

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
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
	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 und Schmelzen geometrisch einfacher Körper	202
2.3.7	Wärmequellen	212

2.4	Numerische Lösung von Wärmeleitproblemen mit Differenzenverfahren	219
2.4.1	Das einfache explizite Differenzenverfahren für instationäre Wärmeleitprobleme	220
2.4.2	Die Diskretisierung der Randbedingungen	224
2.4.3	Das implizite Differenzenverfahren von J. Crank und P. Nicolson	231
2.4.4	Nichtkartesische Koordinaten. Temperaturabhängige Stoffwerte.	235
2.4.5	Instationäre ebene und räumliche Temperaturfelder	239
2.4.6	Stationäre Temperaturfelder	243
2.5	Numerische Lösung von Wärmeleitproblemen mit der Finite-Element-Methode	252
2.5.1	Die Finite-Element-Methode für stationäre, geometrisch eindimensionale Temperaturfelder	253
2.5.2	Die Finite-Element-Methode für ebene stationäre Temperaturfelder	258
2.5.3	Die Finite-Element-Methode für instationäre, geometrisch eindimensionale Wärmeleitprobleme	265
2.5.4	Erweiterung auf instationäre, geometrisch zweidimensionale Wärmeleitprobleme	270
2.6	Diffusion	272
2.6.1	Bemerkungen über ruhende Systeme	272
2.6.2	Die Herleitung der Differentialgleichung für das Konzentrationsfeld.	275
2.6.3	Vereinfachungen	280
2.6.4	Randbedingungen	282
2.6.5	Stationäre Diffusion mit katalytischer Oberflächenreaktion	285
2.6.6	Stationäre Diffusion mit homogener chemischer Reaktion	290
2.6.7	Instationäre Diffusion	295
2.7	Aufgaben	299
	Literatur.	308
3	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Einphasige Strömungen	313
3.1	Vorbemerkungen: Die längsangeströmte ebene Platte bei reibungsfreier Strömung.	314
3.2	Die Bilanzgleichungen.	318
3.2.1	Das Reynoldssche Transporttheorem.	319
3.2.2	Die Massenbilanz.	321
3.2.3	Die Impulsbilanz	325
3.2.4	Die Energiebilanz	337
3.2.5	Zusammenfassung	349

3.3	Einfluss der Reynolds-Zahl auf die Strömung	352
3.4	Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen	355
3.4.1	Schleichende Strömungen	355
3.4.2	Reibungsfreie Strömungen	356
3.4.3	Grenzschichtströmungen	356
3.5	Die Grenzschichtgleichungen	358
3.5.1	Die Strömungsgrenzschicht	358
3.5.2	Die Temperaturgrenzschicht	361
3.5.3	Die Konzentrationsgrenzschicht	366
3.5.4	Allgemeine Bemerkungen zur Lösung der Grenzschichtgleichungen	366
3.6	Einfluss der Turbulenz auf den Wärme- und Stoffübergang	370
3.6.1	Turbulente Strömungen an festen Wänden	375
3.7	Überströmte Körper	379
3.7.1	Die parallel angeströmte ebene Platte	379
3.7.2	Der quer angeströmte Zylinder	396
3.7.3	Quer angeströmte Rohrbündel	401
3.7.4	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang an überströmten Körpern	405
3.8	Durchströmte Kanäle, Haufwerke, Wirbelschichten	409
3.8.1	Die laminare Rohrströmung	409
3.8.2	Die turbulente Rohrströmung	424
3.8.3	Haufwerke	426
3.8.4	Poröse Körper	430
3.8.5	Wirbelschichten	445
3.8.6	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang in durchströmten Kanälen, Haufwerken und Wirbelschichten	456
3.9	Freie Strömung	459
3.9.1	Die Impulsgleichung	462
3.9.2	Wärmeübergang an einer senkrechten Wand bei laminarer Strömung	466
3.9.3	Einige empirische Gleichungen für den Wärmeübergang bei freier Strömung	471
3.9.4	Stoffübergang bei freier Strömung	474
3.10	Überlagerung von freier und erzwungener Strömung	479
3.11	Kompressible Strömungen	481
3.11.1	Das Temperaturfeld in einer kompressiblen Strömung	482
3.11.2	Berechnung des Wärmeübergangs	489
3.12	Aufgaben	492
	Literatur	499

4 Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Strömungen mit Phasenumwandlungen	503
4.1 Wärmeübergang beim Kondensieren	504
4.1.1 Die verschiedenen Arten der Kondensation	504
4.1.2 Die Nußeltsche Wasserhauttheorie	506
4.1.3 Abweichungen von der Nußeltschen Wasserhauttheorie	511
4.1.4 Einfluss nicht kondensierbarer Gase	516
4.1.5 Filmkondensation mit turbulenter Wasserhaut	523
4.1.6 Kondensation strömender Dämpfe	526
4.1.7 Tropfenkondensation	533
4.1.8 Kondensation von Dampfgemischen	536
4.1.9 Einige empirische Gleichungen	548
4.2 Wärmeübergang beim Sieden	550
4.2.1 Die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung	551
4.2.2 Die Entstehung von Dampfblasen	556
4.2.3 Mechanismen der Wärmeübertragung beim Sieden in freier Strömung	559
4.2.4 Blasenfrequenz und Abreißdurchmesser	563
4.2.5 Die Nukijama-Kurve	565
4.2.6 Stabilität beim Sieden in freier Strömung	567
4.2.7 Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden in freier Strömung	571
4.2.8 Einige empirische Gleichungen zum Wärmeübergang beim Blasensieden in freier Strömung	574
4.2.9 Zweiphasige Strömungen	579
4.2.10 Wärmeübergang beim Sieden von Gemischen	604
4.3 Aufgaben	610
Literatur	612
5 Wärmestrahlung	617
5.1 Grundlagen. Strahlungsphysikalische Größen	618
5.1.1 Temperaturstrahlung	618
5.1.2 Ausstrahlung	620
5.1.3 Bestrahlung	630
5.1.4 Absorption von Strahlung	633
5.1.5 Reflexion von Strahlung	638
5.1.6 Hohlraumstrahlung. Gesetz von Kirchhoff	641
5.2 Die Strahlung des Schwarzen Körpers	644
5.2.1 Definition und Realisierung des Schwarzen Körpers	644
5.2.2 Die spektrale Strahldichte und die spektrale spezifische Ausstrahlung	646
5.2.3 Die spezifische Ausstrahlung und die Ausstrahlung in einem Wellenlängenbereich	649

5.3	Strahlungseigenschaften realer Körper	654
5.3.1	Emissionsgrade	654
5.3.2	Die Beziehungen zwischen Emissions-, Absorptions- und Reflexionsgraden. Der graue Lambert-Strahler.	657
5.3.3	Emissionsgrade realer Körper	662
5.3.4	Strahlungsdurchlässige Körper	669
5.4	Solarstrahlung	675
5.4.1	Extraterrestrische Solarstrahlung.	675
5.4.2	Die Schwächung der Solarstrahlung in der Erdatmosphäre.	678
5.4.3	Direkte Solarstrahlung am Erdboden.	685
5.4.4	Diffuse Solarstrahlung und Globalstrahlung	687
5.4.5	Absorptionsgrade für Solarstrahlung.	690
5.5	Strahlungsaustausch.	692
5.5.1	Sichtfaktoren	693
5.5.2	Strahlungsaustausch zwischen Schwarzen Körpern	699
5.5.3	Strahlungsaustausch zwischen grauen Lambert-Strahlern	703
5.5.4	Strahlungsschutzschirme	716
5.6	Gasstrahlung	721
5.6.1	Absorptionskoeffizient und optische Dicke.	722
5.6.2	Absorptions- und Emissionsgrade	724
5.6.3	Ergebnisse für den Emissionsgrad.	728
5.6.4	Emissionsgrade und gleichwertige Schichtdicken von Gasräumen.	729
5.6.5	Strahlungsaustausch in einem gasgefüllten Hohlraum	736
5.7	Aufgaben	741
	Literatur.	747
Anhang A: Ergänzungen		751
Anhang B: Stoffwerte		761
Anhang C: Lösungen der Aufgaben		777
Sachverzeichnis		801