

Hans Dieter Baehr • Karl Stephan

Wärme- und Stoff Übertragung

7, neu bearbeitete Auflage

Mit 343 Abbildungen und zahlreichen
Tabellen sowie 62 Beispielen und 94 Aufgaben

 Springer

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, Wärmeübergangskoeffi- zient	11
1.1.4 Die Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten. Dimensionslose Kevenzahlen	18
1.1.5 Wärmestrahlung	28
1.1.6 Strahlungsaustausch	31
1.2 Wärmedurchgang	34
1.2.1 Der Wärmedurchgangskoeffizient	35
1.2.2 Mehrschichtige Wände	37
1.2.3 Wärmedurchgang durch Wände mit vergrößerter Oberfläche	38
1.2.4 Abkühlung und Erwärmung dünnwandiger Behälter ...	43
1.3 Wärmeübertrager	45
1.3.1 Bauarten und Stromführungen	46
1.3.2 Allgemeine Berechnungsgleichungen. Dimensionslose Kennzahlen	51
1.3.3 Gegenstrom- und Gleichstrom-Wärmeübertrager .. .	56
1.3.4 Kreuzstrom-Wärmeübertrager	64
1.3.5 Betriebscharakteristiken für weitere Stromführungen. Diagramme	71
1.4 Die verschiedenen Arten der Stoff Übertragung	72
1.4.1 Diffusion	75
1.4.2 Einseitige Diffusion, äquimolare Diffusion	82
1.4.3 Konvektiver Stoffübergang	85
1.5 Stoffübergangstheorien	89

Inhaltsverzeichnis

1.5.1	Die Filmtheorie	89
1.5.2	Die Grenzschichttheorie	94
1.5.3	Die Penetrations- und die Oberflächenerneuerungstheorie	96
1.5.4	Anwendung der Filmtheorie auf die Verdunstungs- kühlung	97
1.6	Stoffdurchgang	101
1.7	Stoffübertrager	104
1.7.1	Die Mengenbilanzen	105
1.7.2	Konzentrationsverlauf und Höhe von Stoffaustauschkolonnen	108
1.8	Aufgaben	112
Wärmeleitung und Diffusion		117
2.1	Die Wärmeleitungsgleichung	117
2.1.1	Die Herleitung der Differentialgleichung für das Temperaturfeld	118
2.1.2	Die Wärmeleitungsgleichung für einen Körper mit konstanten Stoffwerten	121
2.1.3	Die Randbedingungen	124
2.1.4	Temperaturabhängige Stoffwerte	127
2.1.5	Ähnliche Temperaturfelder	128
2.2	Stationäre Wärmeleitung	132
2.2.1	Geometrisch eindimensionale Wärmeleitung mit Wärmequellen	132
2.2.2	Wärmeleitung in Längsrichtung eines Stabes	136
2.2.3	Der Temperaturverlauf in Rippen und Nadeln	141
2.2.4	Der Rippenwirkungsgrad	146
2.2.5	Geometrisch mehrdimensionaler Wärmefluss	149
2.3	Instationäre Wärmeleitung	156
2.3.1	Lösungsmethoden	156
2.3.2	Die Laplace-Transformation	157
2.3.3	Der einseitig unendlich ausgedehnte Körper	165
2.3.4	Abkühlung und Erwärmung einfacher Körper bei eindimensionalem Wärmefluss	176
2.3.5	Abkühlung und Erwärmung bei mehrdimensionalem Wärmefluss	190
2.3.6	Erstarren geometrisch einfacher Körper	196
2.3.7	Wärmequellen	205
2.4	Numerische Lösung von Wärmeleitproblemen mit Differenzenverfahren	212
2.4.1	Das einfache explizite Differenzenverfahren für instationäre Wärmeleitprobleme	213
2.4.2	Die Diskretisierung der Randbedingungen	217
2.4.3	Das implizite Differenzenverfahren von J. Crank und P. Nicolson	223

2.4.4	Nichtkartesische Koordinaten. Temperaturabhängige Stoffwerte.	227
2.4.5	Instationäre ebene und räumliche Temperaturfelder	232
2.4.6	Stationäre Temperaturfelder.	235
2.5	Numerische Lösung von Wärmeleitproblemen mit der Finite-Element-Methode.	244
2.5.1	Die Finite-Element-Methode für stationäre, geometrisch eindimensionale Temperaturfelder.	246
2.5.2	Die Finite-Element-Methode für ebene stationäre Temperaturfelder.	250
2.5.3	Die Finite-Element-Methode für instationäre, geometrisch eindimensionale Wärmeleitprobleme.	258
2.5.4	Erweiterung auf instationäre, geometrisch zweidimensionale Wärmeleitprobleme.	263
2.6	Diffusion.	264
2.6.1	Bemerkungen über ruhende Systeme.	264
2.6.2	Die Herleitung der Differentialgleichung für das Konzentrationsfeld.	267
2.6.3	Vereinfachungen.	272
2.6.4	Randbedingungen.	273
2.6.5	Stationäre Diffusion mit katalytischer Oberflächenreaktion.	277
2.6.6	Stationäre Diffusion mit homogener chemischer Reaktion.	281
2.6.7	Instationäre Diffusion.	286
2.7	Aufgaben.	289
	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Einphasige Strömungen.	299
3.1	Vorbemerkungen: Die längsangeströmte ebene Platte bei reibungsfreier Strömung.	300
3.2	Die Bilanzgleichungen.	304
3.2.1	Das Reynoldssche Transporttheorem.	304
3.2.2	Die Massenbilanz.	307
3.2.3	Die Impulsbilanz.	311
3.2.4	Die Energiebilanz.	322
3.2.5	Zusammenfassung.	334
3.3	Einfluss der Reynolds-Zahl auf die Strömung.	337
3.4	Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen.	339
3.4.1	Schleichende Strömungen.	339
3.4.2	Reibungsfreie Strömungen.	340
3.4.3	Grenzschichtströmungen.	341
3.5	Die Grenzschichtgleichungen.	342
3.5.1	Die Strömungsgrenzschicht.	342
3.5.2	Die Temperaturgrenzschicht.	346

Inhaltsverzeichnis

3.5.3	Die Konzentrationsgrenzschicht	350
3.5.4	Allgemeine Bemerkungen zur Lösung der Grenzschichtgleichungen	350
3.6	Einfluss der Turbulenz auf den Wärme- und Stoffübergang.	354
3.6.1	Turbulente Strömungen an festen Wänden.	359
3.7	Überströmte Körper	363
3.7.1	Die parallel angeströmte ebene Platte	364
3.7.2	Der quer angeströmte Zylinder.	381
3.7.3	Quer angeströmte Rohrbündel	386
3.7.4	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang an überströmten Körpern	390
3.8	Durchströmte Kanäle, Haufwerke, Wirbelschichten	394
3.8.1	Die laminare Rohrströmung	394
3.8.2	Die turbulente Rohrströmung	409
3.8.3	Haufwerke	411
3.8.4	Poröse Körper.	415
3.8.5	Wirbelschichten	430
3.8.6	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang in durchströmten Kanälen, Haufwerken und Wirbelschichten.	440
3.9	Freie Strömung	443
3.9.1	Die Impulsgleichung	446
3.9.2	Wärmeübergang an einer senkrechten Wand bei laminarer Strömung	450
3.9.3	Einige empirische Gleichungen für den Wärmeüber- gang bei freier Strömung	455
3.9.4	Stoffübergang bei freier Strömung	457
3.10	Überlagerung von freier und erzwungener Strömung	458
3.11	Kompressible Strömungen	460
3.11.1	Das Temperaturfeld in einer kompressiblen Strömung	461
3.11.2	Berechnung des Wärmeübergangs.	468
3.12	Aufgaben.	471

Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Strömungen mit Phasenumwandlungen 477

4.1	Wärmeübergang beim Kondensieren	478
4.1.1	Die verschiedenen Arten der Kondensation	478
4.1.2	Die Nußeltsche Wasserhauttheorie	480
4.1.3	Abweichungen von der Nußeltschen Wasserhauttheorie	485
4.1.4	Einfluss nicht kondensierbarer Gase	489
4.1.5	Filmkondevisation mit turbulenter Wasserhaut	496
4.1.6	Kondensation strömender Dämpfe.	500
4.1.7	Tropfenkondensation.	506
4.1.8	Kondensation von Dampfgemischen.	510
4.1.9	Einige empirische Gleichungen.	522

4.2	Wärmeübergang beim Sieden	524
4.2.1	Die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung	525
4.2.2	Die Entstehung von Dampfblasen	529
4.2.3	Mechanismen der Wärmeübertragung beim Sieden in freier Strömung	533
4.2.4	Blasenfrequenz und Abreißdurchmesser	537
4.2.5	Die Nukijama-Kurve	540
4.2.6	Stabilität beim Sieden in freier Strömung	542
4.2.7	Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden in freier Strömung	545
4.2.8	Einige empirische Gleichungen zum Wärmeübergang beim Blasensieden in freier Strömung	549
4.2.9	Zweiphasige Strömungen	554
4.2.10	Wärmeübergang beim Sieden von Gemischen	580
4.3	Aufgaben	586
	Wärmestrahlung	589
5.1	Grundlagen. Strahlungsphysikalische Größen	590
5.1.1	Temperaturstrahlung	590
5.1.2	Ausstrahlung	592
5.1.3	Bestrahlung	602
5.1.4	Absorption von Strahlung	605
5.1.5	Reflexion von Strahlung	610
5.1.6	Hohlraumstrahlung. Gesetz von Kirchhoff	612
5.2	Die Strahlung des Schwarzen Körpers	616
5.2.1	Definition und Realisierung des Schwarzen Körpers	616
5.2.2	Die spektrale Strahldichte und die spektrale spezifische Ausstrahlung	618
5.2.3	Die spezifische Ausstrahlung und die Ausstrahlung in einem Wellenlängenbereich	624
5.3	Strahlungseigenschaften realer Körper	627
5.3.1	Emissionsgrade	627
5.3.2	Die Beziehungen zwischen Emissions-, Absorptions- und Reflexionsgraden. Der graue Lambert-Strahler	630
5.3.3	Emissionsgrade realer Körper	635
5.3.4	Strahlungsdurchlässige Körper	642
5.4	Solarstrahlung	647
5.4.1	Extraterrestrische Solarstrahlung	648
5.4.2	Die Schwächung der Solarstrahlung in der Erdatmosphäre	650
5.4.3	Direkte Solarstrahlung am Erdboden	657
5.4.4	Diffuse Solarstrahlung und Globalstrahlung	659
5.4.5	Absorptionsgrade für Solarstrahlung	662
5.5	Strahlungsaustausch	664
5.5.1	Sichtfaktoren	664

5.5.2	Strahlungsaustausch zwischen Schwarzen Körpern . . .	670
5.5.3	Strahlungsaustausch zwischen grauen Lambert-Strahlern	674
5.5.4	Strahlungsschutzschirme	686
5.6	Gasstrahlung	691
5.6.1	Absorptionskoeffizient und optische Dicke	692
5.6.2	Absorptions- und Emissionsgrade	694
5.6.3	Ergebnisse für den Emissionsgrad	697
5.6.4	Emissionsgrade und gleichwertige Schichtdicken von Gasräumen	700
5.6.5	Strahlungsaustausch in einem gasgefüllten Hohlraum. . .	706
5.7	Aufgaben	710
Anhang A: Ergänzungen		715
A.1	Einführung in die Tensorrotation	715
A.2	Zusammenhang zwischen mittlerem und thermodynamischem Druck	717
A.3	Navier-Stokes-Gleichungen eines inkompressiblen Fluids konstanter Viskosität in kartesischen Koordinaten	719
A.4	Navier-Stokes-Gleichungen eines inkompressiblen Fluids konstanter Viskosität in Zylinderkoordinaten	719
A.5	Entropiebilanz für Gemische	720
A.6	Zusammenhang zwischen partieller und spezifischer Enthalpie .	722
A.7	Berechnung der Konstanten a_n des Graetz-Nußelt-Problems (3.245)	723
Anhang B: Stoffwerte		725
Anhang C: Lösungen der Aufgaben		741
Literatur		761
Sachverzeichnis		779