
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 Kennzahlen	18
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	46
1.3.2 Allgemeine Berechnungsgleichungen. Dimensionslose Kennzahlen	50
1.3.3 Gegenstrom- und Gleichstrom-Wärmeübertrager	55
1.3.4 Kreuzstrom-Wärmeübertrager	64
1.3.5 Betriebscharakteristiken für weitere Stromführungen. Diagramme	71
1.4 Die verschiedenen Arten der Stoffübertragung	72
1.4.1 Diffusion	74
1.4.2 Einseitige Diffusion, äquimolare Diffusion	82
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 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
2	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	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	Diffusion	244
2.5.1	Bemerkungen über ruhende Systeme	244
2.5.2	Die Herleitung der Differentialgleichung für das Konzentrationsfeld	247
2.5.3	Vereinfachungen	253
2.5.4	Randbedingungen	254
2.5.5	Stationäre Diffusion mit katalytischer Oberflächenreaktion	257
2.5.6	Stationäre Diffusion mit homogener chemischer Reaktion	262
2.5.7	Instationäre Diffusion	267
2.6	Aufgaben	270

3 Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Einphasige

Strömungen	279	
3.1	Die längsangeströmte ebene Platte bei reibungsfreier Strömung	280
3.2	Die Bilanzgleichungen	284
3.2.1	Das Reynoldssche Transporttheorem	284
3.2.2	Die Massenbilanz	287
3.2.3	Die Impulsbilanz	291
3.2.4	Die Energiebilanz	302
3.2.5	Zusammenfassung	314
3.3	Einfluß der Reynolds-Zahl auf die Strömung	317
3.4	Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen	319
3.4.1	Schleichende Strömungen	319
3.4.2	Reibungsfreie Strömungen	320
3.4.3	Grenzschichtströmungen	321
3.5	Die Grenzschichtgleichungen	322
3.5.1	Die Strömungsgrenzschicht	322
3.5.2	Die Temperaturgrenzschicht	326
3.5.3	Die Konzentrationsgrenzschicht	330
3.5.4	Allgemeine Bemerkungen zur Lösung der Grenzschichtgleichungen	330
3.6	Einfluß der Turbulenz auf den Wärme- und Stoffübergang . . .	334
3.6.1	Turbulente Strömungen an festen Wänden	339
3.7	Überströmte Körper	343
3.7.1	Die parallel angeströmte ebene Platte	344
3.7.2	Der quer angeströmte Zylinder	361
3.7.3	Quer angeströmte Rohrbündel	366
3.7.4	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang an überströmten Körpern	369
3.8	Durchströmte Kanäle, Haufwerke, Wirbelschichten	372

3.8.1	Die laminare Rohrströmung	373
3.8.2	Die turbulente Rohrströmung	388
3.8.3	Haufwerke	390
3.8.4	Poröse Körper	394
3.8.5	Wirbelschichten	402
3.8.6	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang in durchströmten Kanälen, Haufwerken und Wirbelschichten	412
3.9	Freie Strömung	415
3.9.1	Die Impulsgleichung	418
3.9.2	Wärmeübergang an einer senkrechten Wand bei laminarer Strömung	422
3.9.3	Einige empirische Gleichungen für den Wärmeübergang bei freier Strömung	427
3.9.4	Stoffübergang bei freier Strömung	429
3.10	Überlagerung von freier und erzwungener Strömung	430
3.11	Kompressible Strömungen	432
3.11.1	Das Temperaturfeld in einer kompressiblen Strömung ..	433
3.11.2	Berechnung des Wärmeübergangs	440
3.12	Aufgaben	443
4	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang mit Phasenumwandlungen	449
4.1	Wärmeübergang beim Kondensieren	450
4.1.1	Die verschiedenen Arten der Kondensation	450
4.1.2	Die Nufeltsche Wasserhauttheorie	452
4.1.3	Abweichungen von der Nufeltschen Wasserhauttheorie ..	457
4.1.4	Einfluß nicht kondensierbarer Gase	461
4.1.5	Filmkondensation mit turbulenter Wasserhaut	468
4.1.6	Kondensation strömender Dämpfe	472
4.1.7	Tropfenkondensation	477
4.1.8	Kondensation von Dampfgemischen	481
4.1.9	Einige empirische Gleichungen	494
4.2	Wärmeübergang beim Sieden	496
4.2.1	Die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung	496
4.2.2	Die Entstehung von Dampfblasen	501
4.2.3	Mechanismen der Wärmeübertragung beim Sieden in freier Strömung	505
4.2.4	Blasenfrequenz und Abreißdurchmesser	509
4.2.5	Die Nukijama-Kurve	511
4.2.6	Stabilität beim Sieden in freier Strömung	513
4.2.7	Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden in freier Strömung	517
4.2.8	Einige empirische Gleichungen zum Wärmeübergang beim Blasensieden in freier Strömung	520

4.2.9	Zweiphasige Strömungen	525
4.2.10	Wärmeübergang beim Sieden von Gemischen	551
4.3	Aufgaben	556
5	Wärmestrahlung	559
5.1	Grundlagen. Strahlungsphysikalische Größen	560
5.1.1	Temperaturstrahlung	560
5.1.2	Ausstrahlung	562
5.1.3	Bestrahlung	572
5.1.4	Absorption von Strahlung	575
5.1.5	Reflexion von Strahlung	580
5.1.6	Hohlraumstrahlung. Gesetz von Kirchhoff	582
5.2	Die Strahlung des Schwarzen Körpers	585
5.2.1	Definition und Realisierung des Schwarzen Körpers	585
5.2.2	Die spektrale Strahldichte und die spektrale spezifische Ausstrahlung	587
5.2.3	Die spezifische Ausstrahlung und die Ausstrahlung in einem Wellenlängenbereich	593
5.3	Strahlungseigenschaften realer Körper	596
5.3.1	Emissionsgrade	597
5.3.2	Die Beziehungen zwischen Emissions-, Absorptions- und Reflexionsgraden. Der graue Lambert-Strahler	599
5.3.3	Emissionsgrade realer Körper	605
5.3.4	Strahlungsdurchlässige Körper	611
5.4	Solarstrahlung	616
5.4.1	Extraterrestrische Solarstrahlung	617
5.4.2	Die Schwächung der Solarstrahlung in der Erdatmosphäre	619
5.4.3	Direkte Solarstrahlung am Erdboden	626
5.4.4	Diffuse Solarstrahlung und Globalstrahlung	629
5.4.5	Absorptionsgrade für Solarstrahlung	632
5.5	Strahlungsaustausch	633
5.5.1	Sichtfaktoren	634
5.5.2	Strahlungsaustausch zwischen Schwarzen Körpern	640
5.5.3	Strahlungsaustausch zwischen grauen Lambert-Strahlern	643
5.5.4	Strahlungsschutzschirme	655
5.6	Gasstrahlung	660
5.6.1	Absorptionskoeffizient und optische Dicke	661
5.6.2	Absorptions- und Emissionsgrade	663
5.6.3	Ergebnisse für den Emissionsgrad	666
5.6.4	Emissionsgrade und gleichwertige Schichtdicken von Gasräumen	669
5.6.5	Strahlungsaustausch in einem gasgefüllten Hohlraum	674
5.7	Aufgaben	679

Anhang A: Ergänzungen	685
A.1 Einführung in die Tensornotation	685
A.2 Zusammenhang zwischen mittlerem und thermodynamischem Druck	687
A.3 Navier-Stokes-Gleichungen eines inkompressiblen Fluids konstanter Viskosität in kartesischen Koordinaten	689
A.4 Navier-Stokes-Gleichungen eines inkompressiblen Fluids konstanter Viskosität in Zylinderkoordinaten	689
A.5 Entropiebilanz für Gemische	690
A.6 Zusammenhang zwischen partieller und spezifischer Enthalpie ..	692
A.7 Berechnung der Konstanten a_n des Graetz-Nußelt-Problems (3.243)	693
Anhang B: Stoffwerte	695
Anhang C: Lösungen der Aufgaben	711
Literatur	727
Sachverzeichnis	745