

Inhalt

Vorwort	V
1. Abgrenzung des Stoffgebietes und Hinweise zur Darstellung	1
1.1. Einleitung	1
1.2. Die Darstellungsmethode	4
1.3. Zur Wahl der Koordinatensysteme	4
1.4. Zur Vorzeichenfestlegung richtungsabhängiger Größen	6
1.5. Bemerkungen zu den verwendeten Formelzeichen, Maßeinheiten und Bezeichnungen	6
1.6. Einige häufig benutzte Produkte von Größen	10
2. Die Grundgleichungen zur Berechnung von Impuls-, Wärme- und Stofftransport	11
2.1. Erfahrungsgesetze über die Auswirkungen der Molekülbewegung auf Impuls-, Wärme- und Stofftransport	11
2.2. Erhaltungsgesetze	14
2.2.1. Herleitung der Kontinuitätsgleichung	15
2.2.2. Herleitung der Energiegleichung	16
2.2.3. Gemeinsame Betrachtung der Erhaltungsgesetze	20
2.3. Einige mögliche Vereinfachungen der Grundgleichungen am Beispiel der Energiegleichung	21
2.4. Besonderheiten beim Stoffübergang	23
2.4.1. Über die Stoffstromdichte	23
2.4.2. Über die Wärmestromdichte	25
2.5. Vereinfachung der Impulstransportgleichungen durch Einführen des reduzierten Drucks	26
2.5.1. Umformung der Bewegungsgleichungen zu den Grundgleichungen für den Impulstransport bei freier Konvektion infolge von Dichteunterschieden	27
2.5.2. Die Grundgleichungen der erzwungenen Strömung nach Einführen des reduzierten Drucks	28
2.6. Randbedingungen	29
2.7. Definition von Übergangskoeffizienten	30
2.8. Die Mittelwerte der Temperatur und der Partialdichte über dem Querschnitt eines Rohres	32
2.9. Einige Ergänzungen zu den Grundgleichungen	34
2.9.1. Über die Kopplung der einzelnen Gleichungen	34
2.9.2. Zur Vollständigkeit der angegebenen Gleichungen	35
2.9.3. Zur Gültigkeit der Gleichungen in turbulenten Strömungen	35

3. Die Gleichungen in dimensionsloser Schreibweise	37
3.1. Vergleichsgrößen und dimensionslose Variable bei erzwungener Strömung	37
3.2. Einsetzen der dimensionslosen Variablen in die Energiegleichung für erzwungene Umströmung	38
3.3. Die Übergangskoeffizienten in dimensionsloser Schreibweise	40
3.4. Die dimensionslos geschriebenen Kopplungsgleichungen	42
3.5. Besonderheiten bei der freien Konvektion	42
4. Folgerungen aus den dimensionslos geschriebenen Grundgleichungen, Randbedingungen und Kopplungsgleichungen	44
4.1. Die prinzipiellen Lösungsfunktionen und die Potenzansätze zu ihrer näherungsweise Darstellung	44
4.2. Formale Analogien	45
4.2.1. Die Analogie zwischen Wärme- und Stofftransport	45
4.2.2. Die Analogie zwischen Impulstransport und Wärme- bzw. Stofftransport	48
5. Physikalische Ähnlichkeit – die Modellgesetze	51
5.1. Der Ähnlichkeitsbegriff	51
5.2. Die Bedingungen für physikalische Ähnlichkeit	52
5.2.1. Ähnlichkeitsbedingungen für die erzwungene Strömung	53
5.2.2. Ähnlichkeitsbedingungen für den Wärmeübergang bei der erzwungenen Strömung	54
5.2.3. Ähnlichkeitsbedingungen für die Strömung und den Wärmeübergang bei freier Strömung infolge von Dichteunterschieden	54
5.3. Über die geometrische Ähnlichkeit	56
5.3.1. Vollständige geometrische Ähnlichkeit	56
5.3.2. Ähnlichkeit in Teilen	57
5.3.3. Ähnlichkeit von mittleren Werten – der hydraulische Durchmesser	58
5.4. Nähere Einzelheiten zu einigen Stoffwerten und Kennzahlen	61
5.4.1. Die Temperaturleitfähigkeit	61
5.4.2. Die kinematische Zähigkeit	62
5.4.3. Die <i>Prandtl-Zahl</i>	63
5.4.4. Die <i>Reynolds-Zahl</i>	65
6. Wärme- und Stoffübergang in erzwungenen Strömungen mit laminaren Grenzschichten	67
6.1. Vereinfachung der Transportgleichungen in der Außenströmung	67
6.2. Vereinfachung der Transportgleichungen in den Grenzschichten – die Grenzschichtgleichungen	68
6.3. Die Grenzschichten an der längs angeströmten ebenen Wand	71
6.3.1. Die Strömungsgrenzschicht an der längs angeströmten ebenen Wand – <i>Blasius</i> 1908	72
6.3.2. Der Wärmeübergang an der längs angeströmten ebenen Wand konstanter Temperatur – <i>E. Pohlhausen</i> 1921	75

6.4.	Die senkrecht zur begrenzenden Wand integrierten Grenzschichtgleichungen – die örtlichen Bilanzgleichungen	77
6.5.	Näherungsweise Berechnung von Stromdichten in Strömungen mit Grenzschichten mittels der örtlichen Bilanzgleichungen	80
6.5.1.	Herleitungsbeispiel 6 – 1: Herleitung von Berechnungsbeziehungen für Stromdichten mit Hilfe der örtlichen Bilanzgleichungen – die längs angeströmte ebene Wand mit veränderlicher Temperatur	81
6.5.2.	Einige Bemerkungen zu dem Näherungsverfahren	87
6.6.	Herleitungsbeispiel 6 – 2: Berechnung von örtlicher Wärmestromdichte und örtlicher <i>Nusselt</i> -Zahl für die längs angeströmte ebene Wand mit sprungartiger Änderung der Temperatur	89
6.7.	Wärmeübergang an der längs angeströmten ebenen Wand bei beliebiger Temperaturverteilung	92
6.8.	Wärmeübergang bei laminarer Strömung längs gewölbter Flächen	94
6.9.	Wärmeübergang beim längs angeströmten Zylinder	96
6.10.	Berücksichtigung der Richtung des Wärmestroms	96
7.	Wärmeübergang bei der erzwungenen laminaren Strömung durch Rohre..	98
7.1.	Über die Strömung	98
7.2.	Reale und ideale Randbedingungen für das Temperaturfeld	100
7.3.	Der Wärmeübergang bei der laminaren Strömung durch Rohre mit konstanter Wandtemperatur	101
7.3.1.	Der thermische Einlauf bei hydrodynamisch ausgebildeter Rohrströmung – <i>Graetz</i> 1883, <i>Nusselt</i> 1910	101
7.3.2.	Gleichzeitiger hydrodynamischer und thermischer Einlauf – <i>Stephan</i> 1959	103
7.3.3.	Der Verlauf der mittleren Fluidtemperatur längs eines Rohres mit konstanter Wandtemperatur und der insgesamt übertragene Wärmestrom	105
7.3.4.	Die „Anzahl der Übertragungseinheiten beim Wärmeübergang zwischen Rohrwand und strömendem Fluid“	107
7.4.	Der Wärmeübergang mit konstanter Wärmestromdichte bei der laminaren Strömung durch Rohre	112
7.5.	Der Wärmeübergang für Rohre mit nicht kreisförmigem Querschnitt ..	113
7.5.1.	Vorteile und Grenzen für die Benutzung des hydraulischen Durchmessers bei laminaren Strömungen	113
7.5.2.	Konstante Wandtemperatur – hydrodynamisch ausgebildete Strömung ..	113
7.5.3.	Konstante Wärmestromdichte – hydrodynamisch und thermisch ausgebildete Strömung	115
7.5.4.	Herleitungsbeispiel 7 – 1: Herleitung und Berechnungsbeziehungen für das Temperaturprofil und die <i>Nusselt</i> -Zahl bei der ausgebildeten laminaren Strömung in einem ebenen Kanal	117

8. Grundlagen zur Berechnung der Transportvorgänge in turbulenten Strömungen	120
8.1. Aussagen über turbulente Transportvorgänge	120
8.1.1. Das Erscheinungsbild der Turbulenz	120
8.1.2. Existenzbedingung der Turbulenz	121
8.1.3. Auswirkungen der Turbulenz	122
8.2. Formelmäßige Erfassung des Transports infolge der turbulenten Querbewegung	123
8.3. Die Schubspannungsgeschwindigkeit	124
8.4. Verlauf der turbulenten Transportkoeffizienten im Querschnitt eines Kreisrohres	125
8.5. Die Stromdichten über eine Wand bei turbulenten Strömungen	127
8.6. Modelle zur Berechnung turbulenter Transportvorgänge	127
8.7. Zeitlicher Mittelwert und turbulente Schwankung	130
8.8. Zusammenhang zwischen den Schwankungsgrößen und den turbulenten Transportkoeffizienten	133
8.9. Das universelle Geschwindigkeitsgesetz turbulenter Strömungen in der Nähe von Wänden	134
8.10. Ähnlichkeit turbulenter Transportvorgänge – Kenngrößen der Turbulenz	136
9. Der Wärmeübergang bei der erzwungenen turbulenten Strömung durch Rohre	138
9.1. Über die Strömung	138
9.1.1. Kennzeichnung des Strömungscharakters durch die <i>Reynolds-Zahl</i>	138
9.1.2. Die Strömung im Rohreinlauf	138
9.1.3. Der dimensionslose Widerstandsbeiwert	138
9.1.4. Die drei Strömungsbereiche bezüglich der Rauigkeit	139
9.1.5. Die Widerstandsgesetze der ausgebildeten turbulenten Rohrströmung	141
9.1.6. Das Geschwindigkeitsprofil der ausgebildeten turbulenten Rohrströmung	142
9.2. Der Wärmeübergang bei der hydrodynamisch und thermisch ausgebildeten turbulenten Rohrströmung	142
9.2.1. Herleitungsbeispiel 9 – 1: Herleitung einer Beziehung zur Berechnung des Wärmeübergangs für die hydrodynamisch und thermisch ausgebildete turbulente Rohrströmung	143
9.2.2. Bemerkungen zum Herleitungsbeispiel 9 – 1	145
9.3. Einfache Gleichungen für den mittleren Wärmeübergang	147
9.4. Der Wärmeübergang bei der Rohrströmung im Übergangsbereich	149
9.5. Der Wärmeübergang bei der turbulenten Strömung durch Rohre mit nicht kreisförmigem Querschnitt	150

10. Der Wärmeübergang bei der erzwungenen Strömung mit turbulenten Grenzschichten	152
10.1. Kennzeichnung des Strömungscharakters durch die <i>Reynolds</i> -Zahl	152
10.2. Grenzschichtdicke und Widerstandsgesetze	153
10.2.1. Herleitungsbeispiel 10 – 1: Übertragung des <i>Blasiusschen</i> Widerstandsgesetzes für das turbulent durchströmte, hydraulisch glatte Rohr auf die turbulente Grenzschichtströmung längs einer ebenen Wand	155
10.2.2. Herleitungsbeispiel 10 – 2: Herleitung einer Beziehung für die Dicke der turbulenten Grenzschicht und den örtlichen Reibungsbeiwert bei der Strömung längs einer ebenen Wand	156
10.2.3. Herleitungsbeispiel 10 – 3: Ermittlung des Gesamtreibungsbeiwertes einer längs angeströmten ebenen Wand bei Berücksichtigung der laminaren Grenzschicht am Wandanfang	157
10.3. Der Wärmeübergang an der längs angeströmten ebenen Wand bei turbulenter Grenzschicht	158
10.3.1. Der örtliche Wärmeübergang	158
10.3.2. Der mittlere Wärmeübergang ohne Berücksichtigung der laminaren Grenzschichtströmung am Wandanfang	159
10.3.3. Der mittlere Wärmeübergang mit Berücksichtigung der laminaren Grenzschichtströmung am Wandanfang	160
11. Der Wärmeübergang bei der erzwungenen Strömung quer um Einzelrohre und durch Rohrbündel	162
11.1. Die Strömung um einen quer angeströmten Kreiszyylinder	162
11.2. Der Wärmeübergang an einem quer angeströmten Kreiszyylinder	164
11.3. Rohrbündel im Querstrom	166
12. Einige Sonderfragen beim Wärmeübergang durch erzwungene Strömung	172
12.1. Möglichkeiten zur Erhöhung der Wärmestromdichte	172
12.1.1. Rippenheizflächen	173
12.1.2. Erhöhung der Turbulenz durch Einbauten oder künstliche Rauigkeiten	176
12.2. Berücksichtigung der Temperaturerhöhung infolge Reibungsarbeit der Strömung	177
12.2.1. Die Dissipationsfunktion	177
12.2.2. Die Temperatur einer längs angeströmten, wärmeisolierten Wand	178
12.2.3. Der Wärmeübergang über eine längs angeströmte ebene Wand bei der Berücksichtigung der Erzeugung innerer Energie aus der Reibungsarbeit der Strömung	180
12.3. Einige Besonderheiten bei Gasströmungen	182
12.3.1. Temperaturänderung durch isentrope Entspannung oder Verdichtung von Gasen	183
12.3.2. Strömung von Gasen durch beheizte Rohrleitungen – die Anfangsgeschwindigkeit ist kleiner als die Schallgeschwindigkeit	184

13. Allgemeine Aussagen und Gleichungen zur freien Konvektion	187
13.1. Unterscheidung von erzwungener und freier Strömung	187
13.2. Allgemeine Aussagen über den Wärmeübergang bei freier Konvektion ..	188
13.3. Die Grundgleichungen der freien Konvektion	189
13.4. Die Grundgleichungen der freien Konvektion in einer zweckmäßigen dimensionslosen Schreibweise	192
13.5. Die allgemeine Lösung für den Wärmeübergang bei freier Konvektion ..	193
14. Die laminare freie Konvektionsströmung an senkrechten Wänden	196
14.1. Grenzschichtvereinfachungen	196
14.2. Allgemeine Aussagen über die laminare freie Konvektion an senk- rechten Wänden konstanter Temperatur	197
14.3. Die senkrecht zur Wand integrierten Grenzschichtgleichungen der freien Konvektion	197
14.4. Näherungsweise Berechnung der laminaren freien Konvektion an senk- rechten Wänden mit Hilfe der örtlichen Bilanzgleichungen	198
14.5. Herleitungsbeispiel 14 – 1: Ermittlung von Beziehungen für Grenzschichtdicke und Geschwindigkeit bei der laminaren freien Konvektion an senkrechten Wänden konstanter Temperatur	202
14.6. Ergebnisse der näherungsweisen Berechnung bei laminarer freier Kon- vektion an senkrechten Wänden	203
15. Die turbulente freie Konvektion an senkrechten Wänden	208
15.1. Der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung	208
15.2. Allgemeine Aussagen über den Wärmeübergang bei turbulenter freier Konvektion an senkrechten Wänden	209
15.3. Näherungsweise Berechnung der turbulenten freien Konvektion an senk- rechten Wänden mit Hilfe der örtlichen Bilanzgleichungen	210
15.4. Ergebnisse der näherungsweisen Berechnung bei turbulenter freier Kon- vektion an senkrechten Wänden konstanter Temperatur	213
16. Der Wärmeübergang bei freier Konvektion an Körpern verschiedener Form	216
16.1. Der Wärmeübergang bei laminarer freier Konvektion an senkrechten Zylindern	216
16.2. Der Wärmeübergang bei freier Konvektion um waagerechte Zylinder	216
16.3. Der Wärmeübergang bei freier Konvektion an waagerechten Platten ...	220
16.4. Zusammenfassende Darstellung des Wärmeübergangs bei freier Kon- vektion an verschieden geformten Körpern	221

17. Freie Konvektion in dünnen Schichten	223
17.1. Die Strömung	223
17.2. Der Wärmetransport	224
17.3. Berechnungsgleichungen für die scheinbare Wärmeleitfähigkeit	225
17.4. Über die Konvektionssicherheit poröser Isolierstoffe	227

18. Einige Sonderfragen beim Wärmeübergang durch freie Konvektion

18.1. Berücksichtigung des Wärmetransports durch Strahlung	230
18.2. Gleichzeitiges Auftreten von freier und erzwungener Strömung	234
18.2.1. Gleichzeitiges Auftreten von freier und erzwungener Strömung an senkrechten Wänden	235
18.2.2. Gleichzeitiges Auftreten von freier und erzwungener Strömung im Innern waagerechter Rohre	236
18.3. Freie Konvektion in einem rotierenden, einseitig geschlossenen Kanal	236

Anhang

Zusammenstellung von Formelzeichen, Stoffeigenschaften, wichtigen Gleichungen und Berechnungsformeln

Tafel 1: Formelzeichen und Maßeinheiten	238
Tafel 2: Kennzahlen	240
Tafel 3: Umrechnung zwischen verschiedenen Maßeinheiten	241
Tafel 4: Stoffeigenschaften von Gasen	242
Tafel 5: Stoffeigenschaften von Dämpfen im Sättigungszustand	243
Tafel 6: Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten	244
Tafel 7: Stoffeigenschaften von flüssigen Metallen	245
Tafel 8: Erfahrungswerte für übliche Wärmeübertrager	246
Tafel 9: Die Grundgleichungen des Impuls-, Energie- und Stofftransports in kartesischen Koordinaten	247
Tafel 10: Dimensionslose Schreibweise der Grundgleichungen des Impuls-, Energie- und Stofftransports in kartesischen Koordinaten	248
Tafel 11: Die Grundgleichungen des Impuls-, Energie- und Stofftransports in Zylinderkoordinaten bei Rotationssymmetrie	250
Tafel 12: Randbedingungen	252
Tafel 13: Stromdichten, Übergangskoeffizienten, Kopplungsgleichungen	254
Tafel 14: Reynolds-, Prandtl-, Schmidt-Zahl	255
Tafel 15: Die Grenzschichtgleichungen eben, inkompressibel, konstante Stoffwerte, keine Quellglieder	257
Tafel 16: Die senkrecht zur begrenzenden Wand (y -Richtung) integrierten Grenzschichtgleichungen, eben, stationär, inkompressibel, kein oder nur geringer Stoffübergang	258
Tafel 17: Näherungsweise Berechnung von Stromdichten in Strömungen mit Grenzschichten mittels der örtlichen Bilanzgleichungen für Fluide mit $Pr < 1$ ($\partial p / \partial x \approx 0$ sei vorausgesetzt)	259