

---

# 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, Wärmeübergangskoeffizient .....	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 Mengebilanzen .....	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 .....	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
<b>3</b>	<b>Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Einphasige Strömungen . . . . .</b>	<b>279</b>
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
<b>4</b>	<b>Konvektiver Wärme- und Stoffübergang mit Phasenumwandlungen</b>	<b>449</b>
4.1	Wärmeübergang beim Kondensieren	450
4.1.1	Die verschiedenen Arten der Kondensation	450
4.1.2	Die Nußeltsche Wasserhauttheorie	452
4.1.3	Abweichungen von der Nußeltschen 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
<b>5</b>	<b>Wärmestrahlung</b> .....	<b>559</b>
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