Lastannahmen für Sicherheitsventile in Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung (Teil II)

Dr. sc. techn. Bernd GLÜCK
VEB Forschung und Rationalisierung TGA

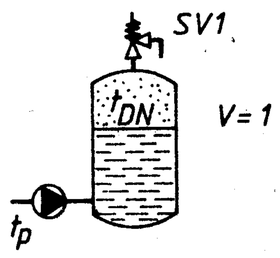
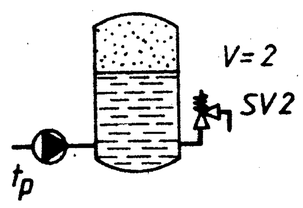
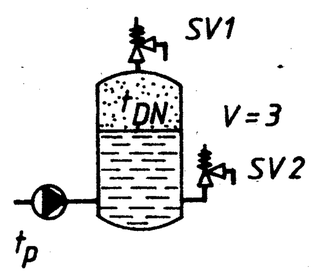
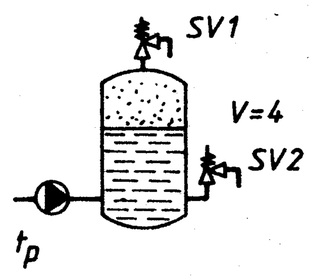
Spezielle Lastfälle

Für die Bemessung der Sicherheitsventile sind von Interesse:

- **Ansprechdruck** p_A
- **Abzuführende Masseströme**

  $\dot{m}_W$ Wasserstrom
  $\dot{m}_{WD}$ Wasserdampfstrom (Sattdampfstrom, Heißdampfstrom)
  $\dot{m}_D$ Druckmedienstrom

Tabelle 1 Lastannahmen bei Pumpenförderung (P)

Schaltung / Variante	Phase	Abblasestrom	Dichte
	I 1) II	$\dot{m}_{D1P}$ $\dot{m}_{W1P}$	$\varrho_{D1P} = \varrho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ $\varrho_{W1P} = \varrho_W(t_P)$
		$\dot{m}_{W2P}$	$\varrho_{W2P} = \varrho_W(t_P)$
	I 1) II 2)	$\dot{m}_{D1P}$ $\dot{m}_{W2P}$	$\varrho_{D1P} = \varrho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ $\varrho_{W2P} = \varrho_W(t_P)$
		$\dot{m}_{W2P}$	$\varrho_{W2P} = \varrho_W(t_P)$

1) Bei W=1 entfällt Phase I.
2) Lastannahme nicht eindeutig.

Tabelle 2 Lastannahmen bei Wasserzufluß über eine Pumpen-Stellventil-Kombination (PV)

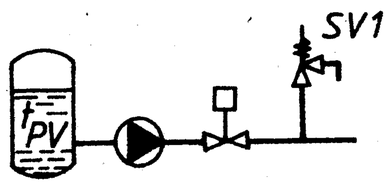
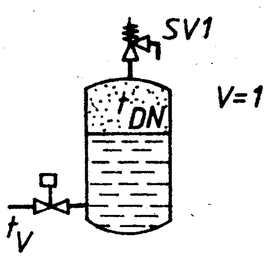
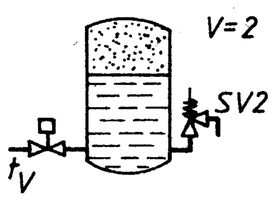
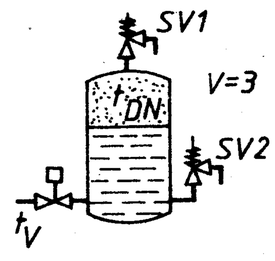
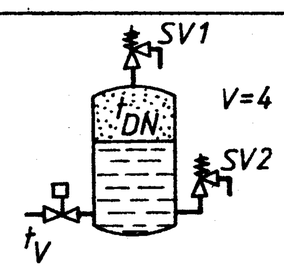
Schaltung / Variante	Abblasestrom	Dichte
	$\dot{m}_{W1PV}$	$\varrho_{W1PV} = \varrho_W(t_{PV})$

Tabelle 3 Lastannahmen bei Stellventil-Zufluß (V)

Schaltung / Variante	Phase	Abblasestrom	Dichte
	I 1) II Last bei Teilverdampfung nach dem Stellventil: I 1) II	$\dot{m}_{D1V}$ $\dot{m}_{W1V}$ $\dot{m}_{D1V}$ $\left[\begin{array}{l}\dot{m}_{WD1V}\\ \dot{m}_{W1V}\end{array}\right.$	$\varrho_{D1V} = \varrho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ $\varrho_{W1V} = \varrho_W(t_V)$ $\varrho_{D1V} = \varrho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ $\left[\begin{array}{l}\varrho_{WD1V} = \varrho_S(p_{A,1})\\ \varrho_{W1V} = \varrho_W(t_S)\end{array}\right]$
		$\dot{m}_{W2V}$	$\varrho_{W2V} = \varrho_W(t_V)$
		Bei Teilverdampfung nach dem Stellventil ist diese Anordnung des Sicherheitsventils nicht zulässig!	
	I 1) II 2) Last bei Teilverdampfung nach dem Stellventil: I 1) II	$\dot{m}_{D1V}$ $\dot{m}_{W2V}$ $\dot{m}_{D1V}$ $\left[\begin{array}{l}\dot{m}_{WD1V}\\ \dot{m}_{W1V}\end{array}\right.$	$\varrho_{D1V} = \varrho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ $\varrho_{W2V} = \varrho_W(t_V)$ $\varrho_{D1V} = \varrho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ $\left[\begin{array}{l}\varrho_{WD1V} = \varrho_S(p_{A,1})\\ \varrho_{W1V} = \varrho_W(t_S)\end{array}\right]$
		$\dot{m}_{W2V}$	$\varrho_{W2V} = \varrho_W(t_V)$
		Last bei Teilverdampfung nach dem Stellventil:	
	I 1)2) II 2)	$\dot{m}_{D1V}$ $\left[\begin{array}{l}\dot{m}_{WD1V}\\ \dot{m}_{W1V}\end{array}\right.$	$\varrho_{D1V} = \varrho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ $\left[\begin{array}{l}\varrho_{WD1V} = \varrho_S(p_{A,1})\\ \varrho_{W1V} = \varrho_W(t_S)\end{array}\right]$

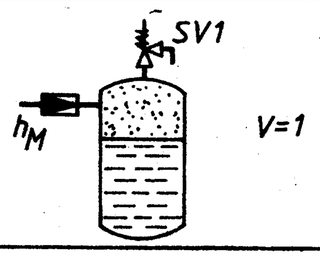
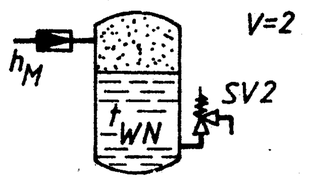
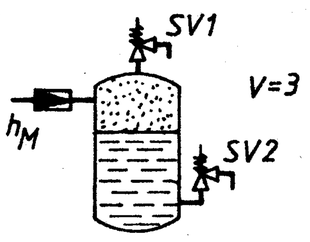
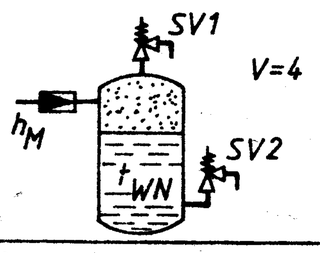
1) Bei W=1 entfällt Phase I. 2) Lastannahme nicht eindeutig.
Beide Masseströme gehören zu einem Lastfall.
t_S ist die Siedetemperatur des Wassers beim Abblasedruck.

- **Dichte der Masseströme**

  ϱ_W Dichte des Wassers (ϱ_{WN} bezogen auf normale Behältertemperatur)
  ϱ_{WD} Dichte des Wasserdampfes (Sattdampfdichte ϱ_S; Heißdampfdichte ϱ_H)
  ϱ_D Dichte des Druckmediums (ϱ_{DN} bezogen auf normale Behältertemperatur).

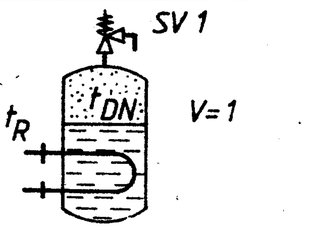
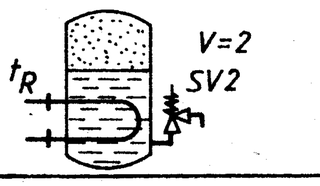
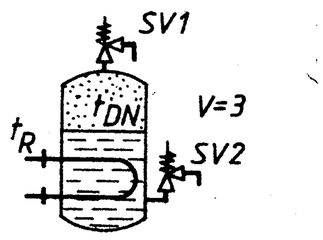
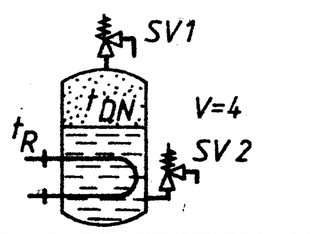
Als Druckmedium wird in der heizungstechnischen Praxis Stickstoff, Luft und Wasserdampf verwendet. Im Abblasefall sei der Massestrom stets mit $\dot{m}_D$ und die zugehörige Dichte mit ϱ_D bezeichnet. Der Wasserdampfstrom $\dot{m}_{WD}$ der Dichte ϱ_{WD} ist damit nicht identisch, denn er entsteht beim Phasenwechsel des Wassers infolge Verdampfung durch Beheizen des Behälterinhalts, durch Entspannung des zugeführten Wassers oder durch direkte Dampfeinleitung (Mischvorwärmer, Rohrreißer).
Zur quantitativen Berechnung der Masseströme existiert eine Vielzahl bekannter Algorithmen. Eine zusammenfassende, ausführliche Publikation befindet sich in Vorbereitung.
Die Art des Massestroms und die Reihenfolge der Sicherheitsventil-Beaufschlagung führt immer wieder zu Fragen. Deshalb sei eine Zusammenstellung (Tabellen 1 bis 7) der relevanten Lastfälle gegeben. Die zusätzlichen Indizes 1 bzw. 2 ($p_{A,1}$; $p_{A,2}$; $\dot{m}_{W,1}$; $\dot{m}_{W,2}$; $\dot{m}_{WD,1}$; $\dot{m}_{D,1}$; $\varrho_{W,1}$; $\varrho_{W,2}$; $\varrho_{WD,1}$; $\varrho_{D,1}$) nehmen auf die Zuordnung zum Sicherheitsventil SV1 bzw. SV2 Bezug.

Tabelle 4 Lastannahmen bei Druckminderer-Zufluß (M)

Schaltung / Variante	Phase	Abblasestrom	Dichte
		$\dot{m}_{D1M}$	$\varrho_{D1M} = \varrho_D(t, p_{A,1})$
	I 1) II	$\dot{m}_{W2M}$ $\dot{m}_{D2M}$	$\varrho_{W2M} = \varrho_{WN}(t_{WN})$ $\varrho_{D2M} = \varrho_D(t, p_{A,2})$
		$\dot{m}_{D1M}$	$\varrho_{D1M} = \varrho_D(t, p_{A,1})$
	I 1) II 2)	$\dot{m}_{W2M}$ $\dot{m}_{D1M}$	$\varrho_{W2M} = \varrho_{WN}(t_{WN})$ $\varrho_{D1M} = \varrho_D(t, p_{A,1})$

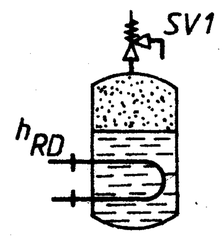
1) Bei W=0 entfällt I. 2) Lastannahme nicht eindeutig.
t ist für $h_M \neq$ const (konstante spez. Enthalpie beim Drosselvorgang zu bestimmen.

Tabelle 5 Lastannahmen bei Wasserzufluß infolge Rohrbruch (R)

Schaltung / Variante	Phase	Abblasestrom	Dichte
	I 1) II Last bei Teilverdampfung: I 1) II	$\dot{m}_{D1R}$ $\dot{m}_{W1R}$ $\dot{m}_{D1R}$ $\dot{m}_{WD1R}$ $\dot{m}_{W1R}$	$\varrho_{D1R} = \varrho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ $\varrho_{W1R} = \varrho_W(t_R)$ $\varrho_{D1R} = \varrho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ $\varrho_{WD1R} = \varrho_S(p_{A,1})$ $\varrho_{W1R} = \varrho_W(t_S)$
		$\dot{m}_{W2R}$	$\varrho_{W2R} = \varrho_W(t_R)$
	I 1) II 2)	$\dot{m}_{D1R}$ $\dot{m}_{W2R}$	$\varrho_{D1R} = \varrho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ $\varrho_{W2R} = \varrho_W(t_R)$
		$\dot{m}_{W2R}$	$\varrho_{W2R} = \varrho_W(t_R)$
	I 1) 2) II 2)	$\dot{m}_{D1R}$ $\dot{m}_{WD1R}$ $\dot{m}_{W1R}$	$\varrho_{D1R} = \varrho_{DN}(t_{DN}; p_{A,1})$ $\varrho_{WD1R} = \varrho_S(p_{A,1})$ $\varrho_{W1R} = \varrho_W(t_S)$

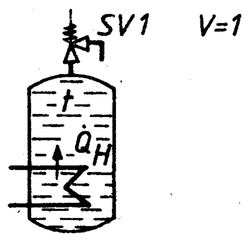
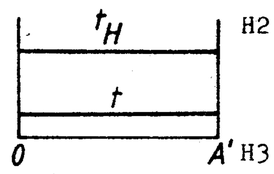
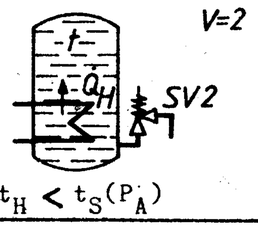
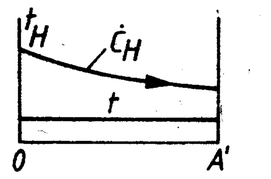
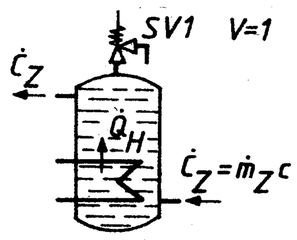
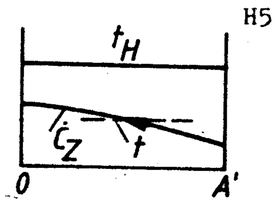
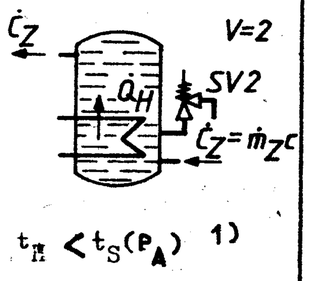
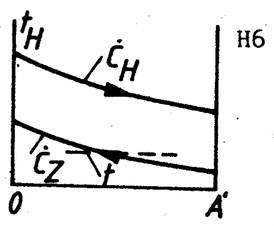
1) Bei W=1 entfällt Phase I. 2) Lastannahme nicht eindeutig.
[ ] Beide Massesträme gehören zu einem Lastfall. t_S ist die Siedetemperatur des Wassers beim Abblasedruck.

Tabelle 6 Lastannahme bei Dampfzufluß infolge Rohrbruch (RD)

Schaltung / Variante	Phase	Abblasestrom	Dichte
		$\dot{m}_{WD1RD}$	$\varrho_{WD1RD} = \varrho_H(t; p_{A,1})$

t ist für h_{RD} = const (konstante spezifische Enthalpie beim Ausströmvorgang) zu bestimmen.

Tabelle 7 Lastannahmen bei Wärmezufuhr (Heizung) (H)

Schaltung / Variante	Lastfall	Abblasestrom	Dichte
Aufheizung des abgesperrten Behälter inhalts			
		H1 1) H2 H3	$\dot{m}_{W1H1}$ $\varrho_{W1H1} = \varrho_W(t)$ $\dot{m}_{W2H1}$ $\varrho_{W2H1} = \varrho_W(t)$ $\dot{m}_{W1H2}$ $\varrho_{W1H2} = \varrho_W(t)$ $\dot{m}_{W2H2}$ $\varrho_{W2H2} = \varrho_W(t)$ $\dot{m}_{W1H3}$ $\varrho_{W1H3} = \varrho_W(t)$ $\dot{m}_{W2H3}$ $\varrho_{W2H3} = \varrho_W(t)$
			
Aufheizung des zirkulierenden Anlageninhalts bei verhinderter Wärmeabfuhr			
		H4 1) H5	$\dot{m}_{W1H4}$ $\varrho_{W1H4} = \varrho_W(t)$ $\dot{m}_{W2H4}$ $\varrho_{W2H4} = \varrho_W(t)$ $\dot{m}_{W1H5}$ $\varrho_{W1H5} = \varrho_W(t)$ $\dot{m}_{W2H5}$ $\varrho_{W2H5} = \varrho_W(t)$
		H6	$\dot{m}_{W1H6}$ $\varrho_{W1H6} = \varrho_W(t)$ $\dot{m}_{W2H6}$ $\varrho_{W2H6} = \varrho_W(t)$

1) H1 und H4 sind nur bei Einsatz zugelassener Sicherheitstemperaturbegrenzungseinrichtungen mit $t_{max} < t_S(p_A)$ anwendbar!

Berichtigung

Durch Versehen der Redaktion machen sich nachstehende Korrekturen an den Tabellen:

1. Alle Buchstaben p im Zusammenhang mit dem Ansprechdruck, also p_A, $p_{A,1}$, $p_{A,2}$, müssen Kleinbuchstaben sein.
2. Alle Buchstaben P als Kurzzeichen für Pumpe oder Pumpe-Stellventil, also t_p, t_{PV} müssen Großbuchstaben sein.
   Dies gilt für sämtliche Tabellen.
3. Tab. 7 Fortsetzung (S. 92) – Spalte Lastfall, 3. Diagramm von oben
   Die Kurve im Bereich A " muß eindeutig waagerecht verlaufen.
   – Zeile Erläuterungen am Schluß der Tabelle
   Im Klammerausdruck muß es richtig heißen: (t = Endtemperatur der Aufheizung von m_Z)

Wir bitten unsere Leser und den Autor um Entschuldigung.

Tabelle 7 Fortsetzung

Schaltung /Variante	Lastfall	Abblasestrom	Dichte
Verdampfen des abgesperrten Behälterinhalts			
V=1; SV1; $p_{A,1}$; $\dot{Q}_H$; $t_H > t_S(p_{A,1})$	$\dot{Q}_H$ = const; t_H; $t_S(PA,1)$; 0; A"; t_H; $\dot{C}_H$; $t_S(PA,1)$; 0; A"	H7 $\dot{m}_{WD1H7}$	$\varrho_{WD1H7} = \varrho_S(p_{A,1})$
		H8 $\dot{m}_{WD1H8}$	$\varrho_{WD1H8} = \varrho_S(p_{A,1})$
		H9 $\dot{m}_{WD1H9}$	$\varrho_{WD1H9} = \varrho_S(p_{A,1})$
Aufheizen/Verdampfen des Behälterinhalts bei konstanter Zuströmung			
V=1; SV1; $p_{A,1}$; $\dot{Q}_H$; $\dot{C}_Z = \dot{m}_Z c$	$\dot{Q}_H$ = const; t_H; t_S; $\dot{C}_Z$; A"; A'	H10 [$\dot{m}_{W1H10}$	$\varrho_{W1H10} = \varrho_W(t_S)$
		$\dot{m}_{Wd1H10}$	$\varrho_{WD1H10} = \varrho_S(p_{A,1})$]
		H11 [$\dot{m}_{W1H11}$	$\varrho_{W1H11} = \varrho_W(t_S)$
		$\dot{m}_{WD1H11}$	$\varrho_{WD1H11} = \varrho_S(p_{A,1})$]
V=2 2); SV2; $\dot{Q}_H$; $\dot{C}_Z = \dot{m}_Z c$	t_H; $\dot{C}_H$; t_S; $\dot{C}_Z$; A"; A'	H12 [$\dot{m}_{W1H12}$	$\varrho_{W1H12} = \varrho_W(t_S)$
		$\dot{m}_{WD1H12}$	$\varrho_{WD1H12} = \varrho_S(p_{A,1})$]

[ ] Drei mögliche Versionen sind zu unterscheiden:
$0 < \dot{m}_{WD} < \dot{m}_Z$: Beide Masseströme ($\dot{m}_W$; $\dot{m}_{WD}$) gehören zum Lastfall.
$\dot{m}_{WD} \geq \dot{m}_Z$: Es ist nur $\dot{m}_{WD}$ vorhanden.
$\dot{m}_{WD} = 0$: Es ist nur $\dot{m}_W = \dot{m}_Z$ bei $\varrho_W = \varrho_W(t)$ abzuleiten (t = Endtemperatur von $\dot{m}_Z$).

2) In Verbindung mit H11 oder H12 nur für $t_H < t_S(p_{A,2})$ und mit H10 nur bei Einsatz einer zugelassenen Sicherheitstemperaturbegrenzungseinrichtung mit $t_{max} < t_S(p_A)$ anwendbar!

Zur Charakterisierung der Lastfälle dienen die nachfolgenden Kurzzeichen:

P Unkontrollierter Wasserzufluß durch Pumpenförderung
PV Unkontrollierter Wasserzufluß über eine Pumpe-Stellventil-Kombination
V Unkontrollierter Wasserzufluß über ein Stellventil
M Unkontrollierter Druckmedienzufluß über einen Druckminderer
R Unkontrollierter Wasserzufluß infolge Rohrreißer
RD Unkontrollierter Dampfzufluß infolge Rohrreißer
Ausdehnung des Wassers im abgesperrten Behälter:
H1 Konstante Heizleistung bei Temperaturbegrenzung
H2 Dampfbeheizte Heizfläche
H3 Wasserbeheizte Heizfläche
Ausdehnung des Wassers im geschlossenen Kreislauf:
H4 Konstante Heizleistung bei Temperaturbegrenzung
H5 Dampfbeheizte Heizfläche
H6 Wasserbeheizte Heizfläche
Verdampfung im abgesperrten Behälter:
H7 Konstante Heizleistung
H8 Dampfbeheizte Heizfläche
H9 Wasserbeheizte Heizfläche
Erwärmung bzw. Verdampfung des zufließenden Wassers bei abgesperrtem Abfluß:
H10 Konstante Heizleistung
H11 Dampfbeheizte Heizfläche
H12 Wasserbeheizte Heizfläche.

Die Bezugsparameter für die Dichte vor dem Sicherheitsventil – die Temperatur und ggf. der Ansprechdruck – sind vermerkt.

Bei der Kennzeichnung der Phasen bedeuten:
W = 0 Vollfüllung des Behälters mit kompressiblem Medium (Luft, Stickstoff, Wasserdampf)
W = 1 Vollfüllung des Behälters mit Wasser.

Beispiel

Ein Wärmeübertrager (Heißwasser/Warmwasser) wird primärseitig mit den Parametern p_R = 1,7 MPa und t_R = 190 °C beaufschlagt. Es sind die Abblaseströme im Falle eines Rohrbruchs (Innendurchmesser d = 0,014 m) für die Absicherungsvariante V = 1 bei einem Ansprechdruck des Sicherheitsventils $p_{A,1}$ = 0,850 MPa zu ermitteln.

Lösung

Die Dichte des ausströmenden Wassers beträgt für t_R = 190 °C nach entsprechenden Tabellen
ϱ_W = 876 kg/m³.
Da zu t_R = 190 °C ein Siededruck von 1,255 MPa gehört, die Absicherung des Wärmeübertragers aber bei $p_{A,1}$ = 0,850 MPa liegt, wird das aus der Rohrbruchstelle austretende Wasser teilweise verdampfen. Für den Massestrom des austretenden Wassers gilt in diesem Fall die zugeschnittene Größengleichung

$$\dot{m} = \sqrt{2 \cdot 10^{-3} \cdot A_D \alpha} \sqrt{\varrho_W (p_R - p_{A,1})} \text{ in kg/s} \tag{14}$$

mit

A_D	mm²	Fläche der Bruchstelle
α	–	Ausflußbeiwert.

Nach /4/ sind zwei freie Rohrquerschnitte für A_D anzusetzen, da von beiden Seiten der Rohrbruchstelle Wasser ausfließen kann.
Weiter ist der Ausflußbeiwert mit α = 0,5 angegeben. Somit gilt für

$$A_D \alpha = 2\pi \frac{d^2}{4} \cdot 0{,}5 = \pi \frac{d^2}{4} \text{ in mm}^2 \tag{15}$$

mit

d	mm	Rohrinnendurchmesser.

Die Gln. (15) und (14) liefern:

$$A_D \alpha = \pi \frac{14^2}{4} = 154 \text{ mm}^2$$

$$\dot{m} = \sqrt{2 \cdot 10^{-3} \cdot 154} \cdot \sqrt{876 \cdot (1{,}7 - 0{,}850)} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 5{,}94 \text{ kg/s}.$$

Um die daraus entstehenden Dampf- und Wasseranteile zu bestimmen, müssen zunächst die zur Auswertung der Gl. (10) benötigten Enthalpien bestimmt werden. Zugehörig zu $p_{A,1}$ gelten die Werte
h_{WS} = 732 kJ/kg und Δh_V = 2 038,8 kJ/kg.
Sie sind direkt den Wasserdampftafeln zu entnehmen. Die Enthalpie des in das Rohrregister eintretenden Wassers beträgt gemäß Dampftafel
h_W = 807,7 kJ/kg.
Der Dampfgehalt des entspannten Massestroms $\dot{m}$ berechnet sich nach Gl. (10):

$$x_{WD} = \frac{807{,}7 - 732}{2038{,}8} = 0{,}037.$$

Damit ergeben sich nach Gl. (11) und (12) die Teilströme:

$$\dot{m}_{WD1R} = 0{,}037 \cdot 5{,}94 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0{,}22 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{W1R} = (5{,}94 - 0{,}22) \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 5{,}72 \text{ kg/s}.$$

Die zugehörigen Dichten betragen:
ϱ_{WD1R} = 4,41 kg/m³; ϱ_{W1R} = 894 kg/m³.
Da der Wärmeübertrager voll mit Wasser gefüllt war (W = 1), tritt nach Tabelle 5 nur die berechnete Phase II auf.

Literatur (Teil II)

/1/ TGL 32 903/02: Behälter und Apparate, Festigkeitsberechnung. 1987
/2/ TGL 32 898/02: Dampf- und Heißwasserkessel, Festigkeitsberechnung. 1979
/3/ TGL 22 160/01: Rohrleitungen aus Stahl, Festigkeitsberechnung. 1984
/4/ TGL 23 043/01: Sicherheitstechnische Ausrüstung für den Schutz von Heizwasseranlagen, 1988