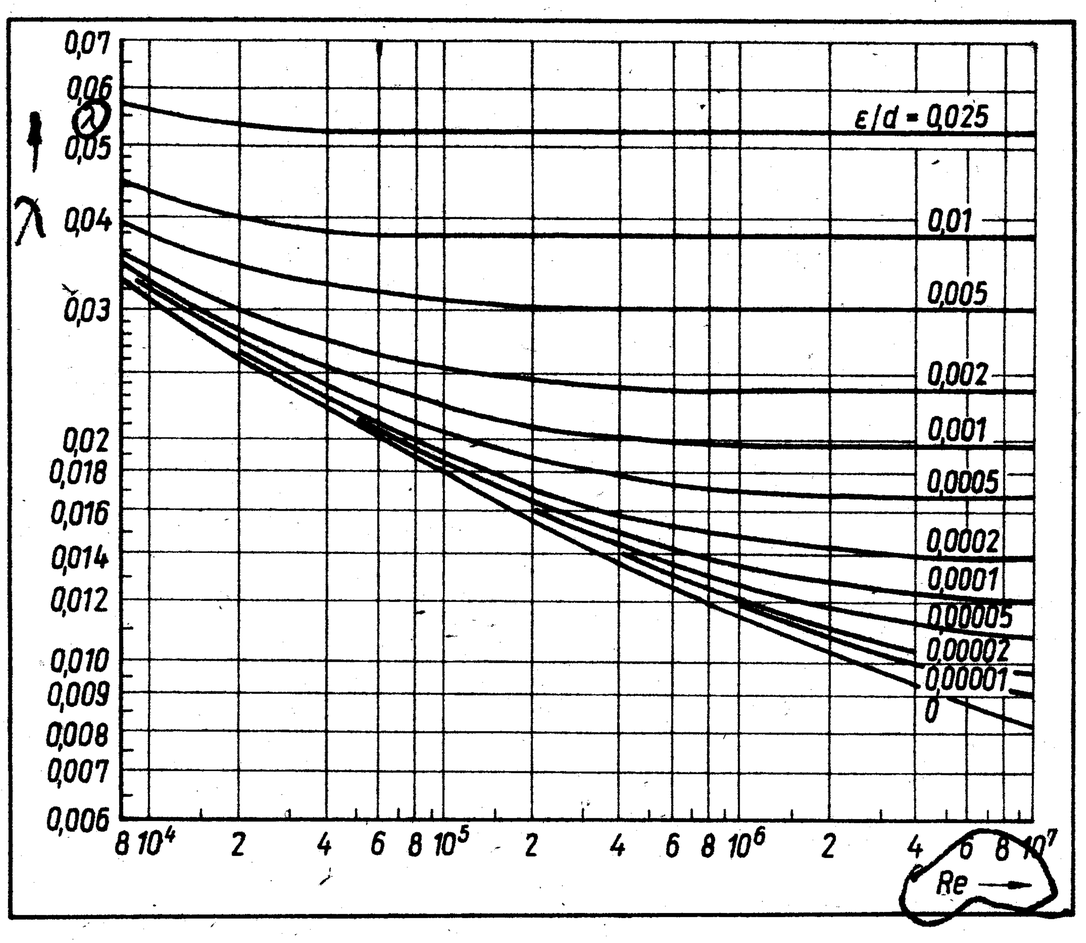
Druckmäßige Nachrechnung der Zu- und Abblaseleitungen von Sicherheitsventilen in Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung

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

Um die Funktionstüchtigkeit der installierten Sicherheitsventile zu gewährleisten, dürfen die Druckverluste in den Zuleitungen und die Gegendrücke am Eintritt der Abblaseleitung bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten.
In /1/ und einigen Herstellerdokumentationen sind Berechnungsverfahren für die zulässigen Rohrleitungslängen angegeben. Dabei wird auf die strömungstechnischen und geometrischen Daten der Sicherheitsventile bezogen. Diese Darstellungen werden damit begründet, daß vielen Anwendern die Druckverlustrechnung für Rohrleitungssysteme wesensfremd ist. Ingenieure der Technischen Gebäudeausrüstung sollten jedoch die üblichen Algorithmen beibehalten, da diese übersichtlicher und vertrauter sind. Sie werden nachfolgend unter den speziellen Bedingungen der möglichen Ein- und Zweiphasenströmung zusammengestellt.

1. Druckverlustermittlung

Die Rechnung kann nach /2/ auf manueller und maschineller Basis erfolgen. Für die **inkompressible** Strömung gelten die bekannten Zusammenhänge



1 Rohrreibungsbeiwert λ für gerade, turbulent durchströmte Rohre in Abhängigkeit der *Reynolds*-Zahl und der relativen Rauhigkeit

$$\Delta p = \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma\zeta\right) \frac{\varrho}{2} w^2 = \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma\zeta\right) \frac{w^2}{2v} = Rl + S\Sigma\zeta \tag{1}$$

$$w = \frac{4\dot{m}}{\varrho \pi d^2} = \frac{4\dot{m}v}{\pi d^2} \tag{2}$$

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\eta \pi d} = \frac{wd}{\eta v} \tag{3}$$

$\lambda = \lambda(\varepsilon/d; Re)$ nach Bild 1

mit den Größen

l	Rohrlänge	ϱ	Dichte
d	Rohrinnendurchmesser	v	Spezifisches Volumen
λ	Rohrreibungsbeiwert (Näherung: $\lambda = 0{,}02$)	η	Dynamische Viskosität
		Re	*Reynolds*-Zahl
ε	Rohrrauhigkeit	R	Spezifischer Druckverlust
$\Sigma\zeta$	Summe der Einzelwiderstände	S	Staudruck
$\dot{m}$	Massestrom		(R und S aus /2, Tabellen/).
w	Geschwindigkeit		

Die Eigenschaften der **kompressiblen** Fluide beachtend, kann analog /2, S. 143/ ausgehend vom Austrittsdruck p_2 der Eintrittsdruck p_1 ermittelt werden. Mit den Vereinfachungen – isothermer Zustandsverlauf, konstante kinetische Energie – folgt

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma\zeta\right) \frac{w_2^2}{v_2} p_2}, \tag{4}$$

wobei die Gln. (2) und (3), Bild 1 sowie die vorgenannte Legende weiterhin gelten.
Ermittelt man den Druckverlust Δp nach dem für inkompressible Fluide gültigen Verfahren [Gl. (1)] mit den entsprechenden geometrischen Größen und den zum Austrittszustand 2 zugehörigen Zustands- und Stoffwerten (p_2, w_2, v_2, η_2), so erhält Gl. (4) die Form

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + 2\Delta p\, p_2}. \tag{5}$$

Für den speziellen Fall der **Zweiphasenströmung** (Naßdampf) ist der in /2, S. 212/ angegebene Algorithmus für waagerechte Rohrleitungen zu verwenden. Die Gln. (1) bis (3) sind bezogen auf jede Phase (f – Wasser und g – Dampf) anzuwenden und Δp_f bzw. Δp_g zu berechnen. Mit dem sogenannten *Lockhart-Martinelli*-Parameter

$$X_{LM} = \sqrt{\frac{\Delta p_f}{\Delta p_g}} \tag{6}$$

folgt aus Bild 2 der Korrekturfaktor Φ_f. Damit ergibt sich der Druckverlust der Zweiphasenströmung

$$\Delta p_Z = \Phi_f^2 \, \Delta p_f. \tag{7}$$

Die mittlere Geschwindigkeit des Zweiphasengemischs folgt aus den Geschwindigkeiten der Einzelphase w_f und w_g zu

$$w = w_g + w_f. \tag{8}$$

2. Nachrechnung der Zuleitung

Nach /1/ gelten für den zulässigen Druckverlust

$$\Delta p_{Zu,\,zul} \leqq 0{,}03\,(p_A - 0{,}1\ \text{MPa}). \tag{9}$$

Der **Ansprechdruck** des Sicherheitsventils p_A sei hierbei als **Absolutdruck** verstanden. Die in Gl. (9) gegebene Aussage gilt im Bereich der Heizungstechnik praktisch uneingeschränkt, da die Schließdruckdifferenzen der Ventile in der Regel $\geqq 5\,\%$ sind und somit weitere Nebenbedingungen entfallen.

Es ist am rationellsten, einen geometrisch fixierten Vorschlag für eine Zuleitung bezüglich der Geschwindigkeit w und des Druckverlustes Δp_{Zu} nachzurechnen und je nach Ergebnis gegebenenfalls zu verändern. Als Maximalgeschwindigkeiten werden empfohlen:

Wasser < 3 m/s
Gas/Dampf < 60 m/s
Naßdampf < 40 m/s.

Wegen des geringen zulässigen Druckabfalls [Gl. (9)] können in der Zuleitung auch für kompressible Fluide stets die hydrodynamischen Beziehungen angesetzt werden.

Beispiel 1 (Wasserabströmung)

Der Wasserstrom $\dot{m}_W = 5{,}2$ kg/s ($t = 60$ °C) soll über ein Proportionalsicherheitsventil mit dem Ansprechdruck $p_A = 0{,}65$ MPa in ein Auffangsystem mit dem Gegendruck $p_G = 0{,}3$ MPa abgeleitet werden. Es ist die in Gl. (9) formulierte Forderung zu überprüfen, wenn die Zuleitung die im Bild 3 skizzierte Form aufweist.

Lösung

Aus /2, S. 265/ kann für $t = 60$ °C; $\dot{m}_W = 5{,}2$ kg/s; $d = 51{,}2$ mm abgelesen werden:

$R = 1303$ Pa; $w = 2{,}6$ m/s; $S = 3243$ Pa.

Die Summe der Einzelwiderstandsbeiwerte ergibt sich nach /2, S. 469, 470/ zu:

Einlauf	$\zeta = 0{,}5$
5 Bogen	$\zeta = 1{,}0$
	$\Sigma\zeta = 1{,}5.$

Damit berechnet sich der Gesamtdruckverlust der Zuleitung nach Gl. (1):

$\Delta p_{Zu} = (1303 \cdot 8 + 3243 \cdot 1{,}5)$ Pa $= 15289$ Pa.

Der zulässige Druckverlust gemäß Gl. (9) beträgt:

$\Delta p_{Zu,\,zul} = 0{,}03 \cdot (0{,}65 - 0{,}1)$ MPa $= 16\,500$ Pa.

Die angenommene Zuleitung entspricht somit den Forderungen.

Beispiel 2 (Naßdampfabströmung)

Es ist der Druckverlust in der Zuleitung (ND 100; $d = 100$ mm; $l = 15$ m; $\Sigma\zeta = 1{,}5$) eines Sicherheitsventils, das mit Naßdampf ($x_{WD} = 0{,}037$; $\dot{m}_{ND} = 5{,}94$ kg/s; $p_A = 0{,}85$ MPa) beaufschlagt wird, zu berechnen.

Lösung

Es gelten die Zustands- und Stoffwerte:

Flüssigphase	Gasphase
$v_f = v' = 0{,}0011182$ m³/kg	$v_g = v'' = 0{,}22687$ m³/kg
$\eta_f = \eta' = 155{,}9 \cdot 10^{-6}$ kg/(s m)	$\eta_g = \eta'' = 14{,}82 \cdot 10^{-6}$ kg/(s m).

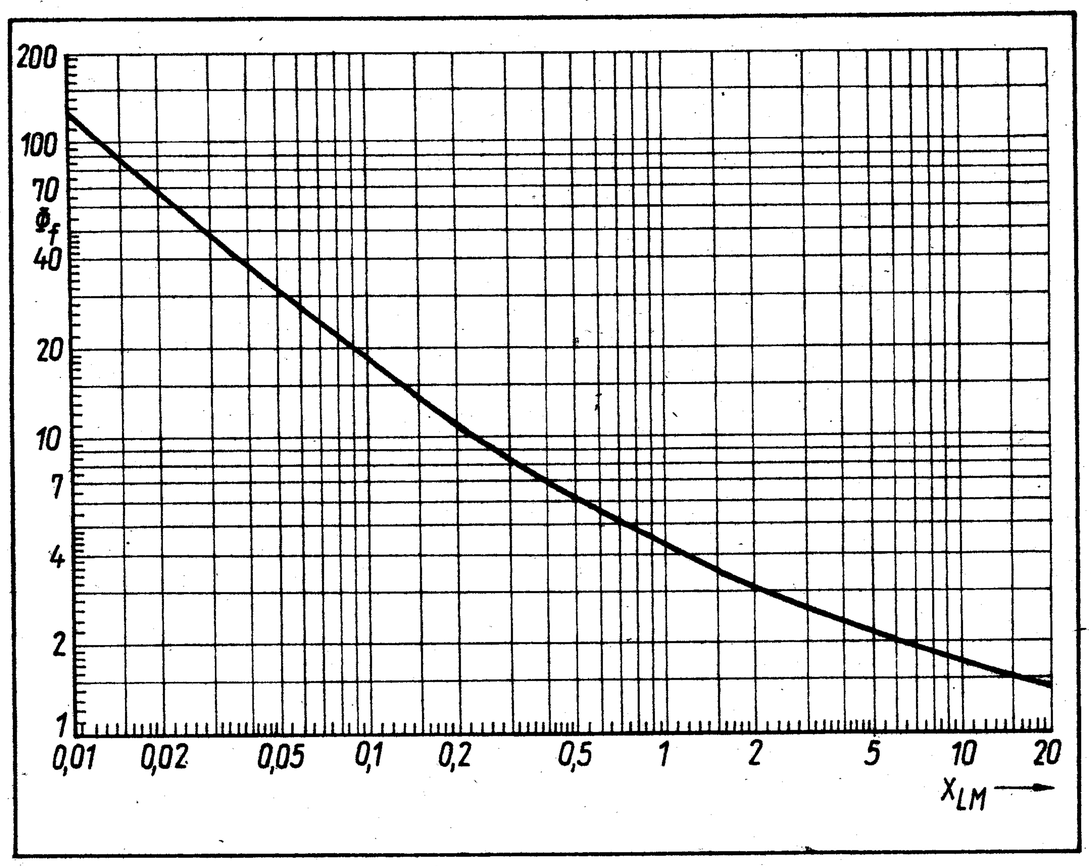
Damit folgen die fiktiven Geschwindigkeiten der Einzelphasen – sie füllen jeweils den Gesamtquerschnitt aus – und die zugehörigen *Reynolds*-Zahlen gemäß den Gln. (2) und (3):

$$w_f = \frac{4 \cdot 5{,}94 \cdot (1 - 0{,}037) \cdot 0{,}0011182}{\pi \cdot 0{,}1^2}\ \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0{,}81\ \text{m/s}$$

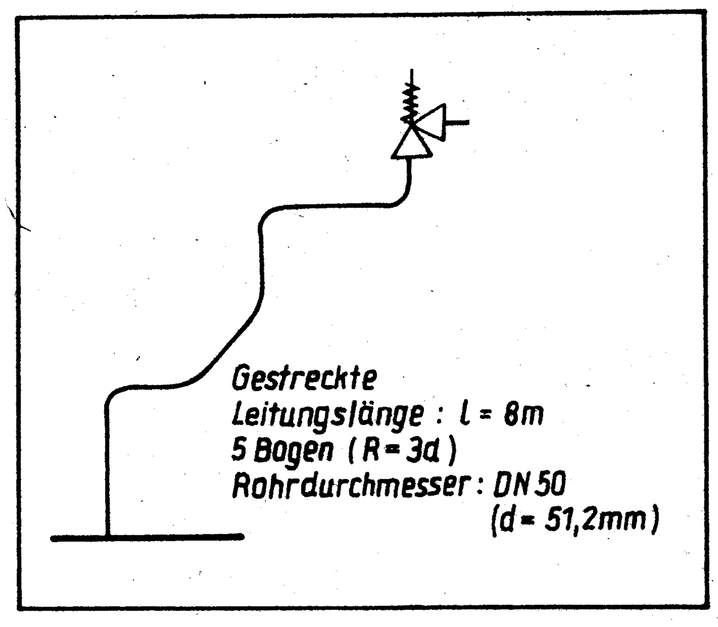
$$Re_f = \frac{0{,}81 \cdot 0{,}1}{155{,}9 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}0011182} = 4{,}6 \cdot 10^5$$

$$w_g = \frac{4 \cdot 5{,}94 \cdot 0{,}037 \cdot 0{,}22687}{\pi \cdot 0{,}1^2}\ \frac{\text{m}}{\text{s}} = 6{,}35\ \text{m/s}$$

$$Re_g = \frac{6{,}35 \cdot 0{,}1}{14{,}82 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}22687} = 1{,}9 \cdot 10^5.$$



2 Korrekturfaktor Φ_f für turbulente Strömung der Einzelphasen in Abhängigkeit des *Lockhart-Martinelli*-Parameters



3 Geometrische Gegebenheiten der im Beispiel 1 betrachteten Zuleitung

Mit der Rohrrauhigkeit $\varepsilon = 0{,}05$ mm ergibt sich $\varepsilon/d = 0{,}0005$, womit aus Bild 1 $\lambda_f = 0{,}018$ und $\lambda_g = 0{,}019$ folgen. Im weiteren berechnen sich schrittweise:

$$\text{Gl. (1):}\quad \Delta p_f = \left(0{,}018\,\frac{15}{0{,}1} + 1{,}5\right)\frac{0{,}81^2}{2 \cdot 0{,}0011182}\ \text{Pa} = 1\,232\ \text{Pa}$$

$$\Delta p_g = \left(0{,}019\,\frac{15}{0{,}1} + 1{,}5\right)\frac{6{,}35^2}{2 \cdot 0{,}22687}\ \text{Pa} = 387\ \text{Pa}$$

$$\text{Gl. (6):}\quad X_{LM} = \sqrt{\frac{1232}{387}} = 1{,}78; \quad \text{Bild 2:}\ \Phi_f = 3{,}2$$

$$\text{Gl. (7):}\quad \Delta p_{Z,\,Zu} = 3{,}2^2 \cdot 1232 = 12\,616\ \text{Pa}.$$

Dieser Wert ist bedeutend kleiner als der zulässige Druckverlust nach Gl. (9)

$\Delta p_{Zu,\,zul} = 0{,}03 \cdot (0{,}85 - 0{,}1)$ MPa $= 22\,500$ Pa.

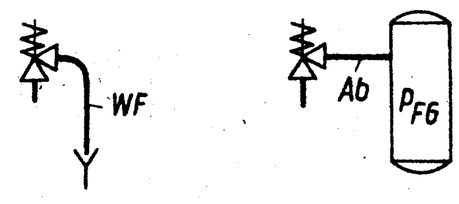
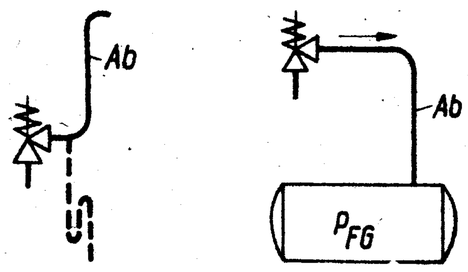
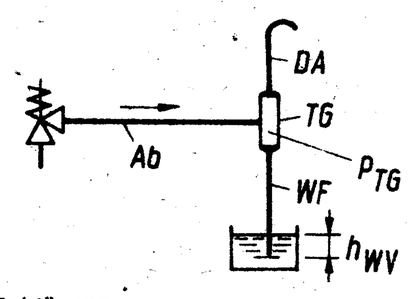
3. Nachrechnung des Abblasesystems

Die erforderliche Nachweisführung sowie die Berechnungsart sind vom abzublasenden Fluid sowie vom eingesetzten Abblasesystem abhängig und bedürfen somit einer detaillierten Betrachtung. Eine Zusammenstellung enthält Bild 4. Danach ist Kalt- und Warmwasser über ein senkrechtes Wasser-Fallrohr ins Freie oder über eine Abblaseleitung in ein geschlossenes System zu führen. Gas- und dampfförmige Medien sollten über eine Abblaseleitung senkrecht nach oben ins Freie oder mit Gefälle in ein geschlossenes System geleitet werden.

Da Heißwasser und Naßdampf bei der Entspannung im Sicherheitsventil oder dessen Austritt einen Phasenwandel mit Zunahme des Dampfgehaltes erfahren, ist nach einer kurzen, mit Gefälle verlegten Abblaseleitung ein Trenngefäß (Bild 5) anzuordnen.

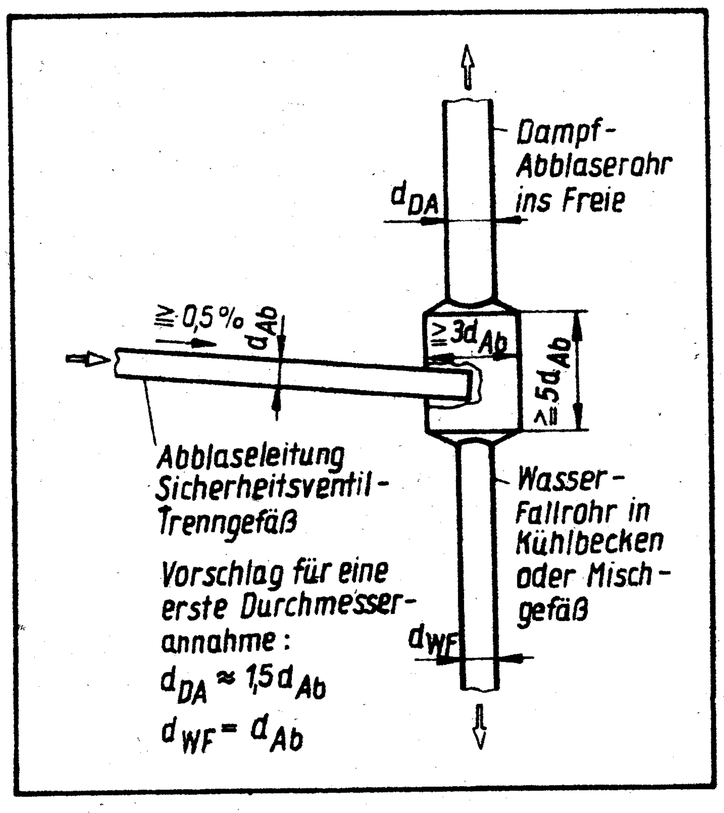
Der separierte Wasserdampf sollte über ein Dampf-Abblaserohr über Dach und das Wasser über ein Wasser-Fallrohr in ein Kühlbecken oder Mischgefäß geleitet werden. Wegen des theoretisch noch nicht exakt beschreibbaren Entspannungsverlaufs ist eine Ableitung in geschlossene Gefäße nicht erlaubt.

Um einen Austritt von Dampf über das nach unten geführte Wasser-Fallrohr zu vermeiden, ist im Auffangbehälter eine Wasservorlage der Höhe h_{WV} vorzusehen. Das System mit Trenngefäß ist auch bei der

Abblasesystem	Zulässiges Abblasemedium
	*Einzelbeaufschlagung des Abblasesystems* • Wasser ($t \leq 115$ °C) • Heißwasser (115 °C < t < t (p_{FG})) in geschlossenes System nur bei SV-Eignungsnachweis zulässig!
	*Einzelbeaufschlagung des Abblasesystems* • Wasserdampf (Sattdampf, Heißdampf) • Gas (Luft, Stickstoff)
	*Einzelbeaufschlagung des Abblasesystems* • Heißwasser (t > 115 °C) • Naßdampf (Siedewasser-Sattdampf-Gemisch) *Kombinierte Beaufschlagung des Abblasesystems* • Heißwasser + Wasser • Heißwasser + Naßdampf • Heißwasser + Wasserdampf • Heißwasser + Gas • Naßdampf + Wasser • Naßdampf + Wasserdampf • Naßdampf + Gas • Wasser + Wasserdampf • Wasser + Gas

Erklärung:
Ab Abblaseleitung
DA Dampf-Abblaserohr
WF Wasser-Fallrohr
TG Trenngefäß
h_{WV} Höhe (Wasservorlage)

4 Abblasesysteme und Zuordnung der Abblasemedien



5 Vorschlag für die konstruktive Ausbildung eines Trenngefäßes

möglichen wechselweisen Beaufschlagung von Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen zu wählen.
Für die **Maximalgeschwindigkeiten** im Abblasesystem gelten folgende Empfehlungen:

Wasser-Fallrohr	< 1 m/s
Dampf-Abblaserohr	< 100 m/s
Abblaseleitung	
Wasser	< 3 m/s
Gas/Dampf	< 250 m/s.

Die genannten Grenzwerte schließen bei kompressiblen Medien Schallgeschwindigkeit am Rohraustritt aus, begrenzen bei inkompressiblen Fluiden die Druckstöße und erübrigen beim Wasser-Fallrohr eine hydraulische Nachrechnung.
Die zugelassenen Gegendrücke sind in den Typzulassungen angegeben.

Abblasen von Wasser mit $t \leq 115$ °C

Bei Abblasen des Wasserstromes über ein senkrecht nach unten geführtes **Wasser-Fallrohr** ins **Freie** gilt

$$p_G = 0{,}1 \text{ MPa}. \tag{10}$$

Diese Beziehung kann auch bei völlig ausgefülltem Rohrquerschnitt (Druckrohrströmung) beibehalten werden, da bei üblicher Durchmesserwahl ($w < 1$ m/s) die Rohrreibung kleiner als die Druckhöhe der senkrechten Flüssigkeitssäule ist. Wird die **Abblaseleitung** Ab in ein **geschlossenes System** mit Fremdgegendruck p_{FG} geführt, so ergibt sich mit dem Druckverlust der Abblaseleitung Δp_{Ab} [Gln. (1) bis (3)] der anzusetzende Gegendruck zu

$$p_G = p_{FG} + \Delta p_{Ab}. \tag{11}$$

Soll der Wasserstrom über ein **Abblasesystem mit Trenngefäß** ins **Freie** geführt werden, so folgt der Gegendruck

$$p_G = p_{TG} + \Delta p_{Ab} \tag{12}$$

mit dem Druck im Trenngefäß

$$p_{TG} = 0{,}1 \text{ MPa}. \tag{13}$$

Abblasen von Gasen (Luft, Stickstoff) und Dämpfen (Sattdampf, Heißdampf)

Mündet die **Abblaseleitung** Ab ins **Freie,** gilt gemäß Gl. (5) für den Gegendruck

$$p_G = \sqrt{p_a^2 + 2\Delta p_{Ab,a}\, p_a} \tag{14}$$

mit dem Atmosphärendruck $p_a = 0{,}1$ MPa und dem Druckverlust in der Abblaseleitung $\Delta p_{Ab,a}$. Letzterer ist nach den Gln. (1) bis (3) mit den Zustands- und Stoffwerten für p_a zu bilden.
Bei Abblasen in ein **geschlossenes System** mit dem Fremdgegendruck p_{FG} gilt analog zu Gl. (14)

$$p_G = \sqrt{p_{FG}^2 + 2\Delta p_{Ab,FG}\, p_{FG}}. \tag{15}$$

Wird der Gas- bzw. Wasserdampfstrom über ein **Abblasesystem mit Trenngefäß** ins **Freie** geführt, so ist in Analogie zum Vorgenannten schrittweise vorzugehen. Mit den geometrischen Daten des Dampf-Abblaserohres DA sowie dem Enddruck p_a, der als Bezugswert für die Zustands- und Stoffwerte gilt, folgen die Ermittlung von $\Delta p_{DA,a}$ [Gl. (1)] und der Druck im Trenngefäß

$$p_{TG} = \sqrt{p_a^2 + 2\Delta p_{DA,a}\, p_a}. \tag{16}$$

Unter Bezugnahme auf die Geometrie der Abblaseleitung Ab sowie p_{TG} berechnet sich mit $\Delta p_{Ab,TG} \approx \Delta p_{Ab,a}$ der Gegendruck

$$p_G = \sqrt{p_{TG}^2 + 2\Delta p_{Ab,TG}\, p_{TG}}. \tag{17}$$

Um ein Austreten von Gas oder Wasserdampf über das Wasser-Fallrohr zu vermeiden, muß die Höhe der Wasservorlage

$$h_{WV} = \frac{p_{TG} - p_a}{\varrho_W\, g} = \frac{v_W}{g}\,(p_{TG} - p_a) \tag{18}$$

betragen. Dabei stellt $\varrho_W = 1/v_W$ die Dichte des Wassers dar.

Hinweis

Die Zustands- und Stoffwerte der Gase und Dämpfe für die Drücke p_{FG} oder p_a sind exakt unter Annahme konstanter Enthalpie beim Drosselvorgang zu ermitteln. Für die praktischen Berechnungen liefert Bild 6 ausreichend genaue Werte.

Abblasen von Heißwasser und Naßdampf

Das aus dem Sicherheitsventil austretende Wasser-Dampf-Gemisch ist über ein **Abblasesystem mit Trenngefäß** ins **Freie** abzuleiten. Zur Berechnung des Gegendruckes am Sicherheitsventilaustritt wird in folgenden Schritten vorgegangen:

- Ermittlung des Wasserdampfgehaltes bei Entspannung auf Atmosphärendruck

$$x_{WD} = \frac{h_1 - 418}{2258} \tag{19}$$

mit h_1 in kJ/kg der spezifischen Enthalpie des Heißwassers oder des Naßdampfes vor dem Sicherheitsventil.

- Aufteilung des Abblasestromes $\dot{m}$ in

Siedewasserstrom: $\dot{m}_W = \dot{m}\,(1 - x_{WD})$ (20)

Sattdampfstrom: $\dot{m}_D = \dot{m}\, x_{WD}$. (21)

- Ausgehend vom Atmosphärendruck p_a am Austritt des **Dampf-Abblaserohres** DA wird unter Verwendung der zugehörigen Zustands- und Stoffwerte $v_a = v'' = 1{,}695$ m³/kg und $\eta_a = \eta'' = 12{,}26 \cdot 10^{-6}$ kg/(s m) sowie der geometrischen Daten des Abblaserohres näherungsweise der Druck im Trenngefäß

$$p_{TG} = \sqrt{p_a^2 + 2\,\Delta p_{DA,a}\,p_a} \qquad (22)$$

bestimmt. Die Gln. (1) bis (3) – einschließlich der Legende – sowie Bild 1 gelten bei Einsetzen der für das Dampf-Abblaserohr zutreffenden Größen zur Berechnung von $\Delta p_{DA,a}$ uneingeschränkt.

- Bemessung des **Wasser-Fallrohres** unter Annahme einer Druckrohrströmung für $\dot{m}_W$ und einer Geschwindigkeit $w < 1$ m/s sowie Ermittlung der Höhe h_{WV} für die Wasservorlage im Kühl- oder Mischgefäß gemäß Gl. (18).
- Berechnung des Druckverlustes $\Delta p_{Z,Ab}$ in der **Abblaseleitung** Ab vom Sicherheitsventil zum Trenngefäß unter Annahme einer Zweiphasenströmung gemäß dem zugehörig zu den Gln. (6) und (7) beschriebenen Verfahrensweg. Für die Gasphase gelten die vorgenannten Größen v'' und η'', für die Flüssigphase sind $v' = 0{,}0010434$ m³/kg und $\eta' = 283{,}3 \cdot 10^{-6}$ kg/(s m) zu verwenden.
- Der für das Sicherheitsventil relevante Gegendruck ergibt sich näherungsweise zu

$$p_G = \Delta p_{Z,Ab} + p_{TG}. \qquad (23)$$

- Die mittlere Geschwindigkeit des Zweiphasengemischs im Rohr berechnet sich nach Gl. (8).

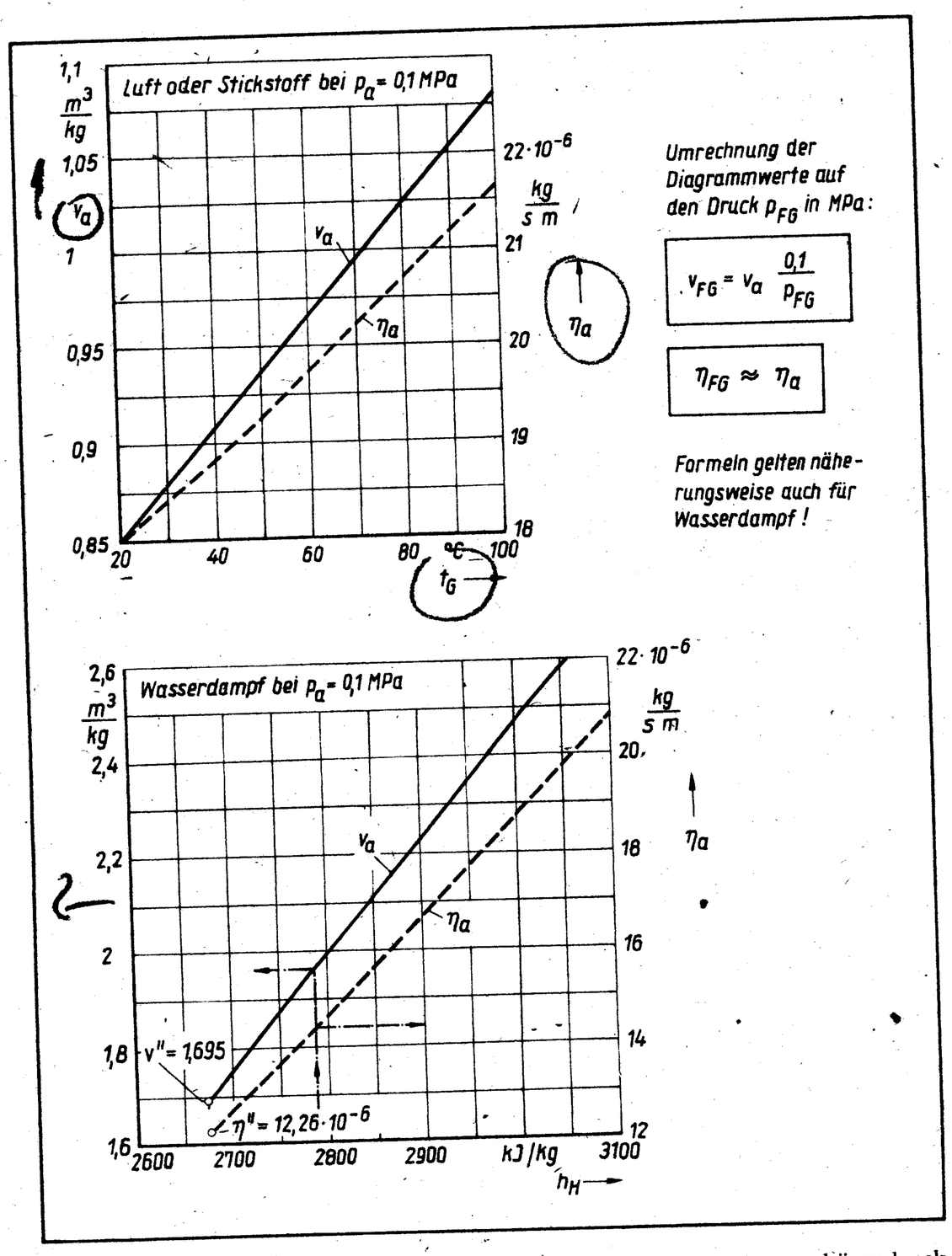
Beispiel 3 (Wasserabströmung)

Der von einem Sicherheitsventil abgespeiste Wasserstrom ($\dot{m}_W = 5{,}2$ kg/s; $t = 60$ °C) wird über eine Rohrleitung (DN 50; $d = 51{,}2$ mm; $l = 2{,}5$ m; $\Sigma\zeta = 2$) in einen Behälter mit dem konstanten Fremdgegendruck $p_{FG} = 0{,}29$ MPa geführt. Der am Sicherheitsventilaustritt anstehende Gesamtgegendruck ist zu berechnen.

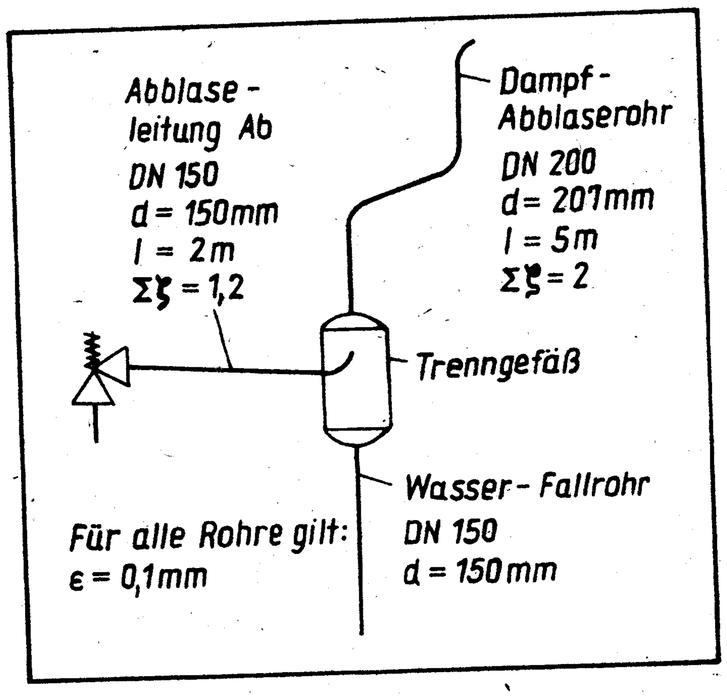
Lösung

Aus /8, S. 265/ folgen für $t = 60$ °C; $\dot{m}_W = 5{,}2$ kg/s; $d = 51{,}2$ mm die Werte:

$R = 1\,303$ Pa; $\quad w = 2{,}6$ m/s; $\quad S = 3\,243$ Pa.



6 Spezifische Volumina v_a und dynamische Viskosität η_a bei Atmosphärendruck $p_a = 0{,}1$ MPa nach einer Entspannung im Sicherheitsventil in Abhängigkeit der Gastemperatur t_G oder der spezifischen Enthalpie h_H vor dem Ventil im Ansprechfall.
Eine näherungsweise Umrechnung auf einen über p_a liegenden Fremdgegendruck p_{FG} ist angegeben.



7 Geometrische Gegebenheiten des im Beispiel 4 betrachteten Abblasesystems

Nach Gl. (1) ergibt sich der Gesamtdruckverlust der Abblaseleitung zu

$\Delta p_{Ab} = (1\,303 \cdot 2{,}5 + 3\,243 \cdot 2)$ Pa $= 0{,}0097$ MPa.

Der Gegendruck berechnet sich damit gemäß Gl. (11):

$p_G = (0{,}29 + 0{,}0097)$ MPa $\approx 0{,}3$ MPa.

Beispiel 4 (Naßdampfabströmung)

Über ein Sicherheitsventil mit dem Ansprechdruck $p_A = 0{,}85$ MPa wird der Naßdampfstrom $\dot{m}_{ND} = 5{,}94$ kg/s; $x_{WD} = 0{,}037$ in das im Bild 7 dargestellte Abblasesystem geleitet. Es ist zu überprüfen, ob der zulässige Eigengegendruck von 15 % eingehalten wird.

Lösung

Die spezifische Enthalpie vor dem Sicherheitsventil h_1 beträgt mit dem zum Druck $p_1 = p_A = 0{,}85$ MPa gehörigen Werten $h_1' = 732{,}0$ kJ/kg und $h_1'' = 2\,770{,}8$ kJ/kg

$h_1 = h_1' + x_{WD,1}\,(h_1'' - h_1') = [732{,}0 + 0{,}037 \cdot (2\,770{,}8 - 732{,}0)]$ kJ/kg

$h_1 = 807{,}4$ kJ/kg.

Für die Zustands- und Stoffwerte bei Atmosphärendruck gelten:

$v' = 0{,}0010434$ m³/kg; $\qquad v'' = 1{,}695$ m³/kg

$\eta' = 283{,}3 \cdot 10^{-6}$ kg/(s m) $\qquad \eta'' = 12{,}26 \cdot 10^{-6}$ kg/(s m).

Weiterhin berechnen sich für das **Dampf-Abblaserohr** schrittweise:

Gl. (19): $x_{WD} = \dfrac{807{,}4 - 418}{2\,258} = 0{,}172$

Gl. (20): $\dot{m}_W = 5{,}94 \cdot (1 - 0{,}172)\,\dfrac{\text{kg}}{\text{s}} = 4{,}92$ kg/s

Gl. (21): $\dot{m}_D = 5{,}94 \cdot 0{,}172\,\dfrac{\text{kg}}{\text{s}} = 1{,}02$ kg/s

Gl. (2): $w = \dfrac{4 \cdot 1{,}02 \cdot 1{,}695}{\pi \cdot 0{,}207^2}\,\dfrac{\text{m}}{\text{s}} = 51{,}4$ m/s

Gl. (3): $Re = \dfrac{51{,}4 \cdot 0{,}207}{12{,}26 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}695} = 5{,}1 \cdot 10^5$

Relative Rauhigkeit: $\varepsilon/d = 0{,}1/207 = 0{,}0005$

Bild 1: $\lambda = 0{,}018$

Gl. (1): $\Delta p_{DA,a} = \left(0{,}018\,\dfrac{5}{0{,}207} + 2\right) \cdot \dfrac{51{,}4^2}{2 \cdot 1{,}695}$ Pa $= 1\,898$ Pa

Gl. (22): $p_{TG} = \sqrt{0{,}1^2 + 2 \cdot 1\,898 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}1}$ MPa $= 0{,}102$ MPa.

Der Druckverlust in der **Abblaseleitung** ergibt sich nach dem Algorithmus für eine Zweiphasenströmung:

Geschwindigkeiten und *Reynolds*-Zahlen nach Gln. (2) und (3) mit $v_f = v'$; $v_g = v''$; $\eta_f = \eta'$ und $\eta_g = \eta''$

$$w_f = \frac{4 \cdot 4{,}92 \cdot 0{,}0010434}{\pi \cdot 0{,}150^2}\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 0{,}29\ \text{m/s}$$

$$Re_f = \frac{0{,}29 \cdot 0{,}150}{283{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}0010434} = 1{,}5 \cdot 10^5$$

$$w_g = \frac{4 \cdot 1{,}02 \cdot 1{,}695}{\pi \cdot 0{,}150^2}\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 97{,}8\ \text{m/s}$$

$$Re_g = \frac{97{,}8 \cdot 0{,}150}{12{,}26 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}695} = 7{,}1 \cdot 10^5$$

Rohrreibungsbeiwert für $\varepsilon/d = 0{,}0007$ nach Bild 1

$\lambda_f = 0{,}020; \qquad \lambda_g = 0{,}018$

Druckverlust der Einzelphasen nach Gl. (1)

$$\Delta p_f = \left(0{,}020\,\frac{2}{0{,}150} + 1{,}2\right)\frac{0{,}29^2}{2\cdot 0{,}0010434}\,\text{Pa} = 59{,}1\,\text{Pa}$$

$$\Delta p_g = \left(0{,}018\,\frac{2}{0{,}150} + 1{,}2\right)\frac{97{,}8^2}{2\cdot 1{,}695}\,\text{Pa} = 4\,063\,\text{Pa}$$

Druckverlust der Zweiphasenströmung

Gl. (6): $x_{LM} = \sqrt{\frac{59{,}1}{4\,063}} = 0{,}12;$ Bild 2: $\Phi_f = 16$

Gl. (7): $\Delta p_{Z,Ab} = 16^2 \cdot 59{,}1\,\text{Pa} = 0{,}0151\,\text{MPa}$

Gl. (8): $w = (97{,}8 + 0{,}29)\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 98{,}1\,\text{m/s}$

Gl. (23): $p_G = (0{,}0151 + 0{,}102)\,\text{MPa} = 0{,}117\,\text{MPa}.$

Demgegenüber ist ein Gegendruck (Überdruck)
$p^*_{G,zul} = 0{,}15 \cdot (0{,}85 - 0{,}1)\,\text{MPa} = 0{,}113\,\text{MPa}$
bzw. der Absolutdruck $p_{G,zul} = 0{,}213\,\text{MPa}$ zulässig.

Die Geschwindigkeit im **Wasser-Fallrohr** beträgt gemäß Gl. (2)

$$w = \frac{4\cdot 4{,}92\cdot 0{,}0010434}{\pi\cdot 0{,}150^2}\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 0{,}29\,\text{m/s}.$$

Sie liegt somit unter dem Grenzwert von 1 m/s. Die Mindesthöhe der Wasservorlage im Auffanggefäß berechnet sich nach Gl. (18)

$$h_{WV} = \frac{0{,}0010434}{9{,}81}\,(0{,}102 - 0{,}1)\cdot 10^6\,\text{m} = 0{,}21\,\text{m}.$$

Literatur

/1/ WBV-AV2: Werkstoff- und Bauvorschriften für Anlagen der Dampf- und Drucktechnik, Ausrüstung, Sicherheitsventile. 1988 (Entwurf)

/2/ *Glück, B.:* Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung, Druckverluste (Reihe Bausteine der Heizungstechnik). Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1988