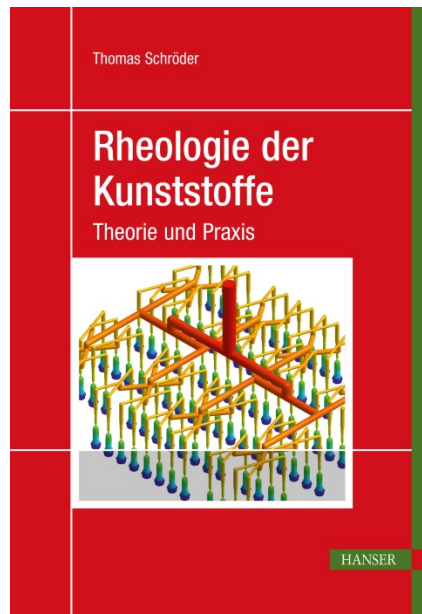


HANSER



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

© Carl Hanser Verlag, München

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Der Autor	VII
Wichtige Formeln der Rheologie	XV
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
1 Einleitung	1
1.1 Wozu benötigt man die Rheologie in der Kunststofftechnik?	3
1.2 Computerunterstützende Simulationsprogramme zur Auslegung von Spritzgießwerkzeugen	7
2 Rheologische Phänomene	11
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
3 Rheologische Grundkörper	31
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

4	Der Scherversuch und die Herleitung des <i>Newtonschen</i> Reibungsgesetzes (Stoffgesetz)	39
4.1	Der Scherversuch	39
4.2	Wichtige rheologische Stoffgesetze	45
5	Strömungsarten	47
6	Rheometrie-Viskosimetrie und Stoffdatenermittlung	61
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	Dehnrheologie	119
6.8.1	Herkunft und Definition der Dehnaviskosität	119
6.8.2	Messung von Dehnaviskositäten	121
6.8.2.1	Messungen mit einachsiger Dehnung	121
6.8.2.2	Ermittlung der Dehnaviskosität mit dem Rheotensversuch	122
6.8.2.3	Ermittlung der Dehnaviskosität 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
7	Viskosimetrie – Einflüsse auf die rheologischen Stoffdaten ..	147
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 Viskositätsbestimmung 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 Temperaturverschiebungsfaktors	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
8	Viskosimetrie – Mathematische Beschreibung der Fließkurve	195
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
9	Berechnung von Fließvorgängen	213
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
10	Die Methode der repräsentativen Schergeschwindigkeit	233
11	Berechnung von Fließvorgängen beim Spritzgießen	237
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 Abkühlereffekte (nichtisotherme Strömung)	249
11.2.6	Berechnung der optimalen Einspritzzeit (Einspritz- geschwindigkeit) beim Spritzgießen mittels <i>Brinkmann-Zahl</i>	252
11.2.6.1	<i>Aufgabe:</i> Optimale Füllzeit	254
12	Berechnen von Fließvorgängen in Heißkanalsystemen und Extrusionswerkzeugen	257
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 Schmelzeverteilersystem	267
12.3.2	Achtfachwerkzeug mit unterschiedlichem Schmelzeverteilersystem	268
12.3.3	Sechsfachwerkzeug mit unterschiedlichem Schmelzeverteilersystem	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 Fischeschwanzverteiler	278
12.4.3	Analytische Balancierung Kleiderbügelverteiler	280
12.4.4	Numerische Balancierung	284
12.4.5	<i>Aufgabe:</i> Analytische Balancierung eines Fischeschwanzverteilers	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

13	Scher- und Dehndruckverluste an Querschnittsübergängen	293
13.1	<i>Aufgabe:</i> zu den Dehn- und Scherdruckverlusten	297
14	Die rheologische Werkzeugauslegung beim Spritzgießen mit der Füllbildmethode	299
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
15	Schneckenströmungen	307
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
16	Probleme beim Fließen und Lösungen	313
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 Grenzs Schubspannung	337
16.3.3	Effekte beim Spritzgießen durch das Überschreiten der kritischen Grenzs Schubspannung	338
16.3.4	Wandgleiten (Stick-Slip-Effekt)	340
17	Materialparameter	343
17.1	Potenzansatz	343
17.2	Carreau-Ansatz	350
17.3	Cross-WLF-Ansatz	356
	Index	359

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 Dehnrheologie 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 anwendungsnah 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]

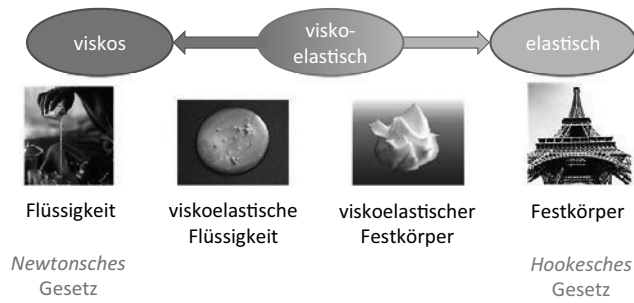


Bild 1.2 Die Rheologie beschreibt das Deformations- und Fließverhalten der Stoffe [2]



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 Fischeschwanzverteiler 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.

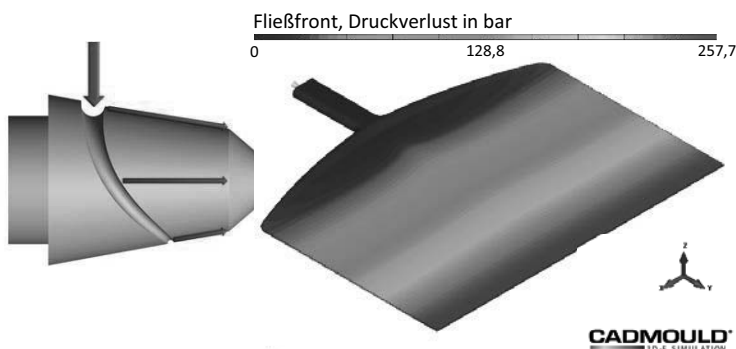


Bild 1.4 Rheologische Balancierung eines Pinolen- und eines Breitschlitzwerkzeugs mittels Kleiderbügel

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 η_∞ bezeichnet.

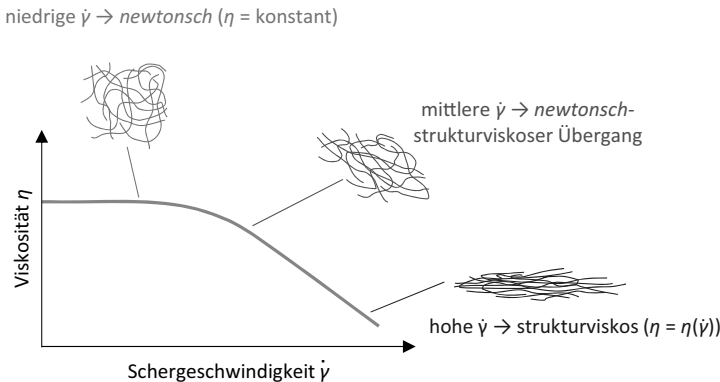


Bild 2.3 Strukturviskoses Verhalten von Kunststoffschmelzen



Merke:

Kunststoffschmelzen verhalten sich strukturviskos. Es gilt:

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

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.

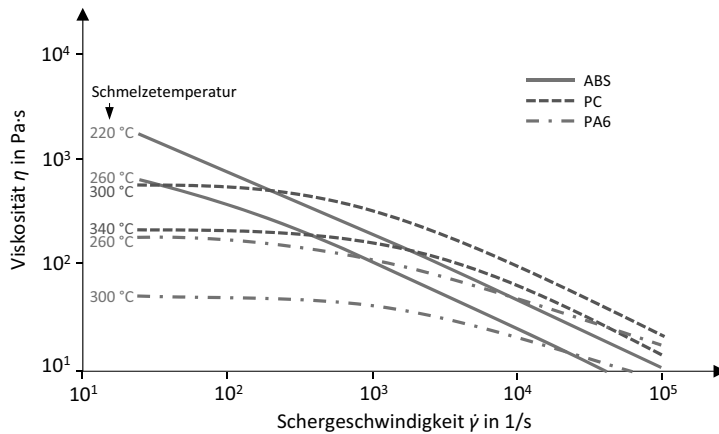


Bild 2.4 Strukturviskoses Fließverhalten für unterschiedliche Kunststofftypen

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 *Newtonschen* 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 *newtonschen* 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]

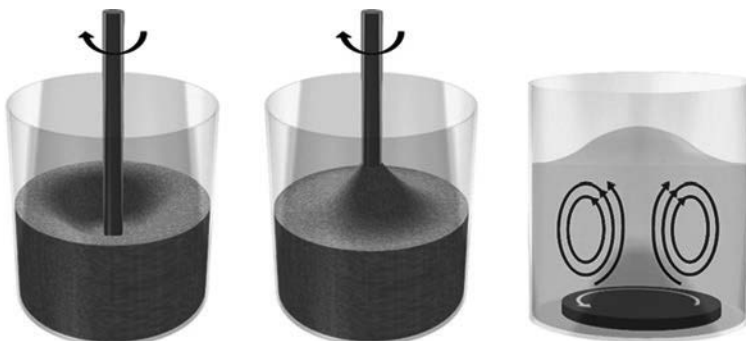


Bild 2.12 Rührversuch
links: *Newton*-Flüssigkeit
Mitte und rechts: Viskoelastisches Fluid [1]

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 *Newtonschen* 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 *newtonschen* 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.

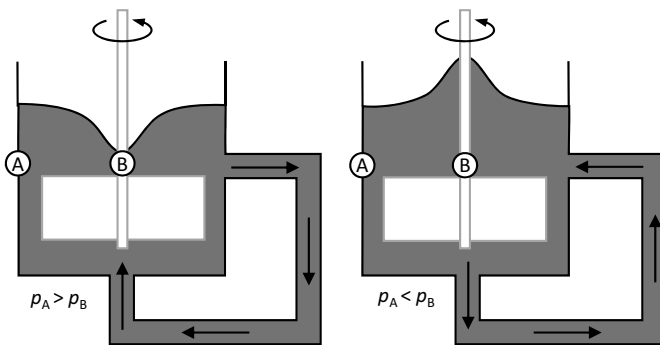


Bild 2.13 Druck und Strömungsverhältnisse einer *newtonschen* (links) und einer viskoelastischen Flüssigkeit in einem Rührgefäß [6]

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 Δt 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:

σ_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 : Strangaufweitung

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 $\tau = f(\dot{\gamma})$ und $\eta = f(\dot{\gamma})$ für Polystyrol dargestellt.

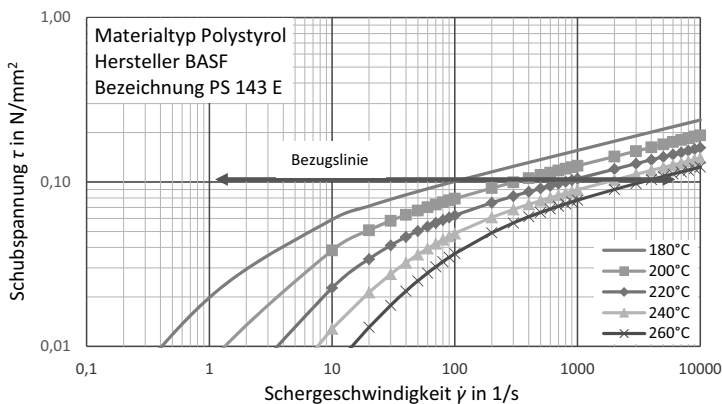


Bild 7.3 Verlauf der Schubspannung in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit für unterschiedliche Temperaturen

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.

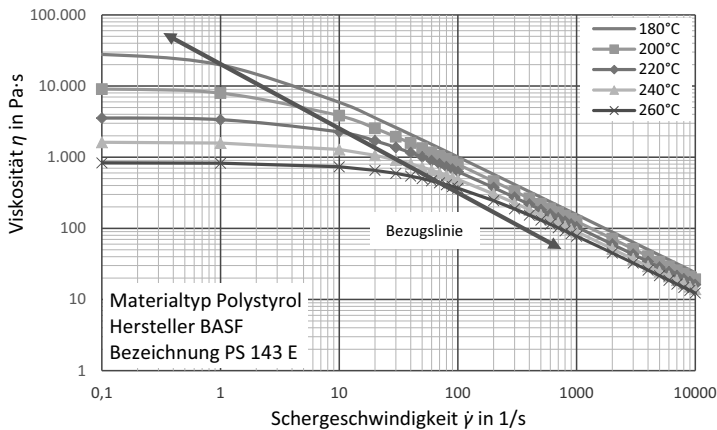


Bild 7.4 Viskositätsverlauf als Funktion der Schergeschwindigkeit für unterschiedliche Temperaturen

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 Temperaturverschiebungsfaktor a_T .

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

1. Zunächst wird eine Bezugstemperatur ϑ_{Bezug} festgelegt. In unserem Beispiel ist dies 220 °C.
2. Anschließend wird eine beliebige Schubspannung τ_{Bezug} für diese Kurve gewählt. Für unser Beispiel ist das 10^{-1} 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: $a_T = \frac{\dot{\gamma}_{\text{Bezug}}}{\dot{\gamma}_{\vartheta}}$.

In dieser Gleichung ist $\dot{\gamma}_{\text{Bezug}}$ die Schergeschwindigkeit der Masterkurve für den gewählten Bezugspunkt τ_{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 τ_{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)

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

in $^\circ\text{C}$	180	200	220	240	260
in 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 $a_T = \frac{\dot{\gamma}_{\text{Bezug}}}{\dot{\gamma}_{\vartheta}}$ 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 $\eta = f(\dot{\gamma})$ 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:

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

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

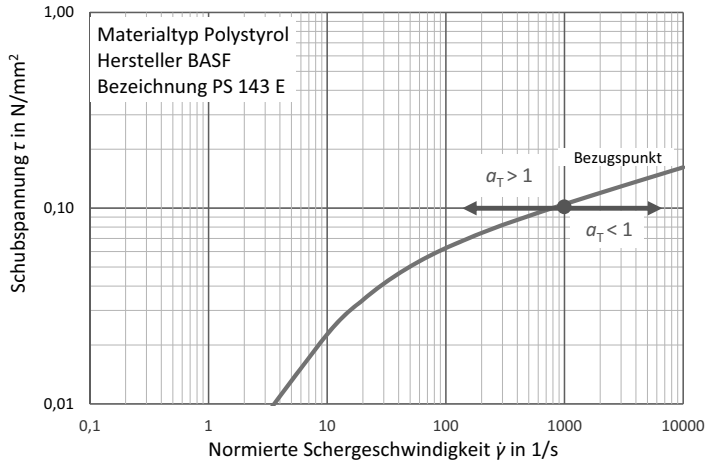


Bild 7.5 Masterkurve $\tau = f(\dot{\gamma} \cdot a_T)$ -Auftragung, Bezugstemperatur $\vartheta_{\text{Bezug}} = 220^\circ\text{C}$

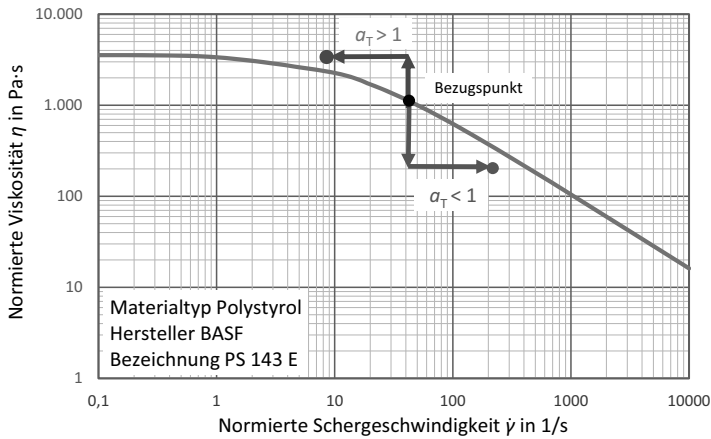


Bild 7.6 Masterkurve $\eta = f\left(\frac{\eta}{a_T}\right)$ -Auftragung, Bezugstemperatur $\vartheta_{\text{Bezug}} = 220^\circ\text{C}$

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.

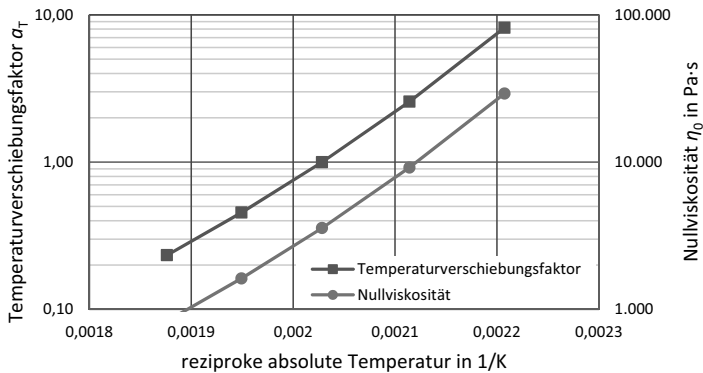


Bild 7.7 Temperaturverschiebungsfaktor a_T und Nullviskosität η_0 als Funktion der Temperatur für ein Polystyrol 143 K

In der obigen Grafik ist auch die Nullviskosität η_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.

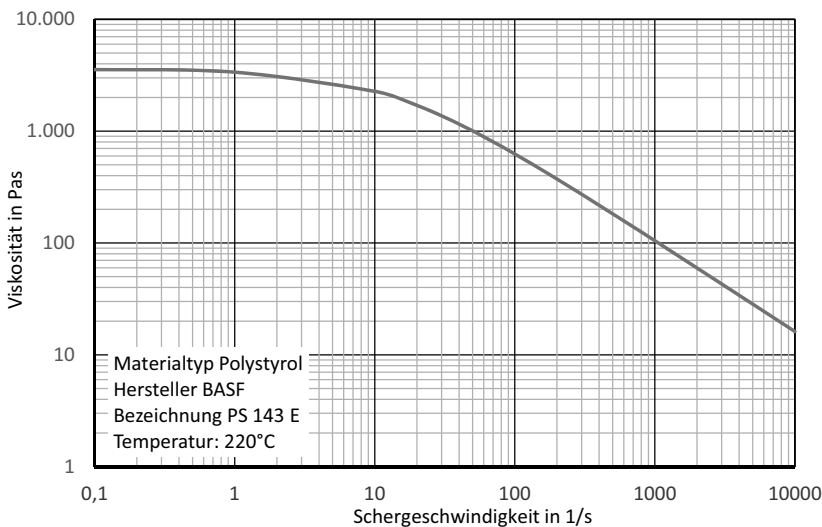


Bild 7.8 Viskosität als Funktion der Schergeschwindigkeit für $T = 220^\circ\text{C}$

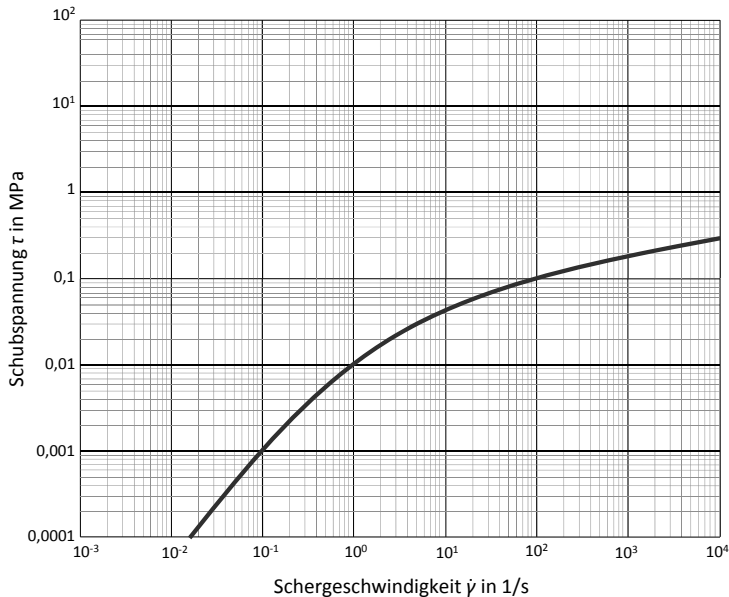


Bild 8.3 Ermittlung der Konstanten für den Potenzansatz aus der Fließkurve

■ 8.2 Der *Carreau*-Ansatz

Der *Carreau*-Ansatz beschreibt den Verlauf der Viskositätsfunktion mit einem sogenannten 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 *newtonsches* Fließverhalten vor.

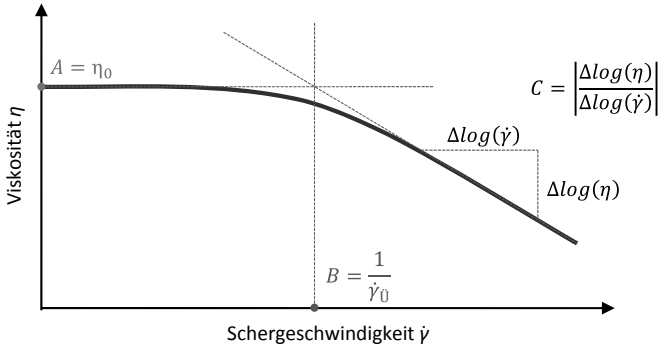


Bild 8.4 Beschreibung der Viskositätskurve mit dem *Carreau*-Modell

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 *newtonsches* 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.

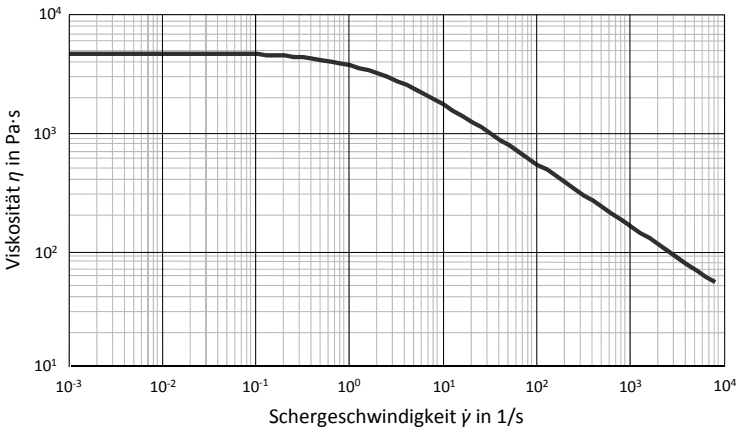


Bild 8.5 Ermittlung der Konstanten für den *Carreau*-Ansatz

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 $1/\dot{\gamma}_0$. 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:

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

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 strukturoviskosen 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 Schergeschwindigkeit von 1 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.

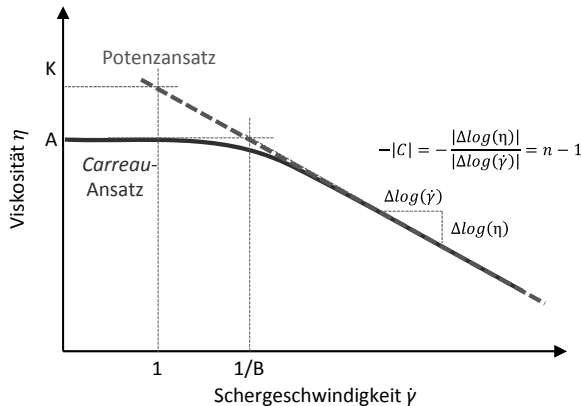


Bild 8.6 Viskositätsverlauf mathematisch beschrieben mit dem Potenz- und dem *Carreau*-Ansatz

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 Φ 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 Glasstemperatur des Kunststoffs. Dabei ist n der Viskositätenexponent. Die Schubspannung τ^* und die Nullviskosität D_1 beziehen sich auf die Glasstemperatur des zu beschreibenden Stoffes. T^* ist die druckabhängige Glasstemperatur 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 $T^* = D_2 + D_3 \cdot p$

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

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 s^{-1}	η in Pa·s	$\dot{\gamma}$ in s^{-1}	η in Pa·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 Geradengleichung 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 s^{-1} bis $10\,000 \text{ s}^{-1}$. Bei genauer 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 322 f.
Barriereschicht 323
Betriebspunktabhängigkeit 282
betriebspunktunabhängige Auslegung 274, 287
Bindenähte 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, 188 f.
Cross-WLF-Ansatz 176, 204

D

Dämpfer 33
Degradation 140
Dehndeformation 56
Dehndruckverluste 294
Dehngeschwindigkeit 120
Dehnrheologie 57, 119
Dehnrheometer 123
Dehnströmungen 47, 293
Dehnviskositäten 119, 121 ff., 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
 Duomeren 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
 Glasterperatur 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
 Hookescher-Festkörper 32
 Hooksches Gesetz 84
 Huygensches 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
Kristallitschmelzetemperatur 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
Lösungviskosimetrie 130
Lösungviskosität 131
Lufteinschlüsse 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
Normalspannungskoeffizient 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, 172f., 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
 Schneckenorraum 297
 Schubspannung 40, 151, 216, 221, 331,
 338
 Schubspannungen 314
 Schubspannungsgrenze 319
 Schubspannungsprofile 230
 Schwerkraft 65
 SEARL-System 91
 Segment 284
 Simulationsprogramme 7, 55
 Speichermodule 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
Strangaufweitung 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,
160 f., 164, 204, 254
thermische Belastung 168, 262
Thixotropie 18
Trouton 58

U

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

V

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

Verteilersysteme 273 f.
Verweilzeit 168, 275, 280
Vielfachwerkzeuge 7, 262 f.
viskoelastisch 12, 23, 26, 81
viskoelastische Eigenschaften 318,
320
viskoelastische Körper 34
Viskosimeter 61
Viskosität 11 f., 151, 174, 178, 191, 233
Viskositätsexponent 198
Viskositätsfunktion 197
Viskositätsverhältnisse 325 f.
Viskosaage 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

Zuhaltekraft 248

Zwei-Platten-Modell 308

Zweischichtströmung 313