

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Berechnungsbeispiele 13

1 Wärmetauscherauslegung 19

1.1	Vorgehensweise bei der Wärmetauscherauslegung	19
1.2	Informationen zu Wärmetauschern	30
1.2.1	Rohranordnung	30
1.2.2	Beipass- und Leckageströmung	30
1.2.3	Umlenklebleche	31
1.2.4	Technische Hinweise	33
1.2.5	Auswahl eines Rohrbündelwärmetauschers	35

2 Ermittlung der wirksamen Temperaturdifferenzen LMTD und CMTD 37

2.1	Logarithmische Temperaturdifferenz LMTD für idealen Gegenstrom	37
2.2	Temperaturdifferenz CMTD für mehrgängige Wärmetauscher TEMA-Typ E	38
2.3	Einfluss der Beipassströmung auf LMTD	45
2.4	Mittlere gewogene Temperaturdifferenz WMTD	46
2.5	Berechnung der Wärmetauscheraustrittstemperaturen für einen mehrgängigen Wärmetauscher mit nichtidealem Gegenstrom und idealen Gegenstrom	48
2.5.1	Berechnung der Austrittstemperaturen in einem mehrgängigen Wärmetauscher unter Berücksichtigung des Temperaturwirkungsfaktors F für nichtidealen Gegenstrom	48
2.5.2	Berechnung der Austrittstemperatur t_{w2} bei idealen Gegenstrom ohne F	49

3 Berechnung der Wärmeübergangszahlen und Druckverluste beim konvektiven Wärmeübergang 51

3.1	Rohrseitige Wärmeübergangszahl	55
3.2	Mantelseitige Wärmeübergangszahl	56
3.3	Vergleich verschiedener Rechenmodelle	68
3.4	Vergleich der Wärmeübergangszahlen bei Längs- und Querströmung auf der Mantelseite von Wärmetauschern	70
3.5	Druckverlustberechnungen in Rohrbündelwärmetauschern	74
3.5.1	Rohrseitiger Druckverlust ΔP_R	74
3.5.2	Mantelseitiger Druckverlust	75
3.6	Wärmetauscherauslegung mit Wärmetauscher-Tabellen	79

4	Geometrische Wärmetauscherberechnungen	89
4.1	Berechnungsformeln	89
4.2	Rohrseitige Berechnungen	92
4.3	Mantelseitige Berechnungen	94
5	Dimensionslose Kennzahlen für den Wärmeübergang	101
5.1	Reynoldszahl Re zur Kennzeichnung des Strömungszustandes	101
5.2	Prandtlzahl Pr zur Kennzeichnung der Stoffeigenschaften	101
5.3	Nusseltzahl Nu zur Berechnung der Wärmeübergangszahl	102
5.4	Stantonzahl St zur Berechnung der Wärmeübergangszahl	102
5.5	Colburnfaktor J_C zur Berechnung der Wärmeübergangszahl	103
5.6	Kern-Wärmeübergangsfaktor J_K zur Berechnung der Wärmeübergangszahl	103
5.7	Graßhofzahl Gr zur Bestimmung der Wärmeübergangszahl bei Eigenkonvektion	104
6	Wärmedurchgangszahl und Temperaturprofil	105
6.1	Berechnung der Wärmedurchgangszahl	105
6.2	Berechnung des Temperaturgradienten beim Wärmedurchgang durch die Wärmewiderstände im Wärmetauscher	112
6.3	Viskositätskorrektur und Ermittlung der Wandtemperaturen	114
6.4	Berechnung der Wärmeübergangszahl aus der Wärmedurchgangszahl	117
7	Verfahrenstechnische Berechnungen	119
7.1	Dampfdruckberechnungen	119
7.2	Phasengleichgewicht zwischen der Flüssig- und der Dampfphase nach den Gesetzen von Dalton und Raoult für ideale Gemische	120
7.3	Siedepunktsberechnung	122
7.4	Taupunktberechnung	123
7.5	Berechnung von Tau- und Siedelinien idealer Binärgemische	125
7.6	Flash-Berechnungen	127
7.7	Kondensations- bzw. Flashkurve von Binärgemischen	128
7.8	Berechnung unidealer Binärgemische	132
7.9	Flashberechnungen für Mehrstoffgemische	134
8	Auslegung von Kondensatoren	137
8.1	Bauarten von Kondensatoren	139
8.2	Berechnung der Wärmeübergangszahlen bei isothermer Kondensation	143
8.2.1	Einflussgrößen auf die Wärmeübergangszahlen	168
8.3	Vergleich verschiedener Berechnungsmodelle	170

8.4	Kondensation mit Inertgas	175
8.5	Kondensation von Mehrstoffgemischen	178
8.6	Verschiedenes	186
8.6.1	Druckverlust im Kondensator	186
8.6.2	Kondensatablaufrohr	187
8.6.3	Schluckfähigkeit	188
8.6.4	Kopfkondensatoren auf Kolonnen	189
8.6.5	Berechnung des Druckverlustes beim Kondensieren in den Rohren	191
8.6.6	Maximale Kondensatbelastung in horizontalen Rohren	193
8.6.7	Flutbelastung in Rückflusskondensatoren	193

9 Auslegung von Verdampfern 197

9.1	Verdampfungsprozess	197
9.1.1	Behältersieden	197
9.1.2	Strömungssieden	198
9.1.3	Entspannungsverdampfung	198
9.2	Verdampferbauarten	198
9.2.1	Thermosiphonverdampfer	199
9.2.1.1	Vertikaler Thermosiphonumlaufverdampfer	199
9.2.1.2	Horizontaler Thermosiphonumlaufverdampfer	200
9.2.1.3	Thermosiphondurchlaufverdampfer	201
9.2.2	Zwangsumlaufverdampfer	202
9.2.3	Entspannungsverdampfer	202
9.2.4	Rohrbündelverdampfer (Kettle-Verdampfer)	204
9.2.5	Interne Verdampfer	204
9.2.6	Fallfilmverdampfer	205
9.3	Auslegung von Verdampfern für Blasensieden	206
9.3.1	Praktische Auslegung mit Beispielen	210
9.3.2	Dimensionierung von Kettle-Reboilern	216
9.3.2.1	Hydraulische Auslegung	216
9.3.2.2	Wärmetechnische Auslegung	218
9.3.2.3	Zulässige Blasenaufstiegsgeschwindigkeit	219
9.3.2.4	Zulässige Wärmestromdichte im Kettleverdampfer	220
9.3.2.5	Tropfen-Mitreißen	222
9.4	Auslegung von Fallfilmverdampfern	223

10 Auslegung von Thermosiphonverdampfern 231

10.1	Wärmetechnische Berechnungen	232
10.1.1	Erforderliche Umlaufmenge W im Thermosiphonkreislauf	232
10.1.2	Abschätzung der benötigten Reboilerfläche A	232
10.1.3	Berechnung der Wärmeübergangszahl für die Verdampfung	233

10.1.3.1	Berechnung der Wärmeübergangszahl α_{kon} für das konvektive Sieden bei der durch die Verdampfung erhöhten Strömungsgeschwindigkeit des 2-Phasen-Gemisches	233
10.1.3.2	Berechnung der Wärmeübergangszahl α_{Sied} für das Blasensieden nach Mostinski mit dem Korrekturfaktor S für unterdrücktes Blasensieden	234
10.1.3.3	Berechnungen für einen vertikalen Thermosiphonverdampfer	236
10.1.3.4	Berechnungen für einen horizontalen Thermosiphonverdampfer Typ AJL oder AHL mit der Querströmung zwischen den Rohren von unten nach oben.....	238
10.1.3.5	Berechnungen für einen horizontalen Thermosiphonverdampfer Typ AEL mit der Längsströmung um die Rohre ohne Umlenkleche	240
10.2	Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit w im Verdampfer	242
10.3	Berechnung der 2-Phasen-Dichte und der mittleren Dichte im Reboiler	243
10.3.1	Berechnung der 2-Phasen-Dichte ρ eines Dampf-Flüssigkeit-Gemisches:	243
10.3.2	Berechnung der mittleren Dichte ρ_3 im Reboiler aus der Dichte der Flüssigkeit ρ_F und der Dichte des 2-Phasen-Gemisches $\rho_{2\text{Ph}}$	243
10.4	Ermittlung der erforderlichen Höhe $H1$ für den Thermosiphonumlauf bzw. des maximal zulässigen Druckverlustes ΔP im Thermosiphonumlauf	245
10.4.1	Berechnung der erforderlichen Höhe $H1$ zur Überwindung des Druckverlustes ΔP mit dem Sicherheitsfaktor S	245
10.4.2	Berechnung des maximal zulässigen Druckverlustes ΔP_{max} im Thermosiphonumlauf bei vorgegebenen Höhen $H1$ und $H2$ und $H4$	246
10.4.3	Auswirkungen der Höhe $H1$ auf Umlaufmenge, Druckverlust, Temperaturdifferenz und Wärmeleistung von Thermosiphonverdampfern	247
10.4.4	Auslegung von Riser- und Downcomerdurchmesser	250
10.5	Berechnung der Druckverluste im Thermosiphonumlauf	251
10.5.1	Berechnung des Druckverlustes im Downcomer	252
10.5.2	Berechnung des Reibungsdruckverlustes für 2-Phasen-Strömung $\Delta P_{2\text{Ph}}$ im Verdampfer	253
10.5.3	Berechnung des Beschleunigungsdruckverlustes im Verdampfer.....	253
10.5.4	Reibungsdruckverlust im Riser für die 2-Phasen-Strömung.....	254
10.5.5	Reboiler-Kennlinien	257
10.6	Berechnung der benötigten Reboilerlänge bzw. -fläche für die Aufheizung auf Siedetemperatur und für die Verdampfung in vertikalen Thermosiphonverdampfern	258
10.6.1	Berechnung der Rohrhöhe L_{Heiz} bzw. der Austauschfläche A_{Heiz} zur konvektiven Aufheizung des Produkts bis zur Siedetemperatur	259
10.6.2	Ermittlung der Rohrhöhe L_{Verd} bzw. der Austauschfläche A_{Verd} für das Verdampfen ..	260
10.6.3	Benötigte Heizlänge für vertikale Thermosiphonverdampfer nach Fair	261
10.6.4	Berechnung der Druck- und Siedepunkterhöhung im Verdampfer durch die treibende Höhe $H1$	264
10.6.5	Mittlere Wärmedurchgangszahl für Aufheizen und Verdampfen	268
10.7	Berechnung des Dampfanteils x des Zweiphasengemisches im vertikalen Verdampfer	269
10.8	Vollständiges Beispiel für die Auslegung eines Thermosiphonverdampfers.....	271

11	Doppelrohr-, Schlangenrohr- und Querstromwärmetauscher	277
11.1	Berechnung von Doppelrohr- und Multirohrwärmetauschern	277
11.2	Schlangenrohr-Wärmetauscher	290
11.3	Querstrombündel	300
12	Rippenrohrwärmetauscher	303
12.1	Warum nimmt man Rippenrohre?	303
12.2	Was beeinflusst die Wirksamkeit von Rippenrohren?	304
12.3	Rippenrohrberechnungen	307
12.3.1	Berechnung des Rippenwirkungsgrads η_R	307
12.3.2	Berechnung des gewogenen Rippenwirkungsgrads η_W	307
12.3.3	Berechnung der Wärmedurchgangszahl k_i für die Innenrohroberfläche F_i ohne Verschmutzung	309
12.3.4	Berechnung der Wärmedurchgangszahl k_a bezogen auf die Außenrohroberfläche F_a ohne Verschmutzung	310
12.3.5	Berechnung der Wärmedurchgangszahl k_a bezogen auf die berippte Außenoberfläche F_a unter Berücksichtigung der Verschmutzungsbeiwerte r_a und r_i	312
12.3.6	Berechnung der Wärmedurchgangszahl k_i für die Innenrohroberfläche F_i unter Berücksichtigung der Verschmutzungsbeiwerte r_a und r_i	312
12.3.7	Verschmutzung und Temperaturgradient	313
12.3.8	Vergleich der Wärmeleistungen $k_i \cdot F_i$ [W/m K] verschiedener Rohre	315
12.4	Anwendungsbeispiele	316
13	Festigkeitsberechnungen von Wärmetauschern	325
13.1	Berechnung der Mantelwandstärke für Innendruckbelastung nach AD-Merkblatt B1	325
13.2	Berechnung der Wandstärke gewölbter Böden (Klöpper- oder Korbogenböden) für Innendruckbelastung nach AD-Merkblatt B3	327
13.3	Berechnung der Rohrbodenwandstärke für Druckbelastung nach AD-Merkblatt B5	331
13.3.1	Berechnung der Wandstärke für zwei feste Rohrböden	331
13.3.2	Berechnung der Wandstärke für einen Rohrboden mit U-Rohren	335
13.4	Berechnung der Wärmetauscherinnenrohre auf inneren und äußeren Überdruck nach AD-Merkblatt B11	335
13.5	Berücksichtigung der Stutzen im Mantel nach AD-Merkblatt B9	336
13.6	Berechnung der Mantelwandstärke bei Außendruckbelastung nach AD-Merkblatt B6	338
13.6.1	Berechnung der Wandstärke gegen elastisches Einbeulen	339
13.6.2	Berechnung gegen plastisches Verformen	340

13.7	Dimensionierung der Schrauben an den Flanschverbindungen nach AD-Merkblatt B7	342
13.8	Dimensionierung der Flansche nach AD-Merkblatt B8	344
Schrifttum		349