

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b> .....	xv
<b>1 Einführung. Technische Anwendungen</b> .....	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
<b>2</b>	<b>Wärmeleitung und Diffusion . . . . .</b>	<b>117</b>
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
<b>4</b>	<b>Konvektiver Wärme- und Stoffübergang mit Phasenumwandlungen . . . . .</b>	<b>477</b>
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
<b>5</b>	<b>Wärmestrahlung . . . . .</b>	<b>587</b>
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
<b>Anhang A: Ergänzungen</b>		<b>713</b>
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
<b>Anhang B: Stoffwerte</b>		<b>723</b>
<b>Anhang C: Lösungen der Aufgaben</b>		<b>739</b>
<b>Literatur</b>		<b>759</b>
<b>Sachverzeichnis</b>		<b>777</b>