

Markus Rütten

Verallgemeinerte newtonsche Fluide

Thermische und viskose
Strömungseigenschaften

EBOOK INSIDE

 Springer Vieweg

Verallgemeinerte newtonsche Fluide

Markus Rütten

Verallgemeinerte newtonsche Fluide

Thermische und viskose
Strömungseigenschaften

Markus Rütten
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Göttingen
Deutschland

ISBN 978-3-662-56225-3 ISBN 978-3-662-56226-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-56226-0>

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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 Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Nichtnewtonsche Fluide sind aus unserer technischen Umwelt nicht wegzudenken, sie gehören vielmehr zu den grundlegenden, fluidischen Materialien, die wir in unseren technischen Prozessen und den verbundenen Operationen benutzen, verbrauchen oder umwandeln. Nichtnewtonsche Fluide umfassen Flüssigkeiten unterschiedlichster Art mit sich zum Teil stark ändernden rheologischen Eigenschaften, daher gibt es für diese nicht die *eine* formale mathematisch-physikalische Beschreibung. Nicht nur deren rheologische Vielfaltigkeit sondern auch die notwendigerweise komplexe strömungsmechanische Beschreibung macht das Themengebiet der nichtnewtonschen Fluide schwierig und anspruchsvoll, daher sind solide mathematische und ingenieurtechnische Fähigkeiten notwendig, um ein vertieftes Verständnis für diese Art der Fluide zu erarbeiten.

Das Buch soll mit seinen theoretischen Grundlagen, vertiefenden analytischen Betrachtungen und anwendungsnahen Simulationsbeispielen helfen, einen Zugang zu diesem hier vorgestellten Themenfeld zu schaffen. Es richtet sich daher sowohl an Studenten der Ingenieur- und Naturwissenschaften als auch an Wissenschaftler und Ingenieure, die in Forschung und Entwicklung tätig sind. In ausführlicher Weise werden daher die mathematischen Grundlagen, die strömungsmechanischen und thermodynamischen Grundgleichungen mit ihren Zustandsgleichungen und den rheologischen Erweiterungen, und den zur Beurteilung der auftretenden Strömungsphänomene notwendigen Analysen behandelt, wobei der Bezug zur Praxis hergestellt wird. Natürlich kann ein Buch alleine nicht alle Fragen zu diesem Themenbereich beantworten, daher wird ergänzend auf federführende Literatur verwiesen, sodass der Leser weitere Orientierungen finden kann.

Dieses Buch basiert auf meiner Habilitationsschrift *Strömungsmechanik thermoviskoser verallgemeinerter newtonscher Fluide*, die an der Universität Kassel eingereicht wurde. Diese Schrift ist daraus entstanden, dass aus meiner Sicht über die Zeit eine Lücke entstanden ist, was das Gebiet der thermoviskosen verallgemeinerten Fluide angeht. Viele neuere Schriften zu den nichtnewtonschen Fluiden konzentrieren sich auf viskoelastische Fluide, da hier einerseits interessante und plakative Strömungsphänomene auftreten und andererseits eine stringente Theorie zur Beschreibung von Fluideigenschaften und deren Rückwirkung auf die Strömung zur Verfügung steht. Dahingegen ist auf dem Gebiet der nichtnewtonschen Fluide die Kopplung der rein impulsgetriebenen Strömung mit

dem Temperatur- und Wärmetransport etwas in den Hintergrund getreten. Dies liegt u.a. daran, dass schon sehr viele theoretische und analytische Arbeiten auf diesem Gebiet in den sechziger bis achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts geleistet wurden. Ausgezeichnete Werke bieten einen Einblick in die Theorie und anzuwendende Lösungsstrategien für grundlegende thermische Strömungsprobleme.

Es haben sich jedoch in der Zwischenzeit neue Möglichkeiten in den Methoden der Strömungsmechanik entwickelt. Insbesondere mit den sich schnell weiterentwickelnden, numerischen Simulationsverfahren wird dem Ingenieur oder dem Wissenschaftler ein Werkzeug in die Hand gegeben, das es ermöglicht, thermische Strömungen komplexer nichtnewtonscher Fluide in bisher nicht darstellbaren komplexen Konfigurationen zu untersuchen und notwendige Fluidmodelle für neuartige Anwendungen zu entwickeln. Damit eröffnen sich neue Anwendungs-, Entwicklungs- und Forschungspotenziale auf vielen industrie- und forschungsrelevanten Gebieten der thermoviskosen, nichtnewtonschen Fluidströmungen. Bevor jedoch speziell entwickelte, numerische Simulationsverfahren auf komplexe Strömungsprobleme angewendet werden können, sind aufwendige Verifikations- und Validierungsschritte notwendig. Daher werden in dieser Arbeit aufbauend auf den theoretischen und analytischen Betrachtungen relevanter, grundsätzlicher Strömungsprobleme entsprechende numerische Simulationsstudien vorgestellt, die sich zur Validierung eines Verfahrens eignen. Die Strömungsprobleme werden bewusst schrittweise behandelt, von der Gittergenerierung über das Aufsetzen der Simulation bis hin zur exemplarischen Analyse der Ergebnisse. Hierbei werden auch Strömungsphänomene vorgestellt, die in der neueren Literatur diskutiert werden. Damit soll dieses Buch helfen, die Lücke zwischen analytisch einfachen Beispielen und komplexen numerischen Strömungssimulationen thermischer, nichtnewtonscher Fluide zu schließen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen akademischen Lehrern bedanken, bei Herrn Prof. Dr. Gert Böhme, der mir eine bestimmte Art des strömungsmechanischen Denkens beibrachte, und bei Herrn Prof. Dr. Olaf Wünsch, der mir in Rat und Tat beiseite stand und mir wertvolle Tipps und Anregungen gab. Danken möchte ich auch meinem Kollegen Herrn Dr. Roland Kessler, der mir bei der Implementierung der notwendigen Programm-erweiterungen und Analysen immer eine starke Unterstützung und Hilfe war. Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Familie für die wertvolle Unterstützung über die lange Zeit der Fertigstellung dieser Arbeit und darüber hinaus. Zudem möchte ich dem DLR für die Unterstützung und dem Team des Springer-Verlags für die angenehme Zusammenarbeit danken.

Göttingen, im Januar 2018

Markus Rütten

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	7
2.1	Zusammenfassung	7
2.2	Kontinuum	8
2.3	Kinematik	9
2.3.1	Kinematik materieller Punkte / Fluidelemente	9
2.3.2	Kinematische Tensoren und Verformungskinetik	14
2.3.3	Fundamentaltheorem der Kinematik	20
2.3.4	Verzerrungstensoren	20
2.3.5	Der relative Deformationsgradiententensor	25
2.3.6	Verformungsmaße	32
2.3.7	Ebene Scherströmungen	36
2.3.8	Reine Dehnströmungen	40
2.3.9	Invarianten	41
2.3.10	Objektivität und Zeitableitungen	47
2.4	Dynamik	52
2.4.1	Kräfte und Spannungen	52
2.4.2	Cauchyscher Spannungstensor	54
2.4.3	Der Druck und die Cauchy-Stokes Zerlegung des Spannungstensor	56
2.4.4	Bilanzgleichungen	57
2.4.5	Das Reynoldssche Transporttheorem	58
2.4.6	Die differenzielle Formulierung oder die Divergenzform	60
2.4.7	Die Massenerhaltung	61
2.4.8	Die Impuls- bzw. Bewegungsgleichungen	62
2.4.9	Die Drallbilanz	63
2.4.10	Die Energiegleichung	63
2.5	Zustandsgleichungen	68
2.5.1	Thermische Zustandsgleichung	68
2.5.2	Kalorische Zustandsgleichung	71

2.6	Wärmetransport	72
2.6.1	Das Newtonsche Gesetz des konvektiven Wärmeübergangs	72
2.6.2	Das Fouriersche Gesetz der Wärmeleitung	73
2.6.3	Die Temperaturtransportgleichung	75
2.6.4	Der Impulsfluss, der Temperaturfluss und die Energiebilanz	76
2.6.5	Boussinesq Approximation	77
	Literatur	79
3	Rheologie – Viskosität der Fluide	83
3.1	Zusammenfassung	83
3.2	Erklärungsansätze für die Viskosität	84
3.2.1	Mikrorheologische Erklärung	84
3.2.2	Makrorheologische Erklärung	86
3.2.3	Prinzip der materiellen Objektivität	86
3.3	Klassifizierung viskoser Fluide	88
3.3.1	Dynamische Viskosität und kinematische Viskosität	88
3.3.2	Die Fließfunktion	90
3.3.3	Einteilung der nichtnewtonschen Fluide	94
3.3.4	Viskosimetrische Funktionen	95
3.4	Linear viskose Fluide – Newtonsche Fluide	96
3.4.1	Stokes'sche Hypothese	98
3.4.2	Navier-Stokes Gleichungen	99
3.4.3	Wirbelstärke-transport für newtonsche Fluide	99
3.5	Nichtlineare viskose Fluide	100
3.5.1	Reiner-Rivlin-Erickson Fluide	101
3.5.2	Thermodynamische Beschränkungen	102
3.5.3	Verallgemeinerte Newtonsche Fluide	105
3.5.4	Viskoplastische Fluide	125
3.5.5	Fluidmodelle für Suspensionen	129
3.5.6	Thixotropie und Rheopexie	132
3.5.7	Viskoelastische Fluide	137
3.5.8	Spannung bei Scherung und Dehnung	148
3.6	Zustandsabhängigkeit der Viskosität	157
3.6.1	Temperaturverhalten der Viskosität	157
3.6.2	Temperaturabhängige Viskositätsfunktionen höher viskoser Fluide	161
3.6.3	Masterkurven von Polymerlösungen	163
3.6.4	Arrhenius Gesetz	166
3.6.5	William-Landel-Ferry Gleichung	170
3.6.6	Erwärmung des Fluids durch Dissipation	174
3.6.7	Druckabhängigkeit der Viskosität	176
3.6.8	Druck- und Temperaturabhängigkeit der Viskosität	177
	Literatur	177

4 Analytische Lösungen thermischer viskoser Strömungen	183
4.1 Zusammenfassung	183
4.2 Ähnlichkeit und Kennzahlen einer Strömung	184
4.2.1 Ähnlichkeit einer Strömung	184
4.2.2 Dimensionslose Kennzahlen	187
4.2.3 Euler- und Reynoldszahl	188
4.2.4 Strouhalzahl	192
4.2.5 Grashof- und Rayleighzahl	193
4.2.6 Richardson- und Froudezahl	195
4.2.7 Prandtl- und Pécletzahl	196
4.2.8 Brinkman-, Nahme- und Graetzzahl	200
4.2.9 Nußelt- und Biotzahl	204
4.2.10 Stanton- und Fourierzahl	208
4.2.11 Deborah- und Weissenbergzahl	210
4.3 Ebene Schichtenströmungen	212
4.3.1 Die klassischen Grenzschichtgleichungen	212
4.3.2 Integrale Impulsmethode nach von Kármán und Pohlhausen	219
4.3.3 Die Blasius Grenzschichtgleichung	222
4.3.4 Die Falkner-Skan Gleichung	225
4.3.5 Die Grenzschichtgleichung für Power-Law Fluide	227
4.3.6 Die Grenzschichtgleichung für ein Carreau Fluid	231
4.3.7 Ebene thermische Plattenströmung	239
4.3.8 Ebene Kanalströmung	248
4.3.9 Ebene Druckschleppströmung	250
4.3.10 Thermische Druckschleppströmung	253
4.3.11 Thermoviskose, ebene Couette-Strömung	254
4.3.12 Thermostrukturviskose, ebene Couette-Strömung	256
4.4 Rohrströmungen	261
4.4.1 Geschwindigkeitsfelder in Rohrströmungen	261
4.4.2 Volumenstrom der Rohrströmungen verallgemeinerter newtonscher Fluide	265
4.4.3 Zerlegung des Volumenstroms in newtonsche und nichtnewtonsche Anteile	270
4.4.4 Die Mooney-Rabinowitsch Gleichung	271
4.4.5 Druckverlust der Rohrströmung verallgemeinerter newtonscher Fluide	274
4.4.6 Thermische Rohrströmung	275
4.4.7 Thermoviskose Rohrströmung	288
4.4.8 Thermische strukturviskose Rohrströmung	292
4.5 Taylor-Couette Strömungen	297
4.5.1 Newtonsche Taylor-Couette Strömung	298
4.5.2 Taylor-Couette Strömung des Power-Law Fluids	302

4.6	Radiale Spaltströmungen	305
4.6.1	Radiale Spaltströmung des verallgemeinerten newtonschen Fluids	307
4.6.2	Newtonsche radiale Spaltströmung	309
4.7	Die Kegel-Platten Strömung	310
4.7.1	Die allgemeine Kegel-Platten Strömung	311
4.7.2	Die Kegel-Platten Strömung eines Power-Law Fluids	313
4.7.3	Die Kegel-Platten Strömung des Bingham Fluids	315
	Literatur	318
5	Numerische Simulation thermischer, strukturviskoser Strömungen	321
5.1	Zusammenfassung	321
5.2	Simulationsumgebung	322
5.2.1	Das numerische Simulationsverfahren	323
5.3	Numerische Modellierung von Stoff- und Zustandsgleichungen	329
5.3.1	Implementierung nichtnewtonscher Fluidmodelle	329
5.3.2	Gitterauflösung für thermische strukturviskose Strömungen	331
5.3.3	Die notwendige Einlaufänge für Strömungen thermischer, strukturviskoser Fluide	333
5.3.4	Die verwendeten Fluidmodelle	334
5.3.5	Validierung mit Hilfe integraler Größen	337
5.4	Thermische Schichtenströmungen	342
5.4.1	Ebene Kanalströmung	342
5.4.2	Thermostrukturviskose Rohrströmung	344
5.4.3	Taylor-Couette Strömungen	346
5.5	Kontraktionsströmungen	351
5.5.1	Die 4:1 Kontraktionsströmung	351
5.5.2	Die 1:3 Expansionsströmung	354
5.5.3	Die Blendenströmung	359
5.6	Nachlaufströmungen	372
5.7	Strömungsteiler	382
	Literatur	390
6	Zusammenfassung und Ausblick	393
7	Mathematische Hilfsmittel	397
7.1	Tensorrechnung	397
7.2	Ableitungen	398
7.3	Benutzte Vektoridentitäten und Umformungen	400
7.4	Integralsätze	401
7.5	Integrationsregeln	402
7.6	Deutung vektoranalytischer Terme der Erhaltungsgleichungen	402
7.7	Isotrope Tensoren	402

7.8	Isotrope Tensorfunktionen	402
	Literatur	404
8	Koordinatensysteme	405
8.1	Kartesische Koordinaten	405
8.2	Zylinderkoordinaten	406
8.3	Kugelkoordinaten	408
8.4	Differenzialgeometrie	409
8.5	Frenetsche Formeln	411
8.6	Partikeltrajektorie im Frenetschen Dreibein	414
8.7	Deformation im lokalen, mitgeführten Koordinatensystem	415
8.8	Verformungsbeschleunigung	418
	Literatur	420
	Stichwortverzeichnis	421

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Invarianten spezieller Strömungen	44
Tab. 2.2	Scherraten und Dehnraten für gemischte Strömungsformen	45
Tab. 2.3	Parametrische Klassifizierung von Dehnströmungen	46
Tab. 3.1	Temperaturabhängige Viskositätsfunktionen	162
Tab. 4.1	Definitionen der Taylorzahl	301
Tab. 5.1	Modellierungsansätze für Extrapannungstensoren	330
Tab. 5.2	Modellierungsansatz für Baysilon M100000	335
Tab. 5.3	Validierung der Rohrströmung des Carreau Fluids	340
Tab. 5.4	Validierung der Spaltströmung des Carreau Fluids	342
Tab. 5.5	Validierung der Rohrströmung des Ellis Fluids	345
Tab. 5.6	Geometriered Ablösung	355
Tab. 5.7	Längen der Ablöseblasen der Expansionsströmung des newtonschen und Carreau Fluids	358
Tab. 5.8	Längen der Ablöseblasen der Blendenströmung des newtonschen und Carreau Fluids	365
Tab. 5.9	Variation der Wandtemperatur der Blendenströmung des Carreau Fluids	369
Tab. 5.10	Dimensionslose Frequenz der Wirbelstraße der untersuchten Fluide . . .	377
Tab. 5.11	Dimensionen der Ablösung der gemittelten Strömung der untersuchten Fluide	382
Tab. 5.12	Strömungssteuernder Temperatureinfluss auf den Massenstrom für das newtonsche und Carreau Fluid	387
Tab. 7.1	Tensorrechnung	398
Tab. 7.2	Differenzialoperatoren	399
Tab. 7.3	Vektoranalytische Terme	403

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Veranschaulichung der Kinematik der Bewegung	10
Abb. 2.2	Darstellung der Winkel an den Linienelementen	16
Abb. 2.3	Kettenregel der Deformationsgradienten nach [6]	25
Abb. 2.4	Veranschaulichung des relativen Deformationsgradienten	26
Abb. 2.5	Skizze zur Hintereinanderschaltung von Tensoren	29
Abb. 2.6	Schematische Darstellung der Schergeschwindigkeit	34
Abb. 2.7	Uniaxiale Dehnung des zylindrischen Fluidelementes	36
Abb. 2.8	Links: Geschwindigkeitsprofil der einfachen ebenen Scherströmung, rechts: Stromlinien zeigen ableitende Scherschichten	37
Abb. 2.9	Geschwindigkeitsprofile (links) und Stromlinien (rechts) der radialen ebenen Scherströmung	37
Abb. 2.10	Ebene Couetteströmung	38
Abb. 2.11	Schematische Darstellung der prinzipiellen Dehnströmungen nach [15]	42
Abb. 2.12	Schranken für Strömungsarten im Invariantenraum	44
Abb. 2.13	Klassifizierung der Dehnströmungen nach dem Dehnparameter	46
Abb. 2.14	Einteilung der Kräfte	52
Abb. 2.15	Tetraedisches Volumenelement und zugehörige Oberflächenkräfte	54
Abb. 2.16	Der Mohrsche Spannungskreis	55
Abb. 2.17	Transport durch Volumenverschiebung	60
Abb. 2.18	Schema des Wärmeüberganges und der Wärmeleitung durch eine Wand nach [34]	74
Abb. 3.1	Veranschaulichung der linearen Viskosität	89
Abb. 3.2	Prinzipieller Verlauf von Fließkurven, 1- newtonsches Fluid, 2 – strukturviskoses bzw. scherentzähendes Fluid, 3 – dilatantes bzw. scherverzähendes Fluid, 4- Fluid mit Fließgrenze . .	92

Abb. 3.3	Prinzipieller Verlauf von Viskositätskurven, 1- newtonsches Fluid, 2 – strukturviskoses bzw. scherentzähendes Fluid, 3 – dilatantes bzw. scherverzähendes Fluid, 4- Fluid mit Fließgrenze . . .	92
Abb. 3.4	Prinzipielle Fließkurven, Zusammenhang der Spannung, Viskositäten und Scherrate für ein dilatantes, newtonsches und strukturviskose Fluid	93
Abb. 3.5	Einteilung der Stoffe nach [52]	93
Abb. 3.6	Viskositätsverhalten des scherentzähenden Power-Law Fluids	108
Abb. 3.7	Viskositätsverhalten des scherverdickenden Power-Law Fluids	108
Abb. 3.8	Verschiebung der Viskositätskurve durch Variation des Konsistenzparameters	109
Abb. 3.9	Konsistenzparametervariation bei scherverdickenden Power-Law Fluiden, Fließindex $n = 2$	109
Abb. 3.10	Viskositätskurven des Prandtl-Eyring Modells in Abhängigkeit der Zeitkonstante λ	110
Abb. 3.11	Beispielviskositätskurven des Powell-Eyring Modells	111
Abb. 3.12	Viskositätskurven für Fluidmodelle in logarithmischer Auftragung . . .	112
Abb. 3.13	Viskositätskurven des Cross Fluidmodells in Abhängigkeit des Fließindex	113
Abb. 3.14	Eigenschaften des Ellis Fluidmodells	113
Abb. 3.15	Variation des Fließindex für das Ellis Fluidmodell	114
Abb. 3.16	Cross und Ellis Fluidmodell im Vergleich, gleiche Fluidparameter	114
Abb. 3.17	Modifikation des Übergangparameters α für das Yasuda Fluidmodell, $\lambda = 0,31$ s, $n = 0,2$	116
Abb. 3.18	Viskositätskurven für ein Yasuda und Carreau Fluidmodell, $\lambda = 0,05$ s, $\alpha = 3$, $n = 0,2$	118
Abb. 3.19	Modifikation des Fließindex n für das Carreau Fluidmodell $\lambda = 0,05$ s	119
Abb. 3.20	Experimentell bestimmte Viskositätskurven wäßriger Polymerlösungen nach [102]	119
Abb. 3.21	Experimentell bestimmte Viskositätskurven ausgesuchter Polymerlösungen, die durch ein Carreau-Yasuda Modell beschrieben werden [10]	120
Abb. 3.22	Experimentell bestimmte Viskositätskurven einer linearen monodispersen Polystyren-1-Chloronaphthalen-Lösung, die mit Hilfes eines Carreau-Yasuda Modells angenähert werden [10]	120
Abb. 3.23	Experimentell bestimmte Viskositätskurven ausgesuchter Polymerschmelzen, die mit dem Carreau Modell abgebildet werden können [10].	121
Abb. 3.24	Grafische Veranschaulichung des vereinfachten Carreau-Ansatzes	121
Abb. 3.25	Prinzipielle Geschwindigkeitsprofile für newtonsche, dilatante und strukturviskose Fluidmodelle bei einer Schichtenströmung für ein Power-Law Fluid	124

Abb. 3.26	Geschwindigkeitsprofile für das Ostwald – de Waale Fluidmodell für verschiedene Fließindizes bei einer Schichtenströmung	124
Abb. 3.27	Prinzipieller Spannungsverlauf eines Bingham Fluids im Vergleich zum newtonschen Fluid	126
Abb. 3.28	Grafische Veranschaulichung des prinzipiellen Spannungsverlaufs und des Geschwindigkeitsprofils des Bingham Fluids	126
Abb. 3.29	Prinzipieller Spannungsverlauf über der Scherrate für modifizierte Bingham Fluidmodelle	127
Abb. 3.30	Prinzipielle Spannungsverläufe über der Scherrate für modifizierte Herschel-Buckley Fluidmodelle	128
Abb. 3.31	Experimentell bestimmte Viskositätskurve von Blutersatz, 65 % Wasser, 35 % Glycerin, 0,02 % Xanthumgummi (% in Massenanteil) nach [4]	129
Abb. 3.32	Grafische Veranschaulichung des zeitabhängigen „Gedächtnisses“ des Fluidverhaltens bei zeitlich konstanter Scherrate thixotroper und rheopexer Fluide	133
Abb. 3.33	Prinzipieller Viskositätsverlauf bei thixotropem Verhalten	133
Abb. 3.34	Prinzipieller Viskositätsverlauf bei rheopexem Verhalten	135
Abb. 3.35	Prinzipieller Viskositätsverlauf bei partiell, thixotropem und rheopexem Verhalten	135
Abb. 3.36	Grafische Veranschaulichung des prinzipiellen Zeitverlaufs des Elastizitätsmoduls $G(t)$ und der Relaxationszeit λ bei plötzlicher wirkender Schubverformung	140
Abb. 3.37	Veranschaulichung des Maxwell-Modells mit Hilfe eines Federdämpfersystems	143
Abb. 3.38	Veranschaulichung des Jeffrey-Modells mit Hilfe eines Federdämpfersystems	144
Abb. 3.39	Prinzipielle Viskositätsfunktionen einer Polymerschmelze, z. B. Polyethylene niedriger Dichte, bei Dehnung und Scherung nach Cogswell [24] und Laun und Münstedt [55], das Troutonverhältnis von 3 gilt nur für den newtonschen Bereich beider Viskositätsfunktionen.	149
Abb. 3.40	Experimentell bestimmte Viskositätskurven eines wäßrigen hm-Acrylcopolymers, 0,6 wt %, [51]	150
Abb. 3.41	Transformationsdiagramm, (\mathbf{Q} bezeichnet hier die Transformationsmatrix, da \mathbf{T} im Kontext den Spannungstensor darstellt.)	155
Abb. 3.42	Experimentell bestimmte Temperaturabhängigkeit der Fließkurve einer 1000 ppm Metallocenen-Polyethylenschmelze (mllpde) [62]	159

Abb. 3.43	Beispielhafte Darstellung des temperaturabhängigen Abfalls der Viskosität für $\eta(T) = Ae^{(\frac{B}{T})}$, $A = 1,2$ Pas, in Abhängigkeit vom Parameter B	160
Abb. 3.44	Temperaturabhängigkeit der Viskosität bei Polymeren [52]	161
Abb. 3.45	Temperaturabhängigkeit der Viskosität im Vergleich, berechnet nach der De Guzman, Vogel und Walther Gleichung	162
Abb. 3.46	Temperaturabhängigkeit des normierten logarithmischen Viskositätsverlaufes, Variation des Verschiebungsfaktors a_T , $\eta_0 = 96,5$ Pas, Konsistenzparameter $K = 20$ s	166
Abb. 3.47	Temperaturabhängigkeit des normierten logarithmischen Viskositätsverlaufes, Variation des Konsistenzparameters K , $\eta_0 = 96,5$ Pas, Verschiebungsfaktor $a_T = 0,5$	166
Abb. 3.48	Viskositätskurven eines Cellulose-Acetat-Butyrat (CAB) zur Bestimmung der Masterkurve, [64]	167
Abb. 3.49	Darstellung des Zeit-Temperatur Verschiebungsprinzips nach [61]	167
Abb. 3.50	Temperaturabhängigkeit des Verschiebungsfaktors a_T für eine jeweils konstante Aktivierungsenergie und gegebener universeller Gaskonstante, $T_{ref} = 290$ K	168
Abb. 3.51	Temperaturabhängigkeit des Verschiebungsfaktors a_T je nach Modellierungsansatz	171
Abb. 3.52	Temperaturabhängigkeit der Verschiebungsfaktoren a_T für die modifizierten WLF Gleichungen im Vergleich, dargestellt über der Temperatur	173
Abb. 3.53	Unterschiedliche Verläufe des Verschiebungsfaktors a_T je nach Materialgruppe [34]	174
Abb. 4.1	Skizzierte Entwicklung des Grenzschichtgeschwindigkeitsprofils	213
Abb. 4.2	Veranschaulichung der Grenzschicht-, Verdrängungs- und Impulsverlustdicken	218
Abb. 4.3	Veranschaulichung der Verdrängungsdicke	219
Abb. 4.4	Ähnlichkeitsgeschwindigkeitsprofil für eine ebene Plattenströmung	225
Abb. 4.5	Einfluss des Fließindex des Ostwald-de Waale Fluids auf das Geschwindigkeitsprofil einer ebenen Kanalströmung, $h = 1$ m, $\partial p / \partial x = 4$ Pa/m	250
Abb. 4.6	Druckverluste in Abhängigkeit des Volumenstroms	274
Abb. 4.7	Bilanz des Wärmeflusses für das radiale Rohrabschnittelement	278
Abb. 4.8	Skizze zur Wärmeflussbehandlung im Rohr	278
Abb. 4.9	Skizze zur radialen Spaltströmung nach [9]	305
Abb. 4.10	Skizze zur Kegelplattengeometrie	310
Abb. 5.1	Visualisierung des primären Rechengitters in schwarz und des dualen CFD Simulationsgitters in rot	324

Abb. 5.2	Ausschnitt des CFD – Gitters für die Validierungssimulation nach [41], zusätzlich eingetragene thermische Randbedingungen für die spätere Validierung	339
Abb. 5.3	Geschwindigkeitsprofile des Rohrströmungsvalidierungsfalles nach Sochi	340
Abb. 5.4	Minimales Gitter für die periodische, ebene Couette-Strömung	343
Abb. 5.5	Fließkurve des in der Validierung benutzten Power-Law Fluids, Konsistenzparameter $K = 607,58 \text{ Pas}^n$, Fließindex $n = 0,3162$	344
Abb. 5.6	Temperatur- und Geschwindigkeitsverlauf des Validierungsfalles nach Bognár [6]	344
Abb. 5.7	Viskositätskurve des verwendeten Ellis Fluidmodells	345
Abb. 5.8	CFD – Gitter für die Simulation der Taylor-Couette Strömung, Längsschnitt mit thermischen Randbedingungen	347
Abb. 5.9	CFD – Gitter für die Simulation der Taylor-Couette Strömung, Querschnitt	348
Abb. 5.10	LIC Visualisierung der Strömung im Mittel- und Querschnitt, Temperatur des beheizten Wandausschnittes 463,15 K, Sekundärströmungen lassen sich anhand der Wirbelstruktur identifizieren, Farbkonturplot der lokalen Reynoldszahl	349
Abb. 5.11	LIC Visualisierung der Strömung im Mittel- und Querschnitt, Temperatur des beheizten Wandausschnittes 463,15 K, Sekundärströmungen werden anhand der Wirbelstruktur identifiziert, Graustufenbild der lokalen Viskosität	350
Abb. 5.12	LIC Visualisierung der Strömung im Detailausschnitt, Temperatur des beheizten Wandausschnittes 463,15 K, Sekundärströmungen können anhand der Wirbelstruktur identifiziert werden	350
Abb. 5.13	Sekundärströmung, Verlauf der Axialgeschwindigkeitskomponente der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Wandtemperatur	351
Abb. 5.14	Ausschnitt des CFD – Gitters für die Simulation einer Kontraktionsströmung, Gitterausschnitt	352
Abb. 5.15	Variationen der Fluideigenschaften des scherenzähenden und dehnverzähenden Carreau Fluids der Kontraktionsströmung nach Niedziela [29]	353
Abb. 5.16	Ausschnittsansicht: Strömungsstruktur und Eckenwirbel der Kontraktionsströmung des newtonschen Fluids, LIC Visualisierung . . .	353
Abb. 5.17	Ausschnittsansicht: Strömungsstruktur und Eckenwirbel der scherverdünnenden Kontraktionsströmung mit einem Carreau Fluidmodell, $\eta_0 = 10 \text{ Pas}$, $\lambda = 1,0 \text{ s}$, $n = 0,2$, LIC Visualisierung . . .	354

Abb. 5.18	Ausschnittsansicht: Strömungsstruktur und Eckenwirbel der scherverdünnenden Kontraktionsströmung mit einem Carreau Fluidmodell, $\eta_0 = 10 \text{ Pas}$, $\lambda = 1,0 \text{ s}$, $n = 0,2$, LIC Visualisierung . . .	354
Abb. 5.19	Skizze der Ablöse- und Wirbeleffekte bei einer Expansionsströmung . .	356
Abb. 5.20	CFD – Gitter für die Simulation einer Expansionsströmung, Gitterausschnitt	356
Abb. 5.21	1 : 3 Expansionsströmung des newtonschen Fluids, $\eta_0 = 100 \text{ Pas}$, LIC Visualisierung des Geschwindigkeitsfeldes, Konturverlauf des Geschwindigkeitsbetrages	357
Abb. 5.22	1 : 3 Expansionsströmung des scherentzähenden Carreau Fluids, LIC Visualisierung des Geschwindigkeitsfeldes, log. Konturverlauf des Betrages der allg. Scherrate	358
Abb. 5.23	1 : 3 Expansionsströmung des scherentzähenden Carreau Fluids, log. Konturverlauf der allg. Scherrate	358
Abb. 5.24	CFD – Gitter für die Simulation einer Kontraktionsströmung durch eine Engstelle bzw. Lochblende, Gitterausschnitt	360
Abb. 5.25	Viskositätskurven des newtonschen und scherratenabhängigen scherentzähenden Carreau Fluids der Blendenströmung	361
Abb. 5.26	Blendenströmung des newtonschen Fluids, Strömungsfeld mit Hilfe der Line Integration Convolution Technik für das Geschwindigkeitsfeld visualisiert, farbliche Konturierung mit dem Geschwindigkeitsbetrag	361
Abb. 5.27	Blendenströmung des scherentzähenden Carreau Fluids, Strömungsfeld mit Hilfe der Line Integration Convolution Technik visualisiert, farbliche Konturierung mit dem Geschwindigkeitsbetrag	362
Abb. 5.28	Blendenströmung des scherentzähenden Carreau Fluids, Strömungsfeld wird mit Hilfe der Line Integration Convolution Technik visualisiert, die Scherrate ist graustufig konturiert dargestellt	362
Abb. 5.29	Blendenströmung des scherentzähenden Carreau Fluids, Strömungsfeld mit Hilfe der LIC Technik für das Geschwindigkeitsfeld visualisiert, die lokale Viskosität ist graustufig konturiert dargestellt	363
Abb. 5.30	Blendenströmung des scherentzähenden Carreau Fluids, als überhöhter Graustufenplot wird die lokale Reynoldszahl dargestellt, Gitterausschnitt	363
Abb. 5.31	Blendenströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, wobei die obere stromab gelegene Wand beheizt ist, das Geschwindigkeitsfeld wird mit Hilfe	

	der Line Integration Convolution Technik visualisiert, die Temperaturkontur ist in Graustufen dargestellt, Gitterausschnitt	364
Abb. 5.32	Blendenströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, wobei die obere, stromab gelegene Wand beheizt ist, als Farbkonturplot wird die lokale Reynoldszahl dargestellt, Gitterausschnitt	365
Abb. 5.33	Blendenströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, wobei die obere stromab gelegene Wand beheizt ist, in überhöhter Graustufenkonturierung wird die lokale Prandtlzahl dargestellt, Gitterausschnitt	366
Abb. 5.34	Blendenströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, wobei die obere stromab gelegene Wand beheizt ist, in überhöhter Graustufenkonturierung wird der lokale Temperaturviskositätsverschiebungsfaktor dargestellt, Gitterausschnitt	367
Abb. 5.35	Blendenströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, wobei die obere stromab gelegene Wand beheizt ist, Graukonturplot der lokalen Nahmezahl, Gitterausschnitt . .	368
Abb. 5.36	Variante 1: Blendenströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, wobei jeweils die stromab gelegene obere und untere Wand, $T_u = 483, 15 \text{ K}$ und $T_o = 423, 15 \text{ K}$, beheizt werden, Farbkonturplot des Geschwindigkeitsbetrages, Gitterausschnitt	369
Abb. 5.37	Variante1: Blendenströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, wobei jeweils die stromab gelegene obere und untere Wand, $T_u = 483, 15 \text{ K}$ und $T_o = 423, 15 \text{ K}$, beheizt werden, Farbkonturplot der lokalen Prandtlzahl, Gitterausschnitt	369
Abb. 5.38	Variante 2: Blendenströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, wobei jeweils die stromab gelegene obere und untere Wand, $T_u = 423, 15 \text{ K}$ und $T_o = 483, 15 \text{ K}$, beheizt werden, Farbkonturplot des Geschwindigkeitsbetrages, Gitterausschnitt	370
Abb. 5.39	Variante 2: Blendenströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, wobei jeweils die stromab gelegene obere und untere Wand, $T_u = 423, 15 \text{ K}$ und $T_o = 483, 15 \text{ K}$, beheizt werden, Farbkonturplot der lokalen Prandtlzahl, Gitterausschnitt	370
Abb. 5.40	Zeitschrieb der instationär schwankenden Temperatur an einem Sensorpunkt im Blendennachlauf für die zwei Simulationsfälle, mit oberer beheizter Wand und oben und unten beheizter Wand	371

Abb. 5.41	CFD - Gitter für die Simulation der Zylindernachlaufströmung, Gitterausschnitt	372
Abb. 5.42	Fließkurve des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids für die Zylinderumströmungssimulation	373
Abb. 5.43	Zylinderumströmung des newtonschen Fluids, beheizte Wand, LIC Visualisierung des Strömungsfelds, Temperatur als Konturplot in Graustufen	374
Abb. 5.44	Zylinderumströmung des scherentzähenden Carreau Fluids, unbeheizte Wand, LIC Visualisierung des Strömungsfelds, allg. Scherrate als farblicher Konturplot	375
Abb. 5.45	Zylinderumströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, beheizte Wand, LIC Visualisierung des Strömungsfelds, Temperaturverlauf als graustufiger Konturplot	375
Abb. 5.46	Zeitschrieb der instationär schwankenden Stromabgeschwindigkeit an einem Sensorpunkt im Nachlauf der Zylinderumströmung	376
Abb. 5.47	Daten der Frequenzanalyse der instationär schwankenden Stromabgeschwindigkeit an einem Sensorpunkt im Nachlauf der Zylinderumströmung	376
Abb. 5.48	Zylinderumströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, beheizte Wand, LIC Visualisierung des Strömungsfelds, allg. Scherrate als Graustufenkonturplot	377
Abb. 5.49	Zylinderumströmung des scherentzähenden Carreau Fluids, unbeheizte Wand, lokale Reynoldszahl zu einem Zeitpunkt als farblicher Konturplot	378
Abb. 5.50	Zylinderumströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, beheizte Wand, lokale Reynoldszahl zu einem Zeitpunkt als farblicher Konturplot	379
Abb. 5.51	Zylinderumströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, beheizte Wand, lokale Prandtlzahl zu einem Zeitpunkt als graustufiger Konturplot	380
Abb. 5.52	Zylinderumströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, beheizte Wand, der temperaturbedingte Viskositätsverschiebungsfaktor zu einem Zeitpunkt als farblicher Konturplot	380
Abb. 5.53	Gemittelttes Geschwindigkeitsfeld der Zylinderumströmung im Fall des scherentzähenden Carreau Fluids, unbeheizte Wand, LIC Visualisierung des gemittelten Strömungsfelds, gemittelte Geschwindigkeit als Graustufenkonturplot	381

Abb. 5.54	Gemittelttes Geschwindigkeitsfeld der Zylinderumströmung im Fall des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, beheizte Wand, LIC Visualisierung des gemittelten Strömungsfelds, gemittelte Geschwindigkeit als Graustufenkonturplot .	381
Abb. 5.55	CFD – Gitter für die Simulation einer sich teilenden Kanalströmung, Gitterausschnitt	382
Abb. 5.56	Keilströmung des newtonschen Fluids, Stromlinien und Geschwindigkeitsbetrag als Konturplot	384
Abb. 5.57	Keilströmung des scherentzähenden Carreau Fluids, unbeheizter Kanal, Stromlinien und Geschwindigkeitsbetrag als Konturplot	384
Abb. 5.58	Keilströmung des scherentzähenden Carreau Fluids, unbeheizter Kanal, LIC Visualisierung des Scherratengradienten, Scherrate als Konturplot	385
Abb. 5.59	Keilströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, untere Kanalwand, beheizt, Stromlinien zeigen Asymmetrie der Strömung, Temperaturverteilung als farblicher Konturplot	385
Abb. 5.60	Keilströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, untere Kanalwand beheizt, Stromlinien und Geschwindigkeitsbetrag als Konturplot	386
Abb. 5.61	Keilströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, untere Kanalwand beheizt, LIC Visualisierung des Strömungsfelds, allg. Scherrate als farblicher Konturplot	386
Abb. 5.62	Keilströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, untere Keilwand beheizt, Stromlinien zur Visualisierung des Strömungsfelds, Geschwindigkeitsbetrag als graustufiger Konturplot	387
Abb. 5.63	Keilströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, untere Keilwand beheizt, LIC Visualisierung des Strömungsfelds, allg. Scherrate als farblicher Konturplot	388
Abb. 5.64	Keilströmung des temperaturabhängigen, scherentzähenden Carreau Fluids, untere Keilwand beheizt, LIC Visualisierung des Scherratengradienten, Gradient der Scherrate als Konturplot	388
Abb. 8.1	Schematische Darstellung einer Raumkurve mit Schmiegekreis	411
Abb. 8.2	Scherströmung zwischen zwei Platten	416

Abkürzungsverzeichnis

BDF	Backward Difference Formula
CDS	Central Differencing Scheme
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant Friedrich Lewy
DFM	Deformation Field Method
FV	Finite Volumen
FVM	Finite Volumen Methode
LDPE	high density polyethylene
LDPE	low density polyethylene
LIC	Line Integration Convolution
LLDPE	linear low density polyethylene
MPI	Message Passing Interface
OpenFOAM	Open Source Field Operation and Manipulation
PA	Polyamid
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
QUADS	Quadratic Upwind Differencing Scheme
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
THETA	Thermal Heat release Extension of TAU

UDS	Upwind Differencing Scheme
VFT	Vogel-Fulcher-Tammann
WLF	William Landel Ferry
WRMS	Weissenberg, Rabinowitsch, Mooney, Schofield

Symbolverzeichnis

A	Matrix, Tensor 2. Stufe
α	Fließexponent
α	Wärmeübergangskoeffizient
a_T	Viskositätsverschiebungsfaktor
a	thermische Diffusivität, Temperaturleitfähigkeit
a	Beschleunigungsvektor
B	Linker Cauchy-Green Verzerrungstensor
\mathcal{B}	materieller Körper
β	thermischer Expansionskoeffizient
Bi	Biotzahl
Br	Brinkmanzahl
\mathbf{B}^{-1}	Greenscher Verformungstensor
C	Rechter Cauchy-Green Verzerrungstensor
χ	topologische Abbildung, Konfiguration des Körpers
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konst. Druck
\mathbf{C}_t	Relativer Rechter Cauchy-Green Verzerrungstensor
\mathbf{C}^{-1}	Piola Verformungstensor
Cu	Carreazahl
c_v	spezifische Wärmekapazität bei konst. Volumen
dA	differenzielles Flächenelement (Maß)
D	Verzerrungsgeschwindigkeitstensor, Deformationsgeschwindigkeitstensor
$\frac{D}{Dt}$	substantielle Zeitableitung
$\frac{d}{dt}$	lokale, raumfeste Zeitableitung
De	Deborahzahl
δ	differenzielle Änderung entlang eines Weges
Δ	kovariante Oldroydableitung

δ	allgemeine Ableitungsoperation
div	Divergenzoperator (raumfest)
d	differenzielle Änderung
∂	partielle Ableitung
Dt	substantielles Zeitelement
dV	differenzielles Volumenelement
$d\mathbf{A}$	differenzielles Flächenelement
$d\mathbf{r}$	Lageänderung, gerichtetes Linienelement
$D\mathbf{v}$	substantielles Geschwindigkeitselement
$d\mathbf{X}$	materielles Linienelement der Referenzkonfiguration
$d\mathbf{x}$	lokales Linienelement
\mathbf{e}_v	Eigenvektor
\mathbf{E}	Almansi Verzerrungstensor
Ec	Eckertzahl
e_i	spezifische innere Energie
E_i	innere Energie, innere Gesamtenergie
e_k	spezifische kinetische Energie
E_{kin}	kinetische Energie, kinetische Gesamtenergie
E_{pot}	potentielle Energie, potentielle Gesamtenergie
ε	Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	Dehnrage
E_t	totale Energie, totale Gesamtenergie
e_t	massenspezifische totale Energiedichte
η	Viskosität, Scherviskosität
$\hat{\eta}$	differenzielle Viskosität
η_∞	obere newtonsche Grenzviskosität
η_R	reduzierte Viskosität
Eu	Eulerzahl
\mathbf{F}	absoluter Deformationsgradiententensor
\mathbf{F}^{-1}	räumlicher Deformationsgradiententensor
\mathcal{F}	Fließfunktion
Fo	Fourierzahl
Fr	Froudezahl
f	Frequenz
\mathbf{F}_t	relativer Deformationsgradiententensor
\mathbf{F}	Gesamtkraft
\mathbf{f}	volumenspezifische Kraft
γ	Scherwinkel, Scherung
$\dot{\gamma}$	Scherrate

G	materielles Greensches Dehnungsmaß
$\hat{\mathbf{G}}$	linker Cauchy-Greenscher Verzerrungstensor
G_n	Generation Number
Gr	Grashofzahl
$Grad$	lagrangescher Gradientenoperator
$grad$	Gradientenoperator (raumfest)
Gz	Graetzzahl
H	Enthalpie, Gesamtenthalpie
h	spezifische Enthalpie
\dot{H}	Gesamtenthalpiefluss
I	Einheitsmatrix
I	1. Grundinvariante
II	2. Grundinvariante
III	3. Grundinvariante
J	Funktionaldeterminante, Jacobi Determinante
j	Stromdichtevektor der Wirbelstärke
K	Konsistenzparameter
κ	Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten
L	Referenzlänge
Λ	Eigenwert
λ	Lagrange Multiplikator
λ	Zeit
λ	stoffspezifische Wärmeleitfähigkeit
L	Geschwindigkeitsgradiententensor
M	Dehnmodenparameter
m	Fließexponent
μ	dynamische Viskosität, newtonsch
μ_D	Dehnviskosität, newtonsch
μ_V	Volumenviskosität, newtonsch
n	Fließindex
Na	Nahmezahl
∇	Nablaoperator
∇	kontravariante Oldroydableitung
N	unbestimmter Normalspannungstensor
N_i	Normalspannungsdifferenz

Nu	Nußeltzahl
ν	kinematische Viskosität
\mathbf{n}	Normalenvektor
$\boldsymbol{\omega}$	Wirbelstärke, Wirbelstärkevektor
$\boldsymbol{\Omega}$	Drehgeschwindigkeitstensor
$^{\circ}$	Jaumannsche Zeitableitung
p	Druck
\mathcal{P}	materieller Punkt
Pe	Pécletzahl
$\boldsymbol{\Phi}_v$	Impulsdichtetensor
Φ	Energiedissipation
φ_e	Gesamtenergiefluss
$\bar{\Phi}$	Fluidität
$\bar{\Phi}$	Mengengröße
ϕ	Winkel, Umfangsrichtung
φ_T	Temperaturfluss
Φ	mitschwimmende Größe
φ_v	Impulsstrom
Pr	Prandtlzahl
Q	Wärmemenge
\mathbf{Q}	allgemeiner Verdrehungstensor
\dot{Q}	Wärmefluss
$\dot{\mathbf{q}}$	spezifischer Wärmefluss, Wärmestrom
R	universelle Gaskonstante
r	Radius, radiale Richtung
Ra	Rayleighzahl
\mathbf{R}	Drehtensor
R	Radius
Re	Reynoldszahl
ρ	Dichte
ρ_0	Referenzdichte
Ri	Richardsonzahl
R_s	spezifische Gaskonstante
\mathbf{S}	Cauchyscher Spannungstensor
σ	Normalspannung
σ	Produktionsrate einer Stoffgröße
St	Stantonzahl

Sr	Strouhalzahl
T	Temperatur
t	Zeit
τ	Schubspannung, Scherspannung
$\tau_{1/2}$	Bezugsschubspannung
τ_0	Bezugsschubspannung
\mathbf{T}	Reibungsspannungstensor
Θ	Allgemeiner Tensor
\mathbf{t}	Spannungsvektor
\mathbf{U}	rechter Streckungstensor
U	innere Energie, innere Gesamtenergie
u	spezifische innere Energie
Υ	Gesamtstoffmenge
u, v, w	Geschwindigkeitskomponenten
\mathbf{V}	linker Streckungstensor
V	Volumen
V_0	Bezugsvolumen
\mathbf{v}	Geschwindigkeit
We	Weissenbergzahl
W	Arbeit
ξ	Temperaturviskosit[Pleaseinsertintopreamble]tseinflusskoeffizient
\mathbf{X}	Ortsvektor in substantieller Betrachtung
\mathbf{x}	Ortsvektor in lokaler Betrachtung



In industriellen Prozessen spielen die Kühlung von Bauteilen, der Transfer von Prozesswärme und der Wärmetransport zur Energiewandlung eine wesentliche Rolle in der Gesamteffizienz der verwendeten Anlagen. Insbesondere dann, wenn Fluide als Schmiermittel eingesetzt werden, kommen mineralische oder synthetische Öle als Medium zum Einsatz. Es werden neben gewöhnlichen newtonschen Flüssigkeiten insbesondere nicht-newtonsche Fluide verwendet. Bei den newtonschen Fluiden hängt bei volumenbeständiger Strömung der Reibungsspannungstensor linear vom örtlichen Verzerrungsgeschwindigkeitstensor ab, zudem spielt die Historie der Strömung keine Rolle. Dies ist bei den meisten niedrigmolekularen Flüssigkeiten, wie Wasser, Benzin bzw. leichte Mineralöle oder Alkohole der Fall. Im Gegensatz dazu zeichnen sich nichtnewtonsche Fluide dadurch aus, dass deren Viskosität nicht nur von Druck oder Temperatur sondern auch von der Strömung selbst und insbesondere von den auftretenden Verzerrungsgeschwindigkeiten aber möglicherweise auch von der Vorgeschichte der Strömung, der Historie, abhängt. Bekannte Beispiele für solche Fluide sind Zahnpasten, Farben, Kunststoffschmelzen, Silikonöle, Polymerlösungen, Lacke, Teige und Suspensionen.

Die sich unter Umständen sehr stark ändernden rheologischen Eigenschaften der nicht-newtonschen Fluide sind in der Planung verfahrenstechnischer Anlagen zu berücksichtigen, da diese den Widerstand bzw. Druckverlust in technischen Apparaten bestimmen und damit die Effizienz der Prozesse und Anlagen mindern können. Dies hat unmittelbare Auswirkungen auf die Anlagenkosten. Zudem sind die rheologischen Eigenschaften dieser Fluide noch wesentlich komplexer und bewirken spezielle Strömungsphänomene, die bei den newtonschen Fluiden nicht vorkommen: Sehr bekannt ist der Weissenbergeffekt, bei dem die freie Oberfläche einer viskoelastischen Flüssigkeit an einem eingetauchten, stabförmigen, rotierenden Rühren emporsteigt anstatt wie bei einem newtonschen Fluid sich trichterartig abzusenken. Bei einem nach unten gerichteten Freistrahle einer nichtnewtonschen Flüssigkeit lässt sich eine Strahlaufweitung hinter der Mündung einer Düse beobachten. Driftphänomene bei Suspensionen und zu newtonschen Fluidströmungen

gegenläufig rotierende Sekundärströmungen sind weitere bekannte Effekte. Solche Phänomene müssen in strömungstechnischen Prozessverfahren berücksichtigt werden, um unerwünschte Auswirkungen auf Produkteigenschaften zu vermeiden.

Neben den Verzerrungsgeschwindigkeiten wirkt sich die Temperatur und stattfindender Wärmeintrag stark auf die rheologischen Eigenschaften der zumeist höhermolekularen nichtnewtonschen Fluide aus. Eine temperaturbedingte Änderung der Viskosität bewirkt bei nichtnewtonschen Fluiden stärkere Rückkopplungseffekte, denn die sich strömungs- und temperaturbedingt ändernden rheologischen Fluideigenschaften wirken sich wiederum auf das Strömungsfeld, den damit verbundenen Wärmetransport und somit auf das sich einstellende Temperaturfeld aus. Der Einfluss von Wärmeeintrag auf die viskosen Eigenschaften und damit verbunden Rückwirkungen ist Gegenstand aktueller Forschung, gerade Fragestellungen hinsichtlich auftretender Strömungsstrukturen, des Fließverhaltens und des Wärmetransportes in nichtnewtonschen Fluiden, z.B. in Wärmetauscherkonfigurationen, werden untersucht. Insbesondere in Hinblick auf den Umgang mit Ressourcen und Energie hat die Effizienzsteigerung beim Wärme- und Stofftransport von nichtnewtonschen Fluiden an Bedeutung gewonnen. Es bieten sich verschiedene Ansätze zur Effizienzsteigerung industriellen Wärmetransportes an. Man kann grundsätzlich zwei Methoden unterscheiden: Einerseits werden entweder aktive oder passive Strömungsbeeinflussungsmaßnahmen ergriffen ohne die Fluideigenschaften zu verändern, andererseits findet eine gezielte Anpassung der viskosen Eigenschaften des Fluids statt. Dies kann beispielsweise durch Änderung von Konzentrationen vorhandener Spezies oder durch Zugaben von Additiven erfolgen. Um solche Maßnahmen jedoch gezielt einsetzen zu können, müssen die grundlegenden Eigenschaften der verschiedenen, nichtnewtonschen Fluide, deren Modellierung und die Mechanismen des Stoff- und Wärmetransportes bekannt sein.

Diese Arbeit konzentriert sich auf eine bestimmte Klasse der nichtnewtonschen Fluide: Es sind die verallgemeinerten newtonschen Fluide, die strukturviskoses bzw. dilatantes Verhalten unter Scherlasten aufweisen. Diese Klasse der Fluide wird hier unter dem Aspekt des Wärmeeintrages diskutiert. Nur wenn die Eigenschaften dieser nichtnewtonschen Fluide hinreichend bekannt sind, deren Modellierung verstanden ist und ihre Transporteigenschaften und das grundsätzlichen Verhalten bei ausgezeichneten Strömungsproblemen ausreichend beschrieben werden kann, lassen sich Möglichkeiten der gezielten Strömungsbeeinflussung, z.B. zur Verbesserung des Wärme- und Stofftransportes in Wärmetauschern industrieller Anwendungen, ableiten. Diese Arbeit setzt sich daher das Ziel, einen Einblick in für technische Anwendungen relevante Strömungsprobleme thermostrukturviskoser Fluide zu geben und einen aktuellen Stand der Forschung auf diesem Gebiet darzustellen. Hierbei wird sich auf die dezidierten Strömungsfälle konzentriert, die insbesondere dazu geeignet sind, die spezifischen Eigenschaften strukturviskoser oder dilatanter Fluide herauszustellen. Über die reinen Impulstransportprobleme hinaus werden insbesondere thermische Problemstellungen diskutiert, da die Auswirkungen des Wärmeeintrages auf das rheologische Verhalten