

Fluid- und Thermodynamik

Springer

Berlin

Heidelberg

New York

Barcelona

Budapest

Hong Kong

London

Mailand

Paris

Tokyo

Kolumban Hutter

Fluid- und Thermodynamik

Eine Einführung

Mit 185 Abbildungen



Springer

Professor Kolumban Hutter, Ph. D.

Institut für Mechanik III
Technische Hochschule Darmstadt
Hochschulstraße 1
D-64289 Darmstadt

Umschlagbild: Wirbelstraße II – Photo: R. Priem

ISBN-13: 978-3-540-59235-8 e-ISBN-13: 978-3-642-97827-2

DOI: 10.1007/ 978-3-642-97827-2

CIP-Eintrag beantragt.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, 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 Grenzen 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-Verlag Berlin Heidelberg 1995

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.

Satz: Reproduktionsfertige Vorlage vom Autor

SPIN: 10501236

21/3144 – 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort

Dieses Buch bildet eine erweiterte Niederschrift einer Vorlesung über *“Einführung in die Fluid- und Thermodynamik”*, welche ich seit einigen Jahren als einsemestrige Veranstaltung für Studenten der Regelungstechnik und der Datentechnik der Technischen Hochschule Darmstadt halte. Ich habe es aus mehreren Gründen geschrieben: Erstens wollte ich meinen Studenten die Erarbeitung eines grundlegenden, aber für den Lernenden nicht einfachen Stoffes erleichtern und einen Text bereitstellen, der die einzelnen Themen etwas breiter behandelte, als es in meinen Handnotizen geschehen war. Zweitens erachte ich es als einen besonderen Glücksfall, daß die Fluiddynamik und die Thermodynamik in einem einzigen Lehrgang – schon vom Titel her – behandelt werden. Dies bietet die reizvolle Aufgabe, die beiden Stoffgebiete *“Fluidmechanik”* und *“Thermodynamik”* nicht als Disjunkta, sondern als Einheit anzusehen, was sie ja eigentlich auch sind. Drittens schließlich, wird die Vorlesung an der Technischen Hochschule Darmstadt für Studenten im Hauptstudium – etwa im 6. oder 8. Semester – angeboten und gestattet dem Dozenten, in den mathematischen und mechanischen Grundlagen von breiteren Voraussetzungen auszugehen als dies in üblichen Kursen der technischen Mechanik möglich ist.

Diese Prämissen legen im wesentlichen die Form des Buches fest. Als Einführung kann es nicht vollständig sein. Man muß sich stofflich automatisch beschränken. Als Vorlesungsunterlage für fortgeschrittene Studenten der genannten elektrotechnischen Fachrichtungen, für welche Fluid- und Thermodynamik nicht zu den zentralen Themen ihrer Studienrichtung gehören, soll es in erster Linie *Verständnis* und erst in zweiter Linie *Stoffwissen* vermitteln. Ich habe mich daher besonders bemüht, die grundsätzlichen Ideen und Konzepte der Fluid- und Thermodynamik klar darzustellen, dabei aber auch deren Anwendung nicht zu vernachlässigen.

Ich habe versucht, die Darstellung von unnötigem mathematischen Beiwerk freizuhalten, mich aber auch nicht davor gescheut, gewisse mathematische Grundkenntnisse vorauszusetzen und diese auch einzusetzen. Weil bei vielen Studenten der Ingenieurwissenschaften im Hauptstudium die mathematischen Kenntnisse aus dem Grundstudium in Vergessenheit geraten, muß dies behutsam geschehen. So werden die Massen- und Impulsbilanz z. B. sowohl anhand eines materiellen Elementarwürfels als auch unter Zuhilfenahme

von allgemeinen integralen Bilanzaussagen unter Verwendung des aus der Vektorenanalyse bekannten Gaußschen Satzes hergeleitet. (Dieser wird übrigens in einem Anhang zusammen mit dem Stokesschen Satz erläutert). Diese parallele Vorführung von physikalischen Aussagen mit einfachen und etwas eleganteren mathematischen Mitteln soll den Leser darauf vorbereiten, eine feldtheoretische Formulierung des ersten und zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik im sechsten Kapitel ohne Schwierigkeiten verstehen zu können. Die Begriffe der Differentiation und des Integrals betrachte ich in einem gewissen Sinne als selbstverständlich, und ich setze auch voraus, daß der Leser mit einfachen Differentialgleichungen umgehen kann. Was die Mechanik betrifft, so werden die Grundkenntnisse, wie sie in einfachsten Vorlesungen aus der Technischen Mechanik und der Physik geboten werden, vorausgesetzt. So werden der Kraftbegriff und das Newtonsche Grundgesetz erwähnt, aber nicht weiter erläutert. Ich glaube kaum, daß dies den Leserkreis des Buches entscheidend einschränkt. Denn es ist allgemein Tradition, die Fluid- und die Thermodynamik unter Voraussetzung dieser Kenntnisse zu unterrichten.

Bei der Auswahl des Stoffes habe ich mich bemüht, auch etwas neuartigere Themen in den Text einzubinden. So beschränkt sich der Begriff der Flüssigkeit nicht nur auf ideale, reibungsfreie strömende und Newtonsche Fluide, sondern vielfach werden auch Strömungen eines allgemeineren Flüssigkeitstyps betrachtet. Desgleichen wird versucht, den Anwendungen aus der Technik auch solche aus den allgemeinen Naturwissenschaften (Meteorologie, Geowissenschaften) beiseitezustellen.

Es gibt viele Zugänge zur klassischen Thermodynamik, und es ist auch bekannt, daß das Erlernen der Grundprinzipien den Studenten im allgemeinen Schwierigkeiten bereitet. Mindestens zum Teil ist diese Schwierigkeit darauf zurückzuführen, daß die Darstellungsweise der thermodynamischen Konzepte, wie sie uns aus dem 19. Jhd. vermittelt wurde, eine ungenügende "sprachliche" Anpassung an das 20. Jhd. gefunden hat. Man darf das mathematische Rüstzeug, wie es den heutigen Studenten in den unteren Semestern geboten wird, nicht nur in der Fluidmechanik benutzen, sondern soll davon in gleichem Maße auch in der Thermodynamik Gebrauch machen. Differentiale, die keine totalen Differentiale sind, bedürfen keiner eigenen Symbole, und der Gaußsche und Stokessche Satz sind ebenso verwendbar. Was für den Studenten das Erlernen der Thermodynamik ebenfalls erschwert, ist m. E. eine oft wenig klare Darstellungsweise dessen, was axiomatische Voraussetzung ist und was daraus folgt; desgleichen, welche neuen Konzepte mit den gewonnenen Erkenntnissen *motiviert* werden. So lassen sich für sogenannte adiabate Systeme die Begriffe der Entropie sowie der absoluten Temperatur *herleiten*. In der modernen feldtheoretischen Behandlung des zweiten Hauptsatzes adiabater oder allgemeiner Systeme wird die Existenz beider dieser Größen in der Regel *postuliert*, ganz zu schweigen davon, daß die Resultate der klassischen Thermodynamik adiabater Systeme benutzt werden, um die

allgemeine Formulierung des zweiten Hauptsatzes zu *motivieren*. Ich hoffe, es ist mir gelungen, dies klar auseinanderzuhalten.

In einem Buch über Fluid- und Thermodynamik darf natürlich die Anwendung nicht fehlen, welche beide Wissensgebiete miteinander verknüpft. Die Gasdynamik ist zum Nachweis dieser Verknüpfung bestens geeignet; sie bietet darüber hinaus die Gelegenheit, in der Stoßtheorie Strömungsprozesse, bei welchen auf bestimmten Flächen gewisse Variablen Sprünge aufweisen können, zu behandeln. Im achten Kapitel wird schließlich der Versuch unternommen, eine kurze, aber geschlossene Theorie der Dimensionsanalyse darzulegen. Sie gehört zwar zumeist nicht zum Lehrstoff der Fluid- und Thermodynamik; sie ist aber äußerst nützlich, und ich pflege sie in vielen Vorlesungen anzuwenden, ohne im Detail darauf einzugehen. Ich hoffe, daß der Leser an dieser Darstellung Gefallen findet.

Bei der Ausarbeitung des Textes haben mich viele Mitarbeiter unterstützt, so Frau R. Danner, die Herren C. Balan, G. Bauer, S. Diebels, P. Güting, K. Jöhnk, T. Koch, A. Sadiki, Y. Wang, L. Weber, U. Weimar, T. Wu und T. Zwinger. Die Zeichnungen sind von Frau R. Schreiber erstellt worden. Ihnen allen sei herzlich gedankt.

Darmstadt, Februar 1995

K. Hutter

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Historische Notizen und Abgrenzung des Fachgebietes	1
1.2 Eigenschaften von Flüssigkeiten	3
2. Hydrostatik	13
2.1 Der Flüssigkeitsdruck	15
2.2 Grundgleichung der Hydrostatik	18
2.3 Druckverteilung in einem dichtebeständigen, schweren Fluid .	22
2.4 Hydrostatischer Auftrieb schwimmender Körper	30
2.5 Hydrostatik im beschleunigten Bezugssystem	40
2.6 Druckverteilung in der Atmosphäre	44
3. Hydrodynamik idealer Fluide	49
3.1 Kinematische Grundbegriffe	49
3.1.1 Bewegung, Geschwindigkeit	49
3.1.2 Stromlinien, Bahnlinien, Streichlinien	53
3.2 Massenbilanz, Kontinuität	62
3.3 Impulsbilanz	71
3.4 Die Bernoullische Gleichung	77
3.5 Einfache Anwendungen der Bernoullischen Gleichung	82
3.6 Globale Formulierung des Impulssatzes	97
3.7 Anwendungen des Impulssatzes	100
3.7.1 Reaktionskräfte in durchströmten Rohren	100
3.7.2 Bordamündung	100
3.7.3 Aufprallen eines Freistrahles auf eine Wand	104
3.7.4 Mischvorgänge	105
3.7.5 Wassersprung	109
3.8 Strömungen um unendlich lange Tragflügel	112
3.8.1 Strömung durch ein periodisches Flügelgitter	112
3.8.2 Strömung um einen Einzelflügel	117
3.9 Drallbilanz	122
3.10 Anwendungen des Drallsatzes	127

3.10.1	Segnersches Wasserrad	127
3.10.2	Eulersche Turbinengleichung	130
4.	Viskose Flüssigkeiten	133
4.1	Dynamische Grundgleichungen viskoser Flüssigkeiten	133
4.1.1	Newtonsche Fluide	137
4.1.2	Dilatante und pseudoplastische, dichtebeständige Fluide	144
4.2	Ebene Schichtenströmungen	149
4.3	Anwendungen	156
4.3.1	Couette Viskosimeter	156
4.3.2	Drehkegel-Viskosimeter	159
4.3.3	Öldruckpolster	160
4.3.4	Filmströmung	163
4.3.5	Einfluß des Eigengewichtes bei der ebenen Poiseuille Strömung	165
4.3.6	Gleitlagertheorie	166
4.4	Dreidimensionale Kriechströmung eines pseudo-plastischen Fluids mit freier Oberfläche	172
5.	Rohrströmungen	187
5.1	Laminare Rohrströmungen	188
5.1.1	Das Gesetz von Hagen-Poiseuille	188
5.1.2	Laminare Strömung in zylindrischen Rohren allgemei- nen Querschnitts	191
5.1.3	Ausfluß aus einem Gefäß	194
5.2	Turbulente Strömungen in Rohren	199
5.2.1	Widerstandszahl	199
5.2.2	Einiges zur Turbulenz nach Prandtl und von Kármán .	205
5.2.3	Druckverlustberechnung in turbulenten Rohrströmun- gen	210
6.	Thermodynamik	217
6.1	Grundsätzliches sowie geschichtliche Bemerkungen	217
6.2	Allgemeine Begriffe und Definitionen	226
6.2.1	System	226
6.2.2	Zustand, Prozeß	227
6.2.3	Extensive, intensive, spezifische, molare Zustandsgröße	228
6.2.4	Adiabate und diatherme Wände	231
6.2.5	Empirische Temperatur, Gastemperatur, Tempera- turskalen	232
6.3	Thermische Zustandsgleichungen	236
6.3.1	Ideales Gas	236
6.3.2	Reale Gase	238
6.3.3	Das phänomenologische Modell von van der Waals ...	240
6.4	Reversible und irreversible thermodynamische Prozesse	244

6.4.1	Reversible Expansion und Verdichtung eines Gases . . .	247
6.5	Der erste Hauptsatz	248
6.5.1	Mechanische Energien	248
6.5.2	Der erste Hauptsatz	251
6.5.3	Die kalorische Zustandsgleichung der Fluide	259
6.5.4	Einfache Anwendungen des 1. Hauptsatzes	262
6.5.5	Spezifische Wärmen bei realen Gasen	270
6.6	Der zweite Hauptsatz — Prinzip der Irreversibilität	272
6.6.1	Vorbemerkungen	272
6.6.2	Der zweite Hauptsatz für einfache adiabate Systeme . .	275
6.7	Verallgemeinerung des 2. HS für nicht-adiabate Systeme	288
6.8	Anwendungen des zweiten Hauptsatzes	297
6.8.1	Einfache Beispiele	297
6.8.2	Auswertung des einfachen Entropieprinzips für eine wärmeleitende viskose Flüssigkeit	302
6.9	Zustandsgleichungen	310
6.9.1	Kanonische Zustandsgleichungen	310
6.9.2	Spezifische Wärmen und andere thermodynamische Größen	315
6.9.3	Anwendung auf ideale Gase	321
6.9.4	Isentrope Prozesse in kalorisch idealen Gasen	323
7.	Gasdynamik	325
7.1	Einleitende Bemerkungen	325
7.2	Ausbreitung kleiner Störungen in einem Gas	326
7.2.1	Grundgleichungen	326
7.2.2	Ebene Wellen und Kugelwellen	332
7.2.3	Eigenschwingungsansatz nach Bernoulli	340
7.3	Stationäre, isentrope Stromfadentheorie	343
7.4	Stoßtheorie	356
7.4.1	Grundsätzliches	356
7.4.2	Sprungbedingungen	358
7.4.3	Stationäre Stöße bei einfachen Fluiden unter adiabaten Bedingungen	363
8.	Dimensionsanalyse	371
8.1	Maß-Systeme und Dimensionen	372
8.2	Theorie der dimensionsbehafteten Gleichungen	375
8.2.1	Dimensionshomogenität	375
8.2.2	Das Theorem von Buckingham	378
8.2.3	Systematische Berechnung von dimensionslosen Pro- dukten	382
8.3	Algebraische Theorie der Dimensionsanalyse	389
8.3.1	Transformation von Grundeinheiten	389
8.3.2	Exakte Definition der Dimensionshomogenität	391

XII Inhaltsverzeichnis

8.3.3	Kalkül der dimensionslosen Produkte	395
8.4	Theorem von Buckingham	400
8.4.1	Beweis des Theorems von Buckingham	400
8.4.2	Anwendungen der Theorie	403
8.5	Ähnlichkeit und Modellversuche	414
8.5.1	Theorie	414
8.5.2	Anwendungen	421
A.	Anhang	425
A	Vektoranalysis und Integralsätze	425
A.1	Der Gradient	425
A.2	Der Gaußsche Satz und die Divergenz	427
A.3	Der Stokessche Satz und die Rotation	433
Index	438
Literaturverzeichnis	445