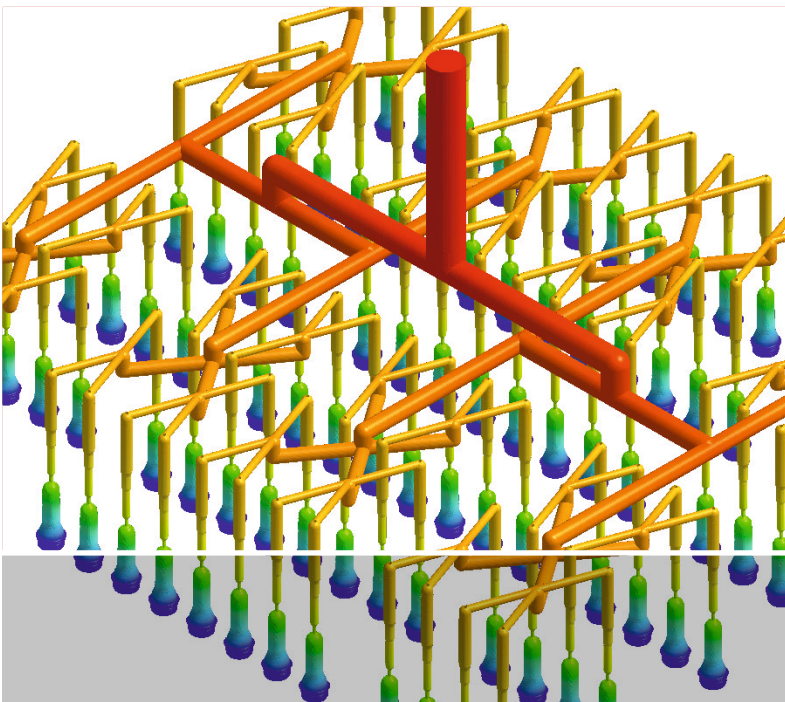


Thomas Schröder

# Rheologie der Kunststoffe

Theorie und Praxis



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

HANSER

Der Autor:

*Prof. Dr.-Ing. Thomas Schröder*, Institut für Kunststofftechnik Darmstadt ikd,  
Hochschule 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.

© 2018 Carl Hanser Verlag München

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

Herstellung: Jörg Strohbach

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

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Coverbild: Mold & Hotrunner Technology AG

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co GmbH und Co KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-45405-7

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

# 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 Vorformlügen.

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 anwendungsnahe definiert sind. Der Leser hat somit die Möglichkeit die Grundlagen zu studieren und gleichzeitig auch die gewonnenen Kenntnisse anzuwenden. Da es sich um eine Erstausgabe handelt, sind sicherlich noch Optimierungspotenziale gegeben. Gerne nehme ich Rückmeldung, die zu einer stetigen Verbesserung des Buches führen und somit den Studierenden und anderen Lesern zu Gute kommen an.

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

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

Darmstadt im Juni 2018

*Prof. Dr. Thomas Schröder*



Farbige Abbildungen siehe E-Book inside.

# Der Autor

Prof. Dr. Thomas Schröder lehrt an der Hochschule Darmstadt 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 ikt und Vorsitzender der Gesellschaft zur Förderung technischen Nachwuchses GFTN e.V., welches Institut an der Hochschule Darmstadt ist. Prof. Schröder forscht sehr intensiv im Rahmen von geförderten Drittmittelprojekten in den Bereichen Rheologie und Spritzgießen.







# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Der Autor</b> .....	<b>VII</b>
<b>Wichtige Formeln der Rheologie</b> .....	<b>XV</b>
Die Gleichungen von <i>Hagen-Poiseuille</i> .....	XV
Gleichungen für die repräsentative Schergeschwindigkeit .....	XVI
Gleichungen für die Viskositätsberechnung .....	XIV
Gleichungen für den Temperaturverschiebungsfaktor $a_T$ .....	XIV
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Wozu benötigt man die Rheologie in der Kunststofftechnik? .....	3
1.2 Computerunterstützende Simulationsprogramme zur Auslegung von Spritzgießwerkzeugen .....	7
<b>2 Rheologische Phänomene</b> .....	<b>11</b>
2.1 Strukturviskosität .....	13
2.1.1 Strukturviskoses Fließverhalten von Kunststoffen .....	14
2.2 Dilatanz .....	16
2.3 Thixotropie und Rheopexie .....	18
2.4 Grenzfließspannung und <i>Bingham</i> -Verhalten .....	20
2.5 Normalspannungen .....	23
2.5.1 Herkunft, Definition und Charakterisierung .....	23
2.5.2 Viskoelastische und Normalspannungseffekte .....	24
2.5.2.1 <i>Weissenberg</i> -Effekt .....	24
2.5.2.2 Strangschwellen (engl.: die swelling effect) .....	26
<b>3 Rheologische Grundkörper</b> .....	<b>31</b>
3.1 Der ideal elastische Festkörper .....	32
3.2 Der ideal viskose Körper ( <i>Newtonsches Fluid</i> ) .....	33
3.3 Der viskoelastische Körper .....	34
3.3.1 Allgemeiner viskoelastischer Stoff .....	37

<b>4</b>	<b>Der Scherversuch und die Herleitung des Newtonschen Reibungsgesetzes (Stoffgesetz)</b> .....	<b>39</b>
4.1	Der Scherversuch .....	39
4.2	Wichtige rheologische Stoffgesetze .....	45
<b>5</b>	<b>Strömungsarten</b> .....	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>Rheometrie-Viskosimetrie und Stoffdatenermittlung</b> .....	<b>61</b>
6.1	Anwendungsbereich der Viskosimetertypen .....	62
6.2	Voraussetzung für die Ermittlung der Stoffdaten .....	63
6.3	Fallrheometer .....	65
6.3.1	Die Ermittlung der Viskosität bei Fallrheometern über das Gesetz von <i>Stokes</i> .....	65
6.3.2	Kugelfallviskosimeter .....	67
6.3.3	Kugel im geneigten Fallrohr .....	68
6.4	Viskosaage .....	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
<b>7</b>	<b>Viskosimetrie – Einflüsse auf die rheologischen Stoffdaten ..</b>	<b>147</b>
7.1	Einfluss der Dissipation .....	147
7.2	Einfluss der Temperatur auf die Fließkurve .....	150
7.2.1	Der Temperaturverschiebungsfaktor .....	152
7.2.2	Temperaturinvariante Auftragung der Fließkurven (Masterkurven) .....	153
7.2.2.1	Beispiel einer Viskositätsermittlung für eine gewählte Schergeschwindigkeit und eine weitere Temperatur .....	156
7.2.2.2	<i>Aufgabe:</i> Gesucht ist die Viskosität für eine gegebene Schergeschwindigkeit anhand einer Masterkurve .....	157
7.2.2.3	<i>Aufgabe:</i> Übung zur Temperaturverschiebung mittels Nullviskosität .....	159
7.2.3	Mathematische Beschreibung des Temperatur- verschiebungsfaktors .....	160
7.2.3.1	<i>Arrhenius</i> -Funktion .....	161
7.2.3.2	Gleichungen von <i>Williams, Landel</i> und <i>Ferry</i> ( <i>WLF</i> -Ansatz) .....	162
7.3	Thermorheologische Größen .....	167
7.3.1	Änderungen des morphologischen Aufbaus durch Wärme ...	167
7.3.2	Füllstoffe .....	168
7.3.3	Der Druckeinfluss .....	173
7.3.4	Einfluss der mittleren Molmasse .....	176
7.3.5	Molmassenverteilung .....	182
7.3.6	Einfluss der Molmasse und der Molmassenverteilung auf das Speicher- und Verlustmodul bei der Oszillation .....	185

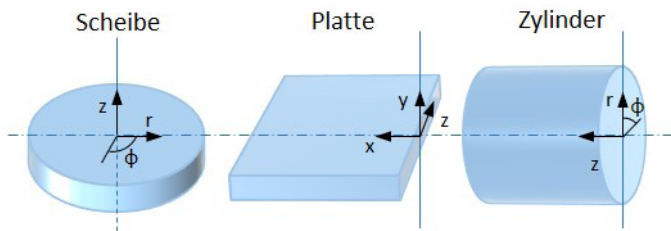
7.4	Einfluss von Restfeuchte auf die Scherviskosität . . . . .	191
7.5	<i>Aufgabe:</i> Beschreiben des Fließverhaltens mit einer „Masterkurve“ . . .	192
<b>8</b>	<b>Viskosimetrie – Mathematische Beschreibung der Fließkurve</b> . . . . .	<b>195</b>
8.1	Der Potenzansatz von <i>Ostwald</i> und <i>de-Waele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

11.2.1	<i>Aufgabe:</i> Beispielrechnungen	244
11.2.1.1	Druckverlust Plattengeometrie	244
11.2.2	<i>Aufgabe:</i> Beispielrechnung	245
11.2.2.1	Druckverlust Scheibengeometrie	245
11.2.3	Einfluss der Materialeigenschaften auf den Verarbeitungsprozess	246
11.2.4	<i>Aufgabe:</i> Druckverluste beim Spritzgießen und die daraus resultierende reale Zuhaltkraft	248
11.2.5	<i>Aufgabe:</i> Berücksichtigung der Dissipations- und 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
<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 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

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

# Wichtige Formeln der Rheologie

## ■ Die Gleichungen von *Hagen-Poiseuille*



	Scheibe	Platte	Zylinder
Fließrichtung	r	x	z
Scherrichtung	z	y	r
Dehn-, bzw. indifferente Richtung	$\phi$	z	$\phi$

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

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



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

<b>Scheibe</b>	$\frac{\Delta p}{r} = \frac{6\dot{V}\eta}{\pi R H^3}$
<b>Platte</b>	$\frac{\Delta p}{x} = \frac{12\dot{V}\eta}{B H^3}$
<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*

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

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**

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



# 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.



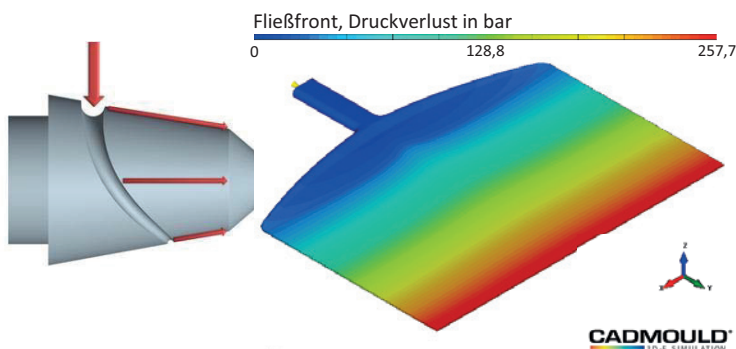
**Bild 1.3** Alltagsbeispiele aus der Rheologie

## ■ 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.

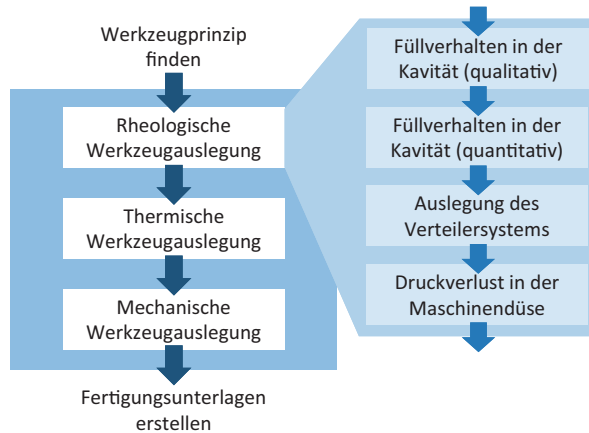


**Bild 1.4** Rheologische Balancierung eines Pinolen- und eines Breitschlitzwerkzeugs mittels Kleiderbügel

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 komplett 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 Luftpfeilschlüssen 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 Positionen von Anschnitten und die erforderlichen Schmelzeströme sowie die erforderliche Massetemperatur. Dies sind entscheidende Randbedingungen für das im dritten Schritt auszulegende Verteilungssystem. 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 Verteilungssystem 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.

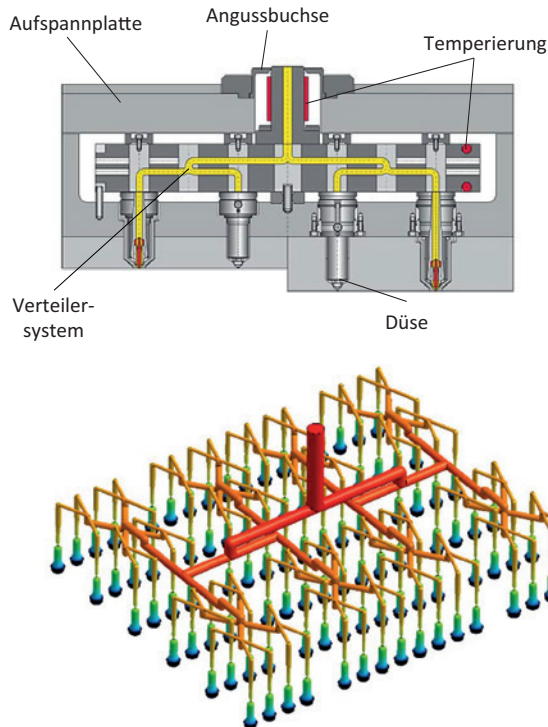
Entscheidend ist bei der Berechnung von Druckverlusten in der Maschinendüse und im Schmelzeverteilerungssystem auch die Berücksichtigung der sogenannten Einlauf- oder Dehndruckverluste. Diese entstehen immer dann, wenn eine Änderung des Strömungskanalquerschnitts (Querschnittsprung) vorliegt. So verändert 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 liegend 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. Die Massetemperatur ist bereits 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.



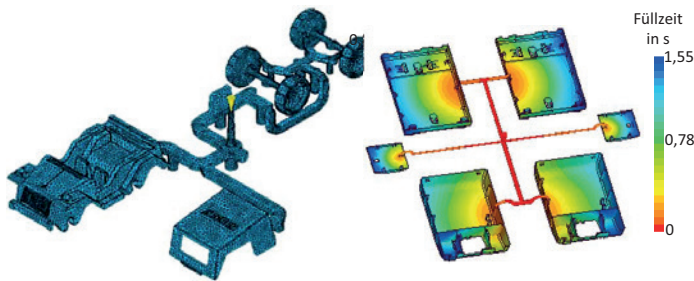
**Bild 1.6** Vielfach-Spritzgießwerkzeug mit Heißkanalverteilersystem [4] [8]

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

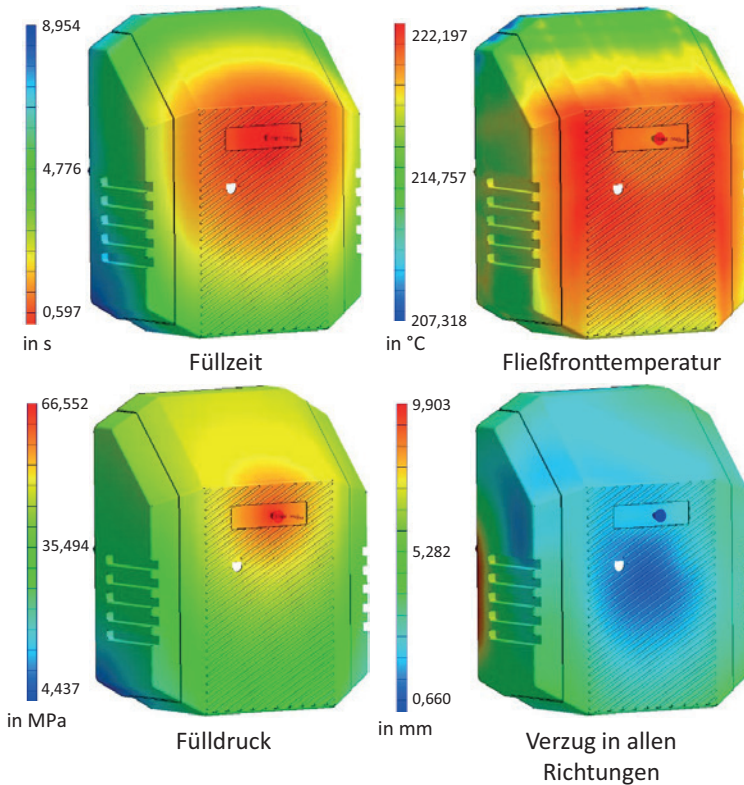
Familienwerkzeuge (siehe Bild 1.7), bei denen die Kavitäten nicht identisch sind, werden immer mathematisch rheologisch balanciert, während bei Vielfachwerkzeugen mit identischen Kavitäten die natürliche rheologische und auch die mathematische rheologische Balancierung genutzt werden kann. In der Regel 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.



**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.

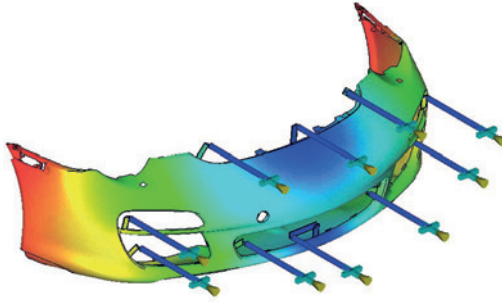


**Bild 1.8** Ergebnisse einer computerunterstützten Simulationsrechnung

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.

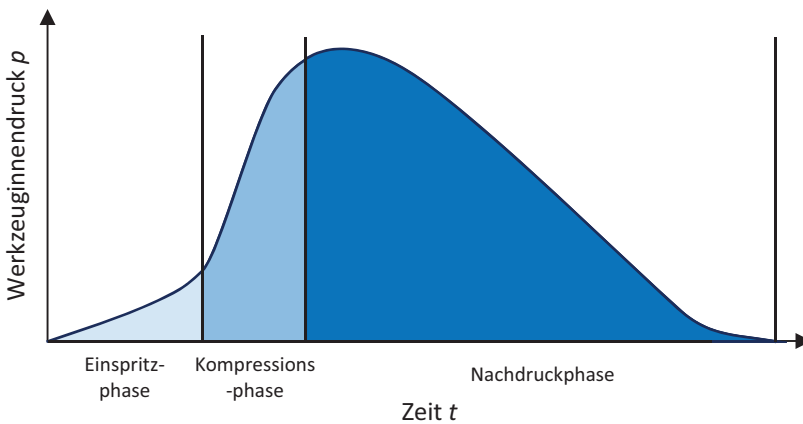
Bei komplexeren Werkzeuggeometrien (Stoßfänger, Armaturentafel etc.) erfolgt in der Regel in einer frühen Phase eine computerunterstützte rheologische Auslegung des Werkzeuges. So definiert und variiert man die Position und die Anzahl der Anspritzpunkte. Des Weiteren ermöglichen die CAD-Programme eine 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 Dynamik Feed<sup>®</sup> simulieren.

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



**Bild 1.9** Computerunterstützte Simulation eines Stoßfängers

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.



**Bild 1.10** Werkzeuginnendruckverlauf mit den Prozessphasen

**Tabelle 1.1** Formteilqualität in Abhängigkeit der Prozessphasen [5]

	Einspritzphase	Kompressionsphase	Nachdruckphase
Einflussgrößen	<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 der 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>▪ Schwimmhaut-ausbildung</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] 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] Menges, G.; Mohren, P.; Michaeli W.: Spritzgießwerkzeuge Auslegung, Bau, Anwendung, München, Carl Hanser Verlag, 2007
- [8] N.N.: MHT Mold & Hotrunner Technology AG, <http://www.mht-ag.de>

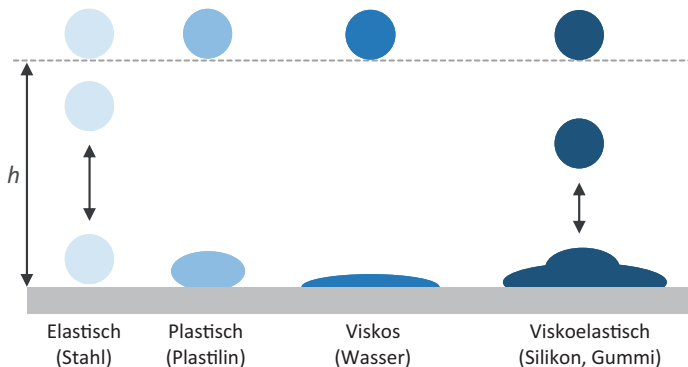
# 2

## 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]



**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 Plastilin-