
Numerische Strömungsmechanik

Eckart Laurien · Herbert Oertel jr.

Numerische Strömungsmechanik

Grundgleichungen und Modelle –
Lösungsmethoden – Qualität und
Genauigkeit

6., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 229 Abbildungen und über 530 Wiederholungs-
und Verständnisfragen

 Springer Vieweg

Eckart Laurien
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Herbert Oertel jr.
Baden-Baden, Deutschland

ISBN 978-3-658-21059-5
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-21060-1>

ISBN 978-3-658-21060-1 (eBook)

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 Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 1995, 2003, 2009, 2011, 2013, 2018
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.

Verantwortlich im Verlag: Thomas Zipsner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort zur 6. Auflage

Das Buch wendet sich an Studierende des Maschinenbaus, der Verfahrenstechnik und verwandter Fachgebiete des Ingenieurwesens sowie an technische orientierte Naturwissenschaftler, z. B. Biologen. Es bietet eine Einführung in die Vorgehensweise, die Grundgleichungen, die numerischen Methoden, die Modelle (insbesondere Turbulenz- und Zweiphasenmodelle) und die Möglichkeiten zur Fehlerkontrolle der Numerischen Strömungssimulation. Es ist gleichermaßen für die Ausbildung an Hochschulen wie für die Einarbeitung in das Fachgebiet für Ingenieure in der industriellen Praxis sowie für Naturwissenschaftler, unabhängig von Softwaredokumentationen, geeignet. Das Ziel ist die Vermittlung fundierten Wissens über die Vorgehensweise der numerischen Strömungssimulation (CFD, Computational Fluid Dynamics) einschließlich der Auswahl der Turbulenzmodelle, als Grundlage für die fachgerechte Verifikation und Validierung problemangepasster Simulationsrechnungen.

Die Numerische Strömungssimulation hat sich in den letzten drei Jahrzehnten zu einem Standardwerkzeug für Ingenieure entwickelt, welches häufig versuchsbegleitend in der Entwicklung und Analyse technischer Systeme angewendet wird. Kommerzielle Softwaresysteme sind heute benutzerfreundlich aufgebaut und gut dokumentiert. Auch Open-Source-Software mit fast gleichwertigen Eigenschaften wie die kommerzielle Software ist heute verfügbar. Weiterhin ist es im Rahmen einer Ausbildung notwendig und sinnvoll, sich die Grundlagen der Methoden und Modelle zu vergegenwärtigen, um ihre Auswahl gezielt und fundiert betreiben zu können.

Das vorliegende Buch soll auch in der 6. Auflage dazu einen Beitrag leisten. Dem Wunsch vieler Leser, zusätzliche illustrierende Beispiele zu zeigen, sind wir durch Einbeziehung von eigenen Forschungsergebnissen sowie zahlreicher studentischer Arbeiten nachgekommen. Wir danken unseren Studenten B. Yildirim, S. Braun, M. Jelinewski, S. Eser für ihre Beiträge. Die Beschreibung von Simulationsprogrammen (früher Abschn. 2.6) haben wir entfernt, da inzwischen geeignete Literatur hierfür verfügbar ist.

Da das Buch mit seinen Grundlagenkapiteln 1–3 von vielen Dozenten zum Aufbau eigener Lehrveranstaltungen mit daraus ausgewählten Inhalten seit Jahren genutzt wird, haben wir auch in der 6. Auflage auf Änderungen in den vorhandenen Formelnummern verzichtet. Durch die Überarbeitung der Bilder und Tabellen haben sich jedoch die Sei-

tenzahlen sowie Bild- und Tabellennummern geändert. Das Literaturverzeichnis wurde erweitert und kapitelweise zusammengestellt.

Dem Springer-Vieweg Verlag danken wir für die weiterhin erfreuliche Zusammenarbeit.

Leonberg und Baden-Baden,
Deutschland
Dezember 2017

Eckart Laurien
Herbert Oertel jr.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Beispiele und Definitionen	2
1.1.1	Einführende Demonstration	2
1.1.2	Modellierung und Simulation in der Strömungsmechanik	5
1.1.3	Strömungsphänomene in Rohrkrümmern	7
1.1.4	Vorbereitung und Durchführung	11
1.1.5	Geschichte	18
1.2	Einführende Beispiele	21
1.2.1	Naturkonvektionsströmung in einem Behälter	21
1.2.2	Die Blasenfahne	26
1.2.3	Thermische Vermischung stromab eines Rohrleitungs-T-Stücks	29
	Literatur	33
2	Vorgehensweise	37
2.1	Physikalische Beschreibung	37
2.1.1	Kontinuumsmechanik	37
2.1.2	Fluide und ihre Eigenschaften	39
2.1.3	Kompressibilität einer Gasströmung	43
2.1.4	Thermische Instabilität der horizontalen Fluidschicht	45
2.1.5	Turbulenz	47
2.1.6	Dimensionsanalyse	49
2.2	Mathematische Formulierung	54
2.2.1	Eigenschaften von Differentialgleichungen	55
2.2.2	Eindimensionale Grundgleichungen der Stromfadentheorie	58
2.2.3	Vereinfachte Ableitung der Navier-Stokes-Gleichungen	60
2.2.4	Randbedingungen	65
2.2.5	Analytische Lösungen	68
2.2.6	Navier-Stokes-Gleichungen für kompressible Strömung	70
2.2.7	Eindimensionale Stoßausbreitung	72

2.3	Diskretisierung	76
2.3.1	Numerische Ableitungsbildung	76
2.3.2	Zeitdiskretisierung	79
2.3.3	Das Einschrittverfahren mit zentralen Differenzen	84
2.3.4	Lax-Wendroff-Verfahren	89
2.3.5	Finite-Differenzen-Methode für die Poisson-Gleichung	93
2.3.6	DuFort-Frankel-Differenzenverfahren	97
2.3.7	SIMPLE-Methode zur Druckberechnung	103
2.3.8	Grundlagen der Finite-Volumen-Methode	105
2.3.9	Metrikkoeffizienten	111
2.3.10	Finite-Volumen-Methode zur Lösung der Poisson-Gleichung	113
2.4	Koordinatentransformation und Netzgenerierung	115
2.4.1	Klassifikation numerischer Netze	116
2.4.2	Generierung strukturierter Netze	123
2.4.3	Transformation auf krummlinige Koordinaten	126
2.4.4	Generierung unstrukturierter Netze	129
2.4.5	Netzadaption	132
2.4.6	Bewegte Netze	135
2.5	Beispiele Numerischer Methoden	136
2.5.1	Runge-Kutta-Finite-Volumen-Methode	136
2.5.2	Semi-Implizite Finite-Volumen-Methode	143
2.5.3	Taylor-Galerkin-Finite-Elemente-Methode	147
	Literatur	157
3	Grundgleichungen und Modelle	159
3.1	Beschreibung auf Molekülebene	160
3.1.1	Gaskinetische Simulationsmethode	160
3.1.2	Lattice-Boltzmann-Methode	165
3.2	Laminare Strömungen	166
3.2.1	Hierarchie der Grundgleichungen	166
3.2.2	Die Euler-Gleichungen der Gasdynamik	168
3.2.3	Potenzialgleichung	171
3.2.4	Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Strömung	174
3.3	Turbulente Strömungen	177
3.3.1	Direkte Numerische Simulation	177
3.3.2	Reynolds-Gleichungen für turbulente Strömungen	183
3.3.3	Prandtl'sches Mischungswegmodell	186
3.3.4	Algebraische Turbulenzmodelle	192
3.3.5	Zweigliedungs-Transportmodelle	194
3.3.6	Reynoldsspannungsmodelle	199
3.3.7	Klassifikation von Turbulenzmodellen	203
3.3.8	Grobstruktursimulation	204

3.4	Zweiphasenströmungen	208
3.4.1	Klassifikation von Zweiphasenströmungen	208
3.4.2	Euler-Lagrange-Methode	210
3.4.3	Homogenes Modell	217
3.4.4	Zwei-Fluid-Formulierung für Zweiphasenströmungen	220
3.4.5	Modelle für Blasenströmungen	226
	Literatur	230
4	Qualität und Genauigkeit	233
4.1	Anforderungen	233
4.1.1	Fehler und Genauigkeit	234
4.1.2	Anforderungen der Strömungsphysik	235
4.1.3	Anforderungen des Ingenieurwesens	237
4.2	Numerische Fehler und Verifikation	239
4.2.1	Rundungsfehler	239
4.2.2	Diskretisierungsfehler	242
4.2.3	Numerische Diffusion	244
4.2.4	Netzverfeinerungsstudie: seitlich beheizter Behälter	245
4.3	Modellfehler und Validierung	247
4.3.1	Vergleich integraler Parameter	247
4.3.2	Detaillierter Vergleich mit Modellexperimenten	248
	Literatur	268
5	Anwendungsbeispiele	269
5.1	Strömungen mit Wärmetransport	269
5.1.1	Konvektionsströmung in einem Behälter	270
5.1.2	Wärmeübergang eines Heizstabs in einem Kanal	271
5.1.3	Beheizte Rohrströmung mit superkritischem Kohlendioxid	273
5.2	Mehrphasenströmungen	274
5.2.1	Gravitationsgetriebene zweiphasige Rohrströmung	274
5.2.2	Kondensation oberhalb eines Kühlturms	275
5.3	Vermischungsvorgänge	276
5.3.1	Auflösung einer Dichteschichtung	276
5.3.2	Durchmischung von Gasen unterschiedlicher Temperaturen	278
5.3.3	Ausbreitung von Wasserdampf im Kernkraftwerks-Sicherheitsbehälter	279
5.4	Aerodynamik	280
5.4.1	Kraftfahrzeugumströmung	281
5.4.2	Umströmung eines Rennwagens	284
5.4.3	Transsonischer Tragflügel	285

5.5	Bioströmungsmechanik	286
5.5.1	Vogelflug	287
5.5.2	Strömung im Herzen	289
5.5.3	Wellenpumpe	293
	Literatur	297
6	Fragenkatalog	299
6.1	Vorlesung „Numerische Strömungssimulation“	299
6.2	Vorlesung „Methoden der Numerischen Strömungssimulation“	315
6.3	Vorlesung „Modellierung von Zweiphasenströmungen“	323
	Sachverzeichnis	325