

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XV
-----------------------------	----

1	Einleitung	1
1.1	Zum Begriff der Wärme	1
1.2	Wärmetransportmechanismen	2
1.3	Wärmedurchgang	4
1.4	Die Wirkung der Zähigkeit	7
1.5	Erzwungene und freie Konvektion	10
1.6	Laminare und turbulente Strömung	12
1.7	Stoffübertragung	14
1.8	Zur Geschichte der Wärmeübertragung	15

Teil 1: Grundgleichungen der Thermofluidynamik

2	Impuls- und Wärmetransport in Fluiden	31
2.1	Grundlagen der Kontinuumsmechanik	31
2.1.1	Zum Begriff des Kontinuums	31
2.1.2	Kinematische Eigenschaften	33
2.1.3	Die Erhaltungssätze	34
2.2	Allgemeine Grundgleichungen	35
2.2.1	Kontinuitätsgleichung	35
2.2.2	Bewegungsgleichung	38
2.2.3	Energiegleichung	42
2.3	Kinetische Ansätze	48
2.3.1	Verzerrungstensor	48
2.3.2	Stokesscher Schubspannungsansatz	51
2.3.3	Fourierscher Wärmeleitungsansatz	53
2.4	Grundgleichungen für Newtonsche Fluide	54
2.4.1	Navier-Stokes-Gleichungen	54
2.4.2	Anfangs- und Randbedingungen	56
2.4.3	Gaskinetische Herleitung der Grundgleichungen	58

3	Turbulenter Impuls- und Wärmetransport	61
3.1	Stabilität und Turbulenz	61
3.1.1	Phänomenologie	61
3.1.2	Entstehung der Turbulenz	63
3.1.3	Beschreibung turbulenter Strömungen	67
3.2	Grundgleichungen für turbulenten Austausch	69
3.2.1	Reynoldssche Gleichungen	69
3.2.2	Transportgleichungen für die Reynoldsschen Terme	71
3.2.3	Das Schließungsproblem	73
3.3	Berechnung turbulenter Transportgrößen	74
3.3.1	Grundkonzepte zur Lösung des Schließungsproblems	74
3.3.1.1	Physikalische Eigenschaften turbulenter Strömungen	74
3.3.1.2	Das Wirbelviskositätsprinzip	75
3.3.1.3	Das Wirbeldiffusionsprinzip	75
3.3.2	Turbulenzmodelle	76
3.3.2.1	Das Null-Gleichungs-Modell	76
3.3.2.2	Das Ein-Gleichungs-Modell	78
3.3.2.3	Das Zwei-Gleichungs-Modell	80
3.3.3	Die turbulente Prandtlzahl	81
4	Grenzschichtströmung	84
4.1	Grenzschichtgleichungen für den laminaren Transport	84
4.2	Grenzschichtgleichungen für den turbulenten Transport	89
4.3	Turbulenzmodelle	90
4.3.1	Ein-Gleichungs-Modell	90
4.3.2	Zwei-Gleichungs-Modell	91
4.3.3	Turbulente Prandtlzahl	91
4.4	Geschwindigkeits- und Temperaturprofil in Wandnähe bei turbulenter Strömung	92
4.4.1	Das universelle Geschwindigkeitsprofil	92
4.4.2	Das universelle Temperaturprofil	97
5	Das Ähnlichkeitsgesetz der Wärmeübertragung	101
5.1	Einführung	101
5.2	Dimensionslose Kenngrößen aus den Differentialgleichungen	103
5.2.1	Erzwungene Konvektion	103
5.2.2	Freie Konvektion	107
5.3	Dimensionsanalyse	109
5.3.1	Freie Konvektion	109
5.3.2	Freie Konvektion bei schleichender Bewegung	111
5.3.3	Freie Konvektion bei Vernachlässigung der Reibung	113
5.4	Physikalische Bedeutung der Kenngrößen	113
5.5	Voraussetzungen und Grenzen der Ähnlichkeitslehre	116

5.6	Temperaturabhängige Stoffwerte	119
5.6.1	Allgemeines	119
5.6.2	Methode der Referenztemperatur	120
5.6.3	Methode der Stoffwertverhältnisse	120

Teil 2: Erzwungene Konvektion

6	Wärmeübergang bei laminarer Kanalströmung	127
6.1	Voll ausgebildete Strömung	128
6.1.1	Mathematische Formulierung	128
6.1.2	Rohrströmung (Kreisquerschnitt)	129
6.1.2.1	Druckverlustkoeffizient	130
6.1.2.2	Wärmeübergangskoeffizient	132
6.1.2.3	Thermohydraulische Kenngrößen	134
6.1.3	Kanalströmung	135
6.1.3.1	Randbedingungen	136
6.1.3.2	Rechteck- und Dreieckskanäle	137
6.1.3.3	Konzentrischer kreisförmiger Ringspalt	139
6.2	Entwicklung der Strömung im Einlauf	140
6.2.1	Mathematische Formulierung	140
6.2.2	Strömung im Kreisrohr	143
6.2.2.1	Hydrodynamischer Einlauf	143
6.2.2.2	Thermischer Einlauf bei hydrodynamisch ausgebildeter Strömung	145
6.2.2.3	Gleichzeitiger thermischer und hydrodynamischer Einlauf	150
6.2.3	Parallele Platten	153
6.2.3.1	Hydrodynamischer Einlauf	153
6.2.3.2	Thermischer Einlauf bei hydrodynamisch ausgebildeter Strömung	154
6.2.3.3	Gleichzeitiger thermischer und hydrodynamischer Einlauf	155
6.2.4	Rechteckquerschnitte	156
6.2.5	Kreisringquerschnitte	156
6.3	Temperaturabhängige Stoffwerte	157
6.3.1	Mathematische Formulierung	157
6.3.2	Heizung und Kühlung	158
6.4	Spezielle Probleme	160
6.4.1	Berücksichtigung der Reibungswärme	160
6.4.2	Einfluß der axialen Wärmeleitung	162
6.4.3	Einfluß der freien Konvektion	166
7	Wärmeübergang bei turbulenter Rohrströmung	169
7.1	Voll entwickelte Rohrströmung	169
7.1.1	Mathematische Formulierung des Problems	169
7.1.2	Geschwindigkeitsprofil und Druckverlust	170

7.1.3	Temperaturprofil und Wärmeübertragung	174
7.1.3.1	Temperaturprofil	174
7.1.3.2	Wärmeübergang bei $q_w = \text{const}$	177
7.1.3.3	Wärmeübergang bei $T_w = \text{const}$	181
7.2	Analogie zwischen Impuls- und Wärmeübertragung	182
7.2.1	Reynoldsanalogie	182
7.2.2	Prandtlanalogie	183
7.2.3	Nicht kreisförmige Querschnitte	184
7.3	Gebrauchsformeln	186
7.3.1	Einlaufbereich	186
7.3.2	Übergangsbereich	188
7.3.3	Einfluß der Rauigkeit	188
7.3.4	Temperaturabhängige Stoffwerte	190
8	Wärmeübergang an der ebenen Platte	195
8.1	Mathematische Formulierung	195
8.2	Laminare Strömung	197
8.2.1	Strömungsgrenzschicht	197
8.2.1.1	Ähnlichkeitstransformation	197
8.2.1.2	Reibungs- und Widerstandskoeffizient	201
8.2.2	Temperaturgrenzschicht für $T_w = \text{const}$	202
8.2.2.1	Ähnlichkeitstransformation	202
8.2.2.2	Wärmeübergang für $Pr = 1$	202
8.2.2.3	Wärmeübergang für $Pr \neq 1$	204
8.2.3	Wärmeübergang bei $q_w = \text{const}$	207
8.3	Turbulente Strömung	209
8.3.1	Strömungsgrenzschicht	209
8.3.2	Temperaturgrenzschicht und Wärmeübergang für $T_w = \text{const}$	211
8.3.2.1	Näherungslösung für $Pr = 1$	212
8.3.2.2	Näherungslösung für $Pr \neq 1$	212
8.3.2.3	Exakte Lösung für $Pr \neq 1$	213
8.3.3	Turbulente Strömung mit laminarem Anlauf	215
8.3.4	Wärmeübergang bei $q_w = \text{const}$	217
8.4	Variable Stoffwerte	217
8.4.1	Laminare Strömung	217
8.4.2	Turbulente Strömung	220
9	Wärmeübergang bei der Umströmung zylindrischer Körper	223
9.1	Ähnliche Lösungen der Grenzschichtgleichungen für die laminare Strömung am ebenen Keil	223
9.1.1	Mathematische Formulierung	223
9.1.2	Ähnlichkeitstransformation	225
9.1.3	Wärmeübergangs- und Reibungskoeffizient	232

9.2	Integralgleichungen der Grenzschicht für die Umströmung zylindrischer Körper	235
9.2.1	Staupunkt und Ablösung	235
9.2.2	Strömungsgrenzschicht	237
9.2.3	Temperaturgrenzschicht	238
9.3	Integralverfahren von von Kármán und K. Pohlhausen für laminar umströmte Körper	239
9.3.1	Geschwindigkeitsprofil	239
9.3.2	Temperaturprofil	242
9.3.3	Lösungsalgorithmus	246
9.4	Integralverfahren auf der Basis der lokalen Ähnlichkeit	251
9.4.1	Prinzip der lokalen Ähnlichkeit	251
9.4.2	Näherungsverfahren von Eckert	253
9.4.3	Näherungsverfahren von Smith und Spalding	255
9.5	Gebrauchsformeln	259
9.5.1	Wärmeübergang im Staupunkt	259
9.5.2	Wärmeübergang am querangeströmten Zylinder	261
9.5.3	Wärmeübergang an der Kugel	268

Teil 3: Freie Konvektion

10	Wärmeübergang an der vertikalen Platte	273
10.1	Grundlagen	273
10.1.1	Grundgleichungen der freien Konvektion	273
10.1.2	Oberbeck-Boussinesq-Approximation	276
10.1.3	Asymptotische Lösungen für kleine und große Prandtlzahlen	278
10.2	Wärmeübergang bei laminarer Strömung	279
10.2.1	Die Wandtemperatur $T_w = \text{const}$	279
10.2.1.1	Ähnlichkeitslösung	279
10.2.1.2	Vergleich zwischen theoretischen und experimentellen Daten	286
10.2.1.3	Gebrauchsformeln	289
10.2.2	Die Wärmestromdichte $q_w = \text{const}$	291
10.2.3	Der Temperaturverlauf $T_w(x)$ der Wand ist gegeben	294
10.2.4	Der Einfluß variabler Stoffwerte	296
10.2.5	Die Umgebungstemperatur T_∞ ist über die Höhe veränderlich	302
10.3	Wärmeübergang bei turbulenter Strömung	307
10.3.1	Näherungslösung mit dem Integralverfahren	308
10.3.2	Verbesserte Näherungslösungen	312
11	Wärmeübergang bei freier Konvektion an umströmten Körpern	315
11.1	Geneigte ebene Platte	316
11.2	Horizontale ebene Platte	318
11.2.1	Grenzschicht und Staupunkt	318

11.2.2	Wärmeabgabe auf der Oberseite	320
11.2.3	Wärmeabgabe auf der Unterseite	323
11.3	Der Würfel	326
11.4	Der horizontale Zylinder	328
11.5	Die Kugel	334
12	Freie Konvektion in Behältern	336
12.1	Stationäre freie Konvektion in rechtwinkligen Behältern	336
12.1.1	Schlanke vertikale Behälter mit $A \gg 1$	336
12.1.2	Flache horizontale Behälter mit $A \ll 1$	346
12.1.3	Der quadratische Behälter mit $A = 1$	350
12.1.4	Der horizontale-zylindrische-Ringspalt	354
12.2	Rayleigh-Bénard-Konvektion	359
12.2.1	Einsetzen der Konvektion	360
12.2.2	Wärmeübergang	369
12.2.3	Grenzen der Boussinesq-Approximation	370
12.3	Aufheizen und Abkühlen von Behältern	373
12.3.1	Der horizontale zylindrische Behälter	373
12.3.2	Der Kugelbehälter	377
12.3.3	Der vertikale Zylinder	380
Anhang	383
Anhang A.	Gradient, Divergenz und Rotation	383
Anhang B.	Kalorische Zustandsgleichung	386
Anhang C.	Die Grundgleichungen in Kartesischen-, Zylinder- und Polar- koordinaten	389
Literaturverzeichnis	393
Sachverzeichnis	409