WWW.PEARSON-STUDIUM.DE
CWS
COMPANION WEBSITE

ing
maschinenbau

Hendrik Kuhlmann

Strömungsmechanik

PEARSON
Studium

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Die Informationen in diesem Buch werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht. Warennamen werden ohne Gewährleistung der freien Verwendbarkeit benutzt. Bei der Zusammenstellung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Verlag, Herausgeber und Autoren können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen. Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Herausgeber dankbar.

Alle Rechte vorbehalten, auch die der fotomechanischen Wiedergabe und der Speicherung in elektronischen Medien. Die gewerbliche Nutzung der in diesem Produkt gezeigten Modelle und Arbeiten ist nicht zulässig.

Fast alle Hardware- und Softwarebezeichnungen und weitere Stichworte
und sonstige Angaben, die in diesem Buch verwendet werden,
sind als eingetragene Marken geschützt.
Da es nicht möglich ist, in allen Fällen zeitnah zu ermitteln,
ob ein Markenschutz besteht, wird das ® Symbol in diesem Buch nicht verwendet.

Umwelthinweis: Dieses Produkt wurde auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt. Die Einschrumpffolie – zum Schutz vor Verschmutzung – ist aus umweltverträglichem und recyclingfähigem PE-Material.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

08 07

ISBN 978-3-8273-7230-7

© 2007 by Pearson Studium
ein Imprint der Pearson Education Deutschland GmbH,
Martin-Kollar-Straße 10–12, D-81829 München/Germany
Alle Rechte vorbehalten
www.pearson-studium.de
Lektorat: Birger Peil, bpeil@pearson.de
Korrektorat: Friederike Daenecke, Zülpich
Umschlaggestaltung: Thomas Arlt, tarlt@adesso21.net
Titelfoto: Sean Davey
Herstellung: Philipp Burkart, pburkart@pearson.de
Satz: LE-TEX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Druck und Verarbeitung: Kösel, Krugzell (www.KoeselBuch.de)

Printed in Germany

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 9

Kapitel 1 Einleitung 11

1.1 Motivation ... 12
1.2 Grundlegende Charakteristika von Fluiden ... 17
1.2.1 Das Kontinuum und seine Grenze ... 18
1.2.2 Viskosität ... 19
1.2.3 Kompressibilität ... 21
1.2.4 Grenzflächenspannung ... 22
1.2.5 Nichtlineare Dynamik ... 23
Zusammenfassung ... 25

Kapitel 2 Hydrostatik 27

2.1 Gleichgewichtsbedingung ... 28
2.2 Konstante Dichte ... 29
2.2.1 Kommunizierende Gefäße ... 30
2.2.2 Hydrostatische Druckkräfte ... 33
2.3 Variable Dichte ... 38
2.3.1 Ideales Gas ... 38
2.3.2 Ruhende Atmosphäre ... 39
2.4 Kapillarität ... 42
2.4.1 Laplace-Druck ... 43
2.4.2 Kontaktwinkel ... 45
2.4.3 Steighöhe in Kapillaren ... 46
2.4.4 Ausblick auf die kapillare Dynamik ... 48
Zusammenfassung ... 52
Aufgaben ... 53

Kapitel 3 Hydrodynamische Grundlagen 57

3.1 Kinematik ... 58
3.1.1 Substantielle Ableitung ... 59
3.1.2 Linien in einem strömenden Fluid ... 61
3.1.3 Visualisierung und Messung der Bewegung eines Fluids ... 63
3.1.4 Lokale Deformation eines Fluids ... 65
3.2 Reynolds' Transport-Theorem ... 69
3.3 Erhaltungsgleichungen für reibungsfreie Fluide ... 71
3.3.1 Massenerhaltung ... 71
3.3.2 Impulserhaltung ... 72

3.3.3 Drallerhaltung ... 73
3.3.4 Erhaltung der Gesamtenergie ... 74
3.3.5 Thermodynamische Energie ... 75
3.4 Bemerkungen zur Euler-Gleichung ... 75
Zusammenfassung ... 77
Aufgaben ... 78

Kapitel 4 Bewegung entlang von Stromfäden und Stromlinien 81

4.1 Stromfadentheorie ... 82
4.1.1 Massenerhaltung für einen stationären Stromfaden ... 82
4.1.2 Impulserhaltung bei der Rohrströmung ... 83
4.1.3 Energieerhaltung entlang eines Stromfadens ... 84
4.2 Integration längs und senkrecht zu Stromlinien ... 85
4.2.1 Bernoulli-Gleichung ... 85
4.2.2 Bemerkungen zur Bernoulli-Gleichung ... 87
4.2.3 Impulsbilanz senkrecht zur Stromlinie ... 89
4.3 Anwendungen der Bernoulli-Gleichung ... 90
4.3.1 Bernoulli-Konstante für eine homogene Anströmung ... 90
4.3.2 Strömung längs einer festen Wand ... 91
4.3.3 Venturi-Rohr ... 92
4.3.4 Prandtlsches Staurohr ... 93
4.3.5 Verlustloses Ausströmen aus einem Behälter ... 95
4.4 Energiesatz für kompressible Strömungen ... 99
4.4.1 Thermodynamische Größen im Staupunkt ... 99
4.4.2 Wärmezufuhr bei konstantem Druck ... 100
4.5 Anwendung des Impulssatzes ... 101
4.5.1 Strahlimpuls ... 101
4.5.2 Strahlablenkung an einer Schneide ... 102
4.5.3 Pelton-Schaufelrad ... 103
4.5.4 Schub und Leistung eines Strahls ... 105
4.5.5 Propeller und Windturbine ... 108
4.5.6 Turbinen und Pumpen ... 112
Zusammenfassung ... 118
Aufgaben ... 119

Kapitel 5 Strömungen mit und ohne Vortizität 125

5.1 Die Stromfunktion ... 127
5.2 Wirbeldynamische Grundlagen ... 128
5.2.1 Vortizität ... 128
5.2.2 Helmholtz-Gleichung ... 129
5.2.3 Helmholtzsche Wirbelsätze ... 131
5.2.4 Zirkulationstheorem von Kelvin ... 131

5.3 Potentialströmungen ... 132
5.3.1 Cauchy-Riemannsche Differentialgleichungen ... 133
5.3.2 Komplexe Darstellung von Potentialströmungen ... 135
5.4 Ebene Wirbelströmungen ... 137
5.4.1 Festkörperrotation ... 137
5.4.2 Potentialwirbel ... 137
5.4.3 Rankine-Wirbel ... 138
5.4.4 Ebene Senkenströmung ... 140
5.4.5 Wirbelsenkenströmung ... 140
5.4.6 Abflußwirbel ... 141
5.5 Oberflächenwellen ... 142
5.5.1 Schwerewellen ... 143
5.5.2 Einfluß von Oberflächenspannung und Tiefe ... 147
5.5.3 Flachwasserwellen ... 148
Zusammenfassung ... 152
Aufgaben ... 154

Kapitel 6 Kompressible, reibungsfreie Strömungen 157

6.1 Schallausbreitung ... 158
6.1.1 Wellengleichung und Schallgeschwindigkeit ... 158
6.1.2 Machscher Kegel ... 161
6.2 Verdichtungsstoß ... 162
6.2.1 Verdichtungswelle ... 162
6.2.2 Stationärer, senkrechter Verdichtungsstoß ... 164
6.2.3 Thermodynamisches Argument gegen einen Verdünnungsstoß ... 167
6.2.4 Instationärer Stoß ... 169
6.2.5 Schwacher Stoß ... 171
6.2.6 Schräger Verdichtungsstoß ... 171
6.3 Stationärer, kompressibler Stromfaden ... 175
6.3.1 Infinitesimale Variationen ... 175
6.3.2 Geschwindigkeit entlang eines kompressiblen Stromfadens ... 177
6.3.3 Zustandsgrößen und kritische Werte ... 179
6.3.4 Kompressible Strömung durch Düsen ... 183
Zusammenfassung ... 191
Aufgaben ... 193

Kapitel 7 Viskose Strömungen 195

7.1 Grundgleichungen ... 196
7.1.1 Spannungstensor ... 196
7.1.2 Navier-Stokes-Gleichung ... 199
7.1.3 Wärmetransportgleichung ... 201
7.1.4 Mechanische Ähnlichkeit ... 201
7.1.5 Dimensionsanalyse ... 204

7.2 Schleichende Strömungen ... 208
7.2.1 Eckenströmungen ... 209
7.2.2 Dünne Filme ... 209
7.3 Rohrströmung ... 211
7.3.1 Laminare, inkompressible Rohrströmung ... 212
7.3.2 Rohrhydraulik ... 214
7.4 Laminare Grenzschicht ... 216
7.4.1 Grenzschichtgleichungen ... 217
7.4.2 Blasius-Profil ... 220
7.4.3 Ablösung der Grenzschicht ... 226
7.5 Turbulente Strömungen ... 228
7.5.1 Übergang zur Turbulenz ... 229
7.5.2 Gleichungen für turbulente Strömungen ... 232
7.5.3 Wirbelviskosität ... 234
7.5.4 Prandtlscher Mischungsweg ... 234
7.5.5 Mittlere Geschwindigkeit in Wandnähe ... 236
7.5.6 Turbulente Grenzschicht einer ebenen Platte ... 239
7.5.7 Wandrauhigkeit ... 243
7.5.8 Turbulente inkompressible Rohrströmung ... 245
7.6 Kraftwirkung auf Körper ... 249
7.6.1 Durchströmung von Rohrleitungen ... 249
7.6.2 Umströmung von Körpern ... 254
7.6.3 Kutta-Joukowski-Formel ... 256
Zusammenfassung ... 264
Aufgaben ... 266

Anhang A Kleines mathematisches Repetitorium 271
A.1 Produkte mit Vektoren ... 271
A.2 Vektorielle Ableitungen ... 273
A.3 Fundamentalsatz der Vektoranalysis ... 274
A.4 Formeln für Volumen- und Flächenintegrale ... 275
A.5 Taylor-Entwicklung ... 275

Anhang B Operatoren und Navier-Stokes-Gleichung in Zylinderkoordinaten 277

Anhang C Ausbreitung eines senkrechten Verdichtungsstoßes 281

Anhang D Druckverteilung in einer Laval-Düse 283

Literaturverzeichnis 287

Sachregister 291