
Inhaltsverzeichnis

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	17
1.1.5 Wärmestrahlung	28
1.1.6 Strahlungsaustausch	30
1.2 Wärmedurchgang	34
1.2.1 Der Wärmedurchgangskoeffizient	34
1.2.2 Mehrschichtige Wände	37
1.2.3 Wärmedurchgang durch Wände mit vergrößerter Oberfläche	38
1.2.4 Abkühlung und Erwärmung dünnwandiger Behälter	42
1.3 Wärmeübertrager	45
1.3.1 Bauarten und Stromführungen	45
1.3.2 Allgemeine Berechnungsgleichungen. Dimensionslose Kennzahlen	49
1.3.3 Gegenstrom- und Gleichstrom-Wärmeübertrager	54
1.3.4 Kreuzstrom-Wärmeübertrager	62
1.3.5 Betriebscharakteristiken für weitere Stromführungen. Diagramme	70
1.4 Die verschiedenen Arten der Stoffübertragung	71
1.4.1 Diffusion	73
1.4.2 Einseitige Diffusion, äquimolare Diffusion	81
1.4.3 Konvektiver Stoffübergang	85
1.5 Stoffübergangstheorien	89
1.5.1 Die Filmtheorie	89
1.5.2 Die Grenzschichttheorie	93
1.5.3 Die Penetrations- und die Oberflächenerneuerungstheorie	95
1.5.4 Anwendung der Filmtheorie auf die Verdunstungskühlung	97

XI

1.6	Stoffdurchgang	101
1.7	Stoffübertrager	104
1.7.1	Die Mengenzbilanzen	105
1.7.2	Konzentrationsverlauf und Höhe von Stoffaustauschkolonnen	108
1.8	Aufgaben	112
	Literatur	118
2	Wärmeleitung und Diffusion	121
2.1	Die Wärmeleitungsgleichung	121
2.1.1	Die Herleitung der Differentialgleichung für das Temperaturfeld	122
2.1.2	Die Wärmeleitungsgleichung für einen Körper mit konstanten Stoffwerten	125
2.1.3	Die Randbedingungen	128
2.1.4	Temperaturabhängige Stoffwerte	131
2.1.5	Ähnliche Temperaturfelder	132
2.2	Stationäre Wärmeleitung	136
2.2.1	Geometrisch eindimensionale Wärmeleitung mit Wärmequellen	136
2.2.2	Wärmeleitung in Längsrichtung eines Stabes	140
2.2.3	Der Temperaturverlauf in Rippen und Nadeln	145
2.2.4	Der Rippenwirkungsgrad	151
2.2.5	Geometrisch mehrdimensionaler Wärmefluss	154
2.3	Instationäre Wärmeleitung	161
2.3.1	Lösungsmethoden	162
2.3.2	Die Laplace-Transformation	163
2.3.3	Der einseitig unendlich ausgedehnte Körper	171
2.3.4	Abkühlung und Erwärmung einfacher Körper bei eindimensionalem Wärmefluss	181
2.3.5	Abkühlung und Erwärmung bei mehrdimensionalem Wärmefluss	196
2.3.6	Erstarren geometrisch einfacher Körper	202
2.3.7	Wärmequellen	210
2.4	Numerische Lösung von Wärmeleitproblemen mit Differenzenverfahren	218
2.4.1	Das einfache explizite Differenzenverfahren für instationäre Wärmeleitprobleme	219
2.4.2	Die Diskretisierung der Randbedingungen	223
2.4.3	Das implizite Differenzenverfahren von J. Crank und P. Nicolson	230
2.4.4	Nichtkartesische Koordinaten. Temperaturabhängige Stoffwerte	234
2.4.5	Instationäre ebene und räumliche Temperaturfelder	238
2.4.6	Stationäre Temperaturfelder	241

2.5	Numerische Lösung von Wärmeleitproblemen mit der Finite-Element-Methode	251
2.5.1	Die Finite-Element-Methode für stationäre, geometrisch eindimensionale Temperaturfelder	252
2.5.2	Die Finite-Element-Methode für ebene stationäre Temperaturfelder	257
2.5.3	Die Finite-Element-Methode für instationäre, geometrisch eindimensionale Wärmeleitprobleme	264
2.5.4	Erweiterung auf instationäre, geometrisch zweidimensionale Wärmeleitprobleme	269
2.6	Diffusion	271
2.6.1	Bemerkungen über ruhende Systeme	271
2.6.2	Die Herleitung der Differentialgleichung für das Konzentrationsfeld	274
2.6.3	Vereinfachungen	279
2.6.4	Randbedingungen	281
2.6.5	Stationäre Diffusion mit katalytischer Oberflächenreaktion	284
2.6.6	Stationäre Diffusion mit homogener chemischer Reaktion	289
2.6.7	Instationäre Diffusion	294
2.7	Aufgaben	298
	Literatur	307
3	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Einphasige Strömungen	311
3.1	Vorbemerkungen: Die längsangeströmte ebene Platte bei reibungsfreier Strömung	312
3.2	Die Bilanzgleichungen	316
3.2.1	Das Reynoldssche Transporttheorem	317
3.2.2	Die Massenbilanz	319
3.2.3	Die Impulsbilanz	323
3.2.4	Die Energiebilanz	335
3.2.5	Zusammenfassung	347
3.3	Einfluss der Reynolds-Zahl auf die Strömung	350
3.4	Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen	353
3.4.1	Schleichende Strömungen	353
3.4.2	Reibungsfreie Strömungen	354
3.4.3	Grenzschichtströmungen	354
3.5	Die Grenzschichtgleichungen	356
3.5.1	Die Strömungsgrenzschicht	356
3.5.2	Die Temperaturgrenzschicht	359
3.5.3	Die Konzentrationsgrenzschicht	364
3.5.4	Allgemeine Bemerkungen zur Lösung der Grenzschichtgleichungen	364

3.6	Einfluss der Turbulenz auf den Wärme- und Stoffübergang	368
3.6.1	Turbulente Strömungen an festen Wänden	373
3.7	Überströmte Körper	377
3.7.1	Die parallel angeströmte ebene Platte	377
3.7.2	Der quer angeströmte Zylinder	394
3.7.3	Quer angeströmte Rohrbündel	399
3.7.4	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang an überströmten Körpern	403
3.8	Durchströmte Kanäle, Haufwerke, Wirbelschichten	407
3.8.1	Die laminare Rohrströmung	407
3.8.2	Die turbulente Rohrströmung	422
3.8.3	Haufwerke	424
3.8.4	Poröse Körper	428
3.8.5	Wirbelschichten	443
3.8.6	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang in durchströmten Kanälen, Haufwerken und Wirbelschichten	454
3.9	Freie Strömung	457
3.9.1	Die Impulsgleichung	460
3.9.2	Wärmeübergang an einer senkrechten Wand bei laminarer Strömung	464
3.9.3	Einige empirische Gleichungen für den Wärmeübergang bei freier Strömung	469
3.9.4	Stoffübergang bei freier Strömung	472
3.10	Überlagerung von freier und erzwungener Strömung	477
3.11	Kompressible Strömungen	479
3.11.1	Das Temperaturfeld in einer kompressiblen Strömung	479
3.11.2	Berechnung des Wärmeübergangs	487
3.12	Aufgaben	490
	Literatur	497
4	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Strömungen mit Phasenumwandlungen	501
4.1	Wärmeübergang beim Kondensieren	502
4.1.1	Die verschiedenen Arten der Kondensation	502
4.1.2	Die Nußeltsche Wasserhauttheorie	504
4.1.3	Abweichungen von der Nußeltschen Wasserhauttheorie	509
4.1.4	Einfluss nicht kondensierbarer Gase	514
4.1.5	Filmkondensation mit turbulenter Wasserhaut	521
4.1.6	Kondensation strömender Dämpfe	524
4.1.7	Tropfenkondensation	531
4.1.8	Kondensation von Dampfgemischen	534
4.1.9	Einige empirische Gleichungen	546

4.2	Wärmeübergang beim Sieden	548
4.2.1	Die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung	549
4.2.2	Die Entstehung von Dampfblasen	554
4.2.3	Mechanismen der Wärmeübertragung beim Sieden in freier Strömung	557
4.2.4	Blasenfrequenz und Abreißdurchmesser	561
4.2.5	Die Nukijama-Kurve	563
4.2.6	Stabilität beim Sieden in freier Strömung	565
4.2.7	Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden in freier Strömung	569
4.2.8	Einige empirische Gleichungen zum Wärmeübergang beim Blasensieden in freier Strömung	572
4.2.9	Zweiphasige Strömungen	577
4.2.10	Wärmeübergang beim Sieden von Gemischen	602
4.3	Aufgaben	608
	Literatur	610
5	Wärmestrahlung	615
5.1	Grundlagen. Strahlungsphysikalische Größen	616
5.1.1	Temperaturstrahlung	616
5.1.2	Ausstrahlung	618
5.1.3	Bestrahlung	628
5.1.4	Absorption von Strahlung	631
5.1.5	Reflexion von Strahlung	636
5.1.6	Hohlraumstrahlung. Gesetz von Kirchhoff	639
5.2	Die Strahlung des Schwarzen Körpers	642
5.2.1	Definition und Realisierung des Schwarzen Körpers	642
5.2.2	Die spektrale Strahldichte und die spektrale spezifische Ausstrahlung	644
5.2.3	Die spezifische Ausstrahlung und die Ausstrahlung in einem Wellenlängenbereich	647
5.3	Strahlungseigenschaften realer Körper	652
5.3.1	Emissionsgrade	652
5.3.2	Die Beziehungen zwischen Emissions-, Absorptions- und Reflexionsgraden. Der graue Lambert-Strahler	655
5.3.3	Emissionsgrade realer Körper	660
5.3.4	Strahlungsdurchlässige Körper	667
5.4	Solarstrahlung	673
5.4.1	Extraterrestrische Solarstrahlung	673
5.4.2	Die Schwächung der Solarstrahlung in der Erdatmosphäre	676
5.4.3	Direkte Solarstrahlung am Erdboden	683
5.4.4	Diffuse Solarstrahlung und Globalstrahlung	685
5.4.5	Absorptionsgrade für Solarstrahlung	688

5.5	Strahlungsaustausch	690
5.5.1	Sichtfaktoren	691
5.5.2	Strahlungsaustausch zwischen Schwarzen Körpern	697
5.5.3	Strahlungsaustausch zwischen grauen Lambert-Strahlern	701
5.5.4	Strahlungsschutzschirme	714
5.6	Gasstrahlung	719
5.6.1	Absorptionskoeffizient und optische Dicke	720
5.6.2	Absorptions- und Emissionsgrade	722
5.6.3	Ergebnisse für den Emissionsgrad	726
5.6.4	Emissionsgrade und gleichwertige Schichtdicken von Gasräumen	727
5.6.5	Strahlungsaustausch in einem gasgefüllten Hohlraum	734
5.7	Aufgaben	739
	Literatur	745
Anhang A: Ergänzungen		749
Anhang B: Stoffwerte		759
Anhang C: Lösungen der Aufgaben		775
Sachverzeichnis		799