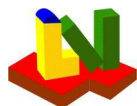


## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	1
Verdampfung reiner Stoffe in Rohrbündel-Wärmeübertragern .....	2
Bearbeitung des Rohrspiegels Ermittlung der Rohrspiegeldaten .....	4
Stoffwerteermittlung .....	6
Stoffwerte von Wasser .....	7
Reale log. Temperaturdifferenz für verschiedene Tauscherbauarten .....	8
Druckverlust in durchströmten Verdampferrohren .....	9
Wärmeübertragung beim Sieden gesättigter Flüssigkeiten -Strömungsformen- .....	11
Wärmeübertragung beim Sieden gesättigter Flüssigkeiten -Blasensieden horizontal- .....	13

### Darstellung

Eingabewerte:	1.234	oder	1.234
Berechnete Werte:	<b>1.234</b>	oder	<b>1.234</b>
Kritische Werte:	<b>1.234</b>	oder	<b>1.234</b>
Schätzwerte:	1.234	oder	1.234



# VERD

Beispielausdruck

2011

## Verdampfung reiner Stoffe in Rohrbündel-Wärmeübertragern

<b>Rohrseite:</b>				<b>Mantelseite:</b>			
Verdampfung in den Rohren				(Kondensation)			
Medium: Freie Eingabe				Medium: Sattdampf Kondensation			
Massenstrom	$m_i$	7200	kg/h	Massenstrom	$m_a$	<b>0.2883</b>	kg/s
Volumenstrom	$V_i$	<b>13.22</b>	m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom	$V_a$	<b>0.108</b>	m <sup>3</sup> /s
Druck ein (abs.)	$P_i$	5	bar	Druck ein (abs.)	$P_a$	5	bar
Eintrittstemp.	$\vartheta_{e_i}$	<b>92.49</b>	°C	Eintrittstemp.	$\vartheta_{e_a}$	<b>151.9</b>	°C
Austrittstemp.	$\vartheta_{a_i}$	<b>92.69</b>	°C	Austrittstemp.	$\vartheta_{a_a}$	<b>151.7</b>	°C
Mittl. Temp.	$\vartheta_{m_i}$	92.59	°C	Mittl. Temp.	$\vartheta_{m_a}$	151.8	°C
Fouling	$f_i$	0	m <sup>2</sup> ·K/W	Fouling	$f_a$	0	m <sup>2</sup> ·K/W
<b>Flüssigphase</b>				<b>Flüssigphase</b>			
Dichte	$\rho_i$	544.8	kg/m <sup>3</sup>	Dichte	$\rho_a$	915	kg/m <sup>3</sup>
Spez. Wärmek.	$cp_i$	2679	J/(kg·K)	Spez. Wärmek.	$cp_a$	4315	J/(kg·K)
Dyn. Viskosität	$\eta_i$	0.1248	mPa·s	Dyn. Viskosität	$\eta_a$	0.1802	mPa·s
Wärmeleitfähigk.	$\lambda_i$	0.1059	W/(m·K)	Wärmeleitfähigk.	$\lambda_a$	0.6833	W/(m·K)
Oberfl. spannung	$\sigma_i$	8.241	mN/m	Oberfl. spannung	$\sigma_a$	48.36	mN/m
Kritischer Druck	$P_c$	3370000	Pa	Kritischer Druck	$P_c$	2.206E+7	Pa
Molmasse	MW	72.15	kg/kmol	Molmasse	MW	18.02	kg/kmol
<b>Dampfphase</b>				<b>Dampfphase</b>			
Dichte Dampf	$\rho_i$	13.75	kg/m <sup>3</sup>	Dichte Dampf	$\rho_a$	2.669	kg/m <sup>3</sup>
Spez. Wärmek.	$cp_i$	2118	J/(kg·K)	Spez. Wärmek.	$cp_a$	2413	J/(kg·K)
Dyn. Viskosität	$\eta_i$	0.008833	mPa·s	Dyn. Viskosität	$\eta_a$	0.01402	mPa·s
Wärmeleitfähigk.	$\lambda_i$	0.0216	W/(m·K)	Wärmeleitfähigk.	$\lambda_a$	0.03103	W/(m·K)
Verdampf. enth.	$\Delta h_v$	303400	J/kg	Verdampf. enth.	$\Delta h_v$	2107420	J/kg
Anteil Flüssigk. (Eintritt)	$x_e$	1	-	Anteil Dampf (Eintritt)	$x_e$	1	-
Anteil Flüssigk. (Austritt)	$x_a$	0	-	Anteil Dampf (Austritt)	$x_a$	0	-
Wärmestrom	$Q_i$	<b>607.9</b>	kW	Wärmestrom	$Q_a$	<b>-607.9</b>	kW
				Verlustwärme	$Q_{V_a}$	0	kW

### Normierte Daten:

Normierte Wärmestromdichte	$q_0$	20000	W/m <sup>2</sup>
Normierter Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_0$	3070	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Spezifische Verdampfungsenthalpie		321200	J/kg ( $\Delta h_{v_0}$ bei $P_c/10$ )
Normierte Dichte der Flüssigkeit		564.4	kg/m <sup>3</sup> (bei $P_c/10$ )
Normierte Dichte des Dampfes		9.341	kg/m <sup>3</sup> (bei $P_c/10$ )
Normierte Oberflächenspannung		9.882	mN/m (bei $P_c/10$ )
Ausgeführte Bündellänge	$l_a$	1.9	m
Wärmeübertragerfläche	A	<b>3.701</b>	m <sup>2</sup>
Leistungszahl des Wärmeübertragers		<b>1.145</b>	-

### Geometrie:

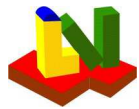
Bezeichnung der Bauform:

Einbaulage: Waagrecht

Geradrohre mit festen Rohrplatten

Mantel ohne Einbauten

Mantelaußendurchm.	$D_a$	<b>188.9</b>	mm	Mantelwanddicke	$s_a$	6.3	mm
Mantelinnendurchm.	$D_i$	176.3	mm				
Abstand Bündel-Mantel		12	mm	Min-Abst. Bündel-Mantel		12	mm
Rohraußendurchmesser	$d_a$	20	mm	Rohrinnendurchmesser	$d_i$	16	mm
Rohrteilung (quer)	$sq$	25	mm	Rohrteilung (längs)	$sl$	21.65	mm
Teilungswinkel	$\phi$	<b>60</b>	°	Gassenbreite	b	40	mm
				Arithmetischer Mittenrauhwert der Rohre	$R_a$	0.002	mm



# VERD

Beispielausdruck

2011

Rohrmaterial	Stahl		
Wärmeleitfähigkeit der Rohre	$\lambda_R$	52	W/(m·K)
Gesamter Verschmutzungswiderstand	Rf	0	m <sup>2</sup> ·K/W
Anzahl der rohrseitigen Durchgänge		1	-
Anzahl seriell geschalteter Wärmeübertrager		1	-

### Ergebnisse:

Anzahl der Rohre	R	31	-
Wärmeübergangskoeffizient (innen)	$\alpha_i$	7787	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Wärmeübergangskoeffizient (außen)	$\alpha_a$	8956	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Wärmedurchgangszahl	k	3174	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Log. mittl. Temperaturdifferenz (LMTD)	$\Delta\theta$	59.25	K
FN (Korrekturfaktor für LMTD)	FN	1	-
Zulässige Überhitzung bei Kondensation	$\vartheta_{\ddot{u}}$	4.599	°C

### Rohrseite:

Druckverlust	$\Delta P_i$	13227	Pa
Wandtemperatur	$\vartheta_{w_i}$	122.8	°C
Geschw. im Rohr reine Flüssigkeit		0.589	m/s
Geschw. im Rohr reiner Dampf		23.34	m/s

### Mantelseite:

Druckverlust	$\Delta P_a$		Pa
Wandtemperatur	$\vartheta_{w_a}$	130.8	°C
Geschw. im Mantel		7.364	m/s

### Eintrittsstutzen

Nennweite	DN 50		
Außendurchmesser	60.3	mm	
Innendurchmesser	54.5	mm	
Geschwindigkeit	1.574	m/s	

### Eintrittsstutzen

Nennweite	DN 100		
Außendurchmesser	114.3	mm	
Innendurchmesser	107.1	mm	
Geschwindigkeit	11.99	m/s	
$\rho \cdot v^2$ Stutzen ein	383.8	kg/(m·s <sup>2</sup> )	

### Austrittsstutzen

Nennweite	DN 100		
Außendurchmesser	114.3	mm	
Innendurchmesser	107.1	mm	
Geschwindigkeit	16.15	m/s	

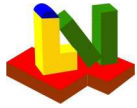
### Austrittsstutzen

Nennweite	DN 25		
Außendurchmesser	33.7	mm	
Innendurchmesser	28.5	mm	
Geschwindigkeit	0.4939	m/s	

### Bewertung:

Ist-Leistung	695.9	kW
Soll-Leistung	607.9	kW
Leistungszahl	1.145	-

Ist-Wärmestromdichte	$\dot{q}$	188050	W/m <sup>2</sup>
Kritische Wärmestromdichte	$\dot{q}_{kr}$	374375	W/m <sup>2</sup>



## Bearbeitung des Rohrspiegels Ermittlung der Rohrspiegeldaten

Bezeichnung der Bauform:

Umlenkblech-Typ:                   Ohne Umlenkbleche

Design = D; Rating / Simulation = R                   < R >

Manteldurchmesser aussen	Da	188.9	mm
Manteldurchmesser innen	Di	176.3	mm
Bündeldurchmesser	Db	152.3	mm
Mindestabstand zw. Bündel und Mantel	Dm	12	mm
Abstand zwischen Bündel und Mantel	D	12	mm

Rohraussendurchmesser	da	20	mm
Rohrinnendurchmesser	di	16	mm
Teilung quer zur Strömungsrichtung	sq	25	mm
Teilung längs zur Strömungsrichtung	sl	21.65	mm
Teilungswinkel	$\Phi$	60	°

Anordnung: fluchtend = f / versetzt = v                   < V >

Anordnung: um das Zentralrohr                   = 0                   < 0 > -  
                  um 1/2-Teilung versetzt                   = 1

Anzahl der rohrseitigen Durchgänge		1	-
Anzahl der mantelseitigen Durchgänge		1	-
Bündel-Typ	<	0	> -
Rohrgassenbreite (horizontal)		40	mm
Rohrgassenbreite (vertikal)		40	mm

Aussendurchmesser des Bodens	Da		mm
Teilkreisdurchmesser	Dt		mm
Schraubenanzahl auf dem Teilkreis		-	
Drehwinkel des Teilkreises für Bohrbild			°

Anzahl der durchströmten Rohre	n	31	-
Anzahl der Blindrohre	nB	0	-
Anzahl der Zuganker	nZ	0	-
Gesamtanzahl Rohre, Blindrohre und Zuganker	nG	31	-
Anzahl der Randrohre erforderlich/vorhanden	RR	/	26

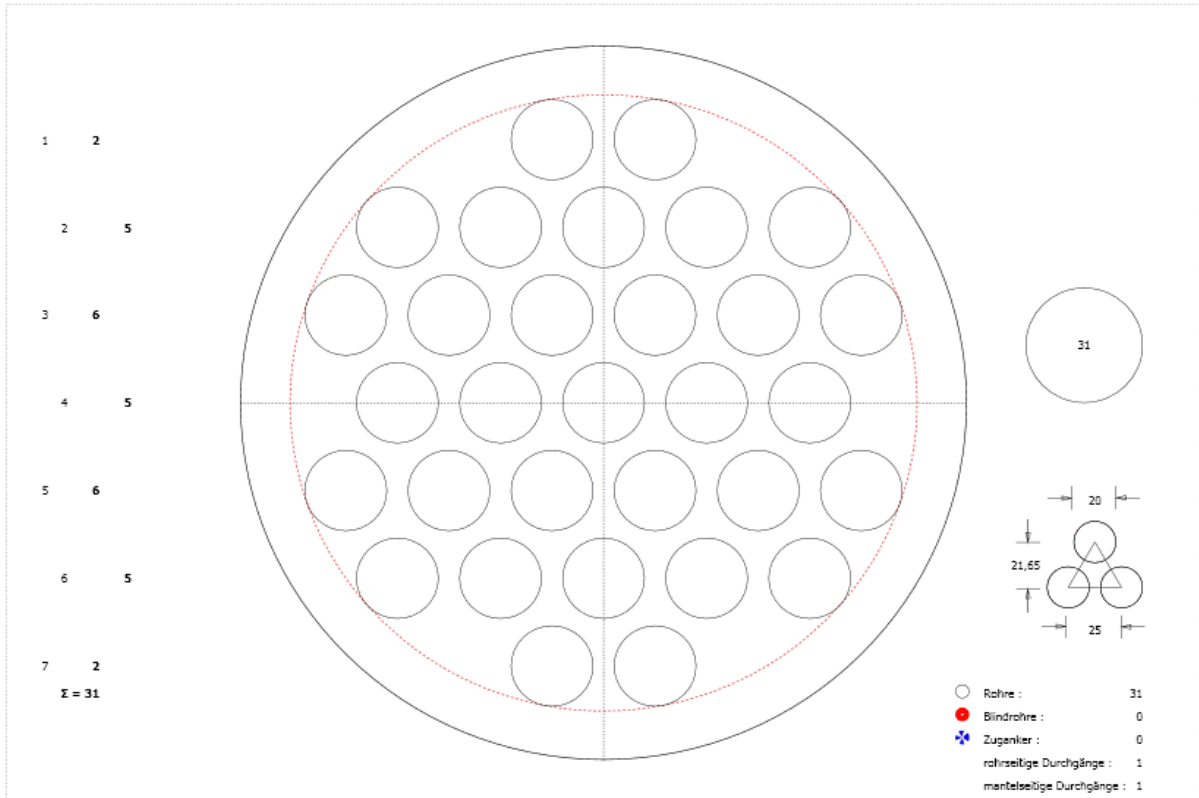
Kürzeste Verbindungsstrecke in der Mitte	Le	76.29	mm
Kürzeste Verbindungsstrecke zwischen Rohr und Rohr	e	5	mm
Kürzeste Verbindungsstrecke zwischen Rohr und Mantel	e1	28.14	mm
Anzahl der Verbindungsstrecken	nV	4	-
Mittlere Entfernung der Randrohre-Bündelmittelpunkt	rh	53.98	mm

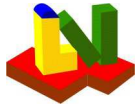
Anzahl der Rohre, Blindrohre und Zuganker pro Durchgang:

Durchgang-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
	31	0	0	0	0	0	0	0

Ausgeführte Rohrlänge	la	1900	mm
Gesamte Oberfläche	A	3.701	m <sup>2</sup>
Anzahl der Wärmeübertrager in Serie		1	-

<b>Stutzen:</b>	Rohrseite	Mantelseite
Innendurchmesser des Einlaufstutzens	54.5	107.1
Innendurchmesser des Auslaufstutzens	107.1	28.5





## Stoffwerteermittlung

### Stoffwerte

Bezeichnung: Rohrmedium: Freie Eingabe

Temperatur	$\vartheta$	365.7	K
Druck	$p$	5	bar

#### Stoffwerte der siedenden Flüssigkeit:

Dichte	$\rho$	545	kg/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärmekapazität	$c_p$	2.679	kJ/(kg·K)
Dynamische Viskosität	$\eta$	0.1248	mPa·s
Kinematische Viskosität	$\nu$	<b>0.229</b>	mm <sup>2</sup> /s
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0.1059	W/(m·K)
Prandtl-Zahl	$Pr$	<b>3.157</b>	-
Oberflächenspannung	$\sigma$	8.241	mN/m

#### Stoffwerte des Sattedampfes:

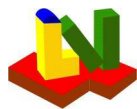
Dichte	$\rho$	13.76	kg/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärmekapazität	$c_p$	2.118	kJ/(kg·K)
Dynamische Viskosität	$\eta$	0.00883	mPa·s
Kinematische Viskosität	$\nu$	<b>0.6417</b>	mm <sup>2</sup> /s
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0.0216	W/(m·K)
Prandtl-Zahl	$Pr$	<b>0.8658</b>	-

Verdampfungsenthalpie	$\Delta h_v$	303.4	kJ/kg
-----------------------	--------------	-------	-------

Kritischer Druck	$P_c$	33.7	bar
Molmasse	$M$	72.15	kg/kmol

#### Normierte Werte bei einem reduzierten Druck von $0.1 \cdot P_c$ :

Reduzierter Druck	$p_r = P_c / 10$	<b>337000</b>	Pa
Verdampfungsenthalpie	$\Delta h_v^*$		J/kg
Dichte der siedenden Flüssigkeit	$\rho_L$		kg/m <sup>3</sup>
Dichte des Sattedampfes	$\rho_g$		kg/m <sup>3</sup>
Oberflächenspannung	$\sigma^*$		mN/m



**Stoffwerte von Wasser**

**Stoffwerte von Wasser und Wasserdampf**

Berechnung für Sättigung J/N	Zustand 1 < J >		Zustand 2 < N >	
	Temperatur	$\vartheta_1$	151.8 °C	$\vartheta_2$
Druck	$p_1$	500099 Pa	$p_2$	500000 Pa

**Stoffwerte von Wasser und überhitztem Dampf:**

	Zustand 1 Flüssig		Zustand 2 Flüssig	
Dichte	$\rho$	915.3 kg/m <sup>3</sup>	$\rho$	934.2 kg/m <sup>3</sup>
Spez. isob. Wärmekapaz.	$c_p$	4315 J/(kg·K)	$c_p$	4266 J/(kg·K)
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0.6836 W/(m·K)	$\lambda$	0.685 W/(m·K)
Dynamische Viskosität	$\eta$	0.1802 mPa·s	$\eta$	0.2115 mPa·s
Kinematische Viskosität	$\nu$	1.969E-7 m <sup>2</sup> /s	$\nu$	2.263E-7 m <sup>2</sup> /s
Prandtl-Zahl	Pr	1.138 -	Pr	1.317 -
Temperaturleitfähigkeit	a	1.731E-7 m <sup>2</sup> /s	a	1.719E-7 m <sup>2</sup> /s
Spezifisches Volumen	v	0.001093 m <sup>3</sup> /kg	v	0.00107 m <sup>3</sup> /kg
Spez. isoch. Wärmekapaz.	$c_v$	3518 J/(kg·K)	$c_v$	3615 J/(kg·K)
Spezifische Enthalpie	h	640218 J/kg	h	550311 J/kg
Spez. innere Energie	u	639671 J/kg	u	549775 J/kg
Spezifische Entropie	s	1861 J/(kg·K)	s	1644 J/(kg·K)
Realgasfaktor	Z	0.002786 -	Z	0.00287 -
Oberflächenspannung	$\sigma$	48.35 mN/m	$\sigma$	52.75 mN/m
Therm. Ausdehnungskoeff.	$\beta$	0.001037 1/K	$\beta$	0.000917 1/K
Isentropenexponent	$\kappa$	3912 -	$\kappa$	4226 -
Schallgeschwindigkeit	w	1462 m/s	w	1504 m/s
Dielektrizitätskonstante	$\epsilon$	43.65 -	$\epsilon$	48.14 -

**Stoffwerte von Sattdampf:**

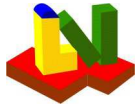
	Zustand 1		Zustand 2	
Dichte	$\rho$	2.669 kg/m <sup>3</sup>	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
Spez. isob. Wärmekapaz.	$c_p$	2413 J/(kg·K)	$c_p$	J/(kg·K)
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0.03103 W/(m·K)	$\lambda$	W/(m·K)
Dynamische Viskosität	$\eta$	0.01402 mPa·s	$\eta$	mPa·s
Kinematische Viskosität	$\nu$	0.000005 m <sup>2</sup> /s	$\nu$	m <sup>2</sup> /s
Prandtl-Zahl	Pr	1.09 -	Pr	-
Temperaturleitfähigkeit	a	4.82E-06 m <sup>2</sup> /s	a	m <sup>2</sup> /s
Spezifisches Volumen	v	0.3747 m <sup>3</sup> /kg	v	m <sup>3</sup> /kg
Spez. isoch. Wärmekapaz.	$c_v$	1761 J/(kg·K)	$c_v$	J/(kg·K)
Spezifische Enthalpie	h	2748117 J/kg	h	J/kg
Spez. innere Energie	u	2560712 J/kg	u	J/kg
Spezifische Entropie	s	6821 J/(kg·K)	s	J/(kg·K)
Realgasfaktor	Z	0.9554 -	Z	-
Therm. Ausdehnungskoeff.	$\beta$	0.002935 1/K	$\beta$	1/K
Isentropenexponent	$\kappa$	1.301 -	$\kappa$	-
Schallgeschwindigkeit	w	493.8 m/s	w	m/s
Dielektrizitätskonstante	$\epsilon$	1.023 -	$\epsilon$	-
Verdampfungsenthalpie	$\Delta h_v$	2107899 J/kg	$\Delta h_v$	J/kg
Verdampfungsentropie	$\Delta s_v$	4960 J/(kg·K)	$\Delta s_v$	J/(kg·K)
Anteil verdampft	x	-	x	-
Enthalpie Naßdampf	hx	J/kg	hx	J/kg
Entropie Naßdampf	sx	J/(kg·K)	sx	J/(kg·K)

**Charakteristische Größen:**

Molmasse	M	18.02 g/mol
Gaskonstante	R	461.5 J/(kg·K)
Kritische Temp.	$T_c$	373.9 °C
Kritischer Druck	$p_c$	2.206E+7 Pa
Kritische Dichte	$\rho_c$	322 kg/m <sup>3</sup>

**Die Gültigkeitsbereiche:**

0.01 °C ≤ $\vartheta$ ≤ 800 °C
0.00612 bar ≤ p ≤ 1000 bar
0.01 °C ≤ $\vartheta$ ≤ 2000 °C
0.00612 bar ≤ p ≤ 500 bar



## Reale log. Temperaturdifferenz für verschiedene Tauscherbauarten

Reale logarithmische Temperaturdifferenz verschiedener Wärmeübertragertypen

---

Rohrbündelwärmeübertrager

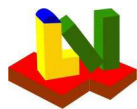
Kennziffer Wärmeübertrager-Bauart		< 50 >
Eintrittstemperatur auf der Außenseite	$\vartheta_{a1}$	151.9 °C
Austrittstemperatur auf der Außenseite	$\vartheta_{a2}$	151.7 °C
Eintrittstemperatur auf der Innenseite	$\vartheta_{i1}$	92.49 °C
Austrittstemperatur auf der Innenseite	$\vartheta_{i2}$	92.69 °C

---

Logarithmische Temperaturdifferenz (Gegenstrom)  $d\vartheta_{\text{Geg}}$  = **59.25** K

Korrekturfaktor FN = **1** -

⇒ Reale logarithmische Temperaturdifferenz  $d\vartheta_m$  = **59.25** K



## Druckverlust in durchströmten Verdampferrohren

### Berechnung lokaler Größen

**Stoffwerte:**

Dichte der Flüssigphase	$\rho_l$	544.8	kg/m <sup>3</sup>
Dichte der Gasphase	$\rho_g$	13.75	kg/m <sup>3</sup>
Dynamische Viskosität der Flüssigphase	$\eta_l$	0.1248	mPa·s
Dynamische Viskosität der Gasphase	$\eta_g$	0.008833	mPa·s

**Geometrie:**

Länge des Verdampferrohres	l	1900	mm
Innendurchmesser des Verdampferrohres	d	16	mm
Relative Rauigkeit	k/d	0.00625	-
Neigungswinkel des Rohres	$\Theta$	0	°

**Randbedingungen:**

Massenstromdichte	m	320.9	kg/(m <sup>2</sup> ·s)
Lokaler Dampfgehalt	x	0.5	-
Dampfgehalt am Eintritt	x1	0	-
Dampfgehalt am Austritt	x2	1	-
Anzahl der Iterationsschritte	n	4	-
Schallgeschwindigkeit	a	211.1	m/s

**Ergebnisse:**

⇒ Froude-Zahl	Fr =	87.57	-	[3]
⇒ Hilfwert aus Froude-Zahl	HW =	48.05	-	[2b]
⇒	1/β =	3.910E+7	-	[2a]
⇒ Volumenanteil Flüssigkeit	β =	2.557E-8	-	

Unterscheidung disperse oder zusammenhängende Phase:

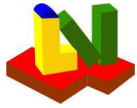
$$\frac{1}{\beta} = 3.910E+7 \leq HW = 48.05 \Rightarrow \text{zusammen} \quad [2]$$

**1. Reibungsdruckabfall****a) Disperse Phase**

⇒ Reynolds-Zahl zusammenhängende Phase	Re_ZP =	53587	-	[6]
⇒ Widerstandsbeiwert	ξ =	0.034	-	[5]
⇒ K2 für β ≤ 0.4 bzw. β > 0.4	K2 =	1.007	-	[7]/[8]
⇒ Örtlicher Reibungsdruckabfall	dp/dl =	1999	Pa/m	[4]

**b) Zusammenhängende Phase**

⇒ Froude-Zahl 1	Fr_1 =	2.27E-12	-	[21]
⇒ Reynolds-Zahl 1	Re_1 =	0.04168	-	[20]
⇒	ψ =	0.000001	-	[19]
⇒	ε_2 =	0.000013	-	[18]
⇒	ε_1 =	0.001288	-	[16]/[17]
⇒	ε =	0.000013	-	[15]
⇒	τ_E =	0.002286	-	[14]
⇒	τ_F =	0.002292	-	[13]
⇒	E =	0.7809	-	[12]
⇒	Φ =	1.005	-	[11]
⇒ Widerstandsbeiwert	ξ =	0.01281	-	[10]
⇒ Örtlicher Reibungsdruckabfall	dp/dl =	3011	Pa/m	[9]



**2. Statischer Druckabfall**

Bereichsunterscheidung für  $1/\beta$ :

Bereich 1:  $1/\beta \leq HW$   
 Bereich 2:  $HW < 1/\beta \leq 500$        $1/\beta = 3.910E+7$   
 Bereich 3:  $500 < 1/\beta \leq 10000$        $HW = 48.05$   
 Bereich 4:  $1/\beta > 10000$        $\Rightarrow$  Bereich 4

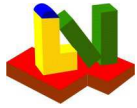
	Bereich	1	2	3	4
$\Rightarrow$	K =	0.9839	[24]		
$\Rightarrow$	$\kappa_{tt}$ =	0.08459		[29]	
$\Rightarrow$	H2 =	0.07799		[28]	
$\Rightarrow$	H1 =	0.0822		[27]	
$\Rightarrow$	H =	2.557E-8		[26]	[30]
$\Rightarrow$ Dampfvolumenanteil	$\alpha$ =	1	[23]	[25]	[25]
$\Rightarrow$ Örtlich statischer Druckabfall $dp/dl$ =		0	Pa/m		[22]

**3. Beschleunigungsdruckabfall**

Impulsfluß  $\dot{I} = 1.506 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$  [33]

**4. Integration über der Verdampferrohrlänge**

$\Rightarrow$  Reibungsdruckverlust  $\Delta p_R = 5928 \text{ Pa}$  [21a]  
 $\Rightarrow$  Statischer Druckverlust  $\Delta p_S = 0 \text{ Pa}$   
 $\Rightarrow$  Beschleunigungsdruckverlust  $\Delta p_B = 7299 \text{ Pa}$  [34a]  
 $\Rightarrow$  Gesamtdruckverlust  $\Delta p_{ges} = 13227 \text{ Pa}$  [1]



## Wärmeübertragung beim Sieden gesättigter Flüssigkeiten -Strömungsformen-

Strömungsformen in horizontalen und wenig geneigten Rohren

### Eingabegrößen:

hydraulischer Durchmesser	d	16 mm
Strömungsdampfgehalt	x	0.9 -
Massenstromdichte	m	320.9 kg/(m <sup>2</sup> ·s)
Oberflächenspannung des Fluids	σ	8.241 mN/m
Dichte der flüssigen Phase	ρ <sub>L</sub>	544.8 kg/m <sup>3</sup>
Dichte der gasförmigen Phase	ρ <sub>G</sub>	13.75 kg/m <sup>3</sup>
Dynamische Viskosität der fl. Phase	η <sub>L</sub>	0.1248 mPa·s
Dynamische Viskosität der gf. Phase	η <sub>G</sub>	0.008833 mPa·s
Neigungswinkel des Rohres	Θ	0 ° ( ≤10° )

### Berechnungsgrößen:

$$X = f ( x ; \rho_G ; \rho_L ; \eta_G ; \eta_L )$$
$$\equiv f ( 0.9 ; 13.75 ; 544.8 ; 0.008833 ; 0.1248 )$$
$$\equiv 0.03235$$

$$\xi_L = 0.3164 / Re_L^{0.25} \equiv 0.3164 / 4114^{0.25} \equiv 0.03951$$

$$Re_L = m \cdot (1 - x) \cdot d / \eta_L$$

$$Re_L = 320.9 \cdot (1 - 0.9) \cdot 0.016 / 0.1248 \equiv 4114$$

$$Re_G = m \cdot x \cdot d / \eta_G$$

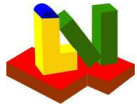
$$Re_G = 320.9 \cdot 0.9 \cdot 0.016 / 0.008833 \equiv 523110$$

$$(Re_L Fr_G')^{0.5} \equiv$$

$$\equiv f ( m ; x ; \rho_G ; \rho_L ; \eta_L ; \Theta )$$

$$\equiv f ( 320.9 ; 0.9 ; 13.75 ; 544.8 ; 0.1248 ; 0 )$$

$$\equiv 547.1$$



$$\begin{aligned} Fr_{Gm}^{0.5} &\equiv \\ &\equiv f ( \quad \dot{m} \quad ; \quad \dot{x} \quad ; \quad d \quad ; \quad \rho_L \quad ; \quad \rho_G \quad ) \\ &\equiv f ( \quad 320.9 \quad ; \quad 0.9 \quad ; \quad 0.016 \quad ; \quad 544.8 \quad ; \quad 13.75 \quad ) \\ &\equiv \quad \mathbf{8.422} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (Fr \text{ Eu})_L^{0.5} &\equiv \\ &\equiv f ( \quad \xi_L \quad ; \quad \dot{m} \quad ; \quad \dot{x} \quad ; \quad d \quad ; \quad \rho_L \quad ; \\ &\quad \rho_G \quad ; \quad \Theta \quad ) \\ &\equiv f ( \quad \mathbf{0.03951} \quad ; \quad 320.9 \quad ; \quad 0.9 \quad ; \quad 0.016 \quad ; \quad 544.8 \quad ; \\ &\quad 13.75 \quad ; \quad 0 \quad ) \\ &\equiv \quad \mathbf{0.02116} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (We/Fr)_L &\equiv f ( \quad d \quad ; \quad \rho_L \quad ; \quad \sigma \quad ) \\ &\equiv f ( \quad 0.016 \quad ; \quad 544.8 \quad ; \quad 8.241 \quad ) \equiv \quad \mathbf{166} \end{aligned}$$

$$\tilde{h} = \mathbf{0.05871} \quad \varepsilon = \mathbf{0.9848} \quad \Phi = \mathbf{5.445}$$

$$\tilde{f}_L = f ( \tilde{h} ) \equiv f ( \mathbf{0.05871} ) \equiv \mathbf{0.01863}$$

$$\tilde{f}_G = \pi / 4 - \tilde{f}_L \equiv \pi / 4 - \mathbf{0.01863} \equiv \mathbf{0.7668}$$

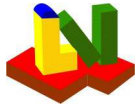
$$\tilde{U}_i = f ( \tilde{h} ) = f ( \mathbf{0.05871} ) \equiv \mathbf{0.4701}$$

**Strömungsart:**

- 0 = unbekannte Strömung
- 1 = Schichtenströmung
- 2 = Wellenströmung
- 3 = Blasenströmung
- 4 = Schwall-/Propfenströmung
- 5 = turbulente Gas- und laminare Flüssigkeitsströmung
- 6 = Nebelströmung
- 7 = Ringströmung

⇒ Strömungsart: **7**





**Berechnungsgrößen:**

$$p^* = p / p_c = 500000 / 3370000 = 0.1484$$

$$n(p^*) = 0.4966$$

$$F(p^*) = 1.185$$

$$F(d) = 0.7906$$

$$F(W) = 1.097$$

$$F(m;x) = 0.5342$$

$$\frac{\alpha(z)_B}{\alpha_0} = \psi \cdot C_F \cdot \left[ \frac{\alpha}{\alpha_0} \right]^n \cdot F(p^*) \cdot F(d) \cdot F(W) \cdot F(m;x)$$

$$= 0.8235 \cdot 1.169 \cdot \left[ \frac{188050}{20000} \right]^{0.4966} \cdot 1.185 \cdot 0.7906 \cdot 1.097 \cdot 0.5342$$
$$= 1.609$$

$$\Rightarrow \alpha(z)_B = 4938 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$