

## Inhalt

### 1. Allgemeine Grundlagen

1.1. Einleitung . . . . .	13
1.2. Mathematische Hilfsmittel zur Darstellung turbulenter Strömungen . . . . .	15
1.2.1. Erwartungswerte, Wahrscheinlichkeitsdichte . . . . .	15
1.2.2. Mittelwerte . . . . .	18
1.2.3. Weitere Einzelheiten über die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen . .	21
1.2.4. Statistische Beschreibung von Geschwindigkeitsfeldern kontinuierlicher Medien . . . . .	24
1.2.5. Fourier-Analyse der Turbulenzfelder . . . . .	29
1.2.6. Konstruktion symmetrischer Tensorfelder . . . . .	36
1.3. Strömungsgleichungen . . . . .	42
1.3.1. Allgemeine Strömungsgleichungen für Gase . . . . .	42
1.3.2. Strömungsgleichungen für inkompressible Flüssigkeiten . . . . .	47
1.3.3. Randbedingungen und mathematische Formulierung des Turbulenz- problems . . . . .	49
1.3.4. Druckschwankungen und Wirbelgleichung . . . . .	52
1.3.5. Strömungsgleichungen in Mittelwerten; Reynoldssche Gleichungen . .	55
1.3.6. Bewegungsgleichungen der statistischen Momente und der Spektral- funktionen . . . . .	57

### 2. Homogene Turbulenzfelder

2.1. Einführung . . . . .	63
2.1.1. Generelle Eigenschaften . . . . .	63
2.1.2. Wirbelgleichung . . . . .	66
2.1.3. Windkanalturbulenz . . . . .	67
2.2. Kinematik und Dynamik der homogenen Turbulenz . . . . .	67
2.2.1. Kinematische Beziehungen . . . . .	67
2.2.2. Korrelations- und Spektralfunktionen im gleichförmigen Flüssigkeits- strom . . . . .	69
2.2.3. Dynamische Gleichungen . . . . .	72
2.3. Isotrope Turbulenzfelder . . . . .	74
2.3.1. Kinematik isotroper Turbulenz . . . . .	74
2.3.2. Dynamik der isotropen Turbulenzfelder . . . . .	83
2.3.3. Energietransport im Wellenzahlenraum . . . . .	85
2.4. Struktur und Energiedissipation isotroper Turbulenz . . . . .	90
2.4.1. Örtliche Struktur bei großen Reynolds-Zahlen . . . . .	90
2.4.2. Grobstruktur . . . . .	101
2.4.3. Endstadium . . . . .	104

## 8 Inhalt

2.4.4. Ähnlichkeit der Struktur und das Abklinggesetz . . . . .	107
2.4.5. Energiedissipation bei großen Reynolds-Zahlen . . . . .	112
2.4.6. Lösungen der Spektralgleichung nach dem Ähnlichkeitsansatz . . . . .	116
2.5. Achsensymmetrische Turbulenzfelder . . . . .	120
2.5.1. Kinematik und Dynamik der achsensymmetrischen Turbulenz . . . . .	120
2.5.2. Energieaustausch zwischen Geschwindigkeitskomponenten verschiedener Richtungen . . . . .	122
<b>3. Turbulente Scherströmungen</b>	
3.1. Grundzüge der Scherströmungen . . . . .	127
3.1.1. Einleitung . . . . .	127
3.1.2. Reynoldssche Gleichungen für turbulente Strömungsschichten . . . . .	128
3.1.3. Gleichungen für die Reynolds-Spannungen und kinetische Schwankungsenergie . . . . .	132
3.1.4. Über den Energiehaushalt . . . . .	135
3.1.5. Scherströmungen großer Reynolds-Zahlen . . . . .	138
3.1.6. Gleichgewichtsbedingungen einfacher Scherströmungen . . . . .	140
3.1.7. Räumlich-zeitlicher Bewegungsablauf . . . . .	145
3.2. Strömung nahe fester Wände . . . . .	150
3.2.1. Ähnlichkeitsbetrachtungen . . . . .	151
3.2.2. Experimentelle Befunde . . . . .	153
3.2.3. Energiehaushalt . . . . .	156
3.2.4. Bewegungen in der viskosen Unterschicht . . . . .	157
3.2.5. Strömung an rauen Oberflächen . . . . .	158
3.3. Freie Grenzen der Turbulenzfelder . . . . .	162
3.3.1. Vorbemerkungen . . . . .	162
3.3.2. Gemischt laminar-turbulente Strömungen . . . . .	163
3.3.3. Statistische Beschreibung . . . . .	164
3.3.4. Dynamik der Turbulenzausbreitung . . . . .	166
3.3.5. Die Strömung außerhalb der Turbulenzgebiete . . . . .	170
3.4. Halbempirische Berechnungsmethoden . . . . .	171
3.4.1. Austauschansatz und Mischungswegformel . . . . .	171
3.4.2. Berechnungsmethoden auf der Grundlage der Turbulenz-Energiegleichung . . . . .	175
3.4.3. Bewegungsgleichung für ein Integral-Längenmaß . . . . .	178
3.4.4. Weitere Entwicklungen . . . . .	184
<b>4. Erscheinungsformen turbulenter Scherströmungen</b>	
4.1. Einführung . . . . .	186
4.2. Strömung durch Leitungen und Rohre gleichbleibender Querschnitte . . . . .	187
4.2.1. Druckabfall und Schubspannungen . . . . .	188
4.2.2. Ähnlichkeitsbetrachtungen . . . . .	189
4.2.3. Widerstandsgesetz . . . . .	191
4.2.4. Weitere Einzelheiten der Strömung . . . . .	192
4.2.5. Anwendung halbempirischer Ansätze . . . . .	195
4.2.6. Sekundärströmungen . . . . .	196
4.3. Freie Turbulenz . . . . .	198

4.3.1. Ähnlichkeitsbetrachtungen . . . . .	200
4.3.2. Versuchsergebnisse . . . . .	207
4.3.3. Turbulenzstruktur. . . . .	213
4.3.4. Anwendung halbempirischer Ansätze . . . . .	217
4.3.5. Freie Strahlgrenzen . . . . .	219
4.4. Grenzschichten . . . . .	222
4.4.1. Grenzschichtgleichungen . . . . .	222
4.4.2. Grenzschicht an einer flachen Platte . . . . .	224
4.4.3. Reibungswiderstand der flachen Platte . . . . .	228
4.4.4. Gleichgewichtsgrenzschichten . . . . .	233
4.4.5. Turbulenzstruktur. . . . .	240
4.4.6. Berechnungsverfahren . . . . .	241
<b>5. Weitere Probleme</b>	
5.1. Wärmetransport und Vermischung . . . . .	252
5.2. Erzeugung und Ausbreitung von Schall . . . . .	254
5.3. Strömungen mit erheblichen Dichteänderungen . . . . .	255
5.4. Analytische Theorien der Turbulenz. . . . .	257
5.5. Statistische Strömungsmechanik . . . . .	259
<b>Weiterführende Bücher</b> . . . . .	260
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	262