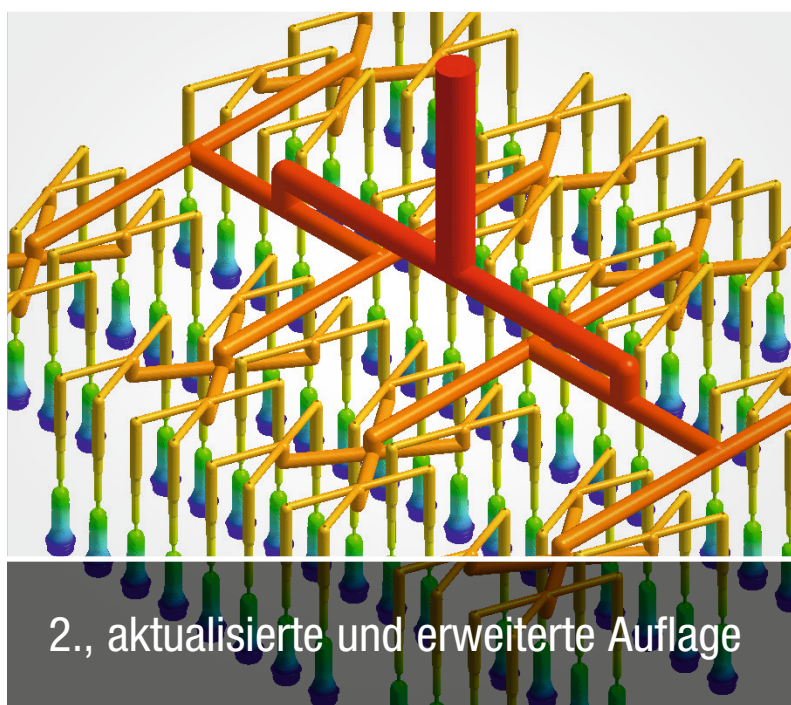


Thomas Schröder

# Rheologie der Kunststoffe

Theorie und Praxis



2., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER



**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**

## **Die Internet-Plattform für Entscheider!**

**Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

**Richtungsweisend:** Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!

**Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

***Kunststoffe*.de**

Thomas Schröder

# **Rheologie der Kunststoffe**

Theorie und Praxis

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Der Autor:

*Prof. Dr.-Ing. Thomas Schröder*, Institut für Kunststofftechnik Darmstadt ikd,  
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Darmstadt h\_da



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2020 Carl Hanser Verlag München

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Ulrike Wittmann

Herstellung: Arthur Lenner, Der Buchmacher, Windach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Coverbild: Mold & Hotrunner Technology AG

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-46151-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-46550-3

# Inhalt

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

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

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



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

<b>8</b>	<b>Viskosimetrie – Mathematische Beschreibung der Fließkurve</b> .....	<b>203</b>
8.1	Der Potenzansatz von <i>Ostwald</i> und <i>de Waele</i> ( <i>Power-Law-Model</i> )	204
8.1.1	<i>Aufgabe:</i> grafische Ermittlung der Konstanten des Potenzansatzes .....	206
8.2	Der <i>Carreau-Ansatz</i> .....	208
8.2.1	Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit im <i>Carreau-Ansatz</i> .....	211
8.3	Der <i>Cross-WLF-Ansatz</i> .....	212
8.4	Polynomansätze .....	214
8.4.1	Polynomansatz nach <i>Münstedt</i> .....	214
8.4.2	Biquadratischer Polynomansatz .....	215
8.4.3	Polynomansätze für komplexes Fließverhalten .....	215
8.5	<i>Aufgabe:</i> Ermittlung des Konsistenzfaktors und des Viskositätsexponenten .....	216
8.6	<i>Aufgabe:</i> Vergleich der Materialgesetze (Potenzansatz und <i>Carreau-Ansatz</i> ) .....	217

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

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

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

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

# Vorwort zur 2. Auflage

Die Freude darüber, dass das von mir verfasste Buch über die Rheologie der Kunststoffe eine große Nachfrage hat und bereits nach zwei Jahren nahezu vergriffen ist, ist groß. Insofern stand schnell die Herausgabe einer zweiten Auflage an. Auch die vielzähligen positiven Rückmeldungen und konstruktiven Anregungen der Leser machen eine weitere Auflage notwendig.

Das Kapitel *Viskosimetrie und Rheometrie* wurde um die sogenannte Large-Amplitude-Oszillation Theorie (LAOS) erweitert. Dabei wird das nicht linear viskoelastische Verhalten unter oszillierender Scherung mit großer Amplitude untersucht und beschrieben.

Das Kapitel *Rheologische Auslegung* von Heißkanalsystemen beim Spritzgießen wurde um Druckverluste, die an Umlenkungen im Heißkanal entstehen ergänzt.

Mehrschichtströmungen gewinnen im Bereich der Kunststoffverarbeitung zunehmend an Bedeutung. Aus diesem Grund wurde dieses Kapitel mit *Berechnungsgleichungen und Simulationsergebnissen*, die den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf das Strömungsverhalten beschreiben, erweitert.

Die zweite Auflage liegt nun komplett in Farbe vor, da auch das ein Wunsch der Leser der ersten Auflage war. Viele Grafiken und Bilder sind damit besser verständlich und machen das Lesen und Verstehen einfacher.

Des Weiteren wurden einige Bilder mit QR-Codes ergänzt. Diese QR-Codes sind mit Animationen verlinkt, die automatisch ablaufen sobald der QR-Code eingelesen wird. Damit soll das Verständnis von vielen rheologischen Phänomenen und anderen Darstellungen, wie z. B. Simulationen vereinfacht werden.

Ich möchte mich nochmals für die zahlreichen positiven Rückmeldungen und die konstruktiven Anregungen, die zu einer völlig überarbeitenden zweiten Auflage geführt haben, bedanken. Das gilt auch für viele nette Kollegen, die mich dabei unterstützt haben.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Mitwirkenden bedanken, die zu einer verbesserten zweiten Auflage beigetragen haben.

Darmstadt im Juni 2020

*Prof. Dr. Thomas Schröder*



**Hinweis:** Die Lösungen zu den Aufgaben befinden sich in Kapitel 18.

## ■ Vorwort zur 1. Auflage

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<sup>®</sup> 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*





# Der Autor

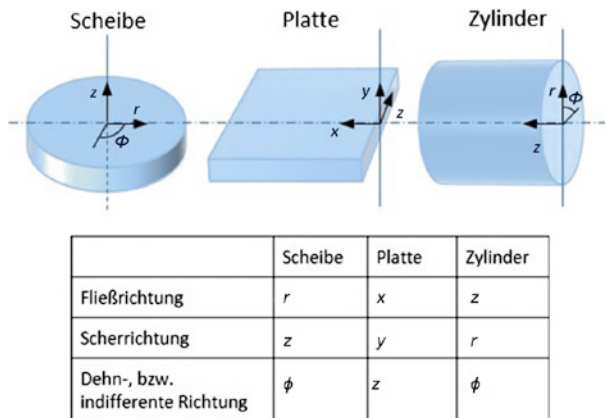
Prof.Dr. Thomas Schröder lehrt an der Hochschule Darmstadt h\_da die Fächer Spritzgießen, Werkzeugtechnik, Simulationstechnologie und Rheologie. Nach dem Studium des Maschinenbaus mit der Fachrichtung Kunststofftechnik an der RWTH Aachen promovierte er bei Prof.Dr.Dr.h.c. Walter Michaeli mit dem Themengebiet Gasinjektionstechnik. Nach mehreren Jahren bei einem namhaften Kunststoffverarbeiter wechselte er zur Fa. Krupp Corpoplast nach Hamburg, wo er für die Systeme zur Herstellung von Vorformlingen verantwortlich war. Im Anschluss an diese Tätigkeit leitete er die Anwendungstechnik SPA bei dem Spritzgießmaschinenhersteller Fa. Netstal in der Schweiz. Im Jahr 2001 erhielt Prof.Schröder den Ruf an die Hochschule Darmstadt. Er ist Mitglied des Instituts für Kunststofftechnik Darmstadt ikd und Vorsitzender der Gesellschaft zur Förderung technischen Nachwuchses GFTN e.V., welches ein Institut an der Hochschule Darmstadt ist. Prof.Schröder forscht sehr intensiv im Rahmen von geförderten Drittmittelprojekten in den Bereichen Rheologie und Spritzgießen. Des Weiteren ist Prof.Schröder Mitglied des Promotionszentrums für Nachhaltigkeitswissenschaften und verfügt damit über das Promotionsrecht an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Darmstadt h\_da.





# Wichtige Formeln der Rheologie

## ■ Die Gleichungen von *Hagen-Poiseuille*



**Bild 1** Geometrie für die Gleichungen von *Hagen-Poiseuille*

<b>Scheibe</b>	$\frac{\Delta p}{r} = \frac{12\bar{v}_r \eta}{H^2}$
<b>Platte</b>	$\frac{\Delta p}{x} = \frac{12\bar{v}_x \eta}{H^2}$
<b>Zylinder</b>	$\frac{\Delta p}{z} = \frac{32\bar{v}_z \eta}{D^2}$

Mit der Kontinuitätsgleichung  $\dot{V} = \bar{v} \cdot A$  folgt:

<b>Scheibe</b>	$\frac{\Delta p}{r} = \frac{6\dot{V}\eta}{\pi RH^3}$
<b>Platte</b>	$\frac{\Delta p}{x} = \frac{12\dot{V}\eta}{BH^3}$
<b>Zylinder</b>	$\frac{\Delta p}{z} = \frac{128\dot{V}\eta}{\pi D^4}$

## ■ Gleichungen für die repräsentative Schergeschwindigkeit

<b>Scheibe</b>	$\bar{\dot{\gamma}} = e_{\text{Rechteck}} \frac{6 \cdot \bar{v}_r}{H} = e_{\text{Rechteck}} \frac{3 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot r \cdot H^2}$
<b>Platte</b>	$\bar{\dot{\gamma}} = e_{\text{Rechteck}} \frac{6 \cdot \bar{v}_x}{H} = e_{\text{Rechteck}} \frac{6 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2}$
<b>Zylinder</b>	$\bar{\dot{\gamma}} = e_{\text{Kreis}} \frac{8 \cdot \bar{v}_z}{D} = e_{\text{Kreis}} \frac{32 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D^3}$
Mit $e_{\text{Rechteck}} = 0,772$ und $e_{\text{Kreis}} = 0,815$	

Die Gleichung für das temperaturabhängige spezifische Volumen

$$v(\vartheta) = v(\vartheta_0) \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)]$$

## ■ Gleichungen für die Viskositätsberechnung

Potenzansatz nach *Ostwald und de-Waele*

$$\eta = K \cdot a_r^n \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

oder

$$\eta = a_T^{\frac{1}{m}} \cdot \phi^{\frac{1}{m}} \cdot \dot{\gamma}^{\frac{1-m}{m}}$$

### Carreau-Ansatz

$$\eta = \frac{a_T \cdot P_1}{(1 + a_T \cdot \dot{\gamma} \cdot P_2)^{P_3}}$$

### Cross-Ansatz

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

mit

$$\eta_0(T, p) = D_1 \cdot e^{\left[ \frac{-A_1(T - D_2 - D_3 p)}{A_2 + T - D_2} \right]}$$

## ■ Gleichungen für den Temperaturverschiebungsfaktor $a_T$

### Arrhenius-Ansatz

$$a_T = e^{\left[ \frac{E_0}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]}$$

### William-Landel-Ferry-Ansatz (WLF-Ansatz)

$$\lg(a_T) = \frac{8,86(T_{\text{Bezug}} - T_S)}{101,6 \text{ K} + (T_{\text{Bezug}} - T_S)} - \frac{8,86(T - T_S)}{101,6 \text{ K} + (T - T_S)}$$



# 1

## Einleitung

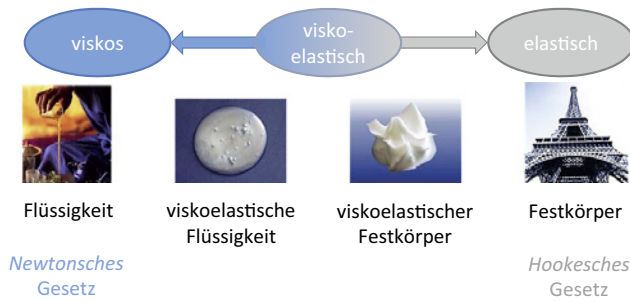
Die Rheologie ist ein sehr altes Fachgebiet und wurde bereits um 1930 u. a. von *E. C. Bingham* und *M. Reiner* in Easton (USA) als eigenständige Disziplin gegründet. Wesentliche Einzelbeiträge veröffentlichten schon sehr viel früher z. B. 1676 *R. Hooke*, 1687 *J. Newton*, 1745 *L. Euler*, 1820 *C. 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.



<https://bit.ly/311MEsw>



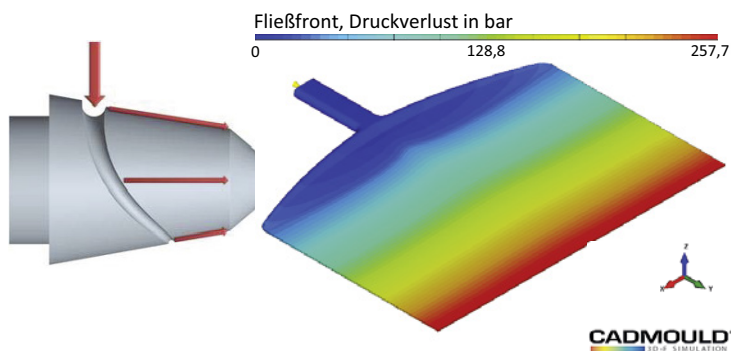
**Bild 1.3** Alltagsbeispiele aus der Rheologie

## ■ 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 *Cad-mould*<sup>®</sup>, *Moldflow*<sup>®</sup>, *Moldex*<sup>®</sup>, *Sigmasoft*<sup>®</sup> oder *Fluent*<sup>®</sup>, 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.



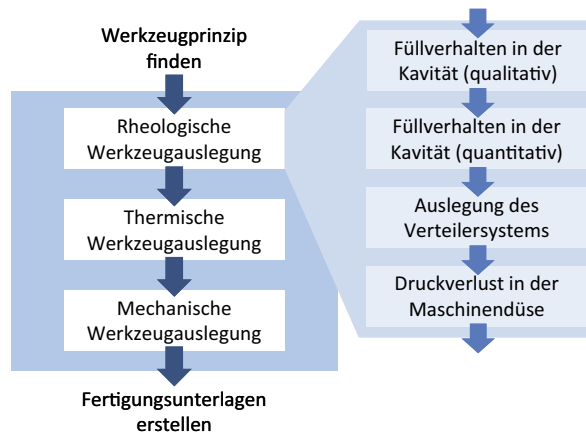
<https://bit.ly/3if0Nth>

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

Neben der Extrusion zählt das Spritzgießen zu den Kunststoffverarbeitungsprozessen, die die größte Anwendung finden. Bei der Auslegung von Schubschnecken, Kolbenspeichern, Scher- und Mischteilen werden auch hier die Grundlagen der Rheologie genutzt. Ziel ist es, die Strömungsvorgänge des Kunststoffs im kompletten Spritzgießsystem, d. h. vom Granulat bis zum Fertigteil beschreiben zu können. Eine Aussage über Druckverluste, Verweilzeiten, Temperaturen, Schubspannungen, Schergeschwindigkeiten, Orientierungen etc. wird möglich.

Das Thema Strukturanalyse gewinnt gerade unter dem Gesichtspunkt Leichtbau zunehmend an Bedeutung. So lassen sich mit Simulationsprogrammen, wie sie vorher aufgeführt wurden, die strömungsbedingten Orientierungen z. B. von Glasfasern im Formteil vorhersagen und über eine Schnittstelle mittels Mapping an ein Programm zur Festigkeitsberechnung übertragen. Damit besteht die Möglichkeit, bei der Bauteilauslegung die Anisotropie des Werkstoffs zu berücksichtigen und infolgedessen eine Bauteiloptimierung vorzunehmen, die wesentlich realitätsnäher und damit effektiver ist.

Im Vordergrund steht jedoch beim Spritzgießen die Auslegung der Spritzgießwerkzeuge inklusive Angussystem zur Herstellung von Kunststoffformteilen. Der Konstruktionsprozess lässt sich in drei Phasen unterteilen. Im Anschluss an die Werkzeugfindungsphase folgt die Werkzeugdimensionierung. Diese beinhaltet neben der mechanischen und thermischen auch die rheologische Auslegung. D. h. an dieser Stelle sind vorwiegend rheologische Kenntnisse, also Kenntnisse über das Fließverhalten der Kunststoffschmelzen, notwendig. [7]



**Bild 1.5** Die Phasen der Werkzeugkonstruktion und die Schritte der rheologischen Werkzeugauslegung [3]

Die rheologische Werkzeugauslegung bietet sich als erster Auslegungsschritt der zweiten Werkzeugauslegungsphase an, da hier kaum Restriktionen aus den Ergeb-

nissen der anderen Auslegungsschritte zu erwarten sind. Sie dient zunächst dazu, die Lage von Bindenähten und Lufteinschlüssen in Abhängigkeit von Art und Lage der Anschnitte und Wanddicke festzuhalten. Da für eine solche Analyse das Materialverhalten eine untergeordnete Rolle spielt und da hier weder Drücke noch Geschwindigkeiten der Schmelze gefragt sind, ist dieser Auslegungsschritt im Bild als qualitativ bezeichnet. Hier kann zum Beispiel die Füllbildmethode Anwendung finden. Auf diese Methode wird später noch detailliert eingegangen.

Nachdem durch diese Analyse die Fließwege der Schmelze im Formnest bestimmt sind, kann eine quantitative Analyse durchgeführt werden. Hierzu ist die Kenntnis des Materialverhaltens, d. h. der Viskositätsfunktion und thermischen Stoffwerte, Voraussetzung. In diesem Schritt der Auslegung wird der Druckbedarf zur Formnestfüllung berechnet. Dieser ist außer vom Materialverhalten von den Prozessparametern abhängig. Somit werden hier auch die optimalen Einspritzgeschwindigkeiten, Masse- und Wandtemperaturen ermittelt. Ferner können die Grenzwerte (Druck, Temperatur, Schergeschwindigkeit, Schubspannung etc.) der Prozessparameter festgelegt werden, deren Überschreiten zu Materialschädigung durch zu hohe Schergeschwindigkeiten oder durch zu hohe Friktionserwärmung führt.

Aus den ersten beiden rheologischen Auslegungsschritten resultieren die Positionen von Anschnitten und die erforderlichen Schmelzeströme, sowie die erforderliche Massetemperatur. Dies sind entscheidende Randbedingungen für das im dritten Schritt auszulegende Verteilersystem. Durch die Position von Anschnitten sind die Grobabmessungen und mögliche Verteilervarianten festgelegt. In den meisten Fällen muss der Konstrukteur durch die gleiche Simulationsrechnung wie unter Schritt zwei die Durchmesser der Verteilerkanäle dimensionieren. Ergebnisse sind auch hier zusätzliche Druckverluste im Verteilersystem sowie Temperatur- und Scherbeanspruchung des Materials.

Nach dieser Dimensionierung liegt der zur Werkzeugfüllung benötigte Druck fest. Dieser muss von der Maschine bereitgestellt werden. Zusätzlich muss noch der in der Maschinendüse selbst entstehende Druckverlust berücksichtigt werden. Je nach Höhe des Druckverlustes muss überprüft werden, ob der Maschinendruck (Einspritzdruck) ausreicht.

Entscheidend ist bei der Berechnung von Druckverlusten in der Maschinendüse und im Schmelzeverteilersystem auch die Berücksichtigung der sogenannten Einlauf- oder Dehndruckverluste. Diese entstehen immer dann, wenn eine Änderung des Strömungskanalquerschnitts (Querschnittsprung) vorliegt. So verändert sich z. B. der Durchmesser einer Maschinendüse immer vom Schneckendurchmesser auf einen Durchmesser, der kleiner ist als der der Angussbuchse. Somit ergeben sich schon hier zusätzliche Druckverluste, die zu den Scherdruckverlusten hinzuaddiert werden müssen. Auch auf dieses Thema wird später noch detailliert eingegangen.

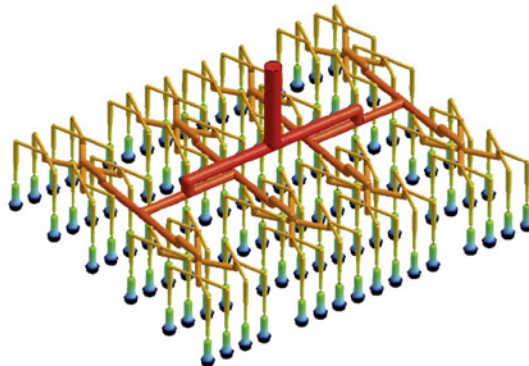
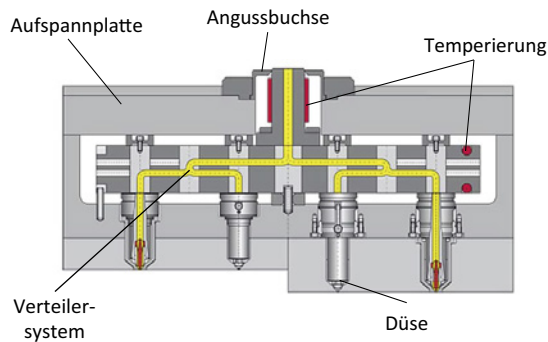
Computerunterstützte Simulationsprogramme vernachlässigen diese Druckverluste in der Regel, weil die rheologischen Stoffdaten nicht oder nur mangelhaft vorhanden sind. Dies kann gerade bei der Auslegung von Heißkanalsystemen zu fehlerhaften Rechnungen führen. So liegen die berechneten Druckverluste je nach Komplexität des Verteilersystems oftmals weit unter den realen Druckverlusten.

Der rheologischen Auslegung schließt sich die thermische Auslegung an. Hierbei sind bereits einige Restriktionen aus der rheologischen Berechnung zu beachten. So ist die Massetemperatur vorgegeben und auch die Temperatur an der Formnestwand liegt in engen Grenzen fest.

Auch bei Werkzeugen mit mehreren Formnestern oder Großwerkzeugen mit Mehrfachanspritzung werden die Gesetze der Rheologie genutzt, um das Strömungs-, respektive das Füllverhalten vorherzusagen.



<https://bit.ly/39WqwUs>



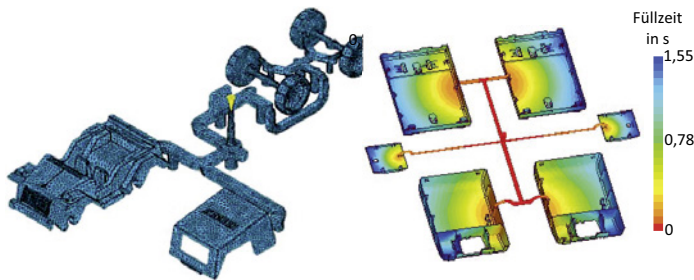
**Bild 1.6** Vielfach-Spritzgießwerkzeug mit Heißkanalverteilersystem [4] [8]

Insbesondere bei Vielfach- und Familienwerkzeugen ist eine rheologische Balancierung zwingend notwendig. Ziel der Balancierung ist es, die Füllung aller Formnester zum gleichen Zeitpunkt abzuschließen.

Dazu stehen bei Vielfachwerkzeugen zwei Möglichkeiten der rheologischen Balancierung zur Verfügung:

- die natürliche rheologische Balancierung
- die mathematische rheologische Balancierung

Familienwerkzeuge (siehe Bild 1.7), bei denen die Kavitäten nicht identisch sind, werden immer mathematisch rheologisch balanciert, während bei Vielfachwerkzeugen mit identischen Kavitäten die natürliche rheologische und auch die mathematische rheologische Balancierung genutzt werden kann. In der Regel wird wegen der Betriebspunktunabhängigkeit und der einfacheren Auslegung die natürliche rheologische Balancierung bei diesen Systemen bevorzugt. Auch auf dieses Thema wird später noch detaillierter eingegangen.



<https://bit.ly/3gwG2Jo>

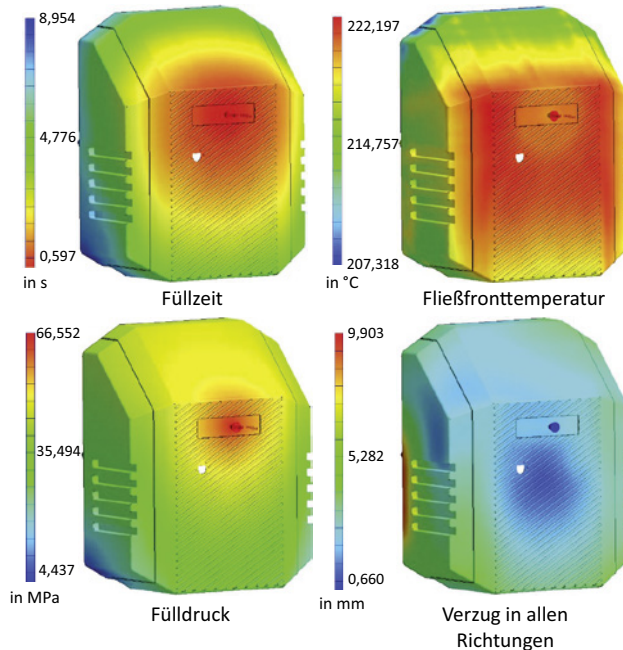
**Bild 1.7** Beispiele für Familienwerkzeuge [6]

## ■ 1.2 Computerunterstützte Simulationsprogramme zur Auslegung von Spritzgießwerkzeugen

Da ein empirisches Ermitteln der optimalen Werkzeugauslegung z. B. mittels Versuchswerkzeugen recht zeit- und auch kostenintensiv ist, werden in der Werkzeugfindungsphase zunehmend computerunterstützte Simulationsprogramme genutzt. Diese CAD-Programme sind so z. B. in der Lage, die Strömungsvorgänge im Werkzeug recht exakt vorherzusagen. Um dies zu ermöglichen, ist jedoch eine Reihe an mathematischen Ansätzen, die das Strömungsverhalten der Kunststoffschmelze beschreiben, notwendig. Des Weiteren werden zur Berechnung der Strömungsvorgänge Daten über die charakteristischen Fließeigenschaften der Kunststoffschmelze benötigt. An dieser Stelle kommt die Rheometrie ins Spiel. Mit Hilfe von unterschiedlichen Messeinrichtungen werden die typischen Fließeigenschaften der Kunststoffschmelzen gemessen und aufgezeichnet.



<https://bit.ly/3gvU0eh>



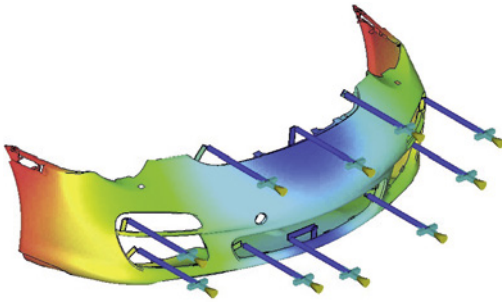
**Bild 1.8** Ergebnisse einer computerunterstützten Simulationsrechnung

Basierend auf diesen rheologischen Grundlagen können die computerunterstützten Simulationsprogramme das Füllverhalten (Isovelen), das Temperaturfeld (Isothermen), den Fülldruck (Isobaren), Orientierungen, Schwindung und Verzug und andere strömungsabhängige Größen berechnen und grafisch darstellen.

Bei komplexeren Werkzeuggeometrien (Stoßfänger, Armaturentafel etc.) erfolgt in der Regel in einer frühen Phase eine computerunterstützte rheologische Auslegung des Werkzeuges. So definiert und variiert man die Position und die Anzahl der Anspritzpunkte. Des Weiteren ermöglichen die CAD-Programme eine Vorhersage der Bindenähte und des Verzugs. Durch eine Variation der Anspritzpunkte kann das komplexe Formteil im Vorfeld optimiert werden. Damit lassen sich die Kosten und die Zeit für die Entwicklung, die Werkzeugfertigung und die sich anschließende Bemusterung reduzieren. So lassen sich heute auch Sonderverfahren, wie das Kaskadenspritzgießen oder Dynamic Feed<sup>®</sup>, simulieren.

Das folgende Bild 1.9 zeigt ein typisches Beispiel einer Simulation eines Stoßfängerwerkzeugs (engl.: Bumper). In diesem Fall wurde das druckgeregelte Kaskadenspritzgießen (Dynamic Feed<sup>®</sup>) simuliert.



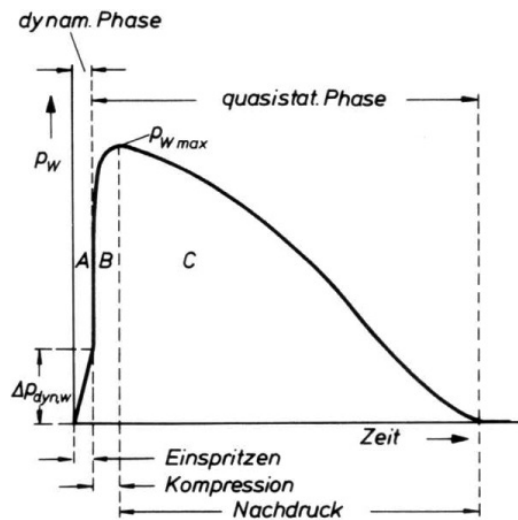


**Bild 1.9**  
Computerunterstützte Simulation  
eines Stoßfängers



<https://bit.ly/2Pnqfk2>

Des Weiteren wird die Qualität der Spritzgussformteile ganz entscheidend durch den Formteilbildungsprozess im Spritzgießwerkzeug definiert. Dazu zählen die Strömungsvorgänge der Schmelze im Werkzeug, in der Einspritz- und der Nachdruckphase.



<https://bit.ly/31kUmye>

**Bild 1.10** Werkzeuginnendruckverlauf mit den Prozessphasen

**Tabelle 1.1** Formteilqualität in Abhängigkeit von den Prozessphasen [5]

	Einspritzphase	Kompressionsphase	Nachdruckphase
<b>Einflussgrößen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einspritzgeschwindigkeit</li> <li>▪ Formmasse-, Werkzeugtemperatur</li> <li>▪ Kunststoffviskosität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Umschaltvorgang auf Nachdruck</li> <li>▪ Einstellung der Druckbegrenzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nachdruckhöhe und -dauer</li> <li>▪ Werkzeugwandtemperatur</li> <li>▪ Deformation des Werkzeuges</li> <li>▪ Stabilität der Schließeinheit</li> <li>▪ Schließkraft</li> </ul>



**Tabelle 1.1** Formteilqualität in Abhängigkeit von den Prozessphasen [5] (Fortsetzung)

	Einspritzphase	Kompressionsphase	Nachdruckphase
<b>Beeinflussung von Stoffparametern</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Viskosität</li> <li>▪ Molekularabbau</li> <li>▪ Kristallinität</li> <li>▪ Orientierung in der Oberflächenschicht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kristallinität</li> <li>▪ Anisotropien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kristallinität</li> <li>▪ Orientierung im Formteilinneren</li> <li>▪ Schwindung</li> </ul>
<b>Beeinflussung von Formteil-eigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Oberflächenqualität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ausformungsgrad</li> <li>▪ Gratbildung</li> <li>▪ Schwimmhautausbildung</li> <li>▪ Gewicht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gewicht</li> <li>▪ Maßhaltigkeit</li> <li>▪ Lunker</li> <li>▪ Einfallstellen</li> <li>▪ Relaxation</li> <li>▪ Entformungsverhalten</li> </ul>

Alle wesentlichen Qualitätsmerkmale, wie das Gewicht, die Maßhaltigkeit, die Oberflächenqualität etc., werden in erster Linie in diesen drei Formteilbildungsphasen geprägt. Insofern ist eine Kenntnis über den Druckverlauf in den Prozessphasen von großer Bedeutung.

Auch an dieser Stelle sind computerunterstützte Simulationsprogramme sehr hilfreich. Mit diesen Programmen lassen sich Aussagen über den Formteilbildungsprozess (Druck, Fließfrontgeschwindigkeit, Scherung, Schubspannung, Temperatur etc.) tätigen. Da der Formteilbildungsprozess, wie die obige Darstellung zeigt, in einem direkten Zusammenhang mit der Formteilqualität steht, sind im Vorfeld Aussagen über evtl. Schwachstellen oder Formteilfehler möglich. Dazu ist jedoch generell ein hohes Fachwissen notwendig, da die Zusammenhänge in der Regel recht komplex sind.

### Literatur zu Kapitel 1

- [1] Pahl, M.; Gleißle, W. und Laun, H.-M.: Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere. Düsseldorf, VDI-Verlag GmbH, 1995
- [2] Mezger, T. G.: Das Rheologie Handbuch. Hannover, Vincentz Network, 2016
- [3] Lichius, U. und Schmidt, L.: Rechnergestütztes Konstruieren von Spritzgießwerkzeugen: systematisches Entwickeln von Betriebsmitteln, Aufbau und Funktion von Spritzgießwerkzeugen. Würzburg, Vogel Verlag, 1986
- [4] N.N.: Ewikon Heißkanaltechnik, Technische Unterlage, 1992
- [5] Johannaber, F. und Michaeli, W.: Handbuch Spritzgießen. München, Carl Hanser Verlag, 2004
- [6] N.N.: CADMOULD 3D-F Benutzerhandbuch
- [7] Hopmann, Chr.; Menges, G.; Michaeli, W.; Mohren, P.: Spritzgießwerkzeuge Auslegung, Bau, Anwendung, München, Carl Hanser Verlag, 2018
- [8] N.N.: MHT Mold & Hotrunner Technology AG, <http://www.mht-ag.de>

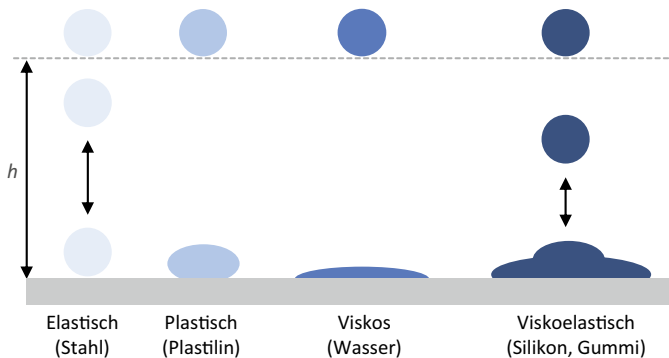
# 2

## Rheologische Phänomene

In der Rheologie unterscheidet man zwischen drei rheologischen Grundeigenschaften:

- Viskosität
- Plastizität
- Elastizität

Dabei weisen reale Materialien alle rheologischen Grundeigenschaften auf. Diese sind unterschiedlich ausgeprägt und hängen von der Beanspruchungshöhe, der Beanspruchungsdauer, der Temperatur etc. ab. [1]



<https://bit.ly/3ibNN7T>

**Bild 2.1** Beispiele für rheologische Eigenschaften [1]

Die Grundeigenschaften der Elastizität, der Plastizität und des viskosen Stoffverhaltens lassen sich anschaulich mit Kugeln demonstrieren, die diese Eigenschaften besitzen. Dazu wählt man eine Stahlkugel, eine Plastilinkugel und einen Wassertropfen aus und lässt diese aus nicht zu großer Höhe  $h$  auf eine saubere Stahlplatte fallen. Die Stahlkugel springt hoch, kommt irgendwann zur Ruhe und bleibt unverformt liegen. In diesem Beanspruchungsbereich entspricht die Stahlkugel einem rein elastischen Festkörper. Die Plastilinkugel verformt sich beim Aufprall plastisch und behält diese Verformung im Ruhezustand bei. Die Plastilinkugel zeigt

ein plastisch-elastisches Feststoffverhalten. Der Wassertropfen fließt nach dem Auftreffen so lange auseinander, bis die Grenzflächenspannung erreicht ist und bildet einen Film aus. Wasser ist damit eine viskose Flüssigkeit. Nimmt man nun eine Kugel aus Silikonkautschuk und lässt diese wie die anderen Kugeln auf die Platte fallen, so hüpfet die Kugel mehrfach wie ein elastischer Körper. Schlussendlich bleibt sie liegen und zerfließt nach längerer Zeit auf der Unterlage. Dieser Silikonkautschuk ist eine viskoelastische Flüssigkeit [1].



Kunststoffschmelzen besitzen viskoelastisches Fließverhalten.

Generell muss man zwischen nieder- und hochviskosen Medien unterscheiden. Während Luft eine sehr niedrige Viskosität aufweist und nahezu reibungsfrei strömt, hat z. B. Kunststoff im Verarbeitungsbereich eine sehr hohe Viskosität. Der Fließwiderstand ist beim Kunststoff entsprechend groß. Bemerkbar macht sich dies bei der Verarbeitung. Bedingt durch die hohe Viskosität (Zähigkeit) wird ein großer Druck benötigt, um den Kunststoff z. B. in ein Werkzeug einzuspritzen.



Als Maß für die Zähigkeit dient die Viskosität. Ihre Einheit ist Pa·s.

Die folgende Tabelle 2.1 zeigt Viskositätswerte einiger Stoffe bei Umgebungsbedingungen.



**Tabelle 2.1** Viskositätswerte ausgewählter Stoffe [1]

Stoff	Viskosität $\eta$ in Pa·s	Konsistenz
Luft	$10^{-5}$	gasförmig
Wasser	$10^{-3}$	dünnflüssig
Glycerin	1	flüssig
Polymerschmelze*	$10^1$ bis $10^6$	zähflüssig
Glas	$10^{21}$	feststoffartig

\* bei Verarbeitungstemperatur

Damit hat die Kunststoffschmelze unter Verarbeitungsbedingungen eine wesentlich höhere Viskosität als zum Beispiel Wasser.

## ■ 2.1 Strukturviskosität

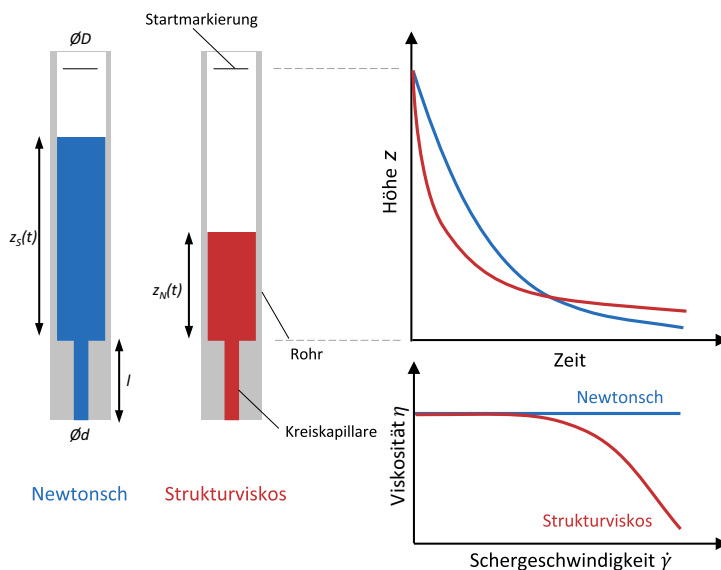
Die Viskosität  $\eta$  ist bei *newtonschen* Medien eine reine Stoffgröße und nur von dem Druck sowie der Temperatur abhängig. Bei strukturviskosen Medien wird  $\eta$  noch von der Deformationsgeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  und der Zeit  $t$  beeinflusst.

Das nachfolgende Beispiel soll exemplarisch den Unterschied zwischen einem *newtonschen* und einem strukturviskosen Medium verdeutlichen.

Dazu nutzt man zwei Glasröhrchen mit sich anschließender Kapillare gleicher Geometrie. Das linke Röhrchen wird mit einer Newton-Flüssigkeit, das andere mit einer strukturviskosen Polymerlösung gleich hoch gefüllt.

Mit einem Kugelfallviskosimeter (siehe Kapitel 7) werden zunächst die Nullviskositäten  $\eta_0$  der beiden Medien gemessen. Der Versuch zeigt, dass die Kugel in beiden Röhrchen gleich schnell sinkt, was zunächst auf eine identische Nullviskosität  $\eta_0$  ( $\eta_{0N} = \eta_{0S}$ ) hindeutet.

Lässt man nun die beiden Medien durch die Kapillaren austreten, so fließt zunächst das strukturviskose Medium schneller. Nach einer bestimmten Zeit bewegen sich beide Menisken mit gleicher Geschwindigkeit.



**Bild 2.2** Fließphänomene in einer *Newton*-Flüssigkeit und einer Polymerlösung [7] [8]

Dieses Verhalten kann wie folgt erklärt werden: Am Anfang des Versuchs ist die Flüssigkeitssäule groß. Das Gewicht der Säule erzeugt in den Kapillaren einen hohen Druck, aus dem zunächst eine hohe Strömungsgeschwindigkeit und damit

eine große Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  resultiert. Bei dem strukturviskosen Medium nimmt die Viskosität  $\eta$  mit ansteigender Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  (Strömungsgeschwindigkeit) ab. Infolgedessen strömt diese Flüssigkeit zunächst schneller als die *newtonsche* Flüssigkeit und das Röhrchen entleert sich entsprechend schneller. Durch den abnehmenden Druck strömt die Flüssigkeit bei abnehmender Füllhöhe langsamer durch die Kapillare. Die Strukturviskosität der Flüssigkeit hat zur Folge, dass mit abnehmender Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  die Viskosität  $\eta$  wieder ansteigt, bis die sogenannte Nullviskosität  $\eta_0$  erreicht wird. Eine weitere Senkung der Schergeschwindigkeit führt zu keiner weiteren Erhöhung von  $\eta$ . Ab einer bestimmten Füllhöhe ist die Geschwindigkeit (Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$ ) so klein, dass  $\eta_0$  erreicht wird. Das Absinken der Menisken ist nicht mehr abhängig von der Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  [1].

### 2.1.1 Strukturviskoses Fließverhalten von Kunststoffen

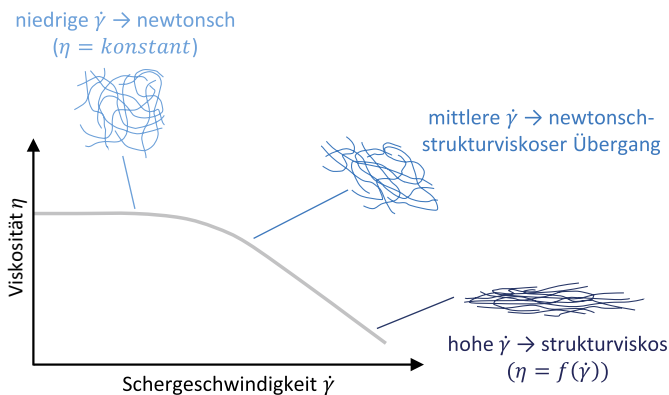
Bei Kunststoffen handelt es sich um sogenannte Makromoleküle (Polymere), die die Form einer Kette haben. Diese fadenförmigen Makromoleküle sind submikroskopisch klein und haben im ungeordneten Ruhezustand einen hydrodynamischen Durchmesser von 5 bis 50 Nanometer. Die Länge der Ketten wird durch die Anzahl der Monomereinheiten, die in der Kette enthalten sind, bestimmt. Bei Polyethylen können dies bis zu  $10^4$  Einheiten sein. Die wichtigste Größe, die die Kettenlänge wiedergibt, ist die Molmasse [5]. Je länger die Kette ist, desto größer ist die Molmasse. Nimmt man nun zum Beispiel ein Polyethylen mit einer Molmasse von 100 000 g/Mol, so haben die fadenförmigen Molekülketten im gestreckten Zustand eine Länge von ca. 1000 Nanometer und einen Durchmesser von ca. 0,5 Nanometer. Damit ergibt sich ein Längen-Durchmesser-Verhältnis von 2000. Vergleicht man das mit einer Spagetti von einem Durchmesser von einem Millimeter, so wäre diese Spagetti im Vergleich zwei Meter lang.

Im Ruhezustand suchen die Makromoleküle den Zustand der größten möglichen Entropie und liegen somit ungeordnet, d. h. knäuel förmig vor. Die Molekülketten sind ineinander verschlauft. Es wird zunächst viel Energie benötigt, um dieses Polymerknäuel zu bewegen, d. h. zum Fließen zu bringen.

Durch den Strömungsvorgang (Wandhaftung, maximale Strömungsgeschwindigkeit in der Fließkanalmitte und laminare Schichtenströmung) bewegen sich die einzelnen Flüssigkeitsschichten relativ zueinander. Bedingt durch diesen Vorgang werden zwischen den Schichten infolge der inneren Reibung, die als Dissipation bezeichnet wird, Schubspannungen übertragen.

Diese Schubspannungen wirken auf die einzelnen Polymerketten der Kunststoffschmelze und bewirken eine Ausrichtung der ungeordneten Ketten in Strömungsrichtung. 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.



**Bild 2.3** Strukturviskoses Verhalten von Kunststoffschmelzen



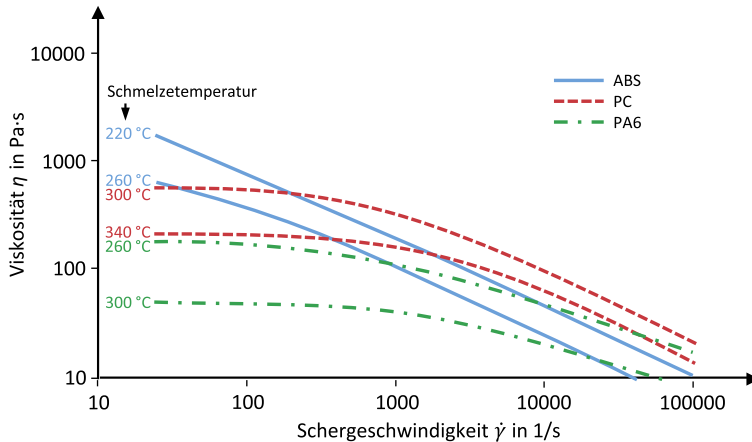
**Merke:**

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 aufweisen. 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 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 zurückzugelangen, 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,

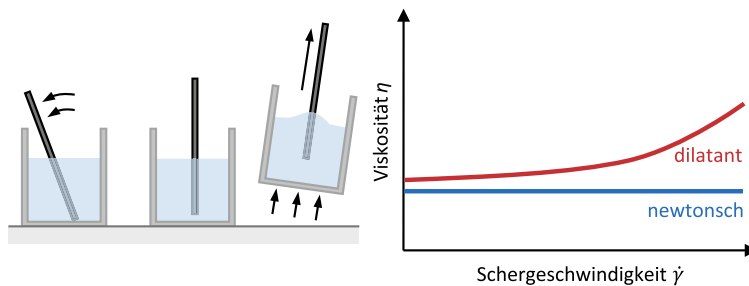
- je stärker die Molekülorientierung/-ausrichtung ist und
- je höher die Temperatur ist. Eine hohe Temperatur bedeutet eine hohe Aktivierungsenergie und damit hohe Rückstellkräfte.

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

Scherung an. Als Beispiel kann eine Stärke/H<sub>2</sub>O-Aufschlämmung in einem Laborbecher dienen. Ein darin stehender Stab mit entsprechendem Gewicht fällt bei leichter Schräglage durch sein Eigengewicht um. Zieht man den Stab schnell hoch, so verfestigt sich die Aufschlämmung so stark, dass es möglich ist, den Becher anzuheben. Einen ähnlichen Versuch haben Studenten einer Universität gemacht. Diese Studenten haben ein großes Becken mit einer dilatanten Flüssigkeit gefüllt. Bedingt durch das dilatante Verhalten der Flüssigkeit sind die Studenten in der Lage, von einer Seite zur anderen Seite über die Flüssigkeit zu laufen ohne einzusinken. Schlussendlich bleibt ein Student in der Mitte des Beckens stehen. Da er stillsteht und sich nicht bewegt, sinkt die Viskosität des Mediums und er sinkt ein.



<https://bit.ly/3fags7q>

**Bild 2.5** Rührversuch einer dilatanten Flüssigkeit (H<sub>2</sub>O-Aufschlämmung) [1]

Man nennt die Erscheinung der Viskositätserhöhung bei Vergrößerung der Schergeschwindigkeit Dilatanz. Sie tritt vorwiegend bei hochkonzentrierten Suspensionen auf. [1]



Sowohl bei der Strukturviskosität wie auch bei der Dilatanz ist die Viskosität eine Funktion der Schergeschwindigkeit.

$$\eta = f(\dot{\gamma})$$

### Beispiel für Dilatanz

Befindet sich ein dilatantes Medium zwischen zwei Scheiben, so kann dieses zur Kraftübertragung genutzt werden. Dreht sich die eine Scheibe, während die andere Scheibe steht, so wird das Medium geschert. Infolgedessen steigt die Viskosität des Mediums zwischen den Scheiben an und die Kraftübertragung auf die zweite Scheibe nimmt zu. Die Funktion ähnelt einer Kupplung.

Der US-Hersteller Dow Corning hat aus einem Silikon-Polymer einen hüpfenden Kitt mit dilatantem Verhalten entwickelt. Dieser Kitt lässt sich ganz normal kneten. Bei schlagartiger mechanischer Belastung verhält sich die Masse völlig anders. Wirft man den Kitt als Kugel auf den Boden, so springt diese wie ein Gummiball