

Hans Dieter Baehr · Karl Stephan

# Wärme- und Stoffübertragung

Dritte Auflage

Mit 327 Abbildungen



Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einführung. Technische Anwendungen</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Wärmeleitung und Diffusion</b> . . . . .	<b>111</b>
2.1	Die Wärmeleitungs-gleichung . . . . .	111
2.1.1	Die Herleitung der Differentialgleichung für das Temperaturfeld . .	112
2.1.2	Die Wärmeleitungs-gleichung 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 halbunendliche 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 Differenzgleichung . . . . .	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
<b>3</b>	<b>Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Einphasige Strömungen</b> . . . . .	<b>261</b>
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 Cauchy'sche 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 Impulsgleichung . . . . .	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
<b>4</b>	<b>Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Strömungen mit Phasenumwandlungen</b>	<b>415</b>
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 zwei- phasigen Strömungen . . . . .	498
4.2.8.6	Wärmeübergang beim Blasensieden und beim Strömungs- sieden . . . . .	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
<b>5</b>	<b>Wärmestrahlung</b> . . . . .	<b>517</b>
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 Strahllichte . . . . .	521
5.1.2.3	Die spektrale spezifische Ausstrahlung und die Strahllichte	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 Strahllichte und die spektrale spezifische Ausstrahlung	543
5.2.3	Die spezifische Ausstrahlung und die Ausstrahlung in einem Wel- lenlängenbereich . . . . .	549
5.3	Strahlungseigenschaften realer Körper . . . . .	552
5.3.1	Emissionsgrade . . . . .	552
5.3.2	Die Beziehungen zwischen Emissions-, Absorptions- und Reflexi- onsgraden. 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
<b>Anhang A: Ergänzungen</b>		<b>633</b>
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
<b>Anhang B: Stoffwerte</b>		<b>642</b>
<b>Anhang C: Lösungen der Aufgaben</b>		<b>656</b>
<b>Literatur</b>		<b>670</b>
<b>Sachverzeichnis</b>		<b>687</b>