
Heinz Herwig · Andreas Moschallski

Wärmeübertragung

Physikalische Grundlagen und ausführliche
Anleitung zum Lösen von Aufgaben

4., überarbeitete und erweiterte Auflage

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der illustrierenden Beispiele	XV
Formelzeichen	XVII

Teil A Einführung

1 Einführende Beispiele	3
1.1 Zwei Beispiele aus dem Alltag	3
1.2 Zwei Beispiele aus technischen Anwendungen	4
2 Begriffs- und Zielbestimmung	7
2.1 Was ist „Wärme“?	7
2.2 Was ist „Wärmeübertragung“?	8
2.3 Was ist eine „gute Wärmeübertragung“?	8
2.4 Was soll das Fachgebiet „Wärmeübertragung“ leisten können?	10
3 Allgemeine Betrachtungen zum Wärmeübergang an Systemgrenzen	13
3.1 Kurz-Charakterisierung verschiedener Wärmeübertragungssituationen	13
3.2 Leitungsbasierter und strahlungsbasierter Energietransport über eine Systemgrenze	14
3.3 Thermische Randbedingungen, konjugierte Probleme	15
3.4 Entropieproduktion bei der Wärmeübertragung	17
3.5 Der Grenzfall reversibler Wärmeübertragung	18
4 Dimensionsanalytische Überlegungen	21
4.1 Vorüberlegungen	21
4.2 Das Π -Theorem	21
4.3 Anwendung des Π -Theorems auf Probleme der Wärmeübertragung	23
4.4 Kennzahlen versus empirische Koeffizienten	24
4.5 Untersuchungen im Modellmaßstab	26

Teil B Leitungsbasierter Wärmeübergang

5 Wärmeleitung	29
5.1 Energiebilanz	29
5.2 Fourier-Ansatz als konstitutive Gleichung	31
5.3 Stationäre, eindimensionale Wärmeleitung	33
5.4 Wärmedurchgang	36
5.5 Instationäre Wärmeleitung, Einfluss der Biot-Zahl	37
5.6 Instationäre Wärmeleitung in einer halbunendlichen ebenen Wand	40

6	Konvektiver Wärmeübergang	57
6.1	Die Physik des konvektiven Wärmeüberganges	57
6.1.1	Konvektiver Wärmeübergang für $\lambda^* \rightarrow \infty$	61
6.1.2	Konvektiver Wärmeübergang bei homogenen Geschwindigkeitsprofilen	62
6.1.3	Konvektiver Wärmeübergang bei turbulenten Strömungen	63
6.1.4	Wärmeübergang bei natürlicher Konvektion entlang von Wänden	66
6.1.5	Systematik bei konvektiven Wärmeübergängen	68
6.2	Grundgleichungen zur Beschreibung des konvektiven Wärmeüberganges	69
6.2.1	Grundgleichungen für konstante Stoffwerte	70
6.2.2	Bezugszustand für konstante Stoffwerte	72
6.2.3	Berücksichtigung variabler Stoffwerte	73
6.3	Erzwungene Konvektion, laminare Strömung	74
6.3.1	Wärmeübergang bei Körperumströmungen, laminar	74
6.3.2	Wärmeübergang bei Durchströmungen, laminar	80
6.4	Erzwungene Konvektion, turbulente Strömung	84
6.4.1	Wärmeübergang bei Körperumströmungen, turbulent	85
6.4.2	Wärmeübergang bei Durchströmungen, turbulent	89
6.5	Natürliche Konvektion bei Körperumströmungen, laminar	92
6.6	Komplexe, technisch bedeutende konvektive Wärmeübergangs-Situationen	94
6.6.1	Wärmeübergang am querangeströmten Kreiszyylinder	95
6.6.2	Wärmeübergang an querangeströmten Kreiszyylinder-Bündeln	96
6.6.3	Wärmeübergang bei Prallstrahlen	97
6.7	Bewertungskriterien für konvektive Wärmeübergänge	100
6.7.1	Ökonomische Analyse konvektiver Wärmeübertragung	102
6.7.2	Exergetische Analyse konvektiver Wärmeübertragung	103
6.8	Schlussbemerkung zum konvektiven Wärmeübergang	105
7	Zweiphasen-Wärmeübergang	113
7.1	Die Physik des Zweiphasen-Wärmeüberganges	113
7.2	Dimensionsanalyse und Systematik bei Zweiphasen-Wärmeübergängen	116
7.3	Kondensation	118
7.3.1	Filmkondensation	118
7.3.2	Tropfenkondensation	122
7.3.3	Strömungskondensation	123
7.4	Sieden	124
7.4.1	Behältersieden	124
7.4.2	Strömungssieden	131
8	Leitungsbasierte Wärmeübertragungssituationen im Vergleich, thermisch aktive Schicht	139
Teil C Strahlungsbasierter Wärmeübergang		
9	Wärmeübergang durch Strahlung	145
9.1	Die Physik elektromagnetischer Energieübertragung (Wärmestrahlung)	145

9.2	Globalbilanzen	147
9.2.1	Generelles Vorgehen	148
9.3	Ideales Strahlungsverhalten / Schwarze Strahler	149
9.3.1	Das Emissionsverhalten Schwarzer Strahler	149
9.3.2	Das Absorptionsverhalten Schwarzer Strahler	153
9.3.3	Die Realisierung Schwarzer Strahler / Hohlraumstrahlung	154
9.4	Reales Strahlungsverhalten / Reale Strahler	155
9.4.1	Das Emissionsverhalten realer Strahler im Vergleich zum Schwarzen Strahler	156
9.4.2	Das Absorptionsverhalten realer Strahler im Vergleich zum Schwarzen Strahler	157
9.4.3	Das Reflexionsverhalten realer Strahler	160
9.4.4	Das Transmissionsverhalten realer Strahler	160
9.5	Strahlungsaustausch zwischen Strahlern	161
9.5.1	Sichtfaktoren für zwei Flächen im Strahlungsaustausch	162
9.5.2	Strahlungsaustausch zwischen zwei Schwarzen Strahlern	165
9.5.3	Strahlungsaustausch zwischen Grauen Lambert-Strahlern	165
9.6	Gasstrahlung	167
9.6.1	Die optische Dicke von Gasschichten	168
9.6.2	Absorption und Emission von Gasräumen	168
9.7	Besonderheiten bei der Solarstrahlung	169
9.7.1	Extraterrestrische Solarstrahlung	170
9.7.2	Terrestrische Solarstrahlung	171

Teil D Wärmeübertragung aus thermodynamischer Sicht

10	Thermodynamische Grundlagen	181
10.1	Entropie, Definition und Erläuterungen	181
10.2	Entropieproduktion und Energiebewertung	182
10.2.1	Energiebewertung, der Exergie-Begriff	182
10.3	Exergieverlust durch Entropieproduktion	183
11	Die Rolle der Entropie bei der Wärmeübertragung	187
11.1	Konvektive Wärmeübertragung	187
11.1.1	Energieentwertungszahl und Entropisches Potential	188
11.1.2	Thermodynamische Prozessbewertung	189
11.2	Bestimmung der Energieentwertungszahl N_i	190
11.2.1	Approximation des Temperaturfeldes	191
11.2.2	Auswertung des vollständigen Temperaturfeldes	192
11.3	Vollständige Bewertung konvektiver Wärmeübertragungen	193
11.3.1	Verluste im Strömungsfeld	194
11.3.2	Verluste im Strömungs- und Temperaturfeld	195
11.4	Entropiebasierte Prozessbewertung: Überblick	197

Teil E Anwendungsaspekte

12 Wärmetechnische Apparate	203
12.1 Wärmeübertrager	203
12.1.1 Bauformen	203
12.1.2 Globalanalyse	204
12.1.3 Kondensatoren	206
12.1.4 Verdampfer	208
12.2 Berechnungskonzepte für Rekuperatoren	209
12.2.1 NTU-Methode	210
12.3 Thermische Energiespeicher	214
12.3.1 Auswahl- und Auslegungskriterien	215
12.3.2 Bauformen und Speichermedien	216
13 Messung von Temperaturen und Wärmeströmen	225
13.1 Temperaturmessungen	225
13.1.1 Berührungsbehaftete Messmethoden	225
13.1.2 Berührungsfreie Messmethoden	228
13.1.3 Temperaturmessungen an Körperoberflächen	229
13.2 Wärmestrommessungen	230
13.2.1 Messprinzipien	230
14 Beispiele, Fragen und Antworten	235
14.1 Die zwei Beispiele aus dem Alltag	235
14.2 Zehn mal „Warum ...?“	236
14.2.1 Fragen	236
14.2.2 Antworten	237

Teil F Aufgabenteil

15 Das SMART-Konzept	243
15.1 Das SMART-Konzept	243
15.1.1 Vorbemerkung	243
15.1.2 Aufgabenstellung und Lösung	244
15.2 SMART-EVE: Ein Konzept in drei Schritten	245
16 Ausgewählte Übungsaufgaben zu einzelnen Kapiteln	247
16.1 Aufgaben zu Kapitel 4: Dimensionsanalytische Überlegungen	247
16.1.1 Aufgabe 4.1	247
16.1.2 Lösung zu Aufgabe 4.1 nach dem SMART-EVE-Konzept	248
16.1.3 Aufgabe 4.2	252
16.1.4 Lösung zu Aufgabe 4.2	253
16.1.5 Aufgabe 4.3	254
16.1.6 Lösung zu Aufgabe 4.3	255
16.2 Aufgaben zu Kapitel 5: Wärmeleitung	257
16.2.1 Aufgabe 5.1	257
16.2.2 Lösung zu Aufgabe 5.1 nach dem SMART-EVE-Konzept	258

16.2.3	Aufgabe 5.2	264
16.2.4	Lösung zu Aufgabe 5.2	264
16.2.5	Aufgabe 5.3	266
16.2.6	Lösung zu Aufgabe 5.3	267
16.3	Aufgaben zu Kapitel 6: Konvektiver Wärmeübergang	269
16.3.1	Aufgabe 6.1	269
16.3.2	Lösung zu Aufgabe 6.1 nach dem SMART-EVE-Konzept	271
16.3.3	Aufgabe 6.2	277
16.3.4	Lösung zu Aufgabe 6.2	277
16.3.5	Aufgabe 6.3	282
16.3.6	Lösung zu Aufgabe 6.3	283
16.4	Aufgaben zu Kapitel 7: Zweiphasen-Wärmeübergang	286
16.4.1	Aufgabe 7.1	286
16.4.2	Lösung zu Aufgabe 7.1 nach dem SMART-EVE-Konzept	288
16.4.3	Aufgabe 7.2	295
16.4.4	Lösung zu Aufgabe 7.2	296
16.4.5	Aufgabe 7.3	298
16.4.6	Lösung zu Aufgabe 7.3	299
16.5	Aufgaben zu Kapitel 9: Wärmeübergang durch Strahlung	301
16.5.1	Aufgabe 9.1	301
16.5.2	Lösung zu Aufgabe 9.1 nach dem SMART-EVE-Konzept	301
16.5.3	Aufgabe 9.2	305
16.5.4	Lösung zu Aufgabe 9.2	306
16.5.5	Aufgabe 9.3	308
16.5.6	Lösung zu Aufgabe 9.3	309
16.6	Aufgaben zu Kapitel 12: Wärmetechnische Apparate	312
16.6.1	Aufgabe 12.1	312
16.6.2	Lösung zu Aufgabe 12.1 nach dem SMART-EVE-Konzept	312
16.6.3	Aufgabe 12.2	320
16.6.4	Lösung zu Aufgabe 12.2	321
16.6.5	Aufgabe 12.3	325
16.6.6	Lösung zu Aufgabe 12.3	325

Teil G Materialien und Anwendungshilfen

G1	Arbeitsblätter	333
G2	Stoffwerte	358
G3	Standard-Werke zur Wärmeübertragung	360
G4	Fachbegriffe Deutsch ↔ Englisch	361
	Index	363