

Technische Strömungslehre

Von

Dr.-Ing. **Bruno Eck**

Fünfte Auflage

Mit 407 Abbildungen



Springer-Verlag
Berlin / Göttingen / Heidelberg
1957

ISBN 978-3-642-52711-1 ISBN 978-3-642-52710-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-52710-4

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,

dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege

(Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Copyright 1941, 1944, 1949 and 1954 by Springer-Verlag OHG., Berlin/Göttingen/Heidelberg.

Softcover reprint of the hardcover 5th edition 1954

Aus dem Vorwort zur ersten Auflage.

Der seit einiger Zeit vergriffenen „Einführung in die technische Strömungslehre“, die in erster Linie für den Physiklehrer bestimmt war, folgt nunmehr ein tiefer gehendes Werk, das sich an Ingenieure, Studenten, die Industrie und andere Interessenten der Flugphysik wendet.

Dem Aufbau des Buches liegen folgende Gesichtspunkte zugrunde: 1. Welches ist die einfachste Form, in der die Hauptgesetze der Strömungslehre abgeleitet und dargestellt werden können? 2. Welche Ergebnisse der theoretischen und experimentellen Forschung sind in erster Linie von praktischem Nutzen? Zur Erreichung dieses Zieles wurden die mathematischen Hilfsmittel auf das unbedingt Notwendige beschränkt (Infinitesimalrechnung), durch zahlreiche Versuchs- und Zahlenbeispiele die Anwendung der Gesetze gezeigt, während Anschauungsmittel der verschiedensten Art zum besseren Verständnis schwieriger Erscheinungen herangezogen wurden.

Während eine große Fülle von mehr mathematisch ausgerichteten Werken der Strömungslehre zur Verfügung steht, fehlte bisher eine mehr dem Techniker zusagende knappe Darstellung. Vielleicht kann das vorliegende Buch hier etwas ausgleichend wirken und gleichzeitig den weiterstrebenden Leser schonend auf weitergehende Darstellungen vorbereiten. Dazu sind im Kleindruck etwas schwierigere und zunächst nicht sehr wichtige Probleme angeschnitten, während zahlreiche Literaturangaben und ein Literaturverzeichnis am Schluß des Buches mit dem Schrifttum bekannt machen.

Von den 278 Abbildungen des Buches stammen 220 aus eigenen Versuchen und Entwürfen. Der Rest ist mit Quellenangabe entlehnt.

K ö l n , im Oktober 1940.

Bruno Eck.

Aus dem Vorwort zur zweiten Auflage.

Das Buch wurde einer eingehenden Neubearbeitung unterzogen, wobei sich eine Reihe Ergänzungen als notwendig erwiesen. An neuen Kapiteln wurden u. a. hinzugefügt: Energieaustausch in reibungsfreien Flüssigkeiten; Ablösung von Flüssigkeitsstrahlen; Näherungsberechnungen für ebene und räumlich gekrümmte Strömungen. Abbildungen und Zahlenmaterial wurden z. T. wesentlich ergänzt.

K ö l n , im Februar 1944.

Bruno Eck.

Aus dem Vorwort zur dritten Auflage.

Wesentliche Umänderungen und Erweiterungen waren notwendig, um den derzeitigen technischen Bedürfnissen Rechnung zu tragen. Insbesondere mußte die Aerodynamik der Verbrennung, wenigstens in den Grundzügen, berücksichtigt werden, zumal es sich hier um äußerst reizvolles Neuland handelt, das im Hinblick auf bekannte und zu erwartende Anwendungen in einer technischen Strömungslehre nicht fehlen darf. Neu ist weiter ein größeres Kapitel über die Bewegung fester Körper in strömenden Medien, um damit einen kurzen grundsätzlichen Einblick in die strömungstechnischen Probleme der Verbrennung fester Brennstoffe, der Sichtung, Aufbereitung, pneumatischen Förderung und der Entstaubungstechnik zu geben. Das umgearbeitete Kapitel über Strömungen über Schaufeln und Profile ist nach den Bedürfnissen des Kreiselmaschinenbaues ausgerichtet worden. Neu sind weiter Ausführungen über Nabendiffusor, Labyrinthdichtungen, Schmiermittelreibung, Winddruck auf Gebäude, sowie eine neue Zusammenstellung der Bewegungsgesetze von Gasen und Dämpfen als Einleitung zu dem Kapitel Gasdynamik. Das Kapitel über Meßtechnik wurde ergänzt.

K ö l n , im Dezember 1948.

Bruno Eck.

Vorwort zur vierten Auflage.

Während die rein theoretische Fundierung der Strömungslehre nunmehr zu einem gewissen Abschluß gekommen ist, steht die Übertragung vieler Erkenntnisse in die Praxis nach wie vor im Vordergrund. Ein weitgehendes Zahlen- und Erfahrungsmaterial liegt bereits vor. Leider ist aber dieses Material so weitgehend in der in- und ausländischen

Literatur verstreut, daß der praktisch arbeitende Ingenieur oft vor einer schwierigen Situation steht. Möge die vorliegende neue Auflage, die weitgehend durchgearbeitet und ergänzt wurde, hier dem Praktiker einige Hilfe bieten, zumindest jedoch den Weg aufzeigen, der im Einzelfall zu beschreiten ist.

Obschon das Buch in den Grundzügen unverändert geblieben ist und sich in dieser Form offenbar bewährt hat, waren zahlreiche Ergänzungen und Verbesserungen notwendig, um die neueren Fortschritte gebührend zu berücksichtigen.

Für wichtige Einzelgebiete können heute praktisch vollkommen befriedigende Darstellungen gegeben werden. Das gilt insbesondere von der PRANDTL-v. KÁRMÁNSchen Turbulenztheorie der Rohrreibung. Daß die genialen Ansätze der beiden Forscher zu einer Lösung geführt haben, mit der die meisten praktischen Aufgaben heute gelöst werden können, dürfte einer der schönsten Erfolge der modernen Strömungslehre sein. Nachdem insbesondere durch amerikanische Messungen ziemliche Klarheiten geschaffen wurden, liegt kein Grund mehr vor, andere überholte Methoden zu benutzen, wenn auch nicht verschwiegen werden darf, daß noch einige ungeklärte Restaufgaben verbleiben.

Bei der Durchsicht des Manuskriptes sowie beim Lesen der Korrekturen wurde ich in dankenswerter Weise von Herrn Dipl.-Ing. O. KEHRMANN, Köln, unterstützt. Ing. L. BOMMES, M.-Gladbach, beteiligte sich in freundlicher Weise bei der Durchsicht der Korrekturen.

Anerkennung verdient der Verlag, der alle Wünsche des Verfassers berücksichtigte und für eine mustergültige Herstellung sorgte.

Köln, im August 1953.

Bruno Eck.

Vorwort zur fünften Auflage.

In Anbetracht des unerwartet schnellen Absatzes habe ich mich mit einer berichtigten Neuauflage begnügt, die sich von der letzten Auflage nur durch eine größere Anzahl von Verbesserungen unterscheidet. Einige neue Abbildungen wurden eingefügt.

Köln, im März 1956.

Bruno Eck.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Hydrostatik	1
1. Der statische Druck	1
2. Messung des Druckes	2
3. Gleichgewicht der Atmosphäre	7
 II. Bewegungslehre	12
4. Vergleich mit der Bewegung fester Körper	12
5. Allgemeine Bewegungsgleichungen	17
a) Stationäre Bewegung S. 19. — b) Nichtstationäre Strömungen S. 21. — c) Ableitung bei veränderlicher Dichte S. 22. — d) Bewegungsgleichungen für ein rotierendes System S. 23. — e) Unterdruck S. 25. — f) Staudruck S. 27. — g) Gasausfluß aus einem Behälter S. 28. — h) Weitere Beispiele S. 29. — i) Abreißen der Strömung in einem Abfallrohr S. 30. — k) Beispiel für nichtstationäre Strömung S. 31.	
6. Kräfte senkrecht zur Strömungsrichtung	32
7. Drehung von Flüssigkeitsteilchen. Begriff der mittleren Drehung	35
8. Behandlung der Flüssigkeit als Kontinuum	36
9. Drehungsfreie Bewegung	37
10. Drehungsfreie Kreisbewegung	38
11. Die wirkliche Kreisströmung. (Der Wirbel)	42
12. Zirkulation	42
13. Das Potential	44
14. Energiebetrachtung	45
15. Weitere Betrachtungen über Wirbelbewegungen	46
16. Dicke des Wirbelkernes	49
17. Stellen der größten und kleinsten Geschwindigkeiten	50
18. Energieaustausch in reibungsfreien Flüssigkeiten	50
a) Energieübertragung durch in Strömungsrichtung bewegte Körper S. 52. — b) Energieübertragung durch schräg zur Strömungsrichtung bewegte Körper S. 53.	
19. Quellen und Senken	56
a) Grundsätzliches S. 56. — b) Überlagerungsgesetz S. 56. — c) Zusammensetzung einer Parallelströmung mit einer Quelle S. 57. — d) Zusammensetzung von Quelle und Senke S. 57. — e) Doppelquelle S. 58. — f) Überlagerung von Parallelströmung mit Quelle und Senke S. 59. — g) Zusammensetzung von Quelle und Senke S. 59. — g) Zusammensetzung von Quelle und Wirbel (Wirbelquelle) S. 60. — h) Doppelquelle und Parallelströmung S. 61. — i) Quellen und Senken im Raume S. 62.	
20. Graphische Konstruktion von Strömungsbildern	64
21. Genauere Verfahren	66
a) Reibungsfreie Kreisströmung S. 68. — b) Umströmung eines Zylinders S. 68. — c) Umströmung einer Kugel S. 68. — d) Strömung zwischen einer Wand und einem Zylinder S. 69. — e) Strö-	

	Seite
mung in einem gekrümmten Kanal S. 69. — f) Strömung zwischen konzentrischen Kreisen S. 70. — g) Praktische Schlußfolgerungen S. 70.	
22. Besonderheiten der rotationssymmetrischen Strömung	74
23. Genauere mathematische Betrachtung	74
24. Konstruktion von Strömungsbildern mit Hilfe der Stromfunktion	76
25. Experimentelle Darstellung der reibungsfreien Strömung	78
26. Impulssatz	80
a) Ableitung S. 80. — b) Die Kugel im schrägen Luftstrahl S. 82. — c) Kraftwirkung auf Krümmer S. 83. — d) Reaktionsdruck von Strahlen S. 84. — e) Ablenkung eines Strahles durch eine Schneide S. 84. — f) Beeinflussung von Strahlen ohne Richtungsänderung S. 85. — g) Ablenkung eines Strahles ohne Widerstand S. 86. — h) Ablenkung eines Strahles mit Widerstand S. 88. — i) Wirkung eines Schaufelgitters S. 89. — k) Berechnung des Stoßverlustes S. 92. — l) Anwendung des Impulssatzes bei beliebigen freien Strömungen S. 94. — m) Auftrieb S. 96. — n) Impulsmomente (Flächensatz) S. 98.	
27. Reibungsfreie Strömung in offenen Rinnen	99
III. Einfluß der Reibung bei ablösungsfreien Strömungen	102
28. Innere Reibung infolge Zähigkeit	102
29. Ähnlichkeitsgesetz	105
30. Bewegungsgleichungen mit Reibungsglied	111
31. Schmiermittelreibung	113
32. Strömungsformen	114
33. Strömungswiderstand in Rohren	117
a) Allgemeine Bemerkungen S. 117. — b) Das glatte Rohr S. 119. — c) Geschwindigkeitsverteilung bei der Rohrströmung S. 121. — d) Die kinetische Energie der Rohrströmung. (Korrekturglied der Bernoullischen Gleichung.) S. 123.	
34. Eingehendere Betrachtung der Turbulenz	124
a) Wandturbulenz S. 124. — b) Übertragung der Turbulenztheorie auf die Rohrreibung S. 126. — c) Praktische Schlußfolgerungen aus der Prandtl-v. Kármánschen Rohrreibungstheorie S. 130. — d) Verfahren nach Wierz und Tonn S. 136. — e) Widerstand in parallel geschalteten Leitungen.	
35. Druckverlust in ruhenden Schüttungen	139
a) Versuche mit Kugelschüttungen S. 139. — b) Versuche mit Kohle und anderen Schüttkörpern S. 141. — c) Instabilität von Schüttungen S. 141. — d) Strömungsverlauf in Schüttungen S. 142.	
36. Rohrreibungswiderstand bei pulsierender Durchflußströmung .	142
37. Aufwertung	143
a) Kanalquerschnitte S. 143. — b) Aufwertungsformel bei Maschinen mit weiter Schaufelleitung S. 144.	
38. Anlaufstrecke	145
39. Strömung in geraden Rohren nicht kreisförmigen Querschnittes	147
40. Oberflächenwiderstand	149
a) Grenzschichtbetrachtungen S. 149. — b) Die technisch zulässige Raubigkeit S. 155. — c) Impulsverfahren nach BETZ S. 156.	

	Seite
41. Radscheibenreibung	158
42. Vermischung eines freien Strahles. (Strahl-Turbulenz.)	159
43. Reichweite und Kraftwirkung von Freien Strahlen	164
44. Isotrope Turbulenz.	167
45. Der Umschlag.	167
a) Entstehung des Umschlags (Turbulenz) S. 168. — b) Umschlag und Instabilitäten bei gekrümmten Flächen S. 168. — c) TAYLORSches Umschlagkriterium. S. 170. — d) Laminarprofile S. 170. — e) Umschlag in divergenten Kanälen S. 171.	
46. Entstehung der Turbulenz	171
47. Turbulente Vermischung in Verbrennungsräumen	172
a) Grundsätzliche Bemerkungen S. 172. — b) Neue Versuchsmethoden zur Untersuchung von Mischvorgängen in Feuerungen nach Rummel S. 175. — c) Ähnlichkeitsbeziehungen S. 177. — d) Vermischung von Gas- und Luftstrahl in einem Raum. (Gasbrenner in Öfen.). S. 178 — e) Versuche mit Zweitluftzuführung S. 181. — f) Einfluß der Vermischung auf die Verbrennung fester Brennstoffe S. 184. — g) Verbrennung in schwingenden Gasäulen nach Schmidt S. 186.	
IV. Das Ablösungsproblem.	187
48. Allgemeines	187
49. Ablösung an scharfen Kanten.	187
50. Ablösung in divergenten Kanälen (Diffusoren)	188
51. Der Naben-Diffusor	199
52. Ablösung in rotierenden Kanälen und bei rotierenden Körpern	202
53. Dimensionslose Erfassung des Widerstandes	204
54. Kugelströmung	205
55. Krümmer	209
56. Ablösung bei Düsen	219
57. Trennung und Vereinigung von Rohrverzweigungen	223
58. Ventile und Absperrmittel	225
59. Strömungsverluste infolge scharfer Kanten, Kontraktion usw.	226
60. Unstetige Querschnittserweiterung.	228
61. Unstetige Rohrverengung.	229
62. Erzeugung möglichst großer Durchflußwiderstände. Labyrinthdichtungen	231
63. Formwiderstand, Oberflächenwiderstand	235
64. Druckverteilung um Körper bei reibungsfreier Strömung	236
65. Bewegung im Totwasserraum	238
66. Druckverteilung bei Kugeln und Zylindern.	242
67. Beeinflussung des Widerstandes durch Ausbildung der Vorderkante	244
68. Führt sehr starke Verzögerung immer zur Ablösung?	244
69. Widerstand von Luftschiffkörpern	246
70. Widerstandskörper in verzögerter Strömung	248
71. Widerstand von Fahrzeugen	250
72. Winddruck auf Gebäude	251
73. Ablösung von Flüssigkeitsstrahlen	255
74. Zusammenstellung von Widerstandsziffern	259
75. Widerstand bei Beschleunigung eines Körpers in einer Flüssigkeit	261
76. Die Hauptgesetze der Ablösung (Zusammenstellung).	262

	Seite
V. Bewegung fester Körper in strömenden Medien	263
77. Die Schwebegeschwindigkeit von Kugeln.	263
78. Praktische Ermittlung der Schwebegeschwindigkeit	265
79. Bewegung von Staubteilchen in typischen Strömungsfällen	265
a) Senkrechter Einschub mit Anfangsgeschwindigkeit S. 265. —	
b) Freier senkrechter Einfall ohne Anfangsgeschwindigkeit	
S. 266. — c) Bewegung von Staubteilchen in einem Absetzraum	
S. 267. — d) Beschleunigung in Strömungsrichtung ohne An-	
fangsgeschwindigkeit S. 267.	
80. Ausschleudern von Staubteilchen in gekrümmten Bahnen	268
a) Die ideale Wirbelsenke als Mittel der Staubabsonderung	
S. 269. — b) Schraubenförmige Bewegung als Grundströmung.	
Drallerzeugung durch Schnecke S. 271.	
81. Ähnlichkeitsbetrachtungen.	274
82. Einfluß der Reibung auf die Bewegung in Abscheidern	274
83. Windsichtung	277
84. Materialförderung im senkrechten Steigrohr.	281
85. Eigenbewegung der Teilchen bei verschiedener Kornverteilung	285
86. Pneumatische Förderung in waagerechten Rohren	286
87. Gesetzmäßigkeiten für Schwebekörper in der konischen Röhre	291
a) Strömungsverluste bei dicht gefülltem konischen Rohr S. 293.	
88. Winkler Schwebbett.	295
VI. Strömung um Schaufeln und Profile	296
89. Fragestellung	296
90. Kurze Übersicht über Kraftwirkungen	299
91. Bezeichnungen und Darstellungsmethoden	300
92. Entstehung der Auftriebskraft.	303
93. Die unendlich lange Schaufel	307
94. Die Schaufel im Gitterverbände.	310
95. Randeinflüsse. (Induzierter Widerstand.).	313
a) Einfluß des freien Spaltes von Kreiselmaschinenschaufeln	
S. 313. — b) Randeinfluß bei teilweise beaufschlagten Schaufeln	
S. 317. — c) Randeinflüsse bei freier Umströmung S. 319.	
96. Wann ist eine Profilierung von Schaufeln lohnenswert?	325
a) Überkritisch S. 331. — b) Unterkritisch S. 332.	
VII. Hilfsmittel zur Vermeidung der Ablösung	332
97. Grenzschichtabsaugung	332
98. Mitbewegte Wand	334
99. Ausblasen von Druckluft	335
100. Leitschaufeln	336
VIII. Kavitation.	341
101. Allgemeines	341
102. Praktische Auswirkungen	342
103. Physikalische Ergänzungen	344
104. Erosion durch Tropfenschlag	347
IX. Gasdynamik	348
105. Bewegungsgesetze für Gase und Dämpfe.	348

	Seite
a) Allgemeine Beziehungen S. 348. — b) Energiesatz für Strömungen mit Wärmeübertragung S. 350. — c) Isotherme Rohrströmung mit Reibung S. 352. — d) Ranque'sches Wirbelrohr S. 354. — e) Wärmeübertragung in freier Strömung S. 356.	
106. Physikalische Ableitung der Schallgeschwindigkeit	357
107. Technische Ableitung der Schallgeschwindigkeit	358
108. Der Machsche Winkel. Die Machsche Kennzahl	359
109. Allgemeine thermodynamische Beziehungen.	361
110. Konstruktion ebener Strömungsbilder bei Überschallgeschwindigkeit	364
111. Der Verdichtungsstoß	367
112. Beeinflussung der Grenzschichten durch Verdichtungsstöße. Der λ -Stoß	369
113. Der X-Stoß (Kondensationsstoß)	371
114. Lavaldüsen	372
115. Einfluß der Kompressibilität bei Unterschallströmungen	374
116. Tragflügeleigenschaften bei Überschallströmungen	376
117. Vorgänge in der Nähe der Schallgeschwindigkeit	379
X. Strömungstechnische Messungen	381
118. Druckmeßgeräte	381
119. Messung von Druck und Geschwindigkeit in offener Strömung	384
120. Feststellung der Strömungsrichtung mit Staugeräten	391
121. Messung mit Düsen, Blenden und Venturirohren	393
122. Staubmessungen	406
123. Gefäßmessungen	408
124. Überfallmessungen	409
125. Direkt anzeigende Durchflußmesser	410
126. Im Flüssigkeitsstrom sich drehende Meßgeräte	412
127. Experimentelle Möglichkeiten zur Sichtbarmachung von Strömungen.	413
a) Flüssigkeitsströmungen S. 413. — b) Luft- und Gasströmungen S. 414.	
Literaturverzeichnis	417
Namen- und Sachverzeichnis	419