruments zur Messung der Lösungsviskosität .....	144
6.9.1.2	Bestimmung des <i>K</i> -Werts in Lösung nach <i>Fikentscher</i> .....	145
<b>7</b>	<b>Viskosimetrie – Einflüsse auf die rheologischen Stoffdaten</b> ..	<b>147</b>
7.1	Einfluss der Dissipation .....	147
7.2	Einfluss der Temperatur auf die Fließkurve .....	150
7.2.1	Der Temperaturverschiebungsfaktor .....	152
7.2.2	Temperaturinvariante Auftragung der Fließkurven (Masterkurven) .....	153
7.2.2.1	Beispiel einer Viskositätsermittlung für eine gewählte Schergeschwindigkeit und eine weitere Temperatur .....	156
7.2.2.2	<i>Aufgabe:</i> Gesucht ist die Viskosität für eine gegebene Schergeschwindigkeit anhand einer Masterkurve .....	157
7.2.2.3	<i>Aufgabe:</i> Übung zur Temperaturverschiebung mittels Nullviskosität .....	159
7.2.3	Mathematische Beschreibung des Temperatur- verschiebungsfaktors .....	160
7.2.3.1	<i>Arrhenius</i> -Funktion .....	161
7.2.3.2	Gleichungen von <i>Williams, Landel</i> und <i>Ferry</i> ( <i>WLF</i> -Ansatz) .....	162
7.3	Thermorheologische Größen .....	167
7.3.1	Änderungen des morphologischen Aufbaus durch Wärme ..	167
7.3.2	Füllstoffe .....	168
7.3.3	Der Druckeinfluss .....	173
7.3.4	Einfluss der mittleren Molmasse .....	176
7.3.5	Molmassenverteilung .....	182
7.3.6	Einfluss der Molmasse und der Molmassenverteilung auf das Speicher- und Verlustmodul bei der Oszillation .....	185

7.4	Einfluss von Restfeuchte auf die Scherviskosität . . . . .	191
7.5	<i>Aufgabe:</i> Beschreiben des Fließverhaltens mit einer „Masterkurve“ . . . . .	192
<b>8</b>	<b>Viskosimetrie – Mathematische Beschreibung der Fließkurve . . . . .</b>	<b>195</b>
8.1	Der Potenzansatz von <i>Ostwald</i> und <i>de-Waele</i> ( <i>Power-Law-Model</i> ) . . . . .	196
8.2.1	<i>Aufgabe:</i> grafische Ermittlung der Konstanten des Potenzansatzes . . . . .	198
8.2	Der <i>Carreau</i> -Ansatz . . . . .	200
8.2.2	Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit im <i>Carreau</i> -Ansatz . . . . .	204
8.3	Der <i>Cross-WLF</i> -Ansatz . . . . .	204
8.4	Polynomansätze . . . . .	207
8.4.1	Polynomansatz nach <i>Münstedt</i> . . . . .	207
8.4.2	Biquadratischer Polynomansatz . . . . .	208
8.4.3	Polynomansätze für komplexes Fließverhalten . . . . .	208
8.5	<i>Aufgabe:</i> Ermittlung des Konsistenzfaktors und des Viskositätsexponenten . . . . .	209
8.6	<i>Aufgabe:</i> Vergleich der Materialgesetze (Potenzansatz und <i>Carreau</i> -Ansatz) . . . . .	209
<b>9</b>	<b>Berechnung von Fließvorgängen . . . . .</b>	<b>213</b>
9.1	Berechnung der Volumenstrom-Druck-Funktion für <i>newtonsche</i> Fluide . . . . .	214
9.1.1	Annahmen zur Vereinfachung der Gleichungen . . . . .	214
9.1.2	Strömungskanal mit Rechteckquerschnitt . . . . .	214
9.1.3	Strömungskanal mit Kreisquerschnitt . . . . .	220
9.1.4	Kanal mit Kreisringquerschnitt . . . . .	224
9.2	Berechnung der Volumenstrom-Druck-Funktion für strukturviskose Fluide . . . . .	225
9.2.1	Berücksichtigung der Strukturviskosität mittels Potenzansatz . . . . .	225
9.2.2	Berücksichtigung der Strukturviskosität mit dem <i>Carreau</i> -Ansatz . . . . .	227
9.3	Geschwindigkeit und Schergeschwindigkeit als Funktion des Radius und der Strukturviskosität . . . . .	228
9.4	<i>Aufgabe:</i> Auswirkung des Strömungskanals auf den Schmelzevolumenstrom . . . . .	231
<b>10</b>	<b>Die Methode der repräsentativen Schergeschwindigkeit . . . . .</b>	<b>233</b>
<b>11</b>	<b>Berechnung von Fließvorgängen beim Spritzgießen . . . . .</b>	<b>237</b>
11.1	Modellvorstellung . . . . .	237
11.2	Allgemeine Vorgehensweise zur Druckverlustberechnung . . . . .	243

11.2.1 <i>Aufgabe:</i> Beispielrechnungen . . . . .	244
11.2.1.1 Druckverlust Plattengeometrie . . . . .	244
11.2.2 <i>Aufgabe:</i> Beispielrechnung . . . . .	245
11.2.2.1 Druckverlust Scheibengeometrie . . . . .	245
11.2.3 Einfluss der Materialeigenschaften auf den Verarbeitungsprozess . . . . .	246
11.2.4 <i>Aufgabe:</i> Druckverluste beim Spritzgießen und die daraus resultierende reale Zuhaltkraft . . . . .	248
11.2.5 <i>Aufgabe:</i> Berücksichtigung der Dissipations- und Abkühleffekte (nichtisotherme Strömung) . . . . .	249
11.2.6 Berechnung der optimalen Einspritzzeit (Einspritzgeschwindigkeit) beim Spritzgießen mittels <i>Brinkmann-Zahl</i>	252
11.2.6.1 <i>Aufgabe:</i> Optimale Füllzeit . . . . .	254
<b>12 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 zusammengesetzten Kanal . . . . .	261
12.2 Rheologische Auslegung von Heißkanalsystemen beim Spritzgießen . . . . .	262
12.3 <i>Aufgaben:</i> Mathematisch rheologische Balancierung von Heißkanalsystemen . . . . .	267
12.3.1 Zweifachwerkzeug mit unterschiedlichem Schmelzverteilersystem . . . . .	267
12.3.2 Achtfachwerkzeug mit unterschiedlichem Schmelzverteilersystem . . . . .	268
12.3.3 Sechsfachwerkzeug mit unterschiedlichem Schmelzverteilersystem . . . . .	270
12.3.4 Zweifach-Familienwerkzeug . . . . .	271
12.4 Rheologische Auslegung von Extrusionswerkzeugen . . . . .	272
12.4.1 Mathematische Voraussetzungen zur Balancierung . . . . .	276
12.4.2 Analytische Balancierung Fischschwanzverteiler . . . . .	278
12.4.3 Analytische Balancierung Kleiderbügelverteiler . . . . .	280
12.4.4 Numerische Balancierung . . . . .	284
12.4.5 <i>Aufgabe:</i> Analytische Balancierung eines Fischschwanzverteilers . . . . .	286
12.4.6 <i>Aufgabe:</i> Analytische Balancierung eines Kleiderbügelverteilers . . . . .	287
12.4.7 <i>Aufgabe:</i> Numerische Balancierung einer Breitschlitzdüse mit Kleiderbügelverteiler mit Segmenten . . . . .	288
12.4.8 <i>Aufgabe:</i> Berechnung der Austragsleistung eines Extruders . . . . .	290
12.4.9 <i>Aufgabe:</i> Auslegung einer Schlitzdüse . . . . .	291

<b>13 Scher- und Dehndruckverluste an Querschnittsübergängen</b> .....	<b>293</b>
13.1 <i>Aufgabe:</i> zu den Dehn- und Scherdruckverlusten .....	297
<b>14 Die rheologische Werkzeugauslegung beim Spritzgießen mit der Füllbildmethode</b> .....	<b>299</b>
14.1 Grundlagen für ein grafisches Verfahren .....	299
14.2 Modellvorstellung des Formfüllvorgangs .....	299
14.3 Rheologische Grundlagen .....	300
14.4 Beispiel für die Füllbildmethode .....	303
14.5 <i>Aufgabe:</i> Nachweis der Unabhängigkeit der Füllbildmethode von der Strukturviskosität .....	305
<b>15 Schneckenströmungen</b> .....	<b>307</b>
15.1 Einleitung und Modelle .....	307
15.1.1 Aufschmelzmodell nach <i>Maddock</i> .....	308
15.1.2 Das Zwei-Platten-Modell der Schleppströmung .....	308
15.2 <i>Aufgabe:</i> Berechnung des Geschwindigkeitsverlaufs einer Schneckenströmung .....	310
<b>16 Probleme beim Fließen und Lösungen</b> .....	<b>313</b>
16.1 Fließprobleme in Mehrschichtströmungen .....	313
16.1.1 Umlagerung der Schmelzen .....	313
16.1.2 Phänomenologie der Umlagerung .....	313
16.1.3 Modelle zur Entstehung der Umlagerung .....	314
16.2 Ausbildung der Schichtdicken beim Sandwichspritzgießen in Abhängigkeit vom Verhältnis der Viskositäten .....	321
16.3 Zusammenhang zwischen Normalspannungseffekten, Druckverlusten und Strömungsinstabilitäten .....	330
16.3.1 <i>Aufgabe:</i> Gesamtdruckabfall .....	335
16.3.2 Effekte bei der Extrusion durch das Überschreiten der kritischen Grenzschubspannung .....	337
16.3.3 Effekte beim Spritzgießen durch das Überschreiten der kritischen Grenzschubspannung .....	338
16.3.4 Wandgleiten (Stick-Slip-Effekt) .....	340
<b>17 Materialparameter</b> .....	<b>343</b>
17.1 Potenzansatz .....	343
17.2 Carreau-Ansatz .....	350
17.3 Cross-WLF-Ansatz .....	356
<b>Index</b> .....	<b>359</b>

# Vorwort

Bereits als Student hat mich die Rheologie begeistert. Mit großem Vergnügen habe ich damals die hochinteressanten Vorlesungen von Prof. Schümmer an der RWTH Aachen verfolgt. Im Rahmen meines Studiums habe ich am Institut für Kunststofftechnik IKV, als wissenschaftliche Hilfskraft, das spezielle rheologische Verhalten von Thermoplasten und Duromeren an Querschnittsübergängen als Berechnungsroutine in das Simulationsprogramm Cadmould® implementiert. Auch im Berufsleben begegnete ich der Rheologie immer wieder. So befasste ich mich zum Beispiel sehr intensiv mit der rheologischen Auslegung von 96-fach Heißkanalsystemen für die Herstellung von Vorformlingen.

Aus diesem Grund habe ich auch bei meinem Ruf an die Hochschule Darmstadt viel Wert darauf gelegt das Fach Rheologie der Kunststoffe zu lehren. Seit 2001 habe ich nun das Vergnügen die Rheologie in Darmstadt aber auch an vielen anderen Hochschulen und Universitäten zu lehren. Dabei ist es für mich sehr wichtig die Rheologie der Kunststoffe und das spezielle Fließverhalten der Kunststoffe möglichst anschaulich zu vermitteln. Neben den theoretischen Inhalten, die im Rahmen der Vorlesungen im Bachelor- und auch im Masterstudiengang Kunststofftechnik abgehandelt werden, lege ich ebenfalls viel Wert auf die praxisnahe Ausbildung. Das von mir geleitete Labor der Rheologie ist aus diesem Grund mit allen Rheometern ausgestattet, die für die Beschreibung des visko-elastischen Fließverhaltens von Kunststoffen notwendig sind. Neben der Scherrheologie wird dort auch die Dehnrrheologie durch Versuche vermittelt.

Dementsprechend ist auch das vorliegende Buch „Rheologie der Kunststoffe – Theorie und Praxis“ strukturiert. Neben den allgemeinen Grundlagen gibt es zu jedem Kapitel Aufgaben und Praxisübungen, die sehr anwendungsnahe definiert sind. Der Leser hat somit die Möglichkeit die Grundlagen zu studieren und gleichzeitig auch die gewonnenen Kenntnisse anzuwenden. Da es sich um eine Erstausgabe handelt, sind sicherlich noch Optimierungspotenziale gegeben. Gerne nehme ich Rückmeldung, die zu einer stetigen Verbesserung des Buches führen und somit den Studierenden und anderen Lesern zu Gute kommen an.

Ich bedanke mich bei den Absolventen und Studierenden des Fachbereichs Maschinenbau und Kunststofftechnik, die bereits zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Inhalte beigetragen haben. Des Weiteren bedanke ich mich beim Hanser Verlag für die Möglichkeit dieses Buch in Hardcover und mit E-Book Inside preislich so anzubieten, dass Studierende davon Gebrauch machen können.

Ich wünsche den Studierenden und anderen Lesern viel Freude beim Erkunden der Rheologie der Kunststoffe. Evtl. werden einige Leser gleichermaßen begeistert von der Thematik sein, wie ich es früher war und auch heute noch bin.

Darmstadt im Juni 2018

*Prof. Dr. Thomas Schröder*



Farbige Abbildungen siehe E-Book inside.

# 1

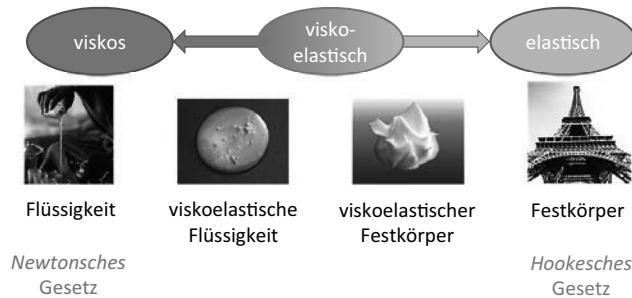
## Einleitung

Die Rheologie ist ein sehr altes Fachgebiet und wurde bereits um 1930 u. a. von *E. C. Bingham* und *M. Reiner* in Easton (USA) als eigenständige Disziplin gegründet. Wesentliche Einzelbeiträge veröffentlichten schon sehr viel früher z. B. 1676 *R. Hooke*, 1687 *J. Newton*, 1745 *L. Euler*, 1820 *C. L. M. H. Navier*, 1845 *G. Stokes*, 1847 *J. L. M. Poiseuille*, 1867 *B. Maxwell* und 1908 *L. Prandtl* [1]. Ansätze aus diesen Beiträgen werden in diesem Buch auch hergeleitet, wie z. B. das *newtonsche Reibungsgesetz* oder das Gesetz von *Hagen-Poiseuille*. [1]



**Bild 1.1** Sir Isaac Newton (links) (\*4. Januar 1643, †31. März 1727), Robert Hooke (rechts) (\*28. Juli 1635, †4. März 1703) [Quelle: Wikipedia]

Das Wort Rheologie leitet sich aus dem griechischen Wort *rheos* = fließen ab. Die Rheologie ist somit die Wissenschaft von der Deformation und dem Fließen der Stoffe. Unter Fließen kann man hierbei die andauernde Deformation eines Materials unter Einwirkung äußerer Kräfte verstehen. Die Aufgabe der Rheologie besteht darin zu beschreiben, zu messen und zu erklären, wie ein Feststoff oder auch eine Flüssigkeit auf eine bestimmte Deformation reagiert. [1]



**Bild 1.2** Die Rheologie beschreibt das Deformations- und Fließverhalten der Stoffe [2]



### Was versteht man unter Rheologie?

Unter Rheologie versteht man die Wissenschaft von der Deformation und dem Fließen der Stoffe.

Zentrale Aufgabe der Rheologie ist somit das Messen, Beschreiben und Erklären des Stoffverhaltens eines Materials unter Einwirkung von äußeren Kräften und Verformungen.

Jeder begegnet früher oder später speziellen rheologischen Phänomenen. Ob es morgens die Zahnpasta und die Marmelade ist oder am Abend der Ketchup. All diese Stoffe haben ihr spezielles Fließverhalten, auf das im Folgenden noch näher eingegangen werden soll.



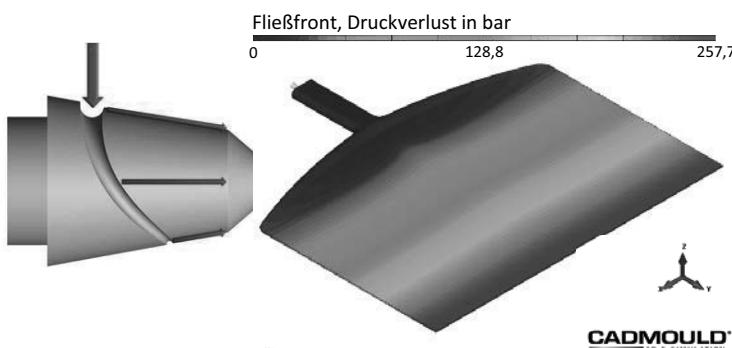
**Bild 1.3** Alltagsbeispiele aus der Rheologie

## ■ 1.1 Wozu benötigt man die Rheologie in der Kunststofftechnik?

Die Rheologie der Kunststoffe ermöglicht u. a. eine Beschreibung der Strömungsvorgänge von Kunststoffschmelzen. Die Ansätze und Randbedingungen, wie die Gleichung von *Hagen-Poiseuille* oder die *Navier-Stokes*-Haftbedingung werden in den folgenden Kapiteln erklärt, hergeleitet und anschließend zur Berechnung von Strömungsvorgängen genutzt.

Mit Hilfe der heutigen computerunterstützten Simulationsprogramme, wie Cadmould®, Moldflow®, Moldex®, Sigmasoft® oder Fluent® lassen sich diese Strömungsvorgänge mit den entsprechenden Randbedingungen (Materialparameter, Verarbeitungsbedingungen etc.) berechnen und grafisch darstellen. Diese Programme basieren auf den Grundlagen der Rheologie. Dazu zählen die rheologischen Stoffdaten aus der Rheometrie und die meist empirisch ermittelten mathematischen Ansätze, wie Stoffgesetze und Temperaturgleichungen der Rheologie.

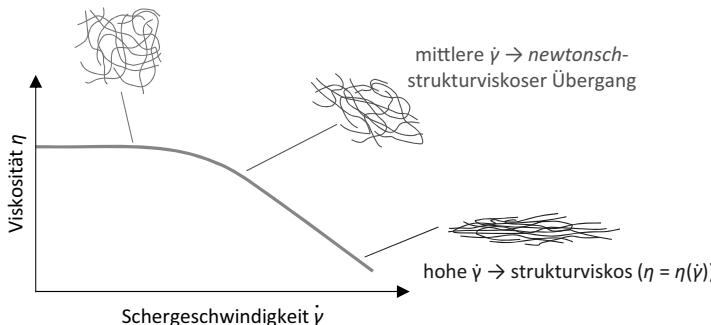
Denkt man an die Extrusion, so dient die Rheologie zur Beschreibung der komplexen Strömungsvorgänge im Extruder und damit zur Auslegung von Schneckengeometrien. Des Weiteren können die Strömungs- und Mischvorgänge in Scher- und Mischteilen beschrieben werden. Die Balancierung der Schmelze in den Verteilersystemen, wie z. B. in Breitschlitzdüsen oder Pinolenverteilersystemen durch Kleiderbügel- oder Fischschwanzverteiler ist ebenfalls ein wichtiges Teilgebiet der Rheologie. Ziel der Balancierung ist es, den Schmelzestrom so zu verteilen, dass dieser am Austritt an allen Stellen die gleiche Geschwindigkeit hat. Dies wird erreicht, indem man die Verteilersysteme so balanciert, dass der Druckverlust auf allen Fließwegen gleich groß ist. Auf diese Balancierungsmethoden wird später noch detailliert eingegangen.



**Bild 1.4** Rheologische Balancierung eines Pinolen- und eines Breitschlitzwerkzeugs mittels Kleiderbügel

richtung. Je stärker die Molekülketten gestreckt, das heißt ausgerichtet werden, desto weniger Energie ist notwendig, um sie aneinander vorbei gleiten zu lassen. Aus diesem Grund nimmt die Viskosität mit ansteigender Schergeschwindigkeit ab. Der Verlauf der Schubspannung ist infolgedessen nicht linear sondern degressiv. Dieses Verhalten einer Flüssigkeit wird als Strukturviskosität bezeichnet. Steigt die Schergeschwindigkeit noch weiter an so nimmt ab einem bestimmten Punkt die Viskosität nicht mehr ab, sondern läuft gegen ein horizontales Plateau. Dieser Plateauwert wird als Unendlich-Viskosität  $\eta_\infty$  bezeichnet.

niedrige  $\dot{\gamma} \rightarrow$  newtonsch ( $\eta = \text{konstant}$ )



**Bild 2.3** Strukturviskoses Verhalten von Kunststoffschmelzen



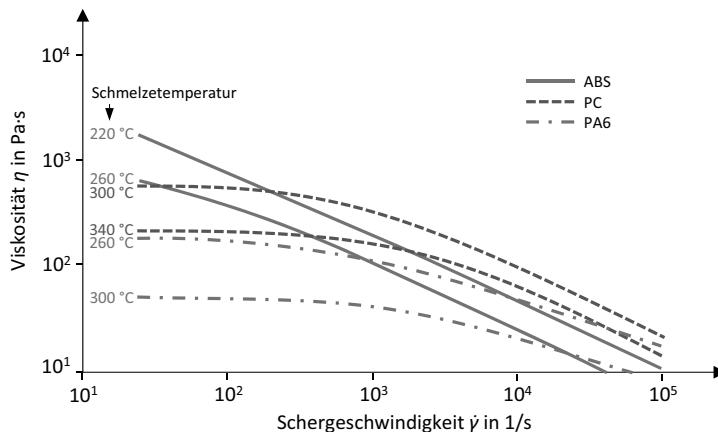
**Merke:**

Kunststoffschmelzen verhalten sich strukturviskos. Es gilt:

$$\eta = f(\dot{\gamma}) \text{ und } \tau = f(\dot{\gamma}) \quad (\text{Der Verlauf von } \tau \text{ ist nicht linear, sondern degressiv})$$

Das strukturviskose Fließverhalten ist eine Funktion des Polymertyps. In Abhängigkeit vom Aufbau des Kunststoffs ändert sich die Viskosität des Kunststoffs als Funktion der Schergeschwindigkeit unterschiedlich. Dies wird im nachfolgenden Bild dargestellt. So gibt es Kunststoffe, wie ein Polycarbonat (PC), welche über einen großen Schergeschwindigkeitsbereich nahezu newtonsches Fließverhalten ausweisen. Später werden wir sehen, dass z. B. für ein PC die Größe  $m$  (Fließexponent), welche das strukturviskose Fließverhalten beschreibt, nahezu bei  $m = 1$  liegt. Für  $m = 1$  liegt newtonsches Fließverhalten vor.

Im Gegensatz dazu zeigt das ABS im nachfolgenden Bild 2.4 [3] ein ausgeprägt strukturviskoses Fließverhalten.



**Bild 2.4** Strukturviskoses Fließverhalten für unterschiedliche Kunststofftypen

Wenn die molekulare Orientierung sehr groß wird, nimmt die zum Strömen notwendige Energie wieder zu. Das bedeutet, dass die Viskosität bei sehr großen Schergeschwindigkeiten wieder ansteigt. Diese Schergeschwindigkeiten sind jedoch so groß, dass sie in der Praxis keine Bedeutung haben.

Das Polymermolekül wird somit durch den Strömungsvorgang aus seiner energetisch günstigsten Lage herausgebracht. Es ist jedoch bestrebt in diesen ungeordneten Zustand zurück zu gelangen, da dies der Zustand größtmöglicher Entropie ist. Aus diesem Grund bilden sich Rückstellkräfte, die den Schubkräften entgegenwirken und mit diesen im Gleichgewicht stehen. Diese Rückstellkräfte sind umso größer,

- je stärker die Molekülorientierung/Ausrichtung ist und
- je höher die Temperatur ist. Eine hohe Temperatur bedeutet eine hohe Aktivierungsenergie und damit hohe Rückstellkräfte.

Bei strukturviskosen Flüssigkeiten kann ein weiteres Phänomen beobachtet werden. Unter Scherbelastung versucht die Flüssigkeit senkrecht zur Beanspruchungs-, das heißt Scherrichtung, auszuweichen (siehe *Weissenberg-Effekt*). Dadurch entstehen zusätzliche Spannungen, die sogenannten Normalspannungen.

## ■ 2.2 Dilatanz

Die Dilatanz wurde 1885 von *Osborne Reynolds* entdeckt. Während bei Medien mit strukturviskosem Verhalten die Viskosität mit zunehmender Beanspruchung (Scherung) abnimmt, steigt die Viskosität bei dilatanten Medien mit ansteigender

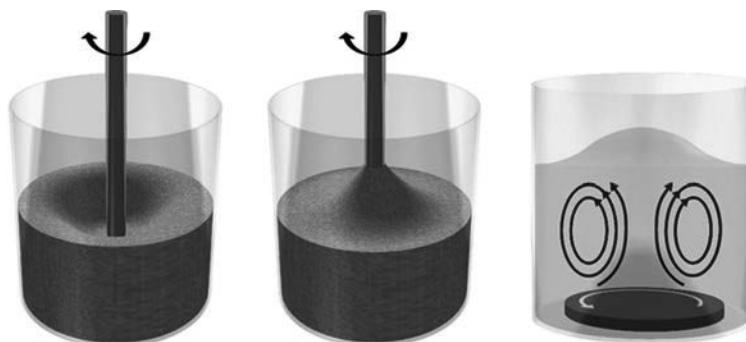
differenzen und der Normalspannungskoeffizienten wird in Kapitel 6 detailliert eingegangen.

## 2.5.2 Viskoelastische und Normalspannungseffekte

Das Auftreten von Normalspannungen kann zu Effekten führen, die aus dem Verhalten Newtonscher Fluide nicht bekannt sind oder diesem widersprechen. Einige dieser Effekte sollen folgend vorgestellt werden. Dabei werden zumeist nur einfache Erklärung gegeben und weniger auf die analytische Formulierung Wert gelegt.

### 2.5.2.1 Weissenberg-Effekt

*Karl Weissenberg* (1893 bis 1976) befasste sich ausführlich mit den viskoelastischen Effekten. Wird eine viskoelastische Flüssigkeit unter bestimmten Bedingungen (hohe Drehzahl und nicht zu hohe Temperaturen) geschert, so weisen sie beim Rühren den *Weissenberg-Effekt* (englisch: rod climbing effect) auf. Wird ein rotierender Stab in ein großes Gefäß gefüllt mit einer *Newtonischen* Flüssigkeit gebracht, so bildet sich bei geeignet hohen Drehzahlen eine Trombe heraus. Diese Absenkung des Flüssigkeitsspiegels in Richtung Rotationsachse wird durch die wirkenden Radialkräfte verursacht. Wird statt einer *newtonischen* Flüssigkeit ein viskoelastisches Fluid eingesetzt, so kommt es zur Ausbildung von Normalspannungen, insbesondere einer Zugspannung in Strömungsrichtung. Stellt man sich diese Zugspannung als einen gespannten Gummi-Ring vor, so wird eine resultierende Kraftwirkung in Richtung Rotationsachse deutlich. Ist diese Kraftwirkung größer als die ihr entgegengesetzt wirkende Radialbeschleunigung, so kommt es zur Anhäufung von Material und damit zur Anhebung des Flüssigkeitsspiegels in Richtung der Rotationsachse (rotierender Stab). Dieser Klettereffekt wird als *Weissenberg-Effekt* bezeichnet. [1] [5]



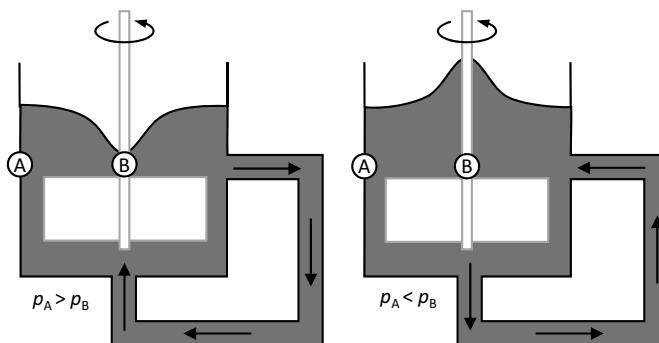
**Bild 2.12** Rührversuch

links: *Newton-Flüssigkeit*

Mitte und rechts: *Viskoelastisches Fluid* [1]

Auch hier entscheidet die Dominanz von Radialbeschleunigung oder Normalspannung über die Qualität der Strömung. Dominiert die Normalspannung, so wird in Nähe des rotierenden Teils eine Strömung in Richtung Mitte ausgelöst. Bei einer am Boden befindlichen, rotierenden Scheibe resultiert hieraus eine in der Mitte emporsteigende Strömung, die infolge des Impulsaustausches bei der Umlenkung zur oberen Querströmung zu einem Anstieg der Flüssigkeitsoberfläche in der Mitte des Behälters führt (Quelleffekt). Im Gegensatz dazu ist in einer *Newtonischen* Flüssigkeit die klassische Trombenbildung mit nach außen ansteigendem Flüssigkeitsspiegel zu beobachten.

Des Weiteren verändern sich die Druck- und Strömungsverhältnisse in einer solchen Apparatur. Der rotierende Stab in der Mitte des Behälters führt bei einer *newtonischen* Flüssigkeit zu einem Druckgefälle vom Rand zur Mitte hin. Bei einer viskoelastischen Flüssigkeit kehren sich diese Verhältnisse um. Infolgedessen sind auch die Strömungsrichtungen in einem Bypass unterschiedlich, wie das nachfolgende Bild 2.13 verdeutlicht.



**Bild 2.13** Druck und Strömungsverhältnisse einer *newtonischen* (links) und einer viskoelastischen Flüssigkeit in einem Rührgefäß [6]

Dieses Verhalten könnte man prinzipiell in der Extrusion nutzen, um Polymer-Schmelzen zu fördern. Das Beispiel in Bild 2.14 zeigt einen sogenannten Elastic-Melt-Extruder der von *Maxwell* und *Scalora* entwickelt wurde. Eine schnell rotierende Scheibe (Rotor) führt dazu, dass sich die gescherte viskoelastische Flüssigkeit in den Scherspalt hineinzieht und somit ein Druckmaximum in der Mitte des Scherspalts entsteht. Das führt dazu, dass diese Flüssigkeit durch die zentral angebrachte Düse (die) gepumpt wird. Da die Normalspannungen der viskoelastischen Flüssigkeit für diesen Effekt verantwortlich sind, wird dieser Extruder auch als Normalspannungsextruder bezeichnet. Der Wirkungsgrad wird infolgedessen im Wesentlichen durch das viskoelastische Verhalten der Flüssigkeit bestimmt. Das Förderverhalten wurde von *Fritz* durch das Einbringen von spiralförmigen Nuten in der Scheibe weiter verbessert. Trotzdem erlangte der Elastic-Melt-Extruder keine Bedeutung in der Extrusion.

Die Längenänderung beträgt nun:

$$\Delta l = l_z - l_w = \frac{1}{2} \cdot a (\Delta t)^2 \quad (6.75)$$

Wobei  $\Delta t$  mit der nachfolgenden Beziehung ermittelt werden kann:

$$\Delta t = \frac{V_z - V_A}{a} \quad (6.76)$$

Für die Berechnung der Dehnviskosität gilt:

$$\eta_{ES} = \frac{\sigma_E}{\dot{\varepsilon}} \quad (6.77)$$

Die Dehnspannung und die Dehngeschwindigkeit lassen sich auch direkt mit den nachfolgenden Gleichungen bestimmen. Es gilt:

$$\sigma_E = \frac{V_L \cdot F}{V_0 \cdot \pi \cdot R_0^2} \quad (6.78)$$

Weiterhin gilt:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_L}{L} \cdot \ln \left( \frac{BR_0}{R_L} \right)^2 = \frac{V_L}{L} \cdot \left[ \ln \left( \frac{V_L}{V_0} \right) + 2 \cdot \ln B \right] \quad (6.79)$$

Wobei gilt:

$\sigma_E$ : Dehnspannung

$\dot{\varepsilon}$ : Dehngeschwindigkeit

$L$ : Abstand Düse zu Walzenpaar

$V_0$ : Abzugsgeschwindigkeit = Extrusionsgeschwindigkeit

$V_L$ : Abzugsgeschwindigkeit

$R_0$ : Düsenradius

$R_L$ : Radius nach Düsenaustritt

$B$ : Strangauflaufweitung

### 6.8.2.3 Ermittlung der Dehnviskosität mit dem Ansatz von F. N. Cogswell

Nach F.N. Cogswell [13] [14] [15] lässt sich aus dem Einlaufdruckverlust  $p_E$  eine scheinbare Dehnviskosität bestimmen.

Die Dehnviskosität lässt sich aus dem Quotienten der Zugspannung und der Dehngeschwindigkeit berechnen. Es gilt:

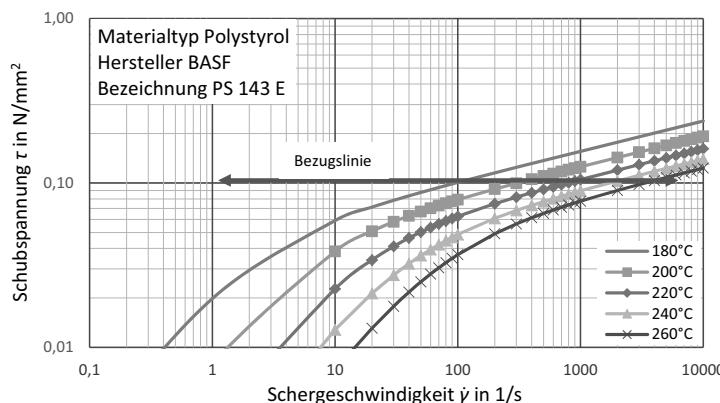
**Tabelle 7.1** Stoffwerte  $K$  für die Bestimmung der Temperaturerhöhung infolge dissipierter Energie (Fortsetzung)

Kunststoff	$K$ in Grad/bar
PP	0,045
PP mit 40 % Talkum	0,033
PS	0,055
PSU	0,047
PSU mit 30 % GF	0,041
PESU	0,043
SAN	0,055
SAN mit 35 % GF	0,044

## ■ 7.2 Einfluss der Temperatur auf die Fließkurve

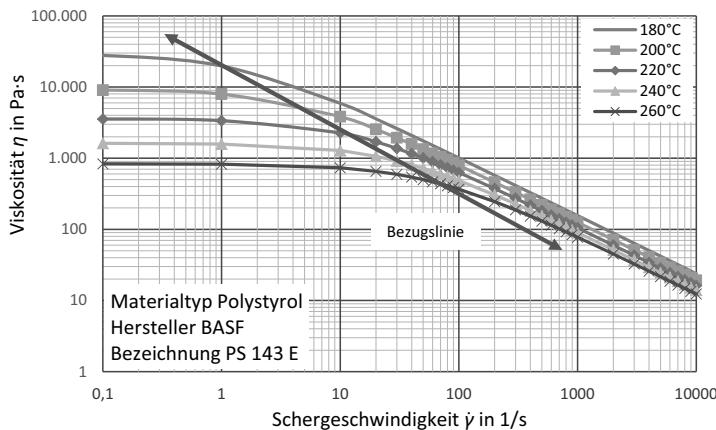
Mit ansteigender Temperatur nimmt die Zähigkeit, das heißt die Viskosität des Kunststoffs ab. Die Auswirkungen auf die Fließkurven sind im folgenden Bild 7.3 dargestellt. Möchte man diese Fließkurven für unterschiedliche Temperaturen mittels Rheometrie ermitteln, so ist ein hoher Zeitaufwand notwendig. Dieser Messaufwand kann mit Hilfe der temperaturinvarianten Auftragung der Fließkurve deutlich reduziert werden.

Im Folgenden soll beschrieben werden, was man unter einer temperaturinvarianten Auftragung der Fließkurve versteht. Dazu werden in den folgenden beiden Grafiken die Fließkurven  $\tau = f(\gamma)$  und  $\eta = f(\gamma)$  für Polystyrol dargestellt.



**Bild 7.3** Verlauf der Schubspannung in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit für unterschiedliche Temperaturen

Zunächst betrachten wir die Fließkurven in der  $\tau = f(\gamma)$  Darstellung. Verschiebt man diese Fließkurven entlang einer horizontalen Linie, so stellt man fest, dass die Kurven der unterschiedlichen Temperaturen alle absolut deckungsgleich sind. Das bedeutet, dass sich die Form (der Verlauf) der Kurven nicht ändert und der Kurvenverlauf somit keine Funktion der Temperatur ist.



**Bild 7.4** Viskositätsverlauf als Funktion der Schergeschwindigkeit für unterschiedliche Temperaturen

Betrachtet man den Verlauf der Viskosität als Funktion der Schergeschwindigkeit für unterschiedliche Temperaturen, so kann man feststellen, dass sich auch der Verlauf dieser Kurven nicht ändert. Die Kurven sind für unterschiedliche Temperaturen ebenfalls deckungsgleich. Aus diesem Grund können auch diese Kurven entlang einer Geraden verschoben werden. Die Verschiebungsgerade verläuft in diesem Fall nicht horizontal, sondern als Diagonale in der logarithmischen Darstellung.

Damit lässt sich die folgende Aussage treffen:

 Fließkurven können für verschiedene Temperaturen durch eine einzige Fließkurve repräsentiert werden. Diese Fließkurve wird als Masterkurve bezeichnet!

Die Temperatur, für die die Masterkurve gilt, wird dabei frei gewählt. Sie sollte möglichst in der Mitte des Bereichs der Verarbeitungstemperatur, der für den untersuchten Kunststoff in Frage kommt, liegen. Bei dem hier betrachteten Polystyrol wird für die Masterkurve für eine Temperatur von 220 °C gewählt.

Somit kann man die Schubspannung als Funktion der Schergeschwindigkeit in einer einzigen Kurve auftragen. Ausgehend von dieser Masterkurve, die für eine

bestimmte Referenztemperatur gilt, können die Kurvenverläufe für die anderen Temperaturen durch ein horizontales Verschieben dieser Kurve ermittelt werden. Für höhere Temperaturen verschiebt sich die Kurve nach rechts. Bei niedrigeren Temperaturen wird die Kurve nach links verschoben.

Auch der Viskositätsverlauf als Funktion der Schergeschwindigkeit kann als Masterkurve dargestellt werden. Ausgehend von dieser Masterkurve werden die Kurven für die anderen Temperaturen durch eine Verschiebung der Ausgangskurve entlang der Diagonalen verschoben. Bei höheren Temperaturen verschiebt sich die Kurve entlang der Geraden nach unten und nach rechts. Bei niedrigeren Temperaturen muss die Kurve nach oben und nach links verschoben werden.

### 7.2.1 Der Temperaturverschiebungsfaktor

Bis jetzt wurde gezeigt, dass man die Fließkurven entlang einer Gerade verschieben kann. Was nun noch fehlt, ist der Betrag mit dem die Kurven für die unterschiedlichen Temperaturen entlang dieser Geraden in eine Masterkurve verschoben werden können.

Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität kann mit Hilfe des *Bolzmannschen* Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips beschrieben werden. Hierzu wird ein Temperaturverschiebungsfaktor  $a_T$  definiert.



Den Faktor zur Verschiebung der Fließkurven in eine Masterkurve nennt man Temperaturverschiebungsfaktur  $a_T$ .

Der Temperaturverschiebungsfaktor  $a_T$  wird zunächst rechnerisch aus den Grafiken ermittelt. Bei der Fließkurve  $\tau = f(\gamma)$  wird dabei wie folgt vorgegangen.

1. Zunächst wird eine Bezugstemperatur  $\vartheta_{Bezug}$  festgelegt. In unserem Beispiel ist dies  $220\text{ }^\circ\text{C}$ .
2. Anschließend wird eine beliebige Schubspannung  $\tau_{Bezug}$  für diese Kurve gewählt. Für unser Beispiel ist das  $10^{-1}\text{ N/mm}^2$ . Die Kurvenpunkte für diese Schubspannung sind in der Bild 7.3 markiert.
3. Bezogen auf diese Schubspannung werden die Schergeschwindigkeiten der Einzelkurven ermittelt.
4. Für jede Einzelkurve wird der Temperaturverschiebungsfaktor  $a_T$  errechnet. Da die Kurven entlang einer horizontalen Geraden verschoben werden können, lautet der Zusammenhang zwischen der Schergeschwindigkeit für die Bezugstemperatur und der Schergeschwindigkeit für die gesuchte Temperatur:  $a_T = \frac{\gamma_{Bezug}}{\dot{\gamma}_\vartheta}$ .

In dieser Gleichung ist  $\dot{\gamma}_{Bezug}$  die Schergeschwindigkeit der Masterkurve für den gewählten Bezugspunkt  $\tau_{Bezug}$ . Die Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}_\vartheta$  ist der Wert der Kurve, welche in die Masterkurve verschoben werden soll. Auch diese wird wieder für die gewählte Bezugsschubspannung  $\tau_{Bezug}$  abgelesen. Mit der Fließkurve für das Polystyrol 143 E kann dann der Temperaturverschiebungsfaktor für die jeweiligen Temperaturen ermittelt werden.

**Tabelle 7.2** Ermitteln des Temperaturverschiebungsfaktors  $a_T$ , für das Polystyrol 143 K aus der Grafik 7.3 (abgelesene Werte)

$$\text{Bezugswerte: } \vartheta_{Bezug} = 220^\circ\text{C}, \tau_{Bezug} = 10^{-1} \frac{N}{mm^2}$$

in $^\circ\text{C}$	180	200	220	240	260
in $\text{s}^{-1}$	100	400	800	2000	4000
$a_T$	8	2	1	0,4	0,2

Für die Masterkurven selbst muss  $a_T = 1$  gelten.

Der Zusammenhang  $a_T = \frac{\dot{\gamma}_{Bezug}}{\dot{\gamma}_\vartheta}$  sagt aus, dass:

- sich die Kurve für höhere Temperaturen nach rechts verschiebt ( $a_T < 1$ )
- sich die Kurve für niedrigere Temperaturen als die Bezugstemperatur nach links verschiebt ( $a_T > 1$ ).

## 7.2.2 Temperaturinvariante Auftragung der Fließkurven (Masterkurven)

Aufgrund der Deckungsgleichheit der Fließkurven reicht es aus nur eine Fließkurve zu messen und abzubilden. Diese Fließkurve bezeichnet man auch als Masterkurve.

Die Masterkurve für die Schubspannung wird in einer Darstellung  $\tau = f(\dot{\gamma} \cdot a_T)$  aufgetragen. Das Produkt  $\dot{\gamma} \cdot a_T$  bezeichnet man als normierte Schergeschwindigkeit.

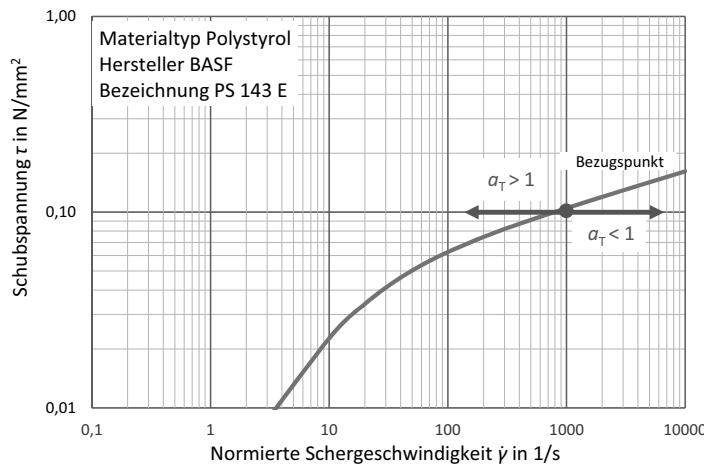
Bei der Ermittlung der Masterkurve für die  $\eta = f(\gamma)$  Darstellung geht man dementsprechend vor. Die Auftragung der Fließkurve erfolgt in der Form  $\frac{\eta}{a_T} = f(\dot{\gamma} \cdot a_T)$ . Den Quotienten  $\frac{\eta}{a_T}$  bezeichnet man als „normierte Viskosität“.

Bei der Darstellung der Verschiebung der Masterkurve  $\frac{\eta}{a_T} = f(\dot{\gamma} \cdot a_T)$  ist zu beachten, dass sich durch die Verschiebung der Masterkurve entlang einer Geraden sowohl die Viskosität, als auch die Schergeschwindigkeit für den ermittelten Punkt ändert.

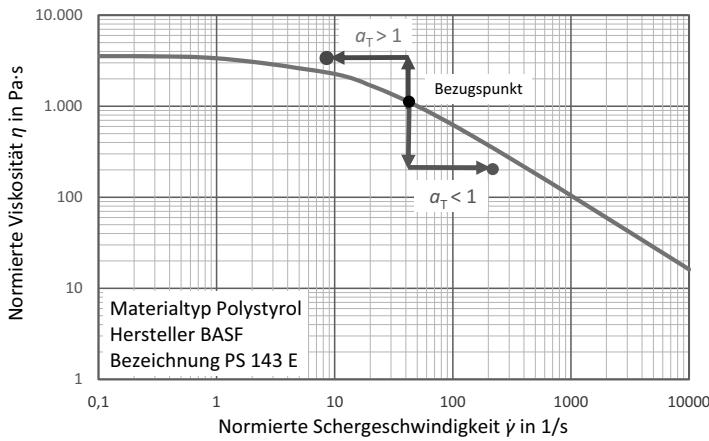
Ist die Masterkurve gegeben, so lassen sich die Fließkurven für andere Temperaturen mit dem Temperaturverschiebungsfaktor  $a_T$  leicht ermitteln. Denn es gilt:

$$\eta_{gesucht} = a_T \cdot \eta_{Bezug} \quad \text{und} \quad \dot{\gamma}_{gesucht} = \frac{1}{a_T} \cdot \dot{\gamma}_{Bezug} \quad (7.7)$$

Der Temperaturverschiebungsfaktor  $a_T$  kann mit einfachen mathematischen Ansätzen (siehe Abschnitt 7.2.3) berechnet werden.

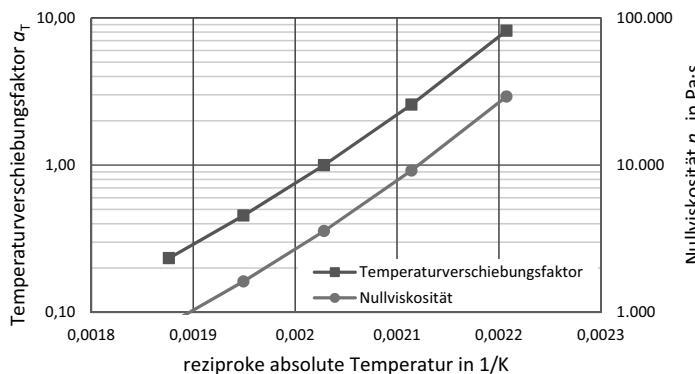


**Bild 7.5** Masterkurve  $\tau = f(\dot{\gamma} \cdot a_T)$ -Auftragung, Bezugstemperatur  $\vartheta_{Bezug} = 220^\circ\text{C}$



**Bild 7.6** Masterkurve  $\eta = f\left(\frac{\eta}{a_T}\right)$ -Auftragung, Bezugstemperatur  $\vartheta_{Bezug} = 220^\circ\text{C}$

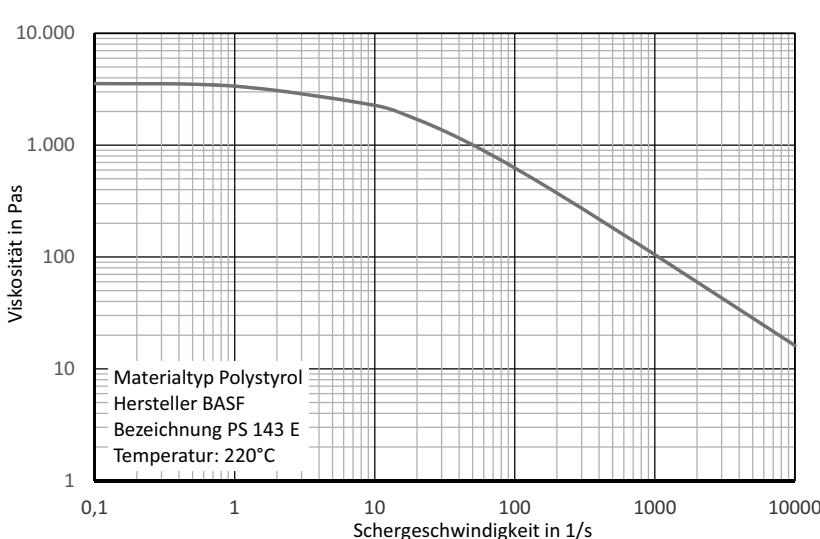
Das folgende Bild 7.7 zeigt den Temperaturverschiebungsfaktor als Funktion der Temperatur beziehungsweise der reziproken Temperatur. Die Auftragung erfolgt auch in Abhängigkeit von der reziproken Temperatur, da diese in der mathematischen Beschreibung des Temperaturverschiebungsfaktors mittels einer *Arrhenius*-Funktion enthalten ist.



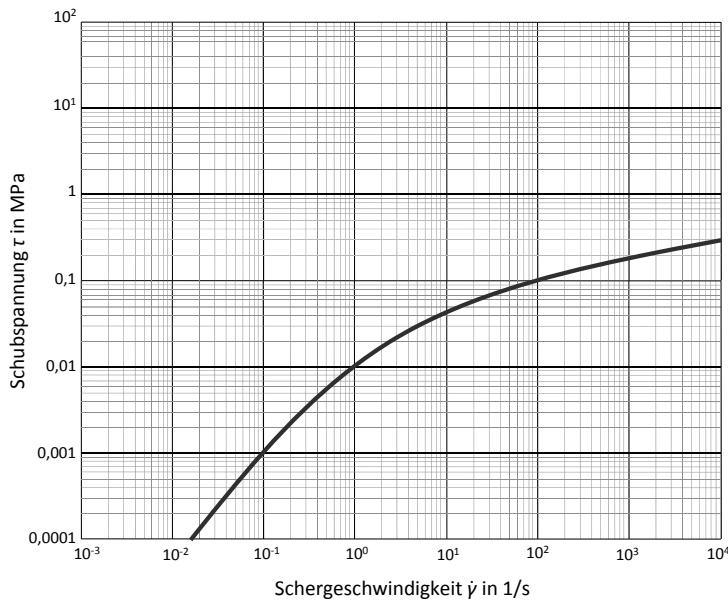
**Bild 7.7** Temperaturverschiebungsfaktor  $a_T$  und Nullviskosität  $\eta_0$  als Funktion der Temperatur für ein Polystyrol 143 K

In der obigen Grafik ist auch die Nullviskosität  $\eta_0$  als Funktion der Temperatur aufgetragen. Vergleicht man die beiden Kurven, so erkennt man, dass der Verlauf identisch ist. Aus diesem Grund kann die Temperaturabhängigkeit der Fließkurve  $\eta = f(\dot{\gamma})$  kann auch normiert auf die Nullviskosität, d.h. in der normierten Form

$$\frac{\eta}{\eta_0} = f(\dot{\gamma} \cdot \eta_0)$$
 aufgetragen werden. Diese Vorgehensweise soll mit dem nachfolgenden Bild 7.8 erklärt werden.



**Bild 7.8** Viskosität als Funktion der Schergeschwindigkeit für  $T = 220^\circ\text{C}$



**Bild 8.3** Ermittlung der Konstanten für den Potenzansatz aus der Fließkurve

## ■ 8.2 Der Carreau-Ansatz

Der *Carreau-Ansatz* beschreibt den Verlauf der Viskositätsfunktion mit einem so genannten Drei-Parameter-Modell der Form:

$$\eta = \frac{A}{(1 + B \cdot \dot{\gamma})^C} \quad (8.7)$$

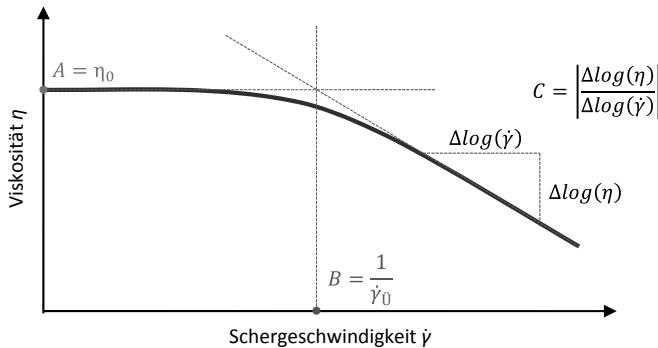
Unter Verwendung des *newtonschen* Reibungsgesetzes  $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$  folgt für den *Carreau-Ansatz*:

$$\tau = \frac{A \cdot \dot{\gamma}}{(1 + B \cdot \dot{\gamma})^C} \quad (8.8)$$

In diesem Ansatz beschreibt:

- A die Nullviskosität
- B die so genannte reziproke Übergangsschergeschwindigkeit und
- C die Steigung der Viskositätskurve im strukturviskosen Bereich. C nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, d.h.  $0 < C < 1$ . Je weiter C sich an den Wert eins

nähert, desto strukturviskoser verhält sich der Stoff. Für  $C = 0$  liegt *newtonisches* Fließverhalten vor.



**Bild 8.4** Beschreibung der Viskositätskurve mit dem *Carreau*-Modell

In der Literatur findet man auch die drei Parameter  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$ . Wobei  $P_1$  die Nullviskosität beschreibt,  $P_2$  der reziproken Übergangsschergeschwindigkeit entspricht und  $P_3$  die Steigung der Fließkurve im strukturviskosen Bereich angibt.

Das *Carreau*-Modell hat den Vorteil, dass es das tatsächliche Stoffverhalten innerhalb eines breiten Schergeschwindigkeitsbereichs richtig wiedergibt. Der Ansatz liefert auch für kleine Schergeschwindigkeiten  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  sinnvolle Viskositätswerte. Es gilt:

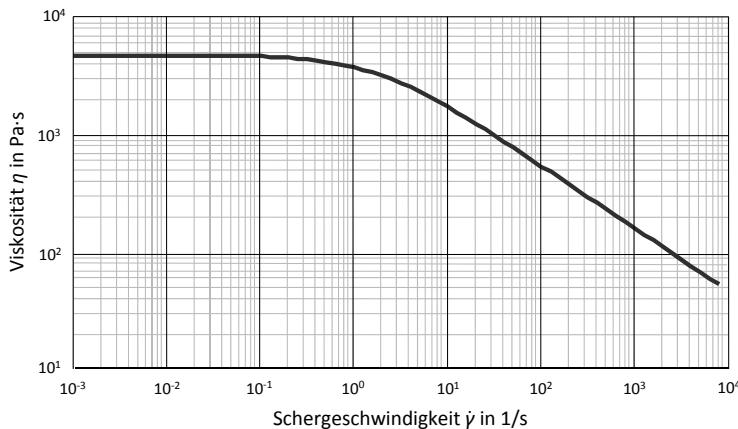
$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \frac{A}{(1 + B \cdot \dot{\gamma})^C} = A = \eta_0 \quad (8.9)$$

Für *newtonisches* Fließverhalten verläuft die Fließkurve in der  $\eta = f(\dot{\gamma})$ -Darstellung horizontal. Daraus folgt, dass die Steigung  $C$  den Wert Null annimmt. Infolgedessen reduziert sich der *Carreau*-Ansatz wie folgt:

$$\eta = \frac{A}{(1 + B \cdot \dot{\gamma})^0} = A = \eta_0 \quad (8.10)$$

Damit beschreibt dieser Ansatz die Fließkurve in einem breiteren Bereich als der Potenzansatz.

Im Folgenden sollen die drei Konstanten  $A$ ,  $B$  und  $C$  anhand der Bild 8.5 ermittelt werden.



**Bild 8.5** Ermittlung der Konstanten für den *Carreau*-Ansatz

Bei der Ermittlung der Konstanten für den *Carreau*-Ansatz geht man wie folgt vor:

1. Der Parameter  $A$  entspricht der Nullviskosität, d. h. der Viskosität für sehr kleine Schergeschwindigkeiten. Der Wert kann an der Ordinate (horizontaler Verlauf der Fließkurve) abgelesen werden.
2. Der Parameter  $B$  entspricht der reziproken Übergangsgeschwindigkeit  $1/\gamma_{\text{v}}$ . Zur Ermittlung wird eine Tangente an die Fließkurve im strukturviskosen Fließbereich und eine Tangente im Bereich der Nullviskosität eingefügt. Am Schnittpunkt der Tangenten kann auf der  $x$ -Achse die Schergeschwindigkeit abgelesen werden.
3. Die Konstante  $C$  wird aus der Steigung der Fließkurve im strukturviskosen Bereich ermittelt. Es gilt:

$$C = \left| \frac{\Delta \log(\eta)}{\Delta \log(\dot{\gamma})} \right| = \left| \frac{\log(\eta_2) - \log(\eta_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} \right| \quad (8.11)$$

Bei gleicher logarithmischer Einteilung (Maßstab) der Achsen kann  $C$  auch aus dem Steigungsdreieck mit Hilfe eines Lineals abgelesen werden.

**Tabelle 8.1** *Carreau*-Parameter ermittelt aus der Grafik

Parameter	A	B	C
Wert	4800	0,56	0,53
Einheit	Pa·s	s	-

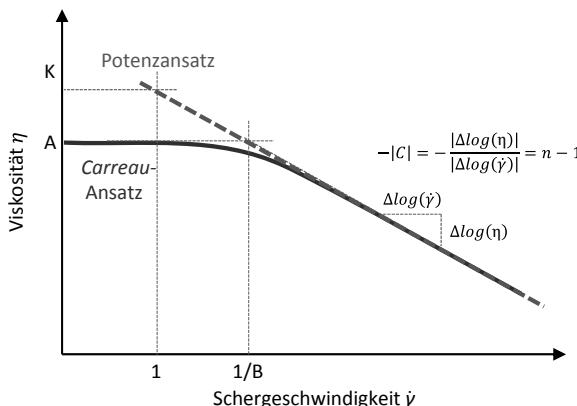
Das nachfolgende Bild 8.6 zeigt beispielhaft die Überlagerung der Fließkurve, wie sie mit dem Potenzansatz und mit dem *Carreau*-Ansatz beschrieben wird. Es wird deutlich, dass der Potenzansatz eine Geradengleichung darstellt. Im strukturviskosen Bereich deckt sich der Verlauf der Geraden mit dem Kurvenverlauf des *Carreau*-Ansatzes. Nur in diesem Bereich wird die Viskosität der Kunststoffschmelze durch den Potenzansatz richtig beschrieben.

Für diesen Bereich entspricht die Steigung  $C$  des *Carreau*-Ansatzes der Steigung  $n-1$  des Potenzansatzes. Es gilt somit:

$$-|C| = n - 1 \quad (8.12)$$

Sobald sich die beiden Verläufe nicht mehr decken, gilt der Potenzansatz nicht mehr. Hier wird in diesem Fall der Gültigkeits- oder auch Approximationsbereich verlassen. Bei der Stoffdatenermittlung wird dieser Bereich immer angegeben. Sobald der Kunststoff nicht mehr im angegebenen Gültigkeitsbereich verarbeitet wird, darf der Ansatz mit den vorgegebenen Stoffparametern nicht mehr angewendet werden.

Es wird auch deutlich, wie der Konsistenzfaktor  $K$  in seiner Größe ermittelt werden kann. Dazu verlängert man die Gerade der Potenzfunktion bis zu einer Scherbeschwindigkeit von  $1 \text{ s}^{-1}$  und liest auf der y-Achse den Wert für diesen Punkt ab. Hier ist wieder auf die Einheiten zu achten, da die Viskosität die Einheit  $\text{Pa} \cdot \text{s}$  hat während die Einheit des Konsistenzfaktors  $K$  in  $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$  lautet.



**Bild 8.6** Viskositätsverlauf mathematisch beschrieben mit dem Potenz- und dem *Carreau*-Ansatz

### 8.2.2 Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit im Carreau-Ansatz

Die Parameter A und B sind im *Carreau*-Ansatz temperaturabhängig, da sich die Fließkurve für eine ansteigende Temperatur nach unten rechts und für eine abnehmende Temperatur nach oben links verschiebt. Die Steigung bleibt konstant. Somit werden die Größen A und B immer für eine bestimmte Bezugstemperatur angegeben. Die Steigung C ist keine Funktion der Temperatur. Die Temperaturabhängigkeit der Größen A und B kann durch den Temperaturverschiebungsfaktor berücksichtigt werden. Laut Abschnitt 7.2.2 gelten für die Viskosität und für die Schergeschwindigkeit folgende Zusammenhänge:

$$\eta_{\text{gesucht}} = a_T \cdot \eta_{\text{bezug}} \quad \text{und} \quad \dot{\gamma}_{\text{gesucht}} = \frac{1}{a_T} \cdot \dot{\gamma}_{\text{bezug}} \quad (8.13)$$

Setzt man diese Gleichungen in den Ansatz von *Carreau*:

$$\eta_{\text{bezug}} = \frac{A}{\left(1 + B \cdot \dot{\gamma}_{\text{bezug}}\right)^C} \quad (8.14)$$

ein, so lautet die Gleichung wie folgt:

$$\eta_{\text{gesucht}} = \frac{A \cdot a_T}{\left(1 + B \cdot \dot{\gamma}_{\text{gesucht}} \cdot a_T\right)^C} \quad (8.15)$$

Mit dieser Gleichung kann die Viskosität als Funktion der Schergeschwindigkeit und der Temperatur beschrieben werden.

Die gleiche Vorgehensweise, d.h. das Implementieren der Temperaturabhängigkeit kann auch mit dem Potenzansatz erfolgen. In dem Potenzansatz sind die Größen  $K$  und  $\Phi$  temperaturabhängig. Die Formeln dazu können Sie dem Anfang des Buches „Wichtige Formeln“ entnehmen.

## ■ 8.3 Der Cross-WLF-Ansatz

Ein weiterer mathematischer Ansatz zur Beschreibung der Fließkurve, welcher oft in computerunterstützten Simulationsprogrammen (Cadmould®, Moldflow®, Moldex® etc.) verwendet wird, ist der *Cross-WLF*-Ansatz. Dieser ähnelt dem *Carreau*-

Ansatz bezieht sich aber auf die Glastemperatur des Kunststoffs. Dabei ist  $n$  der Viskositätenexponent. Die Schubspannung  $\tau^*$  und die Nullviskosität  $D_1$  beziehen sich auf die Glastemperatur des zu beschreibenden Stoffes.  $T^*$  ist die druckabhängige Glastemperatur des Kunststoffs und die Größen  $A_1$  und  $A_2$  bzw.  $A_3$  sind Stoffkonstante, welche die Temperaturabhängigkeit des Stoffes beschreiben.

Des Weiteren beinhaltet der *Cross-WLF* den Parameter  $D_3$ , welcher die Druckabhängigkeit der Viskosität (siehe Abschnitt 3.3.3) beschreibt.

Die Grundgleichung des *Cross-WLF-Ansatzes* lautet:

$$\frac{\eta_{\dot{\gamma}} - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{[1 + K \cdot \dot{\gamma}]^{1-n}} \quad (8.16)$$

Mit  $\eta_{\infty} = 0$  und  $K = \frac{\eta_{\infty}}{\tau^*}$  folgt:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (8.17)$$

Die nachfolgende Gleichung für die Berechnung der Nullviskosität beschreibt die Temperaturabhängigkeit der Nullviskosität.

$$\eta_0(T) = D_1 \cdot e^{\left[ \frac{-A_1(T-T^*)}{A_2+(T-T^*)} \right]} \quad (8.18)$$

Der folgende Ansatz berücksichtigt neben der Temperaturabhängigkeit auch die Druckabhängigkeit der Viskosität über die Größe  $D_3$ , welche die Einheit Kelvin/Pa hat.

Es gilt  $A_2 = A_3 + D_3 \cdot p$  und  $T^* = D_2 + D_3 \cdot p$

$$\eta_0(T, p) = D_1 \cdot e^{\left[ \frac{-A_1(T-D_2-D_3p)}{A_3+D_3 \cdot p + T - D_2 - D_3 \cdot p} \right]} \quad (8.19)$$

Ist der Druckkoeffizient  $D_3$  nicht gegeben ( $D_3 = 0$  K/Pa) folgt  $T^* = D_2$  und  $A_2 = A_3$ . Beispielhaft wird mit den folgenden Parametern eine Berechnung der Viskosität als Funktion der Schergeschwindigkeit für vier verschiedene Temperaturen vorgenommen.

Gegeben sind die Materialdaten für ein Polystyrol der Firma BASF für eine Temperatur von 230 °C.

**Tabelle 8.3** Materialkonstanten der Carreau-Funktion

Material	$P_1$ in Pas	$P_2$ in s	$P_3$
PS 168 N	$0,357 \cdot 10^4$	0,07441	0,8162

**Tabelle 8.4** Materialkonstanten für den Potenzansatz

Material	Fließexponent	Fluidität in $\text{Pa}^{-m} \cdot \text{s}^{-1}$
PS 168 N	4,22	$7,64 \cdot 10^{-19}$

Berechnen Sie die Viskosität für die folgenden Schergeschwindigkeiten und eine Temperatur von 230 °C:

**Tabelle 8.5** Gegebene Schergeschwindigkeiten

$\dot{\gamma}$ in $\text{s}^{-1}$	$\eta$ in $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\dot{\gamma}$ in $\text{s}^{-1}$	$\eta$ in $\text{Pa} \cdot \text{s}$
0,000001		1	
0,00001		10	
0,0001		100	
0,001		1000	
0,01		10000	
0,1		100000	

### Lösung zu Aufgabe 8.6

Das nachfolgende Bild 8.8 zeigt, dass es sich bei dem Potenzansatz um eine Gerae dengleichung handelt, welche die Fließkurve nur bereichsweise beschreibt. Für kleine Schergeschwindigkeiten läuft die Viskosität gegen sehr große Werte. Im Gegensatz dazu beschreibt der Carreau-Ansatz die Fließkurve für alle Schergeschwindigkeiten recht genau. Das gilt auch für sehr kleine Schergeschwindigkeiten. Der Gültigkeitsbereich (Approximationsbereich) des Potenzansatzes liegt zwischen 40  $\text{s}^{-1}$  bis 10 000  $\text{s}^{-1}$ . Bei genauerer Betrachtung der Fließkurve im strukturviskosen Bereich fällt auf, dass sich die beiden Verläufe nicht absolut decken. Die Begründung hierfür liegt in den Materialkoeffizienten, die die Steigung der Fließkurve beschreiben, im Potenzansatz ist dies hier die Größe  $m$  und im Carreau-Ansatz der Parameter  $P_3$ . Es gilt  $n = 1/m$  und  $n - 1 = -|c|$ . Hier stimmen diese Parameter nicht überein.

# Index

## A

- Abkühleffekte 249, 301
- Abkühlgleichung 250
- amorphe Kunststoffe 161
- Amplitudensweep 82, 185, 187
- analytische Auslegung 284
- Arrhenius-Ansatz 241
- Arrhenius-Beziehung 174
- Arrhenius-Funktion 154, 161
- Aufschmelzmodell 308
- Aufschmelzprozess 308
- Auftriebskraft 77
- Auslaufdruckverlust 113

## B

- Bagley-Korrektur 102
- Balancierung 3, 273
- Barriereeigenschaften 322f.
- Barriereschicht 323
- Betriebspunktabhängigkeit 282
- betriebspunktabhängige Auslegung 274, 287
- Bindenähste 299
- Bingham-Fluid 20
- Bingham-Substanz 170
- biquadratische Polynomansatz 208
- Breitschlitzdüsen 3
- Breitschlitzwerkzeuge 273
- Bügelzone 89
- Burger-Modell 37

## C

- Campus-Schwindungsplatte 50
- Carreau-Ansatz 203, 227, 241
- Carreau-WLF-Gleichung 294
- Coextrusion 313
- Coextrusionsblasformen 316
- Cogswell 112, 127
- COUETTE-System 91
- Cox-Merz-Beziehung 86
- Cross-Over-Point (COP) 85, 188f.
- Cross-WLF-Ansatz 176, 204

## D

- Dämpfer 33
- Degradation 140
- Dehndeformation 56
- Dehndruckverluste 294
- Dehngeschwindigkeit 120
- Dehnreologie 57, 119
- Dehnreometer 123
- Dehnströmungen 47, 293
- Dehnviskositäten 119, 121ff., 128, 329
- Delamination 338
- Die-Swelling 89
- Dilatanz 16
- Dissipation 147, 301
- Dissipationseffekte 249
- Drosselfeld 275
- Druck 173, 220, 227
- Druckkoeffizienten 176
- Druckminimum 253
- Druckschwankung 318

Druckströmung 43, 308  
 Druckverlauf 258  
 Druckverluste 219, 257, 278, 281, 283,  
 293, 301  
 Druckverschiebungsfaktor 173, 175  
 Duromeren 340

**E**

Einlaufdruckverluste 100, 112, 127, 295,  
 333  
 Einlauf- oder Dehndruckverluste 5  
 Einspritzgeschwindigkeit 252  
 Einstein-Gold-Beziehung 173  
 Elastizität 11  
 Extrusionsblasformen 261

**F**

Fallrheometer 65  
 Familienwerkzeuge 7, 262  
 Festigkeitseigenschaften 177  
 Fikentscher 146  
 Filmanschnitt 50  
 Fischschwanzverteiler 274, 278 f.  
 Fließaktivierungsenergie 161  
 Fließexponent 197  
 Fließfront 49, 300  
 Fließfrontprofil 327  
 Fließfrontverlauf 300  
 Fließgrenze 172  
 Fließkurven 150, 196, 317  
 Fließphänomen 317  
 Fließweg 258  
 Fließweg-/Wanddickendiagramme 339  
 Fließwiderstand 257, 277  
 Fluidität 197  
 F.N. Cogswell 296  
 Folgar-Tucker 55  
 Frequenzsweep 83, 185  
 Füllbildermittlung 300  
 Füllbildmethode 302  
 Fülldruck 251  
 Fülldruckgrenze 339  
 Füllstoffe 169 f.

Füllung 263  
 Füllvorgang 300  
 Füllzeit 253

**G**

Gasinjektionstechnik 329  
 Gesamtvolumenstrom 258  
 Geschwindigkeit 223, 228  
 Geschwindigkeitsprofile 222, 308, 326  
 Geschwindigkeitsverläufe 41, 218, 310  
 Gesetz von Stokes 65  
 Glasfasern 49  
 Glastemperatur 162, 206  
 Grenzfließspannung 20  
 Grenzschichtinstabilität 318  
 Grenzschubspannungen 339  
 Grundgeometrien 238

**H**

Hagen-Poiseuille 242, 253, 278, 294,  
 338  
 Hagen-Poiseuillesches-Gesetz 219, 223,  
 238  
 Hautkomponente 325  
 Heißkanalsystem 262, 265, 293  
 Hilfskreismethode 109  
 Hochdruckkapillarrheometer (HKV) 88,  
 96  
 Hochdruckkapillarviskosimeter 184  
 Hooke'scher-Festkörper 32  
 Hooke'sches Gesetz 84  
 Huygensch'sches Prinzip 299  
 Hydrolyse 140  
 hygroskopisch 139  
 hygroskopische Eigenschaften 191

**I**

ideal elastischer Stoff 32  
 ideal viskoser Körper 33  
 Impulsbilanz 214  
 inhärente Viskosität 131  
 inkompressible Strömung 216

Inline-Druckrheometer 111  
 Inline-Rheometerdüse 116  
 Insellänge 275, 285  
 Inselsegment 285  
 Instabilitäten 317  
 IV-Wert 131

## K

Kaltkanalsystem 265  
 Kapillarviskosimeter 92  
 Kavitäten 262  
 Kegel-Platte-Rheometer 72  
 Kernkomponente 325  
 Kesselformel 51  
 Kettenabbau 168  
 Kettenlängen 176, 179  
 Kleiderbügelverteiler 274, 280  
 Konsistenzfaktor 198  
 Kontinuitätsgleichung 300  
 Korrekturfaktor 219, 226, 242  
 Kreisquerschnitt 220  
 Kreisringquerschnitt 224  
 Kristallite 167  
 Kristallschmelztemperatur 162  
 Kugelfallrheometer 65  
 Kugelfallviskosimeter 67  
 Kugelrollviskosimeter 68  
 Kuhn-Mark-Houwink-Sakurada-Gleichung 137  
 Kuhnsches Wurzelgesetz 136  
 K-Wert 146

## L

Leckströmung 308  
 Lodge-Meissner-Beziehung 119  
 Lösungskonzentrationen 142  
 Lösungsviskosimetrie 130  
 Lösungsviskosität 131  
 Lufteinchlüsse 299  
 LVE-Bereich 83

## M

Maschinendüse 293, 296  
 Masterkurve 152  
 Materialkarte 206  
 Materialparameter 54  
 mathematisch rheologische Balancierung 264  
 Maxwell-Modell 35  
 mechanische Belastung 262  
 Mehrfachanspritzung 6  
 Mehrschichtströmung 314  
 Melt-Volume-Rate (MVR) 93  
 Mittelschicht 49  
 Molekulargewicht 189  
 Molmasse 85, 137, 176, 178 f., 187, 190  
 Molmassenverschiebungsfaktor 179  
 Molmassenverteilung 85, 176, 182, 189 f.  
 Münstedt 207

## N

natürlich rheologische Balancierung 263  
 newtonsche Flüssigkeit 33, 44  
 newtonsches Reibungsgesetz 43 f., 197  
 Nomalspannungskoeffizient 75  
 Normalspannungen 23, 73, 78  
 Normalspannungsdifferenz 74, 79, 114, 331, 334  
 Normalspannungsdifferenz, erste 118  
 Normalspannungseffekte 56  
 Normalspannungskoeffizient 330  
 normierte Masterkurve 156  
 Nulldüse 106  
 Nullviskosität 71, 155, 169, 179 f., 182 f., 200, 294  
 Numerische Balancierung 284 f., 288

## O

Orientierungen 48, 53  
 Ostwald 132  
 Ostwald und de-Waele 128  
 Oszillationsrheometer 185  
 Oszillationstheometrie 79

**P**

PET 138  
Pfropfenströmung 229  
Phasenverschiebung 80  
Pinolenverteiler 3  
Pinolenwerkzeuge 273  
Plastifizierleistung 307  
Plastifizierstrom 307  
Plastizität 11  
Platte-Platte Rheometer 70  
Polynomansatz 207  
Potenzansatz von Ostwald und de Waele 197, 203, 225, 233, 240, 301  
Preforms 322  
pvT-Diagramm 99

**Q**

Quellströmung 48  
Quellströmungsverhalten 327  
Querschnitt 293

**R**

Randbedingungen 277  
Randschichten 49, 53, 264  
Reibungskraft 65  
Relaxation 36  
Relaxationszeit 89  
relaxieren 56  
repräsentative Schergeschwindigkeit 235, 239, 281  
repräsentative Stelle 234  
Restfeuchte 191  
Restwanddicke 329  
Reynoldszahl 63  
rheologische Auslegung 273  
rheologische Balancierung 263, 273  
rheologische Effekte 253, 324  
rheologische Eigenschaften 328  
rheologische Grundkörper 31  
Rheometer 61  
Rheopexie 19  
Rheotens 122

Rohrströmung 294  
Rotationsrheometer 75  
Rotationsrheometrie 180, 191  
Rotationsviskosimeter 69

**S**

Sandwichspritzgießen 321  
Scheinbare Schubspannung 100  
Scheinbare Wandschergeschwindigkeit 100  
Scherdruckverluste 334  
Schergeschwindigkeiten 148, 172 f., 233, 294, 330  
Scherströmungen 47, 293  
Scherung 262  
Scherversuch 39  
Schichtdickenausbildung 327  
Schichtdickenverteilung 323  
Schleppströmung 41, 308  
Schlitzdüse 291  
Schlitzströmung 219  
Schmelzebelastung 280  
Schmelzebruch 333, 337  
Schmelzefilm 308  
Schmelzefließfront 303  
Schmelzeverteilersysteme 273  
Schmelzeverteilung 276  
Schmelzevolumen 265  
Schneckenströmung 307  
Schneckenvorraum 297  
Schubspannung 40, 151, 216, 221, 331, 338  
Schubspannungen 314  
Schubspannungsgrenze 319  
Schubspannungsprofile 230  
Schwerkraft 65  
SEARL-System 91  
Segment 284  
Simulationsprogramme 7, 55  
Speichermodul 84, 185  
spezifisches Volumen 99  
Squires 219, 242  
Stabilitätskriterium 333, 337  
Standardtemperatur 162

Staudinger 137  
 Steigung 200  
 Stoffgesetze 46, 196, 217, 222, 227  
 Stoffverhalten 201  
 Strangauflösung 27, 116, 118, 184  
 Strangschwellen 26  
 Strömungsarten 47  
 Strömungsinstabilitäten 316  
 Strömungsprofil 328  
 Strömungswiderstand 259  
 Strömungszustand 326  
 Strukturanalyse 4  
 strukturviskose Flüssigkeiten 44, 226  
 Strukturviskosität 13, 182, 218, 229, 310

## T

teilkristalline Kunststoffe 161  
 Temperaturabhängigkeit 205  
 Temperaturkonstante 149  
 Temperaturverschiebungsfaktor 152, 160f., 164, 204, 254  
 thermische Belastung 168, 262  
 Thixotropie 18  
 Trouton 58

## U

Ubbelohde 132  
 Ubbelohde-Kapillarviskosimeter 191  
 Übergangsbereich 196  
 Übergangsschergeschwindigkeit 182f., 200  
 Umlagerung 313  
 Umlenkung 330  
 unverdichteter Bereich 341

## V

Verlustfaktor 84  
 Verlustmodul 84, 185, 320  
 Verschlaufungen 319  
 Verteilerkanalquerschnitt 275  
 Verteilerrohr 284  
 Verteilerrohrlänge 279

Verteilersysteme 273f.  
 Verweilzeit 168, 275, 280  
 Vielfachwerkzeuge 7, 262f.  
 viskoelastisch 12, 23, 26, 81  
 viskoelastische Eigenschaften 318, 320  
 viskoelastische Körper 34  
 Viskosimeter 61  
 Viskosität 11f., 151, 174, 178, 191, 233  
 Viskositätsexponent 198  
 Viskositätsfunktion 197  
 Viskositätsverhältnisse 325f.  
 Viskowaage 69  
 Voigt-Kelvin-Modell 35  
 Volumenstrom 220, 227, 259, 284  
 Volumenstromverteilung 275

## W

wahre Schergeschwindigkeit 108  
 wahre Wandschubspannung 104  
 Wandgleiteffekt 340  
 Wandkontakt 315  
 Wandschergeschwindigkeit 219, 224, 226, 229  
 Wandscherrate 97  
 Wandschubspannung 97, 338  
 Weissenberg-Effekt 24  
 Weissenberg-Rabinowitsch-Korrektur 107  
 Weißenbergzahl 333, 337  
 Wellenfront 300  
 Werkzeugdimensionierung 4  
 Werkzeuginnendruckverlauf 9  
 William-Landel-Ferry-Ansatz 241  
 Williams-Landel und Ferry 162  
 WLF 165  
 WLF-Ansatz 162

## Y

y-Verteiler 264

## Z

- Zuhaltkraft 248
- Zwei-Platten-Modell 308
- Zweischichtströmung 313