

Hans Dieter Baehr · Karl Stephan

Wärme- und Stoffübertragung

Mit 327 Abbildungen

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York

London Paris Tokyo

Hong Kong Barcelona Budapest

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XV
1 Einführung. Technische Anwendungen	1
1.1 Die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung	1
1.1.1 Wärmeleitung	2
1.1.2 Stationäre, geometrisch eindimensionale Wärmeleitung	5
1.1.3 Konvektiver Wärmeübergang, Wärmeübergangskoeffizient	10
1.1.4 Die Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten. Dimensionslose Kennzahlen	16
1.1.5 Wärmestrahlung	26
1.1.6 Strahlungsaustausch	29
1.2 Wärmedurchgang	32
1.2.1 Der Wärmedurchgangskoeffizient	32
1.2.2 Mehrschichtige Wände	34
1.2.3 Wärmedurchgang durch Wände mit vergrößerter Oberfläche	36
1.2.4 Abkühlung und Erwärmung dünnwandiger Behälter	39
1.3 Wärmeübertrager	42
1.3.1 Bauarten und Stromführungen	43
1.3.2 Allgemeine Berechnungsgleichungen. Dimensionslose Kennzahlen	47
1.3.3 Gegenstrom- und Gleichstrom-Wärmeübertrager	52
1.3.4 Kreuzstrom-Wärmeübertrager	59
1.3.5 Betriebscharakteristiken für weitere Stromführungen. Diagramme	66
1.4 Die verschiedenen Arten der Stoffübertragung	67
1.4.1 Diffusion	70
1.4.1.1 Zusammensetzung von Gemischen	70
1.4.1.2 Diffusionsströme	71
1.4.1.3 Ficksches Gesetz	74
1.4.2 Einseitige Diffusion, äquimolare Diffusion	76
1.4.3 Konvektiver Stoffübergang	80
1.5 Stoffübergangstheorien	84
1.5.1 Die Filmtheorie	84
1.5.2 Die Grenzschichttheorie	88
1.5.3 Die Penetrations- und die Oberflächenerneuerungstheorie	90
1.5.4 Anwendung der Filmtheorie auf die Verdunstungskühlung	91

1.6	Stoffdurchgang	95
1.7	Stoffübertrager	98
1.7.1	Die Mengenbilanzen	99
1.7.2	Konzentrationsverlauf und Höhe von Stoffaustauschkolonnen . . .	102
1.8	Aufgaben	106
2	Wärmeleitung und Diffusion	111
2.1	Die Wärmeleitungsgleichung	111
2.1.1	Die Herleitung der Differentialgleichung für das Temperaturfeld . .	112
2.1.2	Die Wärmeleitungsgleichung für einen Körper mit konstanten Stoff- werten	115
2.1.3	Die Randbedingungen	117
2.1.4	Temperaturabhängige Stoffwerte	120
2.1.5	Ähnliche Temperaturfelder	122
2.2	Stationäre Wärmeleitung	125
2.2.1	Geometrisch eindimensionale Wärmeleitung mit Wärmequellen . .	126
2.2.2	Wärmeleitung in Längsrichtung eines Stabes	129
2.2.3	Der Temperaturverlauf in Rippen und Nadeln	133
2.2.4	Der Rippenwirkungsgrad	138
2.2.5	Geometrisch mehrdimensionaler Wärmefluß	141
2.2.5.1	Überlagerung von Wärmequellen und Wärmesenken . . .	142
2.2.5.2	Formkoeffizienten	146
2.3	Instationäre Wärmeleitung	147
2.3.1	Lösungsmethoden	148
2.3.2	Die Laplace-Transformation	149
2.3.3	Der einseitig unendlich ausgedehnte Körper	156
2.3.3.1	Erwärmung und Abkühlung bei verschiedenen Randbedin- gungen	156
2.3.3.2	Zwei sich berührende halbusendliche Körper	161
2.3.3.3	Periodische Temperaturänderungen	163
2.3.4	Abkühlung und Erwärmung einfacher Körper bei eindimensionalem Wärmefluß	166
2.3.4.1	Formulierung des Problems	167
2.3.4.2	Separationsansatz	169
2.3.4.3	Ergebnisse für die Platte	170
2.3.4.4	Ergebnisse für Zylinder und Kugel	175
2.3.4.5	Näherung für große Zeiten: Beschränkung auf den ersten Term der Reihen	177
2.3.4.6	Eine Lösung für kleine Zeiten	178
2.3.5	Abkühlung und Erwärmung bei mehrdimensionalem Wärmefluß .	179
2.3.5.1	Produktlösungen	180
2.3.5.2	Näherung für kleine Biot-Zahlen	183
2.3.6	Erstarren geometrisch einfacher Körper	185
2.3.6.1	Das Erstarren ebener Schichten (Stefan-Problem)	186
2.3.6.2	Die quasistationäre Näherung	189

2.3.6.3	Verbesserte Näherungen	192
2.3.7	Wärmequellen	193
2.3.7.1	Homogene Wärmequellen	193
2.3.7.2	Punkt- und linienförmige Wärmequellen	195
2.4	Numerische Lösung von Wärmeleitproblemen	200
2.4.1	Das einfache explizite Differenzenverfahren für instationäre Wärmeleitprobleme	201
2.4.1.1	Die Differenzengleichung	201
2.4.1.2	Die Stabilitätsbedingung	203
2.4.1.3	Wärmequellen	204
2.4.2	Die Diskretisierung der Randbedingungen	205
2.4.3	Das implizite Differenzenverfahren von J. Crank und P. Nicolson	210
2.4.4	Nichtkartesische Koordinaten. Temperaturabhängige Stoffwerte	214
2.4.4.1	Die Diskretisierung des selbstadjungierten Differentialoperators	214
2.4.4.2	Konstante Stoffwerte. Zylinderkoordinaten	215
2.4.4.3	Temperaturabhängige Stoffwerte	217
2.4.5	Instationäre ebene und räumliche Temperaturfelder	218
2.4.6	Stationäre Temperaturfelder	221
2.4.6.1	Ein einfaches Differenzenverfahren für ebene stationäre Temperaturfelder	222
2.4.6.2	Die Berücksichtigung der Randbedingungen	225
2.5	Diffusion	229
2.5.1	Bemerkungen über ruhende Systeme	230
2.5.2	Die Herleitung der Differentialgleichung für das Konzentrationsfeld	233
2.5.3	Vereinfachungen	238
2.5.4	Randbedingungen	239
2.5.5	Stationäre Diffusion mit katalytischer Oberflächenreaktion	242
2.5.6	Stationäre Diffusion mit homogener chemischer Reaktion	246
2.5.7	Instationäre Diffusion	251
2.5.7.1	Instationäre Diffusion in einem einseitig unendlich ausgedehnten Körper	251
2.5.7.2	Instationäre Diffusion in einfachen Körpern bei eindimensionalem Stofffluß	253
2.6	Aufgaben	254
3	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Einphasige Strömungen	261
3.1	Vorbemerkungen: Die längsangeströmte ebene Platte bei reibungsfreier Strömung	262
3.2	Die Bilanzgleichungen	266
3.2.1	Das Reynoldssche Transporttheorem	266
3.2.2	Die Massenbilanz	269
3.2.2.1	Reine Stoffe	269
3.2.2.2	Mehrstoffgemische	270
3.2.3	Die Impulsbilanz	273

3.2.3.1	Der Spannungstensor	275
3.2.3.2	Die Cauchysche Bewegungsgleichung	278
3.2.3.3	Der Verzerrungstensor	279
3.2.3.4	Materialgesetze zur Lösung der Impulsgleichung	282
3.2.3.5	Die Navier-Stokesschen Gleichungen	283
3.2.4	Die Energiebilanz	283
3.2.4.1	Dissipierte Energie und Entropie	289
3.2.4.2	Materialgesetze zur Lösung der Energiegleichung	290
3.2.4.3	Einige andere Formulierungen der Energiegleichung	292
3.2.5	Zusammenfassung	295
3.3	Einfluß der Reynolds-Zahl auf die Strömung	297
3.4	Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen	300
3.4.1	Schleichende Strömungen	300
3.4.2	Reibungsfreie Strömungen	301
3.4.3	Grenzschichtströmungen	301
3.5	Die Grenzschichtgleichungen	303
3.5.1	Die Strömungsgrenzschicht	303
3.5.2	Die Temperaturgrenzschicht	306
3.5.3	Die Konzentrationsgrenzschicht	310
3.5.4	Allgemeine Bemerkungen zur Lösung der Grenzschichtgleichungen	310
3.6	Einfluß der Turbulenz auf den Wärme- und Stoffübergang	314
3.6.1	Turbulente Strömungen an festen Wänden	319
3.7	Überströmte Körper	323
3.7.1	Die parallel angeströmte ebene Platte	323
3.7.1.1	Laminare Grenzschicht	324
3.7.1.2	Turbulente Strömung	335
3.7.2	Der quer angeströmte Zylinder	340
3.7.3	Quer angeströmte Rohrbündel	344
3.7.4	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang an überströmten Körpern	347
3.8	Durchströmte Kanäle, Haufwerke, Wirbelschichten	350
3.8.1	Die laminare Rohrströmung	350
3.8.1.1	Die hydrodynamisch ausgebildete Laminarströmung	351
3.8.1.2	Die thermisch ausgebildete Laminarströmung	353
3.8.1.3	Wärmeübergangskoeffizienten bei thermisch ausgebildeter Laminarströmung	356
3.8.1.4	Die thermische Einlaufströmung mit ausgebildetem Geschwindigkeitsprofil	359
3.8.1.5	Die hydrodynamisch und thermisch nicht ausgebildete Strömung	363
3.8.2	Die turbulente Rohrströmung	365
3.8.3	Haufwerke	367
3.8.4	Wirbelschichten	371

3.8.5	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang in durchströmten Kanälen, Haufwerken und Wirbelschichten . . .	380
3.9	Freie Strömung	383
3.9.1	Die Impuls Gleichung	386
3.9.2	Wärmeübergang an einer senkrechten Wand bei laminarer Strömung	389
3.9.3	Einige empirische Gleichungen für den Wärmeübergang bei freier Strömung	394
3.9.4	Stoffübergang bei freier Strömung	396
3.10	Überlagerung von freier und erzwungener Strömung	397
3.11	Kompressible Strömungen	399
3.11.1	Das Temperaturfeld in einer kompressiblen Strömung	399
3.11.2	Berechnung des Wärmeübergangs	407
3.12	Aufgaben	409
4	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Strömungen mit Phasenumwandlungen	415
4.1	Wärmeübergang beim Kondensieren	416
4.1.1	Die verschiedenen Arten der Kondensation	416
4.1.2	Die Nußeltsche Wasserhauttheorie	418
4.1.3	Abweichungen von der Nußeltschen Wasserhauttheorie	423
4.1.4	Einfluß nicht kondensierbarer Gase	426
4.1.5	Filmkondensation mit turbulenter Wasserhaut	432
4.1.6	Kondensation strömender Dämpfe	436
4.1.7	Tropfenkondensation	441
4.1.8	Kondensation von Dampfgemischen	444
4.1.8.1	Die Temperatur an der Phasengrenze	449
4.1.8.2	Die Mengen- und die Energiebilanz des Dampfes	453
4.1.8.3	Die Berechnung der Fläche eines Kondensators	455
4.1.9	Einige empirische Gleichungen	456
4.2	Wärmeübergang beim Sieden	458
4.2.1	Die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung	459
4.2.2	Die Entstehung von Dampfblasen	463
4.2.3	Blasenfrequenz und Abreißdurchmesser	467
4.2.4	Sieden in freier Strömung. Die Nukijama-Kurve	470
4.2.5	Stabilität beim Sieden in freier Strömung	472
4.2.6	Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden in freier Strömung	475
4.2.7	Einige empirische Gleichungen zum Wärmeübergang beim Blasen-sieden in freier Strömung	479
4.2.8	Zweiphasige Strömungen	483
4.2.8.1	Die verschiedenen Strömungsformen	483
4.2.8.2	Strömungskarten	486
4.2.8.3	Einige Grundbegriffe und Definitionen	487
4.2.8.4	Druckabfall zweiphasiger Strömungen	490

4.2.8.5	Die verschiedenen Bereiche des Wärmeübergangs in zweiphasigen Strömungen	498
4.2.8.6	Wärmeübergang beim Blasensieden und beim Strömungssieden	500
4.2.8.7	Kritische Siedezustände	503
4.2.8.8	Einige empirische Gleichungen zum Wärmeübergang an zweiphasige Strömungen	506
4.2.9	Wärmeübergang beim Sieden von Gemischen	508
4.3	Aufgaben	514
5	Wärmestrahlung	517
5.1	Grundlagen. Strahlungsphysikalische Größen	517
5.1.1	Temperaturstrahlung	518
5.1.2	Ausstrahlung	520
5.1.2.1	Die spezifische Ausstrahlung	521
5.1.2.2	Die spektrale Strahldichte	521
5.1.2.3	Die spektrale spezifische Ausstrahlung und die Strahldichte	523
5.1.2.4	Diffuse Strahler. Lambertsches Cosinusetz	528
5.1.3	Bestrahlung	529
5.1.4	Absorption von Strahlung	532
5.1.5	Reflexion von Strahlung	537
5.1.6	Hohlraumstrahlung. Gesetz von Kirchhoff	539
5.2	Die Strahlung des Schwarzen Körpers	542
5.2.1	Definition und Realisierung des Schwarzen Körpers	542
5.2.2	Die spektrale Strahldichte und die spektrale spezifische Ausstrahlung	543
5.2.3	Die spezifische Ausstrahlung und die Ausstrahlung in einem Wellenlängenbereich	549
5.3	Strahlungseigenschaften realer Körper	552
5.3.1	Emissionsgrade	552
5.3.2	Die Beziehungen zwischen Emissions-, Absorptions- und Reflexionsgraden. Der graue Lambert-Strahler	555
5.3.2.1	Folgerungen aus dem Gesetz von Kirchhoff	555
5.3.2.2	Die Berechnung von Absorptionsgraden aus Emissionsgraden	555
5.3.2.3	Der graue Lambert-Strahler	557
5.3.3	Emissionsgrade realer Körper	559
5.3.3.1	Elektrische Nichtleiter	560
5.3.3.2	Elektrische Leiter (Metalle)	563
5.3.4	Strahlungsdurchlässige Körper	565
5.4	Solarstrahlung	570
5.4.1	Extraterrestrische Solarstrahlung	571
5.4.2	Die Schwächung der Solarstrahlung in der Erdatmosphäre	573
5.4.2.1	Spektrale Transmissionsgrade	574
5.4.2.2	Molekulare und Aerosol-Streuung	577
5.4.2.3	Absorption	578
5.4.3	Direkte Solarstrahlung am Erdboden	579

5.4.4	Diffuse Solarstrahlung und Globalstrahlung	581
5.4.5	Absorptionsgrade für Solarstrahlung	584
5.5	Strahlungsaustausch	585
5.5.1	Sichtfaktoren	586
5.5.2	Strahlungsaustausch zwischen Schwarzen Körpern	592
5.5.3	Strahlungsaustausch zwischen grauen Lambert-Strahlern	595
5.5.3.1	Die Bilanzgleichungen nach der Netto-Strahlungsmethode	596
5.5.3.2	Strahlungsaustausch zwischen Strahlungsquelle, Strahlungsempfänger und einer rückstrahlenden Wand	597
5.5.3.3	Strahlungsaustausch in einem Hohlraum mit zwei Zonen	601
5.5.3.4	Das Gleichungssystem für den Strahlungsaustausch zwischen beliebig vielen Zonen	603
5.5.4	Strahlungsschutzschirme	606
5.6	Gasstrahlung	611
5.6.1	Absorptionskoeffizient und optische Dicke	611
5.6.2	Absorptions- und Emissionsgrade	613
5.6.3	Ergebnisse für den Emissionsgrad	617
5.6.4	Emissionsgrade und gleichwertige Schichtdicken von Gasräumen	619
5.6.5	Strahlungsaustausch in einem gasgefüllten Hohlraum	624
5.6.5.1	Schwarze isotherme Begrenzungswände	624
5.6.5.2	Graue isotherme Begrenzungswände	625
5.6.5.3	Berechnung des Strahlungsaustausches in komplizierteren Fällen	628
5.7	Aufgaben	629
Anhang A: Ergänzungen		633
A.1	Einführung in die Tensornotation	633
A.2	Zusammenhang zwischen mittlerem und thermodynamischem Druck	635
A.3	Navier-Stokes-Gleichungen eines inkompressiblen Fluids konstanter Viskosität in kartesischen Koordinaten	636
A.4	Navier-Stokes-Gleichungen eines inkompressiblen Fluids konstanter Viskosität in Zylinderkoordinaten	637
A.5	Entropiebilanz für Gemische	638
A.6	Zusammenhang zwischen partieller und spezifischer Enthalpie	639
A.7	Berechnung der Konstanten a_n des Graetz-Nußelt-Problems (3.243)	640
Anhang B: Stoffwerte		642
Anhang C: Lösungen der Aufgaben		656
Literatur		670
Sachverzeichnis		687