

Heinz Herwig

Strömungsmechanik

Eine Einführung in die Physik
und die mathematische Modellierung
von Strömungen

2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 100 Abbildungen und 48 Tabellen

YJ Springer

Inhalt

Teil A Grundlagen

1 Überblick über verschiedene Strömungen und ihre physikalischen Merkmale	
1.1 Vorüberlegungen	3
1.1.1 Gegenstand der Strömungsmechanik	3
1.1.2 Strömungsmechanik als Kontinuumstheorie	3
1.2 Verschiedene Aspekte zur Charakterisierung von Strömungen	5
1.2.1 Aspekte des Strömungsverhaltens	5
1.2.2 Aspekte des FluidVerhaltens	8
<i>Anmerkung 1.1: Teilgebiete der Strömungsmechanik</i>	10
2 Physikalisch/mathematische Modellbildung in der Strömungsmechanik	13
2.1 Vorüberlegungen	13
2.2 Bildung physikalisch/mathematischer Modelle	14
2.3 Dimensionsanalyse	16
2.3.1 Vorbemerkung	16
2.3.2 Das Pi-Theorem	17
2.3.3 Modellbildung durch Aufstellen der Relevanzliste	21
<i>Anmerkung 2.1: Vorteil dimensionsloser Darstellung</i>	23
2.3.4 Kennzahlen und Modell-Theorie	23
3 Spezielle Phänomene	27
3.1 Haftbedingung/Grenzschichten	27
<i>Anmerkung 3.1: Physikalisch/mathematische Modelle ohne Haftbedingung</i>	30
3.2 Strömungsablösung	30

Inhalt

3.2.1	Stromlinien	30
3.2.2	Stromlinienverlauf bei Strömungsablösung	31
3.3	Turbulenz	32
3.3.1	Entstehung turbulenter Strömungen (Transition)	32
3.3.2	Erscheinungsbild turbulenter Strömungen	32
	Anmerkung 3.2: Charakteristische Zeiten turbulenter Strömungen	35
3.3.3	Eigenschaften turbulenter Strömungen	35
3.4	Drehung und Zirkulation	36
3.4.1	Vorbemerkung	36
3.4.2	Drehung	37
	Anmerkung 3.3: Definition der Drehung in einer allgemeinen dreidimensionalen Strömung	38
3.4.3	Zirkulation	39
3.5	Kompressibilität und Druckwellen	39
3.5.1	Vorbemerkungen	39
3.5.2	Ausbreitung von schwachen Druckwellen, Schallgeschwindigkeit	41
3.5.3	Ausbreitung von starken Druckwellen, Verdichtungsstöße, Verdünnungswellen	44
4	Grundgleichungen der Strömungsmechanik	47
4.1	Erhaltungsgrößen, Bilanzgleichungen	47
	Anmerkung 4.1: Bilanzen in bezug auf endliche Kontrollräume	48
	Anmerkung 4.2: Relativistische Mechanik	48
4.2	Teilchenfeste/ortsfeste Betrachtungsweise	48
4.3	Übergang von der teilchenfesten auf die ortsfeste Betrachtungsweise	49
4.4	Allgemeine Bilanzgleichungen, dimensionsbehaftet	51
4.5	Erläuterungen zu den allgemeinen Bilanzgleichungen	52
4.5.1	Erläuterungen zur Kontinuitätsgleichung (K^*)	52
	Anmerkung 4.3: Bilanzgleichungen in konservativer Form; Interpretation der Kontinuitätsgleichung in der Eulerschen (ortsfesten) Betrachtungsweise	54
	Anmerkung 4.4: Spezialfälle der allgemeinen Kontinuitätsgleichung	56

4.5.2 Erläuterungen zu den Impulsgleichungen (XI*), (YI*) und (ZP).	56
<i>Anmerkung 4.5: Druck in strömenden Fluiden, Stokessche Hypothese, mechanischer Druck, modifizierter Druck</i>	58
4.5.3 Erläuterungen zu den Energiegleichungen (E*), (ME*) und (TE*).	59
<i>Anmerkung 4.6: Potentielle Energie als Teil der Gesamtenergie bzw. -enthalpie</i>	61
4.6 Spezielle konstitutive Gleichungen, dimensionsbehaftet	61
4.6.1 Konstitutive Gleichungen für T^*J in den Impulsgleichungen / Newtonsche Fluide	62
4.6.2 Konstitutive Gleichungen für q^* in den Energiegleichungen / Fouriersches Wärmeleitungsverhalten	64
4.7 Navier-Stokes-Gleichungen, dimensionsbehaftet	65
4.8 Entdimensionierung der Grundgleichungen	68
<i>Anmerkung 4.7: Index-Schreibweise der Grundgleichungen, hier: Navier-Stokes-Gleichungen.</i>	70
<i>Anmerkung 4.8: Vektor-Schreibweise der Grundgleichungen, hier: Navier-Stokes-Gleichungen</i>	72
<i>Anmerkung 4.9: Wirbeltransportgleichung als spezielle Form der Navier-Stokes-Gleichungen</i>	73
<i>Anmerkung 4.10: Einführung einer Stromfunktion</i>	75
<i>Anmerkung 4.11: Bilanzen in endlichen Kontrollräumen</i>	76
<i>Anmerkung 4.12: Impulsmomentengleichungen als weitere Bilanzgleichungen.</i>	78
<i>Anmerkung 4.13: Natürliche Konvektionsströmungen</i>	78
 5 Das Turbulenzproblem	 81
5.1 Der Energiehaushalt turbulenter Strömungen	81
<i>Anmerkung 5.1: Kaskadenprozeß in „Gedichtform“</i>	84
<i>Anmerkung 5.2: Korrelationen zwischen zwei turbulenten Schwankungsgrößen</i>	84
5.2 Direkte numerische Simulation (DNS)	86
5.3 Grundgleichungen für zeitgemittelte Größen	89
5.3.1 Zeitmittelung der Strömungsgrößen	89

5.3.2	Zeitmittelung der Grundgleichungen (RANS)	. . . . .	91
	<i>Anmerkung 5.3: Die Kontinuitätsgleichung bei konventioneller Mittelung.</i>	. . . . .	94
5.3.3	Allgemeine Grundgleichungen für die zeitgemittelten Strömungsgrößen/spezielle konstitutive Gleichungen		94
5.4	Turbulenzmodellierung	. . . . .	100
	<i>Anmerkung 5.4: Modellierung weiterer turbulenter Zusatzterme</i>	. . . . .	107
5.4.1	Turbulenzmodelle I: Wirbelviskositäts-Modelle	. . . . .	107
5.4.2	Turbulenzmodelle II: Reynolds-Spannungs-Modelle		113
	<i>Anmerkung 5.5: „Zweite Momente“.</i>	. . . . .	115
	<i>Anmerkung 5.6: Schließung durch zusätzliche Gleichungen</i>	. . . . .	115
	<i>Anmerkung 5.7: Homogene Turbulenz</i>	. . . . .	116
	<i>Anmerkung 5.8: Isotrope Turbulenz</i>	. . . . .	116
	<i>Anmerkung 5.9: Modellierung der Reynoldsschen Wärmestromdichte A^*.</i>	117
	<i>Anmerkung 5.10: Grobstruktur-Simulation (LES)</i>	. . . . .	118
	<i>Anmerkung 5.11: Entstehung der Turbulenz/Strömungsstabilität bzw. -instabilität.</i>	. . . . .	118

Teil B Die physikalisch/mathematische Modellierung spezieller Strömungen

B1 Eindimensionale Näherung

6	Stromfadentheorie bei endlichen Querschnitten für inkompressible Strömungen.	. . . . .	125
6.1	Stromfaden, Stromröhre.	. . . . .	125
6.2	Mechanische Energiegleichung	. . . . .	125
6.2.1	Bernoulli-Gleichung	. . . . .	125
	<i>Anmerkung 6.1: Hydrostatisches Grundgesetz als Grenzfall der Bernoulli-Gleichung für $u^*_{si} = 0$/Kräfte auf feste Wände.</i>	. . . . .	129

Anmerkung 6.2:	<i>Druckverteilung in gleichförmig rotierenden Fluiden</i>	133
Anmerkung 6.3:	<i>Auswertung der Bernoulli-Gleichung bei endlichen Querschnitten</i>	133
Anmerkung 6.4:	<i>Stationäre Bernoulli-Gleichung</i>	134
6.2.2	Erweiterte Bernoulli-Gleichung	135
Anmerkung 6.5:	<i>Andere Formen der (erweiterten) Bernoulli-Gleichung</i>	139
Anmerkung 6.6:	<i>Dynamischer Druck, Gesamtdruck</i>	140
6.3	Thermische Energiegleichung	142
Anmerkung 6.7:	<i>Gesamt-Energiegleichung der Stromfadentheorie</i>	143
6.4	Impulsgleichungen	143
7	Stromfadentheorie bei endlichen Querschnitten für kompressible Strömungen	153
7.1	Vorbemerkung	153
7.2	Grundgleichungen für isentrope Strömungen	153
7.3	Besondere Entdimensionierung des Gleichungssystems; Erzeugung von Überschallströmungen in einer Stromröhre	155
7.4	Berechnung der kompressiblen isentropen Strömung durch eine Stromröhre	161
Anmerkung 7.1:	<i>Die inkompressible Strömung als Grenzfall der kompressiblen Strömung</i>	164
7.5	Senkrechter Verdichtungsstoß	166
Anmerkung 7.2:	<i>Schiefer Verdichtungsstoß</i>	171

B2 Zweidimensionale Näherung

8	Reibungsfreie Umströmungen	177
8.1	Euler-Gleichungen	177
8.2	Potentialströmungen	180
8.2.1	Vorbemerkung	180
8.2.2	Drehungsfreie Strömungen (Potentialströmungen)	181

<i>Anmerkung 8.1: Konstante Drehung bzw. Drehungsfreiheit als Bedingung für eine reibungsfreie Strömung</i>	182
8.2.3 Direkte Lösungen für Potentialströmungen	183
8.2.4 Indirekte Lösungen für Potentialströmungen	184
8.2.5 Singularitätenmethoden	189
9 Reibungsbehaftete Umströmungen	191
9.1 Vorbemerkung	191
9.2 Die Entstehung und Physik von Strömungsgrenzschichten	192
9.3 Die Grenzschichttheorie als asymptotische Theorie für $Re \rightarrow \infty$	197
9.4 Grenzschichttheorie für laminare Strömungen	199
9.4.1 Grenzschichteffekt: Widerstand	208
9.4.2 Grenzschicht-Effekt: Verdrängung	214
<i>Anmerkung 9.1: Selbstähnliche Grenzschichten (laminar)</i>	216
<i>Anmerkung 9.2: Grenzschichtablösung (laminar)</i>	217
9.5 Grenzschichttheorie für turbulente Strömungen	219
9.5.1 Die Entstehung und Physik der Wandschicht	222
9.5.2 Der Übergang in den vollturbulenten Bereich	228
<i>Anmerkung 9.3: Logarithmisches „Wand“gesetz als asymptotische Anpassungsbedingung</i>	232
9.5.3 Der vollturbulente Bereich (Defekt-Schicht)	233
<i>Anmerkung 9.4: Indirekte Turbulenzmodellierung zur Bestimmung des Geschwindigkeits-Defektes</i>	235
9.5.4 Ergebnisse für turbulente Grenzschichten	236
<i>Anmerkung 9.5: Grenzschichtablösung (turbulent)</i>	244
<i>Anmerkung 9.6: Turbulenzgrad der Außenströmung</i>	245
<i>Anmerkung 9.7: Temperaturgrenzschichten</i>	246
<i>Anmerkung 9.8: Der Transitionsprozeß bei ebenen Grenzschichten/ Strömungsstabilität bzw. -instabilität</i>	246
10 Durchströmungen	249
10.1 Ausgebildete Durchströmungen	249
10.1.1 Das Konzept des hydraulischen Durchmessers	250
10.1.2 Laminare Strömungen im ebenen Kanal	253

Anmerkung 10.1: Ausgebildete laminare Strömung im Rohr (Kreisquerschnitt)	258
10.1.3 Turbulente Strömungen im ebenen Kanal	258
Anmerkung 10.2: Ausgebildete turbulente Strömung im Rohr (Kreisquerschnitt)	263
10.2 Nichtausgebildete Durchströmungen	263
10.2.1 Laminare Einlaufströmungen im ebenen Kanal	266
Anmerkung 10.3: Laminare Einlaufströmungen im Rohr (Kreisquerschnitt)	267
10.2.2 Turbulente Einlaufströmungen	267
Anmerkung 10.4: Kräfte- und Energiebilanzen bei Durchströmungen	269

B3 Dreidimensionale Näherung

11 Vereinfachte Gleichungen für dreidimensionale Strömungen	273
11.1 Dreidimensionale Körperumströmungen	273
11.1.1 Reibungsfreie Umströmungen und Potentialströmungen	273
Anmerkung 11.1: Das d'Alembertsche Paradoxon bei räumlichen Strömungen	276
11.1.2 Strömungsgrenzschichten	277
11.2 Dreidimensionale Durchströmungen	288
11.2.1 Vorbemerkung	288
11.2.2 Parabolisierte, teilparabolisierte Navier-Stokes-Gleichungen	288
12 Spezielle Aspekte bei der numerischen Lösung komplexer Strömungsprobleme	291
12.1 Numerische Lösung dimensionsloser Gleichungen	291
12.1.1 Bestimmung dimensionsloser Ergebnisse aus dimensionsbehafteten Gleichungen	293
12.1.2 Bestimmung weiterer dimensionsbehafteter Ergebnisse aus einer dimensionsbehafteten Lösung	297

12.2 Numerische Lösungen bei turbulenten Strömungen	299
12.3 Numerische Lösungen kritisch gesehen	304

Teil C Übungsaufgaben

Aufgaben	311
---------------------------	------------

Lösungswege und -Hinweise zu den Aufgaben	329
--	------------

Anhang 1 Vektoroperatoren und ihre Bedeutung in kartesischen Koordinaten.	355
--	------------

Anhang 2 Andere Koordinatensysteme/Grundgleichungen in Zylinderkoordinaten.	357
--	------------

Häufig verwendete Indizes und Kennungen	361
--	------------

Symbole und Formelzeichen	363
--	------------

Literatur.	369
-----------------------------	------------

Index	371
--------------	------------