

H. E. Siekmann · P. U. Thamsen

Strömungslehre

Grundlagen

2., aktualisierte Auflage

Mit 124 Abbildungen und 3 Tabellen

 Springer

Prof. Dr.-Ing. Helmut E. Siekmann

Prof. Dr.-Ing. Paul Uwe Thamsen

Technische Universität Berlin

Fluidsystemdynamik – Strömungstechnik in Maschinen und Anlagen

Sekretariat K2

Straße des 17. Juni 135

10623 Berlin

Germany

E-mail: helmut.siekmann@tu-berlin.de

paul-uwe.thamsen@tu-berlin.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-540-73726-1 2. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York

ISBN 978-3-540-66851-0 1. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Gren- zen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media

springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2000, 2008

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.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuziehen.

Satz: Digitale Druckvorlage der Autoren

Herstellung: LE-TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig

Einbandgestaltung: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

7/3180/YL - 5 4 3 2 1 0

Vorwort

Die vorliegende korrigierte zweite Auflage „Strömungslehre – Grundlagen“ entspricht unserer Vorlesung Strömungslehre I, die wir in stetig redigierter Form seit vielen Jahren an der Technischen Universität Berlin halten. Wir legen dieses Lehrbuch einer größeren Zielgruppe vor, die aus Studierenden der Ingenieurwissenschaften und Physik sowie den Praktikern aus vorwiegend strömungstechnischer Industrie besteht. Es ist uns ein Anliegen, einen Abriss der Strömungstechnik zu geben, die zur Strömungsmaschine und strömungstechnischen Anlage führt.

In einem zweiten Band wird der Stoff des ersten vertieft, ergänzt und mit vielen praktischen Beispielen ausgestattet.

Für die Realisierung dieses Werkes danken wir herzlich:

Frau KOMOLL und Frau LAWRENZ für die Erstellung der Zeichnungen, Frau Bente THAMSEN für die Redaktion und computerunterstützte Anfertigung der druckfertigen Vorlage und dem Springer-Verlag für das uns entgegengebrachte Vertrauen.

Berlin, August 2007

Helmut E. Siekmann
Paul Uwe Thamsen

Inhaltsverzeichnis

1	Hydrostatik	1
1.1	Vorbemerkungen.....	1
1.2	Fluidspannung.....	2
1.3	Hydrostatische Druckverteilung.....	3
1.4	Kräfte auf Behälterwände.....	9
1.4.1	Einleitung.....	9
1.4.2	Vertikalkraft.....	10
1.4.3	Horizontalkraft.....	13
1.5	Hydrostatischer Auftrieb.....	15
2	Kinematik der Fluide	24
2.1	Vorbemerkungen.....	24
2.2	Bahnlinien, Stromlinien und Streichlinien.....	26
2.3	Kontinuitätsgleichung.....	31
2.3.1	Herleitung in differentieller Form.....	31
2.3.2	Herleitung in integraler Form.....	34
2.3.3	Kinematik der instationären Strömung.....	37
2.3.4	Kontinuitätsgleichung in verschiedenen Koordinatensystemen.....	39
3	Stromfadentheorie reibungsfreier Fluide	40
3.1	Stromfaden.....	40
3.2	EULER-Bewegungsgleichung für das Kräftegleichgewicht in Stromfadenrichtung.....	41
3.3	BERNOULLI-Gleichung für inkompressible Fluide ohne Reibung.....	46
3.4	Radiale Druckgleichung.....	47
3.5	Allgemeine EULER-Bewegungsgleichung.....	54
3.6	Kontinuitätsgleichung für einen Stromfaden.....	55
3.7	Kavitation in einem Fallrohr.....	59
4	Impuls- und Drallsatz	76
4.1	Allgemeiner Impulssatz der Mechanik.....	76
4.2	Spezieller Impulssatz der Strömungstechnik.....	77
4.2.1	Herleitung für den Stromfaden.....	77
4.2.2	Reaktionswandkraft bei Außendruck.....	86

4.3	Anwendung des speziellen Impulssatzes der Strömungs- technik auf eine Rohrabstützung.....	90
4.4	Drallsatz.....	93
4.5	Anwendungen des Drallsatzes.....	96
4.5.1	EULER-Strömungsmaschinenhauptgleichung.....	96
4.5.2	Optimale Umfangsgeschwindigkeit einer PELTON- Wasserturbine.....	101
5	Bewegung kompressibler Fluide (Gasdynamik).....	105
5.1	Einführung.....	105
5.2	Thermodynamische Grundgleichungen für thermisch und kalorisch ideale Gase.....	106
5.2.1	Thermische Zustandsgleichung.....	106
5.2.2	Kalorische Zustandsgleichung.....	106
5.2.3	GIBBS-Fundamentalgleichung.....	107
5.3	Schallausbreitung.....	109
5.3.1	Schallausbreitung in ruhenden Fluiden.....	109
5.3.2	Schallausbreitung in bewegten Fluiden.....	111
5.4	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik für einen Stromfaden.....	114
5.5	Definition der Ruhegrößen und kritischen Größen.....	118
5.5.1	Ruhegröße und Energieellipse.....	118
5.5.2	Kritische Größen.....	122
5.6	Isentropes Ausströmen aus einem Druckkessel.....	123
5.7	Flächen-Geschwindigkeits-Beziehung.....	126
5.8	Verdichtungsstöße.....	132
5.8.1	Senkrechter Verdichtungsstoß.....	132
5.8.2	Schiefer Verdichtungsstoß.....	136
5.9	LAVAL-Düse.....	139
6	NAVIER-STOKES-Bewegungsgleichung.....	147
6.1	Molekulartheoretische Erklärung der Viskosität.....	147
6.2	NEWTON-Schubspannungsansatz.....	149
6.3	NEWTON-Fluide.....	153
6.4	Nicht-NEWTON-Fluide.....	154
6.5	NAVIER-STOKES-Bewegungsgleichung für inkompressible NEWTON-Fluide.....	158
7	Potentialströmung inkompressibler Fluide.....	165
7.1	Definition der Potentialströmung.....	165
7.2	Grundgleichungen für räumliche instationäre Potentialströmung	170
7.3	Ebene stationäre Potentialströmung.....	172
7.3.1	CAUCHY-RIEMANN-Differentialgleichungen.....	172
7.3.2	Beispiele.....	174

8	Wirbelströmungen	177
8.1	RANKINE-Wirbel.....	177
8.2	Analogien.....	180
8.3	Wirbelsatz von THOMSON.....	182
8.4	Wirbelsatz von HELMHOLTZ.....	184
8.5	Wirbelsatz von BIOT-SAVART.....	186
9	Grenzschichtströmungen	190
9.1	Einführung.....	190
9.2	PRANDTL-Grenzschichtgleichungen.....	191
9.3	Laminare Grenzschicht an der ebenen, unendlich langen Platte in freier Strömung.....	193
9.4	Grenzschichtdicken.....	194
9.4.1	Phänomenologie.....	194
9.4.2	99%-Grenzschichtdicke der ebenen Platte.....	195
9.4.3	Verdrängungsdicke.....	197
9.4.4	Impulsverlustdicke.....	199
10	Turbulente Strömungen inkompressibler Fluide	201
10.1	REYNOLDS-Farbfadenversuch.....	201
10.2	Turbulenzgrad.....	205
11	Strömung inkompressibler Fluide in Rohrleitungen	207
11.1	BERNOULLI-Gleichung.....	207
11.2	Einbauteil-Druckverlust.....	208
11.3	Rohrreibungs-Druckverlust.....	214
11.3.1	Einlaufströmung.....	214
11.3.2	Rohrreibungskoeffizient bei laminarer Strömung.....	215
11.3.3	Rohrreibungskoeffizient bei turbulenter Strömung.....	217
11.4	MOODY-Diagramm.....	218
12	Umströmung von Körpern	221
12.1	Widerstand umströmter Körper.....	221
12.1.1	Kugelwiderstandsversuche von EIFFEL und PRANDTL.....	221
12.1.2	NEWTON-Stoßtheorie.....	223
12.1.3	Strömungswiderstand als Summe von Druck- und Reibungswiderstand.....	224
12.2	Widerstand von Zylinder, Kugel und Kreisscheibe.....	227
	Namens- und Sachverzeichnis	229