

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat - Wärmetauscher

Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Für den Anlagenentwurf werden Berechnungslisten und Diagramme mit einer Übersicht der wesentlichen Verfahrensparameter und Apparate-Abmessungen bereitgestellt.

Methode: Näherungsweise Grobdimensionierung durch dynamische Verknüpfung von Vorgang und Gestaltung.

Checkliste: Aufgabenstellung

Stoff: ETH Ethanol CW Kühlwasser

Vorgang: E Erhitzen KU Kühlen
V Verdampfen KO Kondensieren

Phasen: L Flüssig G Gasförmig

Verteilung: RR Rohrraum, MR Mantelraum

Regime: R Rohrströmung F Filmströmung

$1/\alpha_s$ Foulingwiderstand ($\text{sm}^2\text{K/J}$); Verschmutzung

Δp_z Zulässiger Druckverlust (kPa)

$\Delta t_m = (\Delta t_g - \Delta t_k) / \ln(\Delta t_g / \Delta t_k)$; Mittl. Log. Temp'diff.

G = $(t_w - t_k) / (t_w' - t_k')$ Aus-/Eintritt Gap

ε Korrekturfaktor für Δt_m bei mehrgängigen RWÜ
notw.: $0,75 < \varepsilon < 1$, wenn $G < 0,3$; s. Lit.13.

$f_{\text{verl.}}$ Verlustfaktor; Wärmeverlust z.B.10%, $f_{\text{verl.}} = 0,1$
 $Q = Q_{\text{verf.}} / (1 - f_{\text{verl.}})$; hier Kühler, d.h. $f_{\text{verl.}} = 0$

$Q_{\text{verf.}} = [(m_i/3600) \cdot c_p \cdot (t' - t'')]_{\text{ETH}}$ Verfügbare Wärme,
z.B. $Q = 1992/3600 \cdot 2,1 \cdot 65 = 75,5 \text{ kW}$

Bl. AW01

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat - Wärmetauscher

Auslegung: Dimensionierung

DN – Vorauswahl für den größeren Volumenstrom, z.B im RR nach Diag.1, s. Bl.AW09: NW300, 2-gängig,

w_{ein} – Strömungseintrittsgeschwindigkeit $v \sim 0,35 \text{ (m/s)}$.

DN	Rohre	F (m^2) bei Nennlänge L (m)			
	nR	2	3	4	6
300	56	8,8	13,2	17,6	
600	236	37	56	74	111
800	442	69	104	138	208
1000	718	117	169	225	338
1200	1048			329	493

Tab. RWÜ-Katalogauswahl für: $d_R = 25 \text{ mm}$, Rohrwand. $s=2 \text{ mm}$, Rohrteilung Dreieck 32 mm . Siehe folg. Beispiel:

MR Diag.3, s. Bl. AW11, Querleitbl. ($S=0,4D$) $v \sim 0,06 \text{ (m/s)}$

F Wärmeübertragungsfläche; $F = Q / (k \cdot \Delta t_m)$; geschätzt
 $k = 200 \text{ W/m}^2\text{K}$, ergibt $F = 1,07/0,2 = 5,35 \text{ m}^2$. Auswahl aus obiger Tabelle: $F_{\text{gewählt}} = 8,8 \text{ (m}^2\text{)}$; DN 300; L 2 (m).

α Wärmeübergangszahl RR für Wasser nach Diag. 6, s. Bl.AW14 $\alpha = f(w, t)$, z.B. $w_i = 0,35 \text{ m/s}$ und $t = 28^\circ\text{C}$
 $\alpha_{RR} \sim 2000 \text{ (W/m}^2\text{K)}$.

Wärmeübergangszahl MR für Ethanol nach Diag. 7, s.

Bl.AW15 $\alpha = f(w, \eta)$, $w_a = 0,06 \text{ m/s}$, $\eta = 0,012 \text{ cP}$

$\alpha_{MR} \sim 250 \text{ (W/m}^2\text{K)}$.

Bl. AW02

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat - Wärmetauscher

Checkliste RWÜ Kühler

Tabelle 1.0: RWÜ-Checkliste, Kühler					
Auftragsbez.:	Alk60.000		Bearb./Datum:	MH 12.03.2000	
Apparat-Pos.-Nr.:	W 09 Kühler				
Bez./Symbol	Dimension	warm	kalt	warm	kalt
Stoff		ETH	CW		
Vorgang	E KU V KO	KU	E		
Phasen	L G L/G	L	L		
Verteilung	RR MR	MR	RR		
Regime	R F	R	R		
ρ_l	kg/m^3	685	935		
ρ_g	kg/m^3	9,5	1,5		
η	cP	0,012	0,213		
c_p	kJ/kgK	2,1	4,267		
r	kJ/kg	840	2174		
λ	J/msK		0,684		
$1/\alpha_s$	$\text{sm}^2\text{K/J}$	0,0001	0,0001		
$(\rho_l / \rho_g) - 1$		71	622		
$r \cdot \rho_g$					
m_l	kg/h	1992	12000		
m_g	kg/h				
V_l	m^3/h	2,91	12,83		
V_g	m^3/h				
P	bar (Ü)	6	5		
Δp_z	kPa				
t'	$^\circ\text{C}$	135	25		
t''	$^\circ\text{C}$	70	30		
Δt_m	K	70,7			
$(t_w - t_k) / (t_w' - t_k')$		0,36			
ε	Korrekturfaktor	1			
$\Delta t_{m \text{ kor.}}$	K	70,7			
$f_{\text{verl.}}$	Verlustfaktor	0,0			
Q	kW	75,5			
$Q / \Delta t_m$	kW/K	1,07			
Bemerkung:					

Bl. AW03

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat - Wärmetauscher

Auslegung RWÜ Kühler

k Wärmedurchgangskoeffizient;

$$1/k = 1/\alpha_{RR} + 1/\alpha_{SRR} + 1/\alpha_{SMR} + 1/\alpha_{MR},$$

z.B. $1/k = 0,0005 + 0,0001 + 0,0001 + 0,004 = 0,0047$;
 $k = 213 \text{ (J/sm}^2\text{K)}$.

Fk Leistungswert (J/K)

$k \Delta t_m$ Thermische Heizflächenbelastung ($\text{J/m}^2\text{s}$)

Q/F Konstruktive Heizflächenbelastung ($\text{J/m}^2\text{s}$)

$Fk \Delta t_m / Q$ Sicherheit für die Auslegung, hier z.B. 1,75-fach

NW Stutzenausführung (mm) nach Katalogauswahl.

Δp Druckverlust des RWÜ (kPa), s. Diag.15-19.

Tabelle 2.1 RWÜ Auslegung Kühler									
Auftragsbez.:	Alk60.000						Bearb./Datum:	MH 12.03.2000	
Apparat-Pos.-Nr.:	W09	Kühler							
Bez./Symbol	Dimension	RR	L	G	MR	L	G	RR	L
Stoff		CW			ETH				
F	m^2				8,8				
d_R	mm	25	2						
n_R		56							
DN	mm				300				
L	m	2							
Gangzahl	Querleitbleche	2			16				
w_{ein}	m/s	0,37			0,06				
w_{aus}	m/s								
$w^* \rho_g$									
α	$\text{J/sm}^2\text{K}$	2000			250				
k	$\text{J/sm}^2\text{K}$				213				
Fk	J/K				1872				
$k \Delta t_m$	$\text{J/m}^2\text{s}$				15041				
Q/F	$\text{J/m}^2\text{s}$				8583				
$Fk \Delta t_m / Q$	Sicherheit				1,75				
NW StutzenEin	mm	80			50				
NW StutzenAus	mm	80			50				
Δp	kPa								
Bemerkung									

Bl. AW04

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher Checkliste RWÜ Kondensator

Tabelle 1.0: RWÜ-Checkliste, Kondensator					
Auftragsbez.:	Alt60.000			Bearb./Datum:	MH 11.03.2000
Apparat-Pos.-Nr.: W 08 Kondensator					
Bez./Symbol	Dimension	warm	kalt	warm	kalt
Stoff		ETH	CW		
Vorgang	E KU V KO	KO	E		
Phasen	L G L/G	G/L	L		
Verteilung	RR MR	MR	RR		
Regime	R F	R	R		
ρ_l	kg/m ³	757	997		
ρ_g	kg/m ³	1,435			
η	cP	0,01	0,9		
c_p	kJ/kgK	1,83	4,18		
r	kJ/kg	963			
λ	J/msK		0,605		
$1/\alpha_s$	sm ² /K	0,0001	0,0001		
$(\rho_l/\rho_g) - 1$		527			
r/ρ_g		1382			
m_l	kg/h	636	14641		
m_g	kg/h	636			
V_l	m ³ /h	0,8	14,69		
V_g	m ³ /h	442,9			
P	bar (Ü)	atm.	5		
Δp_z	kPa				
t'	°C	78	25		
t''	°C	78	35		
Δt_m	K		47,8		
$(t_w - t_K)/(t_w - t_K)$		0,81			
ε	Korrekturfaktor	1			
$\Delta t_{m \text{ kor.}}$	K	47,8			
$f_{\text{verl.}}$	Verlustfaktor	0			
Q	kW		170,0		
$Q/\Delta t_m$	kW/K		3,55		
Bemerkung:					

Bl. AW05

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher Auslegung RWÜ Kondensator

DN – Vorauswahl für eine ausreichende Geschwindigkeit z.B im RR nach Diagr.1, s. Bl.AW09: NW400, 2-gängig,
 w_{ein} – Strömungsgeschwindigkeit im RR $v \sim 0,22$ (m/s).
 MR Diagr.3, s. Bl.AW11, Querleitbl. ($S=0,4D$), $v \sim 4,4$ (m/s).
 F Wärmeübertragungsfläche; $F = Q/(k \cdot \Delta t_m)$;
 geschätzt $k = 400$ W/m²K, ergibt $F = 3,55/0,4 = 8,9$ m².
 Auswahl aus Tabelle: $F_{\text{gewählt}} = 10$ (m²); DN 400; L 1,5 (m).
 α Wärmeübergangszahl RR, s. Diagr.6, Bl.AW14 $w_i = 0,22$ m/s und $t = 30^\circ\text{C}$, $\alpha_{\text{RR}} \sim 1100$ (W/m²K). α_{MR} s. Diagr.9, Bl.AW17, vollständig.
 Kondensation: $0,58 \cdot w_{\text{ein}} \cdot \rho_g = 3,7$ (kg/sm²), $\alpha_{\text{MR}} \sim 900$ (W/m²K).
 Alle weiteren Daten s. Bl.AW04.

RWÜ Auslegung Kondensator									
Auftragsbez.:	Alt60.000							Bearb./Datum:	MH 11.03.200
Apparat-Pos.-Nr.: W08 Kondensator									
Bez./Symbol	Dimension	RR	G	MR	G	RR	G	MR	G
Stoff		CW		ETH					
F	m ²		10						
d_R *s	mm	25	2						
n_R		80							
DN	mm		400						
L	m		1,5						
Gangzahl	Querleitbleche	2		10					
w_{ein}	m/s	0,22			4,40				
w_{aus}	m/s	0,22							
w_F/ρ_g					6,31				
α	J/sm ² K	1100			900				
k	J/sm ² K		450						
Fk	J/K		4504						
$k \cdot \Delta t_m$	J/m ² s		21541						
Q/F	J/m ² s		17000						
$Fk \cdot \Delta t_m/Q$	Sicherheit		1,27						
NW Stutzen	mm	100			200				
NW Stutzenaus	mm	100		50					
Δp	kPa								
Bemerkung									

Bl. AW06

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher Checkliste RWÜ Verdampfer

Tabelle 1.0: RWÜ-Checkliste, Verdampfer					
Auftragsbez.:	Alt60.000			Bearb./Datum:	MH 11.03.2000
Apparat-Pos.-Nr.: W01 Umlaufverdampfer					
Bez./Symbol	Dimension	warm	kalt	warm	kalt
Stoff		PRW	SUW		
Vorgang	E KU V KO	KO	V		
Phasen	L G L/G	G/L	L/G		
Verteilung	RR MR	MR	RR		
Regime	R F	R	R		
ρ_l	kg/m ³	958	972		
ρ_g	kg/m ³	0,598	0,293		
η	cP	0,012	0,355		
c_p	kJ/kgK	4,217	4,19		
r	kJ/kg	2257	2308		
λ	J/msK	0,679	0,67		
$1/\alpha_s$	sm ² /K	0,0001	0,0001		
$(\rho_l/\rho_g) - 1$		1601	3316		
r/ρ_g		1350			
m_l	kg/h	2586			
m_g	kg/h	2586	2529		
V_l	m ³ /h				
V_g	m ³ /h	4324,7	8631,4		
P	bar (Ü)	atm.	Vak.		
Δp_z	kPa				
t'	°C	100	80		
t''	°C	100	80		
Δt_m	K		20,0		
$(t_w - t_K)/(t_w - t_K)$		1			
ε	Korrekturfaktor	1			
$\Delta t_{m \text{ kor.}}$	K	20,0			
$f_{\text{verl.}}$	Verlustfaktor				
Q	kW		1621,4		
$Q/\Delta t_m$	kW/K		81,07		
Bemerkung:					

Bl. AW07

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat - Wärmetauscher Auslegung RWÜ Verdampfer

Rohrbündel-Wärmeaustauscher als Umlaufverdampfer (senkrecht stehend) für Sumpf-Wasser der Alkohol-Kolonne (SUW), Heizmedium Prozess-Wasserdampf (PRW).
 DN – Vorauswahl für eine maximale Austritt-Geschwindigkeit z.B im RR nach Diagr.1, s. Bl.AW09: NW1000, $V_g = 8631$ (m³/h)
 w_{aus} – Strömungsaustritt-Geschwindigkeit im RR $v \sim 9$ (m/s).
 F Wärmeübertragungsfläche; gewählt $L=2$ (m) ergibt $F = 117$ (m²).
 α Wärmeübergangszahl RR, s. Diagr.10, Bl.AW18:
 $Q/F = 13858$ (W/m²) ergibt $\alpha_{\text{RR}} \sim 1900$ (W/m²K).
 α_{MR} s. Diagr.9, Bl.AW17: Für $0,58 \cdot w_{\text{ein}} \cdot \rho_g = 1,8$ (kg/sm²) wird
 $\alpha_{\text{MR}} \sim 5000$ (W/m²K), ergibt s. Bl.AW04 $k = 1080$ (W/m²K).

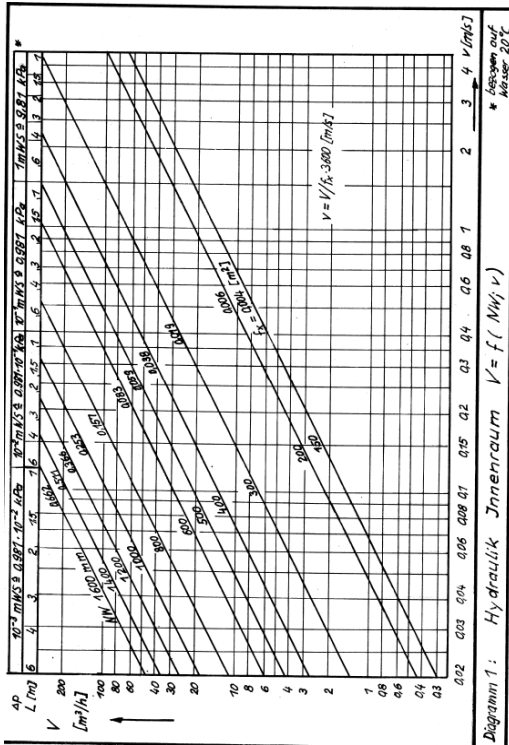
Tabelle 2.1 RWÜ Auslegung Verdampfer									
Auftragsbez.:	Alt60.000							Bearb./Datum:	MH 11.03.2000
Apparat-Pos.-Nr.: W01 Umlaufverdampfer									
Bez./Symbol	Dimension	RR	G	MR	G	RR	G	MR	G
Stoff		SUW		PRW					
F	m ²		117						
d_R *s	mm	25	2						
n_R		747							
DN	mm		1000						
L	m		2						
Gangzahl	Querleitbleche	1		4					
w_{ein}	m/s			5,2					
w_{aus}	m/s		9,27						
w_F/ρ_g				3,11					
α	J/sm ² K	1900		5000					
k	J/sm ² K		1080						
Fk	J/K		126307						
$k \cdot \Delta t_m$	J/m ² s		21591						
Q/F	J/m ² s		13858						
$Fk \cdot \Delta t_m/Q$	Sicherheit		1,56						
NW Stutzen	mm	200			200				
NW Stutzenaus	mm		300	80					
Δp	kPa								
Bemerkung									

Bl. AW08

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher Hydraulik – Rohrbündelwärmetauscher

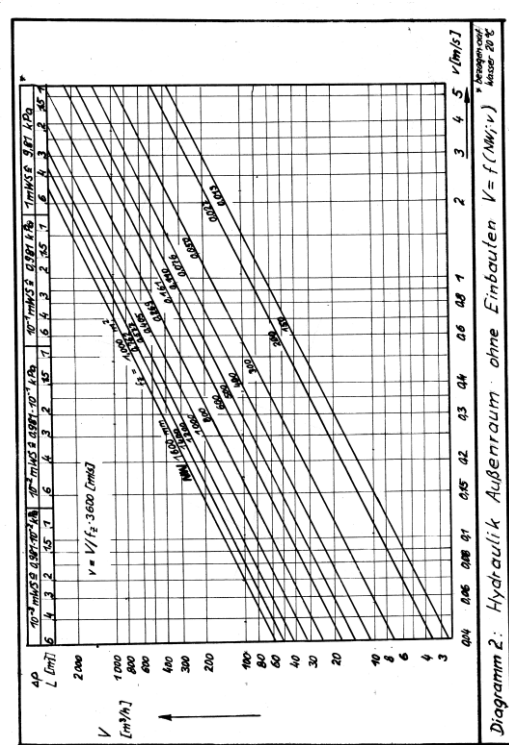


Bl. AW09

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher Hydraulik – Rohrbündelwärmetauscher

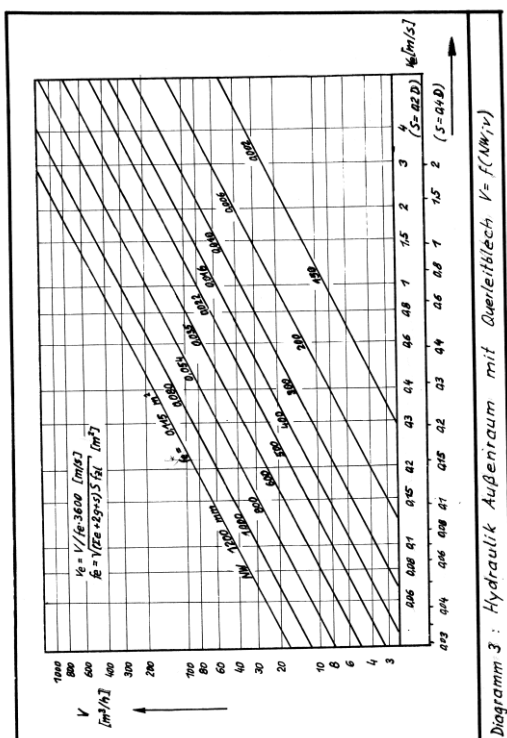


Bl. AW10

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher Hydraulik – Rohrbündelwärmetauscher

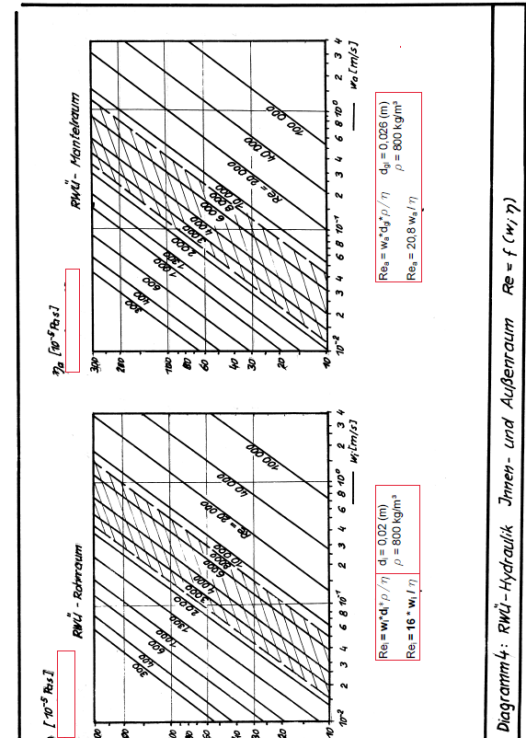


Bl. AW11

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher Hydraulik – Rohrbündelwärmetauscher



Bl. AW12

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 1, Bl.AW09: Hydraulik Innenraum $V = f(NW; v)$

- V Volumenstrom (m^3/h)
 NW Nenndurchmesser DN des RWÜ-Apparates (mm):
 Tab. RWÜ-Katalogauswahl für $d_R = 25$ mm,
 Rohrwand. $s = 2$ mm, Rohrteilung Δt 32 mm, s.
 Bl.AW02
 f_x Freie Querschnittsfläche im Rohrraum
 $f_x = n_R \cdot d_{Ri}^2 \cdot \pi/4$ (m^2)
 v Strömungsgeschwindigkeit im Rohr
 $v = V/(f_x \cdot 3600)$ (m/s)
 Δp Druckabfallbereiche (mWS) als Grobabschätzung
 abhängig von der Rohrlänge: $\Delta p = f(v, L)$
 (Vereinfachung: Wasser bei 20°C),
 $\Delta p = \zeta \cdot (L/d_{Ri}) \cdot (\rho \cdot v^2/2)$, s. Lit.(14; Bl.Lb1).
 Laminare Strömung: $\Delta p_i = 8,2 \cdot L \cdot v$ (10^{-3} mWS)
 Turbulente Strömung: $\Delta p_i = 68,65 \cdot L \cdot v^{1,75}$ (10^{-3} mWS)
 Beispiel: $V = 6,6$ m^3/h , RWÜ DN 300, $\Rightarrow v = 0,1$ m/s
 für $L = 1$ m $\Rightarrow \Delta p = 1 \cdot 10^{-3}$ (mWS) = $0,981 \cdot 10^{-2}$ (kPa)

Bl. AW09a

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 2, Bl.AW10: Hydraulik Aussenraum ohne Einbauten $V = f(NW; v)$

- V Volumenstrom (m^3/h)
 NW Nenndurchmesser DN des RWÜ-Apparates (mm):
 Tab. RWÜ-Katalogauswahl für $d_R = 25$ mm,
 Rohrteilung Δt 32 mm, s. Bl.AW02
 f_z Freie Querschnittsfläche im Mantelraum
 $f_z = (D_i^2 - n_R \cdot d_R^2) \cdot \pi/4$ (m^2); $D_i = DN = NW$
 v Strömungsgeschwindigkeit im Rohr
 $v = V/(f_z \cdot 3600)$ (m/s)
 Δp Druckabfallbereiche (mWS) als Grobabschätzung
 abhängig von der Rohrlänge: $\Delta p = f(v, L)$
 (Vereinfachung: Wasser bei 20°C),
 $\Delta p = \zeta \cdot (L/d_{Ri}) \cdot (\rho \cdot v^2/2)$, s. Lit.(13; Bl.Lb1).
 $\Delta p = 48,83 \cdot L \cdot v^{1,75}$ (10^{-3} mWS)
 Beispiel: $V = 9,3$ m^3/h , RWÜ DN 300,
 $\Rightarrow v = 0,05$ m/s
 für $L = 4$ m $\Rightarrow \Delta p = 1 \cdot 10^{-3}$ (mWS); entsprechend
 für $L = 2$ m $\Rightarrow \Delta p = 5 \cdot 10^{-4}$ (mWS) = $4,9 \cdot 10^{-3}$ (kPa).

Bl. AW10a

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 3, Bl.AW11: Hydraulik Aussenraum mit Querleitblechen $V = f(NW; v)$

- V Volumenstrom (m^3/h) im Mantelraum MR
 NW Nenndurchmesser DN des RWÜ-Apparates (mm):
 Tab. RWÜ-Katalogauswahl für $d_R = 25$ mm,
 Rohrwand. $s = 2$ mm, Rohrteilung Δt 32 mm,
 s. Bl.VE10
 f_e Freie Querschnittsfläche im Mantelraum bezogen
 auf Querströmung zwischen den Querleitblechen
 und Längsströmung im Ausschnitt des Querleitbl.
 $f_e = [(\sum e + 2g + s) \cdot S \cdot f_{zi}]^{0,5}$ (m^2); z.B. RWÜ DN 400:
 Summe der kürzesten Verbindungsstrecken
 $L = (\sum e + 2g + s)$ (m) = $0,083$ m, $\sum e = n_{Ri}(\Delta t - d_R) =$
 $6 \cdot 7 = 42$ (mm); Abstand äußerste Rohre zum RWÜ-
 Mantel innen $g = 8$ mm, Rohrabstand auf Mittellinie,
 2-flut. RWÜ $s = 25$ (mm). Abstand der
 Querleitbleche $S = 0,4D = 0,4 \cdot 400 = 160$ (mm),
 Ausschnitt des Querleitbleches gemäß Katalog
 $f_{zi} = 0,0195$ m^2 , ergibt $f_e = 0,016$ m^2
 v_e Strömungsgeschwindigkeit im Mantelraum
 $v_e = V/(f_e \cdot 3600)$ (m/s)

Bl. AW11a

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat - Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern Diagr. 4, Bl.AW12: RWÜ-Hydraulik Innen- und Aussenraum $Re = f(w; \eta)$

- $Re = v \cdot d / \nu$ Dimensionslose Kenngröße
 charakterisiert die Strömung von Gas oder Flüssigkeit im
 Kreisrohr (d) oder im RWÜ-Mantelraum (d_{gl}).
 v (m/s) Strömungsgeschwindigkeit
 ν (m^2/s) = η / ρ Viskosität des Strömungsmediums
 d (m) Rohrlinnendurchmesser,
 bzw. bei Strömung im RWÜ-Mantelraum
 d_{gl} (m) gleichwertiger (hydraulischer) Durchmesser
 als Verhältnis von Strömungsquerschnitt zum Umfang:
 $d_{gl} = (D_i^2 - n \cdot d_a^2) / (D_i + n \cdot d_a)$, s. Lit. (15, S.19)
 D_i Mantelinnendurchmesser
 d_a Rohraussendurchmesser
 n Rohranzahl
 Laminare Strömung bei $Re < Re_{kr}$
 Turbulente Strömung, wenn $Re > Re_{kr}$ wird.
Im Diagr. 4: $Re = w \cdot d \cdot \rho / \eta$
 RWÜ-Rohrraum: $d_i = 0,02$ m; $\rho = 800$ kg/m^3 ; η (10^{-5} Pa s)
 $Re_i = 16 \cdot w_i / \eta$
 RWÜ-Mantelraum: $d_{gl} = 0,026$ m $\approx$ konst. für alle RWÜ
 der Katalogauswahl, s. Bl.AW02. $Re_a = 20,8 \cdot w_a / \eta$

Bl. AW12a

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Wärmeübertragung – Rohrbündelwärmetauscher

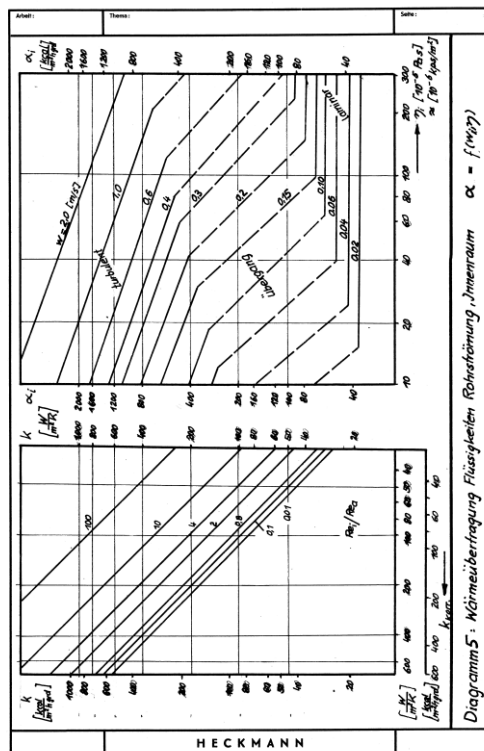


Diagramm 5: Wärmeübertragung Flüssigkeiten Rohrströmung, Innenraum $\alpha = f(w, \eta)$

HECKMANN

Bl. AW13

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Wärmeübertragung – Rohrbündelwärmetauscher

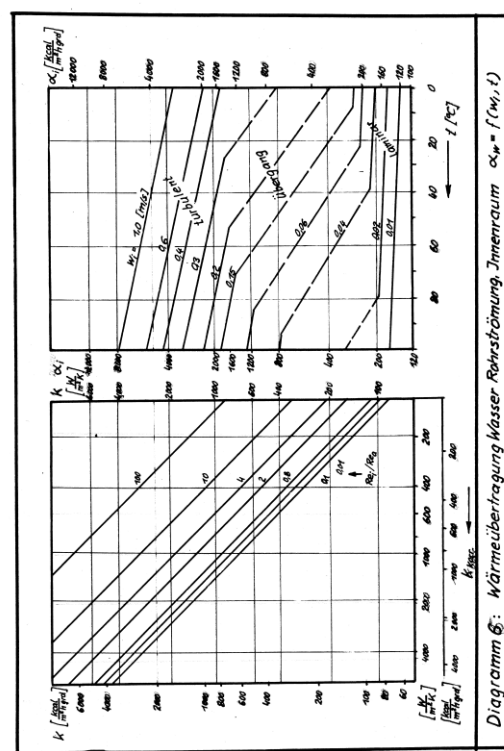


Diagramm 6: Wärmeübertragung Wasser Rohrströmung, Innenraum $\alpha_w = f(w_i, t)$

Bl. AW14

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Wärmeübertragung – Rohrbündelwärmetauscher

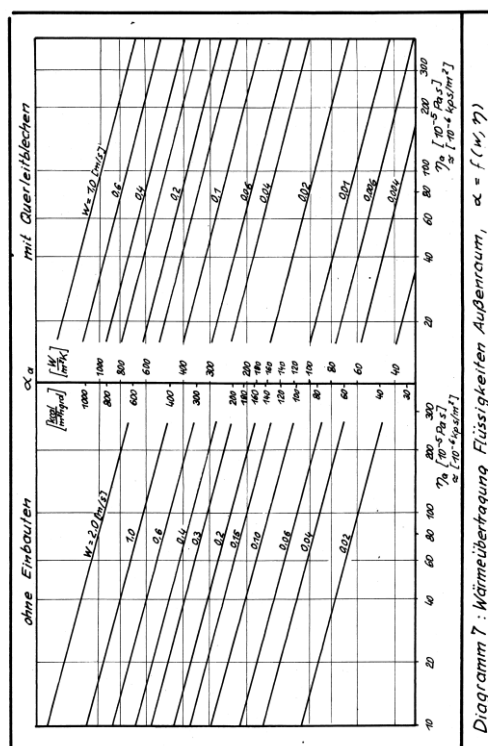


Diagramm 7: Wärmeeübertragung Flüssigkeiten Außenraum, $\alpha = f(w, \eta)$

aktualisiert 2020-11-11

Bl. AW15

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat - Wärmetauscher

Wärmeübertragung – Rohrbündelwärmetauscher

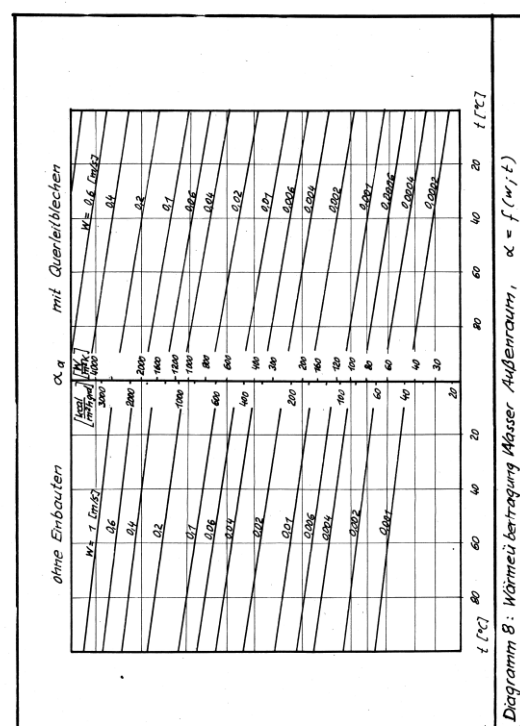


Diagramm 8: Wärmeliefertragung Wasser Außenraum, $\alpha = f(w, t)$

Bl. AW16

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 5, Bl.AW13: Wärmeübertragung Flüssigkeiten Rohrströmung, Innenraum $\alpha = f(w_i; \eta)$

Der aus der Ähnlichkeitstheorie abgeleitete dimensionslose Ausdruck für den Wärmeübergang definiert die Nußelt'sche Kenngröße

$$\alpha \cdot d / \lambda = Nu \text{ und begründet die Abhängigkeit } Nu = C Re^m Pr^n$$

Kraußold'sche Gleichungen nach Hausen, s. Lit. (15, S. 43, 31):

$$Nu_i = 1,86 (Re Pr d_i / L)^{0,33} (\eta_f / \eta_w)^{0,14}$$

$$Nu_t = 0,024 (1 + (d_i / L)^{0,67}) Re^{0,8} Pr^{0,33} (\eta_f / \eta_w)^{0,14}$$

1. Vereinfachung für das Diagramm:

Das Verhältnis der Viskositäten von strömender Flüssigkeit und in der Wandzone $(\eta_f / \eta_w) = 1$; Rohr 25x2,5mm; Rohrlänge 1 bis 6 m, damit wird $(d_i / L)^{0,33} = 0,188$ (bei 3m Rohrlänge) und $1 + (d_i / L)^{0,67} \approx 1$, somit: $Nu_i = 0,35 Re^{0,33} Pr^{0,33}$ und $Nu_t = 0,024 Re^{0,8} Pr^{0,33}$

2. Vereinfachung für das Diagramm:

$\rho = 800 \text{ (kg/m}^3\text{)}$; $c_p = 2,1 \text{ (kJ/kg K)}$; $\lambda = 0,13 \text{ (J/m s K)}$; damit wird: $Re = w d \rho / \eta = 16 w / \eta$; $Pr = c_p \eta / \lambda$ und mit $Nu = \alpha \cdot d_i / \lambda$ wird für:

$$\text{laminare Rohrströmung } \alpha_i = 139 w^{0,33} \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

$$\text{turbulente Rohrströmung } \alpha_t = 35 w^{0,8} \eta^{-0,47} \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

Wärmedurchgangskoeffizient k , s. Bl.AW04

$$1/k = 1/\alpha_{RR} + 1/\alpha_{SRR} + 1/\alpha_{SMR} + 1/\alpha_{MR}, \text{ ohne Berücksichtigung von}$$

Foulingwiderstand $1/\alpha_s$ und $\alpha_{RR} \approx \alpha_{MR}$ wird $k = \frac{1}{2} \alpha_i$ bzw.

$$k_{\text{kor}} : 1/k = 1/\alpha_{RR} + 1/\alpha_{MR} \text{ mit dem Strömungsverhältnis } Re_{RR}/Re_{MR}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{Re_i / Re_a}{\alpha_i} \text{ für die Grobdimensionierung des RWÜ, s. Diagr.5.}$$

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 6, Bl.AW14: Wärmeübertragung Wasser Rohrströmung, Innenraum $\alpha_w = f(w_i; t)$

Nach Hausen, s. Lit. (15, S.42, 31):

$$Nu_i = 3,65 + \frac{0,0668 Pr Re \frac{d_i}{L}}{1 + 0,045 (Pr Re \frac{d_i}{L})^{0,67}}$$

$$Nu_t = 0,024 (1 + (d_i / L)^{0,67}) Re^{0,8} Pr^{0,33} (\eta_f / \eta_w)^{0,14}$$

Vereinfachung für das Diagramm:

Das Verhältnis der Viskositäten von strömender Flüssigkeit und in der Wandzone $(\eta_f / \eta_w) = 1$; Rohr 25x2,5mm; Rohrteilung $\Delta t = 32\text{mm}$; Rohrlänge 1 bis 6 m und im Mittelwert häufigste Größe $d_i / L = 0,006$

Beispiel: Funktion Kühler

Kühlwasser, $t = 20^\circ\text{C}$, $V = 10 \text{ m}^3/\text{h}$, NW 300, $v = 0,15 \text{ m/s}$

$$\alpha_i = 400 \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

Abschätzung des Wärmedurchgangskoeffizienten k erfolgt analog wie im Diagr. 5, z. B.:

$$Re_i / Re_a = 2 \text{ wird } k_{\text{kor}} \approx 160 \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

Bl. AW13a

aktualisiert 2020-11-11

Bl. AW14a

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 7, Bl.AW15: Wärmeübertragung Flüssigkeiten Aussenraum $\alpha = f(w; \eta)$

$$Nu = C Re^{0,6} Pr^{0,33} (\eta_f / \eta_w)^{0,14} \text{ nach Donohue, s. Lit. 16:}$$

Gültig für $Pr = 0,5$ bis 500

Re bis 5000

Vereinfachungen für das Diagramm:

Rohr 25 x 2,5mm; Rohrteilung $\Delta t = 32\text{mm}$; $(\eta_f / \eta_w)^{0,14} = 1$; $\rho = 800$

(kg/m^3) ; $c_p = 2,1 \text{ (kJ/kg K)}$; $\lambda = 0,13 \text{ (J/m s K)}$;

$$Re = w d_{gl} \rho / \eta = 20,8 w / \eta$$

$$Pr = c_p \eta / \lambda = 16,2 \cdot 10^3 \eta$$

RWÜ ohne Einbauten:

$$C = 1,16 d_{gl}^{0,6} \quad d_{gl} = 0,026 \text{ (mm), s. Bl. AW12a}$$

$C \approx 0,13$ für alle RWÜ ohne Einbauten

mit $Nu = \alpha \cdot d_i / \lambda$

$$\alpha = 98,4 w^{0,6} \eta^{-0,27} \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

RWÜ mit Querleitblechen:

$C \approx 0,22$ für alle RWÜ mit Querleitblechen

$$\alpha = 167 w^{0,6} \eta^{-0,27} \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

Beispiel: Vorwärmer

Stoff: $\eta = 220 \cdot 10^{-5} \text{ (Pa s)}$

$w = 0,055 \text{ (m/s)}$

ohne Einbauten $\alpha = 89 \text{ (W/m}^2\text{K)}$

mit Einbauten $\alpha = 152 \text{ (W/m}^2\text{K)}$

AW Apparat - Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 8, Bl.AW16: Wärmeübertragung Wasser Aussenraum $\alpha = f(w; t)$

$$Nu = C Re^{0,6} Pr^{0,33} (\eta_f / \eta_w)^{0,14} \text{ nach Donohue, s. Lit. 16:}$$

Gültig für $Pr = 0,5$ bis 500

Re bis 5000

Vereinfachungen für das Diagramm:

Rohr 25 x 2,5mm; $(\eta_f / \eta_w)^{0,14} = 1$;

$C \approx 0,13$ für alle RWÜ ohne Einbauten

$C \approx 0,22$ für alle RWÜ mit Querleitblechen

Beispiel: Kühler

Kühlwasser: $t = 25^\circ\text{C}$

$w = 0,055 \text{ (m/s)}$

ohne Einbauten $\alpha = 550 \text{ (W/m}^2\text{K)}$

mit Einbauten $\alpha = 820 \text{ (W/m}^2\text{K)}$

Bl. AW15a

aktualisiert 2020-11-11

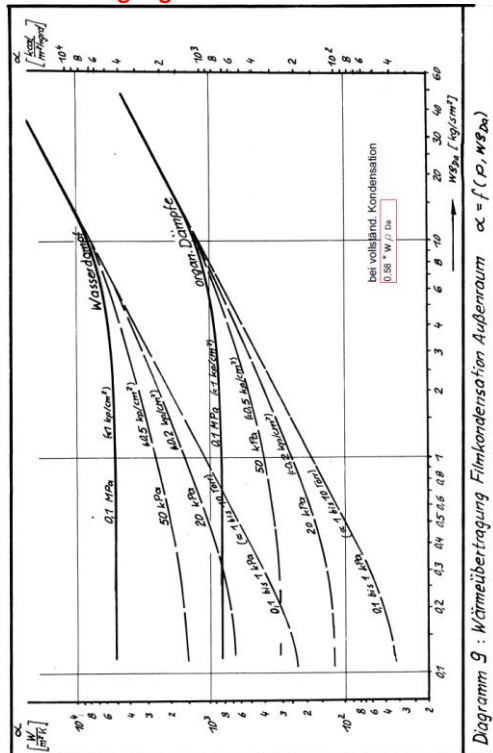
Bl. AW16a

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Wärmeübertragung – Rohrbündelwärmetauscher



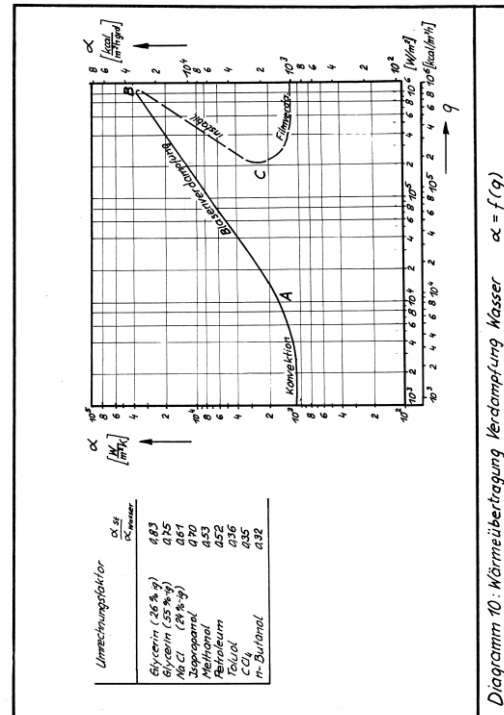
Bl. AW17

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Wärmeübertragung – Rohrbündelwärmetauscher



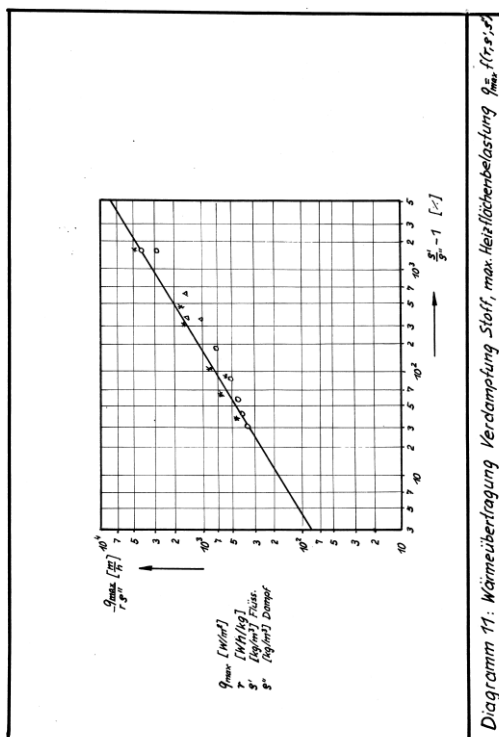
Bl. AW18

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Wärmeübertragung – Rohrbündelwärmetauscher



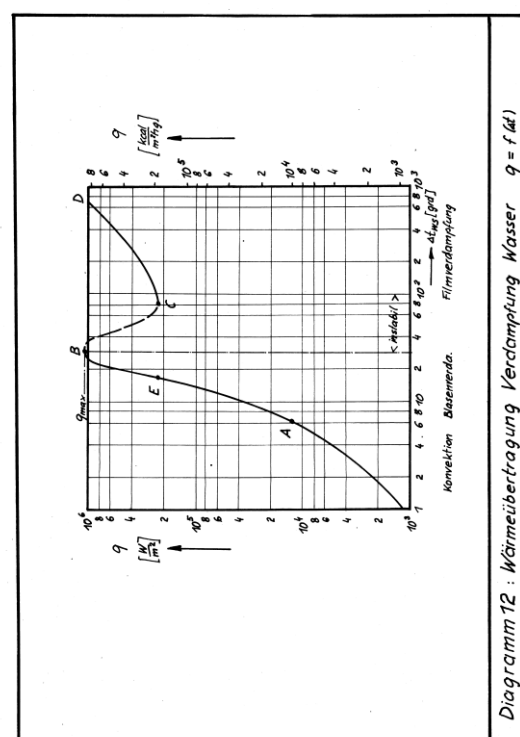
Bl. AW19

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Wärmeübertragung – Rohrbündelwärmetauscher



Bl. AW20

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 9, Bl.AW17: Wärmeübertragung

Filmkondensation Aussenraum $\alpha = f(P; w\rho_{Da})$

Filmkondensation bei laminarer Kondenshaut, d.h. keine nennenswerten Schubkräfte bei Dampfgeschwindigkeiten $< 5\text{ m/s}$, Wärmeübergangszahl nach Nußelt, s. Lit. 15, S.52:

$$\alpha = 4,9 \left(\frac{1}{d\Delta t} \right)^{1/4} \left(\frac{r\rho^2\lambda^3}{\eta} \right)^{1/4}$$

Beispiel: Wasser, $p = 1\text{ bar}$

$$r = 2257\text{ kJ/kg} \quad \rho = 958\text{ kg/m}^3 \quad \rho_{Da} = 0,6\text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 0,679\text{ W/mK} \quad \eta = 282 \cdot 10^{-6}\text{ kg/ms}$$

$$\Delta t = 20\text{ K (Differenz strömende Flüssigkeit und Wandzone)}$$

$$d = 0,025\text{ m}$$

$$\alpha = 5037\text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{s. Diagr. 9; } \alpha = \text{konst. für } (w \cdot \rho_{Da}) < 3\text{ kg/sm}^2$$

Beispiel: Kondensation von gesättigtem Toluol bei 111°C und 1 bar :

$$\alpha = 836\text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{s. Diagr. 9; organ. Dämpfe.}$$

Filmkondensation bei strömendem Sattedampf, halbempirische Gleichung nach Carpenter und Colburn, s. Lit. 17; für $Re > 10.000$

$$\alpha = 0,055 \frac{\lambda}{g\eta} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_D}} \sqrt{Pr\xi} (w\rho_{Da})$$

Beispiel: Wasser, $p = 1\text{ bar}$, $w = 20\text{ m/s}$, $\xi = f(Re) = 0,5$

$$\alpha = 6150\text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{s. Diagr. 9; für } (w \cdot \rho_{Da}) = 12\text{ kg/sm}^2$$

Im Vakuum ist der Einfluss von $(w \cdot \rho_{Da})$ umso mehr zu berücksichtigen, je geringer die Dampfdichte ist. In Ermangelung allgemeingültiger Gleichungen enthält das Diagr. eigene industrielle Erfahrungswerte.

Bl. AW17a

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 10-12, Bl.AW18-20: Wärmeübertragung

Verdampfung

Haupteinflußgrößen:

$$\Delta t_{ws} = t_w - t_s \quad \text{Differenz Heizwand und siedende Flüssigkeit}$$

$$q = Q/A = \alpha (t_w - t_s) \quad \text{Heizflächenbelastung (W/m}^2\text{)}$$

Diagr. 10: $\alpha = f(q)$ charakteristische Verdampfungskurve für Wasser bei 1 bar , nach Nukijama (1934), s. Lit. 18, Umrechnungsfaktoren für $\alpha_{St}/\alpha_{Wasser}$ nach Issinger s. Lit. 19. Bei Überschreiten der max. Heizflächenbelastung tritt Instabilität auf; dies sollte vermieden werden.

Diagr. 11: $q_{max} = f(r, \rho', \rho'')$ max. Heizflächenbelastung nach Rohsenow und Griffith s. Lit. 18, abhängig vom Verhältnis der flüss. zur dampfförmigen Dichte des Stoffes.

Diagr. 12: $q = f(\Delta t_{ws})$ charakteristische Verdampfungskurve für Wasser bei 1 bar , nach Nukijama (1934), s. Lit. 5, S.552.

Mit o.g. drei Diagrammen kann der Entwurf des Verdampfers zunächst mit einer Genauigkeit von $\pm 20\%$ erfolgen, wobei die jeweils unterschiedlichen Stoff- und Druckverhältnisse durch q und r berücksichtigt werden. Für Stoffgemische gelten die einfachen Abhängigkeiten für q_{max} nicht mehr. Die Gemische verhalten sich sehr verschiedenartig, so dass eine allgemeine Aussage nicht gemacht werden kann.

Bl. AW18a

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 10-12, Bl.AW18-20: Wärmeübertragung

Verdampfung

Beispiel: Isopropanol-Verdampfung

$$\rho' = 732\text{ kg/m}^3 \quad \rho'' = 2,1\text{ kg/m}^3$$

$$r = 678\text{ kJ/kg} = 678 \cdot 10^3 / 3600\text{ Wh/kg}$$

$$(\rho' / \rho'')^{-1} = 348$$

$$\text{aus Diagr. 11: } q_{max} / (r \cdot \rho'') \approx 1700\text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$\text{aus Diagr. 10: } q_{max} \approx 6,7 \cdot 10^5\text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$\Rightarrow \alpha_{Wasser} \approx 2,8 \cdot 10^4\text{ (W/m}^2\text{K)}$$

$$\text{Umrechnungsfaktor für Isopropanol } (\alpha_{St}/\alpha_{Wasser}) = 0,7$$

$$\alpha_{St} \approx 19600\text{ (W/m}^2\text{K)}$$

aus Diagr. 12:

$$\Delta t_{ws} \approx 20\text{ (K)}$$

Bl. AW19a

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat - Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 13, Bl.AW21: Rieselfilmstabilität Rohrrinnenwand

$q_{max} = f(Re; \eta; r)$

Im Fallfilmverdampfer wird das Produkt auf dem oberen Rohrboden des stehenden RWÜ gleichmäßig auf die Rohre verteilt, so dass die Verdampfung über den ringförmig abströmenden Film an der Rohrrinnenwand erfolgt. Die Wärmezufuhr erfolgt über den Mantelraum des RWÜ. Wegen der kurzen Aufenthaltszeit und des geringen Druckverlustes der Dampfströmung, wird der Fallfilmverdampfer bevorzugt für thermisch empfindliche Produkte sowie zur Verdampfung unter Vakuum eingesetzt.

Filmstärke am Rohreintritt nach Nusselt (1916), s. Lit. 19:

$$\delta = (3 \eta^2 / \rho^2 g)^{1/3} Re^{1/3} \text{ (m)} \quad \text{für } Re < 400; \text{ Gl. (a)}$$

Mit $\rho = 800\text{ (kg/m}^3\text{)}$ für die meisten organischen Stoffe gilt vereinfacht $\delta = 0,00783 \eta^{2/3} Re^{1/3} \text{ (m)}$ als grobe Schätzwert und kann dem

Diagr. 13 entnommen werden:

$$\text{Z. B. Toluol: } Re = 100 \quad \eta = 25,1 \cdot 10^{-5} \text{ (Pa s)} \Rightarrow \delta = 0,15\text{ mm}$$

$$\text{n-Butan: } Re = 20 \quad \eta = 228 \cdot 10^{-5} \text{ (Pa s)} \Rightarrow \delta = 0,37\text{ mm}$$

Durch Begrenzung der maximalen Heizflächenbelastung kann die **Instabilität** des Films vermieden werden.

Bei vollständiger Verdampfung der angegebenen Flüssigkeit wird

$$q_{max} = G \cdot r / F = G \cdot r / \pi d_i z L \quad \text{Massenstrom bezogen auf}$$

$$\text{benetzten Rohrumfang } G_F = G / \pi d_i z \text{ (kg/ms),}$$

$$\text{nach Schnabel, G. (1980), s. Lit.19 } \Rightarrow Re \approx G_F / \eta \text{ wird}$$

$$q_{max} = Re \eta / L \text{ mit Gl. (a) und } \delta \text{ in (mm)}$$

$$\Rightarrow q_{max} = 0,697 \cdot 10^{-3} \delta^3 r / \eta \text{ (W/m}^2\text{)}$$

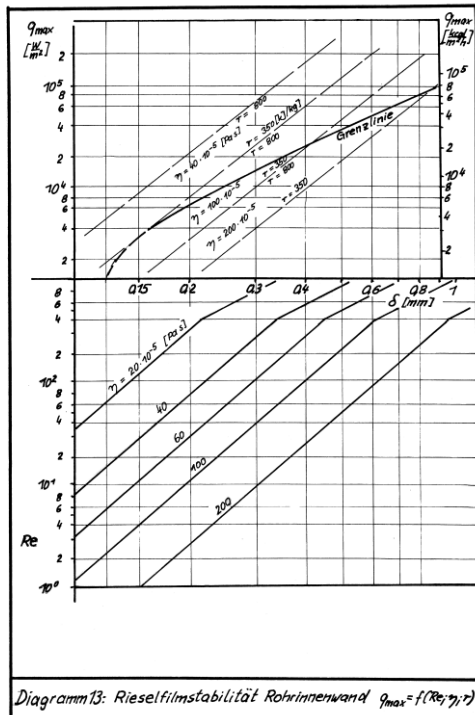
Bl. AW21a

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Wärmeübertragung – Rohrbündelwärmetauscher



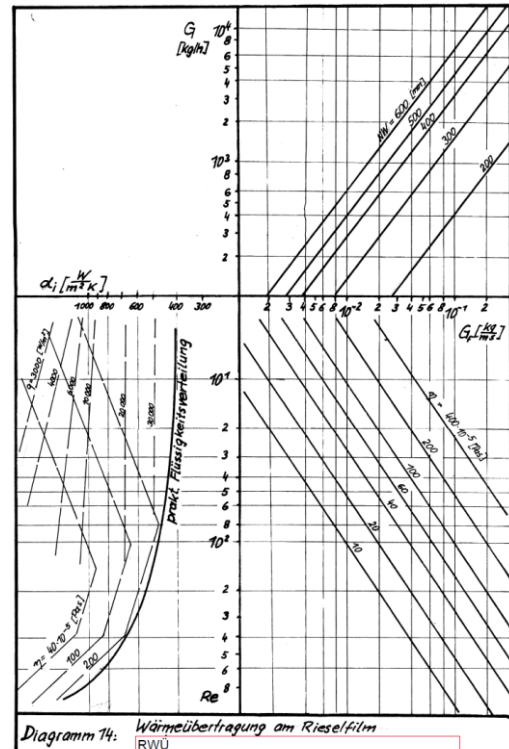
Bl. AW21

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Wärmeübertragung – Rohrbündelwärmetauscher



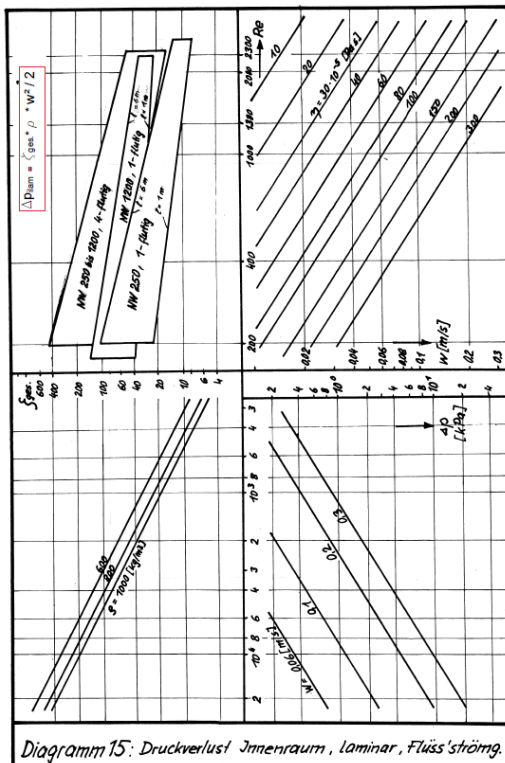
Bl. AW22

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Druckverlust – Rohrbündelwärmetauscher



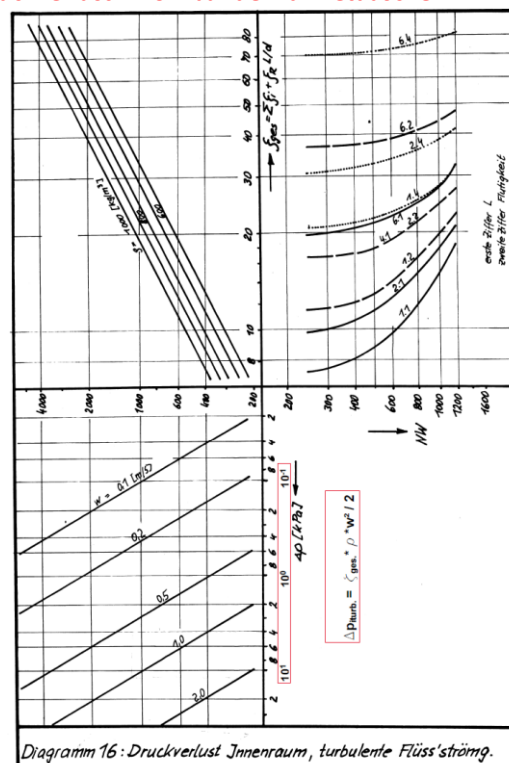
Bl. AW23

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Druckverlust – Rohrbündelwärmetauscher



Bl. AW24

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Fortsetzung

Diagr. 13, Bl.AW21: Rieselfilmstabilität Rohrrinnenwand

$$q_{\max} = f(\text{Re}; \eta; r)$$

Die **Filmstabilität** ist erfahrungsgemäß gewährleistet, wenn die Heizflächenbelastung die eingezeichnete Grenzlinie im Diagr. 13 nicht überschreitet. Die Bereiche der berechneten max. Heizflächenbelastungen sind im Diagr. ebenfalls dargestellt.

Beispiel:

$$\text{Benzol: } \delta = 0,4 \text{ (mm); } r = 447 \text{ (kJ/kg); } \eta = 81,5 \cdot 10^{-5} \text{ (Pa s)}$$

$$q_{\max} = 37,2 \cdot 10^3 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$q_{\max}$ liegt über der Grenzlinie. Zur Vermeidung der Instabilität des Films sollte der Massenstrom G (kg/h) am Rohreintritt mindestens auf $\delta = 0,5$ (mm) erhöht werden.

Diagr. 14, Bl.AW22: Wärmeübertragung am Rieselfilm

Der Wärmeübergang beim Sieden an der Filmoberfläche (konvektives Sieden) wird nach Schnabel, G. (1980), s. Lit.19 berechnet für $\text{Re} < 400$:

$$\text{Nu}_{\text{lam}} = 0,9 \cdot \text{Re}^{1/3} \quad \text{mit der Definition: } \text{Nu} \equiv \alpha(\eta^2/\rho^2g)^{1/3}/\lambda \quad \text{wird}$$

$$\alpha_{\text{lam}} = 0,9 \cdot \text{Re}^{1/3} \cdot \lambda / (\eta^2/\rho^2g)^{1/3}$$

Beispiel: Toluol 1000 kg/h wird dem RWÜ-NW500 aufgegeben, ergibt 0,024 kg/m s und der Viskosität von 24 Pa s $\Rightarrow \text{Re} = 100$ rechnerisch eine Wärmeübergangszahl $\alpha_{\text{rechner}} = 1007 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$. Erfahrungsgemäß wurden im Industrieinsatz deutlich geringere Leistungszahlen beobachtet. Begründet ist dies besonders durch geringe Filmstärken (hier 0,17 mm). Im Diagr. 14 sind die reduzierten Werte durch die „praktische Flüssigkeitsverteilung“ dargestellt. Für obiges Beispiel: $\alpha_{\text{real}} \approx 480 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$.

Bl. AW21b

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 15 u. 16, Bl.AW23/24: Druckverlust Innenraum, Flüssigkeitsströmung

Allgemein gilt bei der Strömung durch Querschnittsänderungen nach Bernoulli, s. Lit.19 (Lc1): $\Delta p = \zeta \cdot \rho \cdot w^2/2 \text{ (Pa)}$

Die Widerstandsbeiwerte ζ werden für Querschnittsveränderungen und die Rohrströmung durch den RWÜ (Katalogauswahl s. Bl.AW02): Stutzen/ Kammer/ Einlauf Rohrbündel/ Rohr/ Auslauf Rohrbündel/ Kammer/ Stutzen (s. Lit.19: Lb1/2 und Lc1/3) erfasst und ermöglichen die Bestimmung des gesamten Druckabfalles im Apparat. Als Haupteinflussgröße stellt sich die Geschwindigkeit dar. Bei laminarer Flüssigkeitsströmung wird der Druckverlust zudem durch die Viskosität beeinflusst, s. Diagr. 15. Die geometrischen Abmessungen bekommen bei turbulenter Strömung durch Rohrlänge und Flutigkeit Bedeutung, s. Diagr. 16.

Beispiel:

laminar: Sojaöl, 120 °C

$$\text{Diagr. 1: } 15 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow \text{RWÜ DN600 x 6m, 4-flutig} \Rightarrow v = 0,2 \text{ m/s}$$

$$\text{Diagr. 15: } \eta = 300 \cdot 10^{-5} \text{ (Pa s)} \Rightarrow \text{Re} \approx 1100 \Rightarrow \zeta_{\text{ges}} = 90;$$

$$\rho = 830 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow w = 0,2 \text{ m/s} \Rightarrow \Delta p = 1,6 \text{ kPa}$$

turbulent: Wasser, 20 °C

$$\text{Diagr. 1: } 35 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow \text{RWÜ DN400 x 6m, 2-flutig} \Rightarrow v = 0,5 \text{ m/s}$$

$$\text{Diagr. 16: (NW400; 6.2)} \Rightarrow \zeta_{\text{ges}} = 38; \rho = 998 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow$$

$$w = 0,5 \text{ m/s} \Rightarrow \Delta p = 5 \text{ kPa}$$

Bl. AW23a

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 17/19, Bl.AW25/27: Druckverlust Mantelraum, Flüssigkeitsströmung

Zur Übersichtsrechnung der Strömungs-Druckverluste bei abwechselnder Quer- und Längsströmung im Mantelraum der mit Querleitblechen ausgerüsteten RWÜ bietet die Arbeit von Donohue, s. Lit. 16, die am einfachsten zu benutzenden Gleichungen.

$$\Delta p_{\text{ges}} = \Delta p_b + \Delta p_c$$

Δp_b Druckverlust in dem Teil des RWÜ, der im Ausschnitt der

Querleitbleche liegt $\Rightarrow$ Fensterzone,

$$\Delta p_b = 1,09 G_b^2 z / \rho \text{ (kg/ms}^2\text{)} = (\text{Pa})$$

G_b Mengenstrom im freien Querschnitt zwischen den Rohren in der Fensterzone (kg/sm²)

z Zahl der Querleitbleche, Abstand der Bleche $S = 0,2D$

ρ Dichte der Flüssigkeit (kg/m³)

Δp_c Druckverlust in dem Teil des RWÜ, der zwischen zwei

benachbarten Querleitblechen liegt $\Rightarrow$ Querströmungszone

$$\Delta p_{c \text{ lam}} = 0,68 \cdot 10^3 N G_c \eta z g / \rho \text{ (Pa)}$$

$$\Delta p_{c \text{ turb}} = 0,65 \cdot N G_c^{1,8} \eta^{0,2} z g / \rho \text{ (Pa)}$$

G_c Mengenstrom im freien Querschnitt zwischen den Rohren in der Querströmungszone (kg/sm²)

N Anzahl der Rohrreihen

η Viskosität der Flüssigkeit (Pa s)

$g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ Erdbeschleunigung

Bl. AW27a

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat - Wärmetauscher

Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Diagr. 17/19, Bl.AW25/27: Druckverlust Mantelraum, Flüssigkeitsströmung

Beispiel: Wasser, 20 °C, $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$, $\eta = 100 \cdot 10^{-5} \text{ (Pa s)}$

laminar: Diagr. 3: $5 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow \text{RWÜ DN500 x 6m} \Rightarrow v_e = 0,06 \text{ m/s}$

$$\text{Diagr. 17: } G = 4.990 \text{ kg/h} \Rightarrow G_b' \approx 35 \text{ (kg/sm}^2\text{)}$$

$$\Rightarrow \Delta p_b \approx 40 \text{ (Pa) im RWÜ}$$

$$\text{Diagr. 18: } G = 4.990 \text{ kg/h} \Rightarrow G_N \approx 800 \text{ (kg/sm}^2\text{)}$$

$$\Rightarrow 0,08 G_N \eta \Rightarrow \Delta p_{c \text{ lam}} \approx 4 \text{ (Pa) pro QLB}$$

$$\Delta p_{c \text{ lam}} \approx 150 \text{ (Pa) im RWÜ}$$

$$\Delta p_{\text{ges}} = \Delta p_b + \Delta p_c = 190 \text{ (Pa)}$$

turbulent: Diagr. 3: $15 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow \text{RWÜ DN500 x 6m} \Rightarrow v_e = 0,2 \text{ m/s}$

$$\text{Diagr. 17: } G = 14.970 \text{ kg/h} \Rightarrow G_b' \approx 100 \text{ (kg/sm}^2\text{)}$$

$$\Rightarrow \Delta p_b \approx 700 \text{ (Pa) im RWÜ}$$

$$\text{Diagr. 19: } G = 14.970 \text{ kg/h} \Rightarrow G_c^{1,8} N \approx 10^5 \text{ (kg/sm}^2\text{)}$$

$$\Rightarrow G_c^{1,8} N \eta^{0,2} \approx 2 \cdot 10^4 \Rightarrow \Delta p_{c \text{ lam}} \approx 80 \text{ (Pa) pro QLB}$$

$$\Delta p_{c \text{ turb}} \approx 4.000 \text{ (Pa) im RWÜ}$$

$$\Delta p_{\text{ges}} = \Delta p_b + \Delta p_c = 4.700 \text{ (Pa)}$$

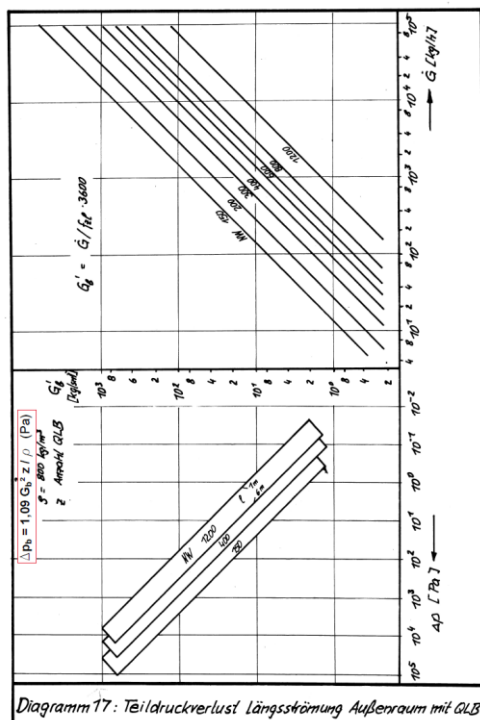
Bl. AW27b

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Druckverlust – Rohrbündelwärmetauscher



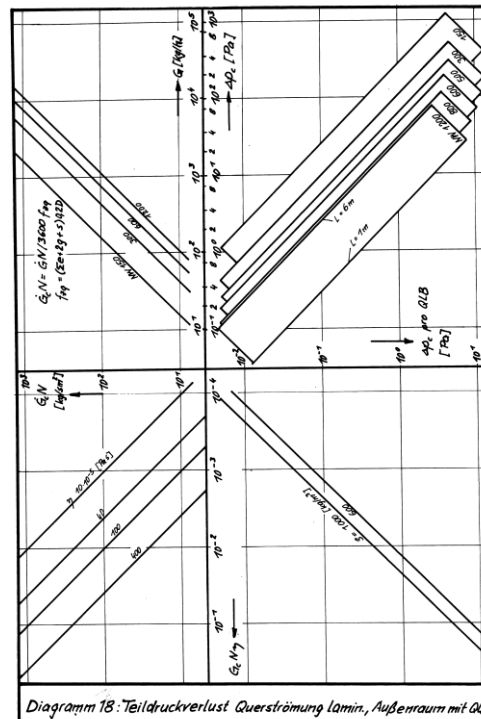
Bl. AW25

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Druckverlust – Rohrbündelwärmetauscher



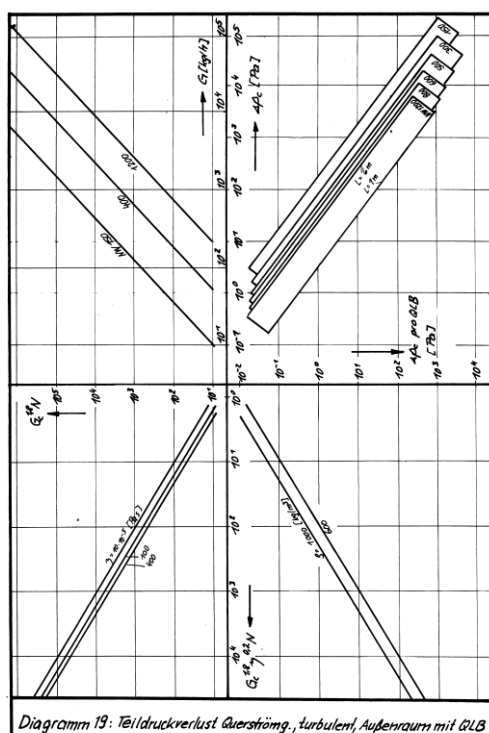
Bl. AW26

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Druckverlust – Rohrbündelwärmetauscher



Bl. AW27

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Rohrbündelwärmetauscher

Bl. AW28

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Allgemeine Hinweise zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

01 Wärmeübertragungsfläche -F- wird erfahrungsgemäß ermittelt für übliche k-Werte.

02 Rohrlänge

In der Tabelle für RWÜ-Vorzugsgrößen, s. Bl. AW02, wird die größte Länge ausgewählt, die beim vorhandenen Volumenstrom -V- die maximal mögliche Reynolds Zahl (Δp beachten) zulässt. Rohrteilung t/d kleiner 1,75 vermeiden, schwingungsgefährdete Rohre sind durch Stützen auf der Rohrlänge zu stabilisieren. Besondere Sicherheitsvorkehrungen bei Rohren in Wandnähe und in der Nähe von Dampfgassen bei Rohrbündel-Wärmeaustauscher (Mitte) s. Lit. 20. Resonanz-Schwingungen (Rohrwechselbeanspruchungen durch Wirbelablösung) oder auch Durchbiegung können zu erheblichen Belastungen insbesondere bei langen Rohren führen. Schließlich treten bleibende Belastungen auf durch den Einwalzvorgang, welcher zu einer bleibenden Verformung der Rohrwand führt.

Bl. AW29

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Allgemeine Hinweise zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

03 Rohrdurchmesser

Durch die Wahl kleinerer Rohrdurchmesser bei gleicher Rohrlänge und Rohrzahl eines Bündels kann die Wärmeübertragungsleistung beachtlich gesteigert werden, allerdings unter erheblicher Zunahme des Druckabfalles. So beruht die Konstruktionsaufgabe im Wesentlichen darauf, Strömungsbedingungen zu schaffen, welche bei vertretbarem Energieaufwand durch gute Wärmeübertragungsbedingungen die gewünschten Temperatur- und Wärmeverhältnisse im Stoffstrom herbeiführen.

04 Anzustreben sind **kühlwasserseitig**

Strömungsgeschwindigkeiten von $v = 1 \dots 2$ m/s zwecks Vermeidung von Verschmutzung und Ablagerungen. Die Aufwärmung des Kühlwassers soll nicht höher als 45°C betragen, um Verkrustungen zu verhindern.

Bl. AW30

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat – Wärmetauscher

Allgemeine Hinweise zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

05 Hinsichtlich der apparativen **Anordnung** ist eine vertikale Aufstellung des Kühlers bei einmaligem Durchgang von Kühlstrom und Kühlmittel zweckmäßig: Produkt strömt mit eigenem Gefälle durch den Mantelraum, Kühlwasser fließt von unten nach oben in einmaligem Durchgang durch die Rohre, wobei einwandfreie Entlüftung gesichert ist. Für größere Leistungen und ganze Kühlsysteme wird Zwangsströmung beiderseits empfohlen bei waagerechter Anordnung und Reihenschaltung von übereinander und nebeneinander angeordneten Apparaten. Dabei ist besonders auf die Möglichkeit zuverlässiger Entlüftung zu achten.

Bl. AW31

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

AW Apparat - Wärmetauscher

Allgemeine Hinweise zur Dimensionierung von Rohrbündel-Wärmeaustauschern

Bl. AW32

aktualisiert 2020-11-11