
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	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 Stoffübertragung	72
1.4.1 Diffusion	75
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	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
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 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

3 Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Einphasige

Strömungen 299

3.1 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

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	382
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	393
3.8.1	Die laminare Rohrströmung	393
3.8.2	Die turbulente Rohrströmung	409
3.8.3	Haufwerke	410
3.8.4	Poröse Körper	414
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	449
3.9.3	Einige empirische Gleichungen für den Wärmeüber- gang bei freier Strömung	454
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	460
3.11.2	Berechnung des Wärmeübergangs	468
3.12	Aufgaben	471
4	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang 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	Filmkondensation mit turbulenter Wasserhaut	496
4.1.6	Kondensation strömender Dämpfe	500
4.1.7	Tropfenkondensation	506
4.1.8	Kondensation von Dampfgemischen	509
4.1.9	Einige empirische Gleichungen	522
4.2	Wärmeübergang beim Sieden	524

4.2.1	Die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung	524
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	539
4.2.6	Stabilität beim Sieden in freier Strömung	541
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	548
4.2.9	Zweiphasige Strömungen	553
4.2.10	Wärmeübergang beim Sieden von Gemischen	579
4.3	Aufgaben	585
5	Wärmestrahlung	587
5.1	Grundlagen. Strahlungsphysikalische Größen	588
5.1.1	Temperaturstrahlung	588
5.1.2	Ausstrahlung	590
5.1.3	Bestrahlung	600
5.1.4	Absorption von Strahlung	603
5.1.5	Reflexion von Strahlung	608
5.1.6	Hohlraumstrahlung. Gesetz von Kirchhoff	610
5.2	Die Strahlung des Schwarzen Körpers	614
5.2.1	Definition und Realisierung des Schwarzen Körpers	614
5.2.2	Die spektrale Strahldichte und die spektrale spezifische Ausstrahlung	616
5.2.3	Die spezifische Ausstrahlung und die Ausstrahlung in einem Wellenlängenbereich	622
5.3	Strahlungseigenschaften realer Körper	625
5.3.1	Emissionsgrade	625
5.3.2	Die Beziehungen zwischen Emissions-, Absorptions- und Reflexionsgraden. Der graue Lambert-Strahler	628
5.3.3	Emissionsgrade realer Körper	633
5.3.4	Strahlungsdurchlässige Körper	640
5.4	Solarstrahlung	645
5.4.1	Extraterrestrische Solarstrahlung	646
5.4.2	Die Schwächung der Solarstrahlung in der Erdatmosphäre	648
5.4.3	Direkte Solarstrahlung am Erdboden	655
5.4.4	Diffuse Solarstrahlung und Globalstrahlung	657
5.4.5	Absorptionsgrade für Solarstrahlung	660
5.5	Strahlungsaustausch	662
5.5.1	Sichtfaktoren	662
5.5.2	Strahlungsaustausch zwischen Schwarzen Körpern	668

5.5.3	Strahlungsaustausch zwischen grauen Lambert-Strahlern	672
5.5.4	Strahlungsschutzschirme	684
5.6	Gasstrahlung	689
5.6.1	Absorptionskoeffizient und optische Dicke	690
5.6.2	Absorptions- und Emissionsgrade	692
5.6.3	Ergebnisse für den Emissionsgrad	695
5.6.4	Emissionsgrade und gleichwertige Schichtdicken von Gasräumen	698
5.6.5	Strahlungsaustausch in einem gasgefüllten Hohlraum	704
5.7	Aufgaben	708
Anhang A: Ergänzungen		713
A.1	Einführung in die Tensornotation	713
A.2	Zusammenhang zwischen mittlerem und thermodynamischem Druck	715
A.3	Navier-Stokes-Gleichungen eines inkompressiblen Fluids konstanter Viskosität in kartesischen Koordinaten	717
A.4	Navier-Stokes-Gleichungen eines inkompressiblen Fluids konstanter Viskosität in Zylinderkoordinaten	717
A.5	Entropiebilanz für Gemische	718
A.6	Zusammenhang zwischen partieller und spezifischer Enthalpie	720
A.7	Berechnung der Konstanten a_n des Graetz-Nußelt-Problems (3.243)	721
Anhang B: Stoffwerte		723
Anhang C: Lösungen der Aufgaben		739
Literatur		759
Sachverzeichnis		777