
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	11
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	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	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	63
1.3.5	Betriebscharakteristiken für weitere Stromführungen. Diagramme	70
1.4	Die verschiedenen Arten der Stoffübertragung	71
1.4.1	Diffusion	74
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	153
2.3	Instationäre Wärmeleitung	161
2.3.1	Lösungsmethoden	161
2.3.2	Die Laplace-Transformation	163
2.3.3	Der einseitig unendlich ausgedehnte Körper	170
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 geometrisch einfacher Körper	202
2.3.7	Wärmequellen	210
2.4	Numerische Lösung von Wärmeleitproblemen mit Differenzenverfahren	218
2.4.1	Das einfache explizite Differenzenverfahren für instationäre Wärmeleitprobleme	218
2.4.2	Die Diskretisierung der Randbedingungen	223
2.4.3	Das implizite Differenzenverfahren von J. Crank und P. Nicolson	229
2.4.4	Nichtkartesische Koordinaten. Temperaturabhängige Stoffwerte	233

2.4.5	Instationäre ebene und räumliche Temperaturfelder	238
2.4.6	Stationäre Temperaturfelder	241
2.5	Numerische Lösung von Wärmeleitproblemen mit der Finite-Element-Methode	250
2.5.1	Die Finite-Element-Methode für stationäre, geometrisch eindimensionale Temperaturfelder	252
2.5.2	Die Finite-Element-Methode für ebene stationäre Temperaturfelder	256
2.5.3	Die Finite-Element-Methode für instationäre, geometrisch eindimensionale Wärmeleitprobleme	264
2.5.4	Erweiterung auf instationäre, geometrisch zweidimensionale Wärmeleitprobleme	269
2.6	Diffusion	270
2.6.1	Bemerkungen über ruhende Systeme	270
2.6.2	Die Herleitung der Differentialgleichung für das Konzentrationsfeld	273
2.6.3	Vereinfachungen	279
2.6.4	Randbedingungen	280
2.6.5	Stationäre Diffusion mit katalytischer Oberflächenreaktion	283
2.6.6	Stationäre Diffusion mit homogener chemischer Reaktion	288
2.6.7	Instationäre Diffusion	293
2.7	Aufgaben	296
	Literatur	306
3	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Einphasige Strömungen	311
3.1	Vorbemerkungen: Die längsangeströmte ebene Platte bei reibungsfreier Strömung	312
3.2	Die Bilanzgleichungen	316
3.2.1	Das Reynoldssche Transporttheorem	317
3.2.2	Die Massenbilanz	319
3.2.3	Die Impulsbilanz	323
3.2.4	Die Energiebilanz	335
3.2.5	Zusammenfassung	348
3.3	Einfluss der Reynolds-Zahl auf die Strömung	351
3.4	Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen	354
3.4.1	Schleichende Strömungen	354
3.4.2	Reibungsfreie Strömungen	355
3.4.3	Grenzschichtströmungen	355
3.5	Die Grenzschichtgleichungen	357
3.5.1	Die Strömungsgrenzschicht	357
3.5.2	Die Temperaturgrenzschicht	360
3.5.3	Die Konzentrationsgrenzschicht	365

3.5.4	Allgemeine Bemerkungen zur Lösung der Grenzschichtgleichungen	365
3.6	Einfluss der Turbulenz auf den Wärme- und Stoffübergang	369
3.6.1	Turbulente Strömungen an festen Wänden	374
3.7	Überströmte Körper	378
3.7.1	Die parallel angeströmte ebene Platte	379
3.7.2	Der quer angeströmte Zylinder	397
3.7.3	Quer angeströmte Rohrbündel	402
3.7.4	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang an überströmten Körpern	406
3.8	Durchströmte Kanäle, Haufwerke, Wirbelschichten	409
3.8.1	Die laminare Rohrströmung	410
3.8.2	Die turbulente Rohrströmung	425
3.8.3	Haufwerke	427
3.8.4	Poröse Körper	431
3.8.5	Wirbelschichten	447
3.8.6	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang in durchströmten Kanälen, Haufwerken und Wirbelschichten	457
3.9	Freie Strömung	460
3.9.1	Die Impulsgleichung	463
3.9.2	Wärmeübergang an einer senkrechten Wand bei laminarer Strömung	467
3.9.3	Einige empirische Gleichungen für den Wärmeübergang bei freier Strömung	473
3.9.4	Stoffübergang bei freier Strömung	475
3.10	Überlagerung von freier und erzwungener Strömung	479
3.11	Kompressible Strömungen	481
3.11.1	Das Temperaturfeld in einer kompressiblen Strömung	481
3.11.2	Berechnung des Wärmeübergangs	489
3.12	Aufgaben	492
	Literatur	498
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	507
4.1.3	Abweichungen von der Nußeltschen Wasserhauttheorie	512
4.1.4	Einfluss nicht kondensierbarer Gase	516
4.1.5	Filmkondensation mit turbulenter Wasserhaut	523
4.1.6	Kondensation strömender Dämpfe	527

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.....	566
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.....	605
4.3	Aufgaben.....	610
	Literatur.....	612
5	Wärmestrahlung.....	619
5.1	Grundlagen. Strahlungsphysikalische Größen.....	620
5.1.1	Temperaturstrahlung.....	620
5.1.2	Ausstrahlung.....	622
5.1.3	Bestrahlung.....	632
5.1.4	Absorption von Strahlung.....	636
5.1.5	Reflexion von Strahlung.....	640
5.1.6	Hohlraumstrahlung. Gesetz von Kirchhoff.....	643
5.2	Die Strahlung des Schwarzen Körpers.....	646
5.2.1	Definition und Realisierung des Schwarzen Körpers.....	646
5.2.2	Die spektrale Strahldichte und die spektrale spezifische Ausstrahlung.....	647
5.2.3	Die spezifische Ausstrahlung und die Ausstrahlung in einem Wellenlängenbereich.....	654
5.3	Strahlungseigenschaften realer Körper.....	658
5.3.1	Emissionsgrade.....	658
5.3.2	Die Beziehungen zwischen Emissions-, Absorptions- und Reflexionsgraden. Der graue Lambert-Strahler.....	661
5.3.3	Emissionsgrade realer Körper.....	666
5.3.4	Strahlungsdurchlässige Körper.....	672
5.4	Solarstrahlung.....	678
5.4.1	Extraterrestrische Solarstrahlung.....	679

5.4.2	Die Schwächung der Solarstrahlung in der Erdatmosphäre.	682
5.4.3	Direkte Solarstrahlung am Erdboden	688
5.4.4	Diffuse Solarstrahlung und Globalstrahlung	691
5.4.5	Absorptionsgrade für Solarstrahlung.	694
5.5	Strahlungsaustausch	695
5.5.1	Sichtfaktoren	696
5.5.2	Strahlungsaustausch zwischen Schwarzen Körpern	703
5.5.3	Strahlungsaustausch zwischen grauen Lambert-Strahlern.	707
5.5.4	Strahlungsschutzschirme	720
5.6	Gasstrahlung	725
5.6.1	Absorptionskoeffizient und optische Dicke	726
5.6.2	Absorptions- und Emissionsgrade	728
5.6.3	Ergebnisse für den Emissionsgrad	732
5.6.4	Emissionsgrade und gleichwertige Schichtdicken von Gasräumen	733
5.6.5	Strahlungsaustausch in einem gasgefüllten Hohlraum.	740
5.7	Aufgaben	745
	Literatur.	751
Anhang A: Ergänzungen		755
Anhang B: Stoffwerte		765
Anhang C: Lösungen der Aufgaben		781
Sachverzeichnis		795