Bemessung des Sicherheitsventil-Querschnitts im Anwendungsbereich der technischen Gebäudeausrüstung

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

Für eine determinierte Einsatzsituation sind folgende Aufgaben von Interesse:

- Bestimmen des Abblasestromes für ein bekanntes Sicherheitsventil
- Auswahl eines Sicherheitsventils aus einer Baureihe bei vorgegebenem Abblasestrom.

Zur Beantwortung der beiden Fragestellungen wurden die Ausströmvorgänge auf physikalisch-mathematischer Grundlage modelliert und an die realen Versuchsergebnisse angepaßt. Spezielle Sicherheitszuschläge und Einsatzbedingungen sind den technischen Regelwerken und Typzulassungen zu entnehmen.

Definition der Berechnungsgrößen

Die in der Fachliteratur und den technischen Vorschriften verwendeten Bezeichnungen sind außerordentlich umfangreich, leider aber nicht einheitlich.
Nachfolgend werden nur die für die Bemessung relevanten Größen erfaßt. Für die später durchzuführenden, praktischen Berechnungen ist es vorteilhaft, mit zugeschnittenen Größengleichungen zu arbeiten. In diesen Fällen müssen die tabellarisch angegebenen Einheiten verwendet werden. Die zugeschnittenen Größengleichungen sind an der jeweils nachgestellten Einheitenangabe (z. B. in mm^2) zu erkennen.

Geometrische Größen

A_0	mm^2	Engster Strömungsquerschnitt A_0 bildet die Grundlage für die Berechnung des Abblasestroms.
d_0	mm	Engster Strömungsdurchmesser

Drücke

p_A	MPa	Ansprechdruck Absoluter Druck vor dem Ventil, bei dem der Ventilkegel zu öffnen beginnt.
p_G	MPa	Gegendruck Absoluter Druck am Ventilaustritt im Abblasezustand. Bei überkritischer Gasströmung handelt es sich um den Druck außerhalb des Strahles.

p_a	MPa	Atmosphärendruck ($p_a = 0{,}1$ MPa)
$p_{Öff}$	MPa	Öffnungsdruck Absoluter Druck, bei dem das Ventil voll öffnet.
p_{Sch}	MPa	Schließdruck Absoluter Druck, bei dem das Ventil nach dem Abblasevorgang wieder geschlossen hat.
p_1	MPa	Vordruck Absoluter Druck im Druckraum vor dem Ventil während des Abblasens.
p_2	MPa	Austrittsdruck Absoluter Druck im ausfließenden Strahl am Ventilaustritt.

Beim Abblasen des vollgeöffneten Ventils entspricht der **Vordruck** p_1 dem **Öffnungsdruck** $p_{Öff}$.
Der **Austrittsdruck** p_2 ist bei **Flüssigkeitsströmungen** sowie bei **unterkritischen** bzw. **kritischen Gasströmungen** identisch mit dem **Gegendruck** p_G. Somit wäre zur Bestimmung eines Flüssigkeits-Abblasestroms $\dot{m}$ *die* Druckdifferenz $\Delta p = p_{Öff} - p_G$ maßgebend. Da jedoch der Ansprechdruck p_A eine von den technischen Kontrollorganen am Einsatzort überprüfbare und einstellbare Größe darstellt, während der Öffnungsdruck lediglich im Rahmen der Typprüfung kontrolliert wird, ist sicherheitshalber auf p_A Bezug zu nehmen.

Beachte!

- Für die Bemessung der Sicherheitsventile wird der Vordruck gleich dem Ansprechdruck gesetzt ($p_1 = p_A$).
  Weiterhin besteht bei **Flüssigkeitsabströmung** Gleichheit zwischen dem Austrittsdruck und dem Gegendruck $p_2 = p_G$.
  Beim Abblasen von **Gasen** und **Dämpfen** gelten im
  – unterkritischen und kritischen Bereich $\mathbf{p_2 = p_G}$
  – überkritischen Bereich $\mathbf{p_2 > p_G}$.
- **Arbeitsdruckdifferenzen** sind im Algorithmus zur Festlegung der Ansprechdrücke in gleichartiger Weise wie die **Schließdruckdifferenzen** zu beachten.

Strömungstechnische Ventilcharakteristik

α	–	Ausflußziffer
α_d	–	Zuerkannte Ausflußziffer Vom technischen Überwachungsorgan zugelassene Ausflußziffer $\alpha_d = 0{,}9\,\alpha$
α_{dp}	–	Ausflußziffer bei teilweisem Phasenwechsel $\alpha_{dp} = 0{,}89 \cdot \alpha_d = 0{,}8\,\alpha$.

Die Größe der Ausflußziffern ist grundsätzlich eine Funktion der Konstruktion (Gehäuseform, Sitzquerschnitt, Kegelform, Kegelführung, Hubbegrenzung).
Besonders bei Gasen und Dämpfen besteht auch noch eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Gegendruck, d. h., die Ausflußziffer ist keine **reine** konstruktionsbezogene Ventilkenngröße. Der Hersteller der Sicherheitsventile muß deshalb den gegendruckabhängigen Verlauf für die Ausflußziffer angeben, mindestens jedoch den maximal zulässigen Gegendruck zu einer gegebenen Ausflußziffer benennen.

Weitere strömungstechnische und thermodynamische Größen

$\dot{m}$	kg/s	Massestrom
w	m/s	Geschwindigkeit
ϱ	kg/m³	Dichte
v	m³/kg	Spezifisches Volumen ($v = 1/\varrho$)
T	K	Absolute Temperatur ($T = t + 273$ °K)
κ	–	Isentropenexponent Luft, Stickstoff $\kappa = 1{,}4$ Sattdampf $\kappa = 1{,}135$ Heißdampf $\kappa = 1{,}3$
Ψ	–	Ausflußfunktion
Ψ_{max}	–	Maximale Ausflußfunktion
$\tilde{M}$	kg/kmol	Molare Masse (Molmasse)
$\tilde{R}$	J/(kmol K)	Molare (allgemeine) Gaskonstante $\tilde{R} = 8314$ J/(kmol K)
R	J/(kgK)	Technische (individuelle) Gaskonstante $R_{Luft} = 287$ J/(kgK) $R_{N_2} = 297$ J/(kgK)
x_{WD}	–	Dampfgehalt
μ	kg/(m² s)	Massestromdichte
h	kJ/kg	Spezifische Enthalpie
Δh_V	kJ/kg	Spezifische Verdampfungsenthalpie (Verdampfungswärme)
x	smm² MPa/kg	Druckmittelbeiwert

Abblasen von Wasser mit t ≦ 115 °C

Es gelten die zugeschnittenen Berechnungsgleichungen:

$$\dot{m} = \frac{\alpha_d A_0}{707} \sqrt{\varrho\,(p_1 - p_2)} \text{ in kg/s} \tag{1}$$

$$A_0 = \frac{707\,\dot{m}}{\alpha_d \sqrt{\varrho\,(p_1 - p_2)}} \text{ in mm}^2. \tag{2}$$

Beispiel 1 (Kaltwasserabströmung)
Über ein Proportionalsicherheitsventil mit der Ausflußziffer $\alpha_d = 0{,}25$ ist bei einem Ansprechdruck $p_A = 0{,}65$ MPa ein Wasserstrom $\dot{m}_W = 5{,}2$ kg/s mit einer Temperatur von 60 °C abzuführen. Der Abblasequerschnitt soll in Abhängigkeit des Gegendruckes p_G für zwei Fälle ermittelt werden.
Fall 1: Abströmen ins Freie $p_G = p_a = 0{,}1$ MPa
Fall 2: Abströmen in einen geschlossenen Behälter $p_G = 0{,}3$ MPa.

Lösung
Die Dichte beträgt $\varrho = 983$ kg/m³. Damit ergeben sich die erforderlichen Ventilquerschnitte nach Gl. (2):
Fall 1

$$A_0 = \frac{707 \cdot 5{,}2}{0{,}25 \cdot \sqrt{983 \cdot (0{,}65 - 0{,}1)}} \text{ mm}^2 = 632 \text{ mm}^2$$

Fall 2

$$A_0 = \frac{707 \cdot 5{,}2}{0{,}25 \cdot \sqrt{983 \cdot (0{,}65 - 0{,}3)}} \text{ mm}^2 = 793 \text{ mm}^2.$$

Abblasen von Gasen und Dämpfen

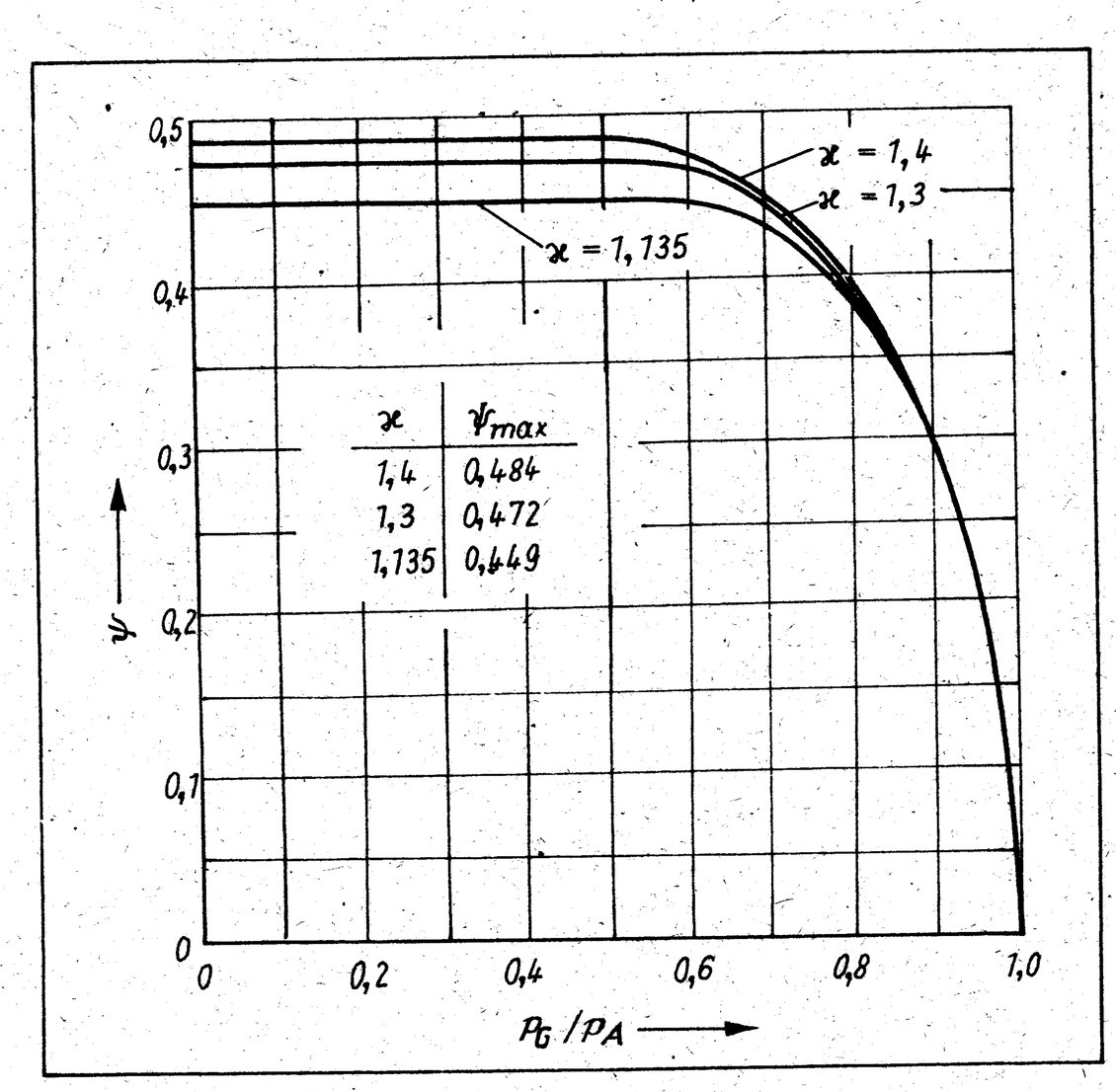
Die zugeschnittenen Berechnungsgleichungen

$$\dot{m} = \frac{\alpha_d A_0}{707} \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}\ \Psi = \frac{\alpha_d A_0}{707} \sqrt{\varrho_1 p_1}\ \Psi \text{ in kg/s} \tag{3}$$

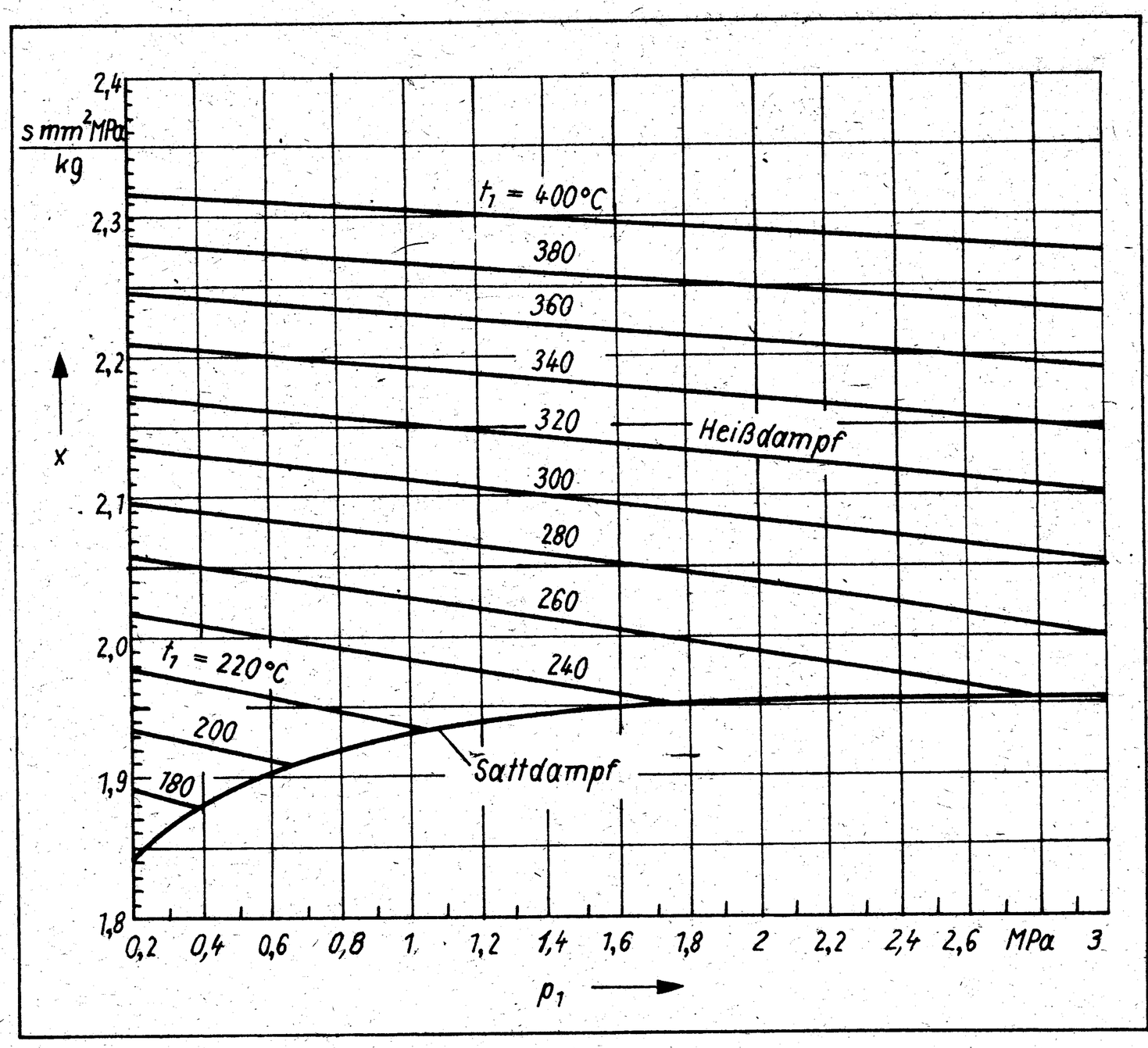
$$A_0 = \frac{707\,\dot{m}}{\alpha_d \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}\ \Psi} = \frac{707\,\dot{m}}{\alpha_d \sqrt{\varrho_1 p_1}\,\Psi} \text{ in mm}^2 \tag{4}$$

sind allgemeingültig mit der Dichte für nahezu ideale Gase

$$\varrho_1 = \frac{p_1}{R\,T_1} = \frac{p_1\,\tilde{M}}{\tilde{R}\,T_1} \tag{5}$$



1 Ausflußfunktion Ψ



2 Druckmittelbeiwert x für überkritische Wasserdampfabströmung

oder dem spezifischen Volumen für Wasserdampf anwendbar. Die Ausflußfunktion Ψ kann aus Bild 1 entnommen werden.
Für **Wasserdampf** ist bei **überkritischer Ausströmung** die Berechnung des Ventilquerschnittes auch nach der Beziehung

$$A_0 = 360 \frac{x\,\dot{m}}{\alpha_d\, p_1} \text{ in mm}^2 \qquad (6)$$

mit Entnahme des Druckmittelbeiwertes x aus Bild 2 möglich.
Bei Abblasen von gering überhitztem Heißdampf sollte bei Verwenden der Gln. (3) bzw. (4) stets noch eine Nachrechnung für den entsprechenden Sattdampfstrom erfolgen. Der jeweils kleinste Abblasestrom bzw. der größte erforderliche Ventilquerschnitt sind dann für die weiteren Untersuchungen zu verwenden. Bei Benutzung der Gl. (6) ist dieser Vergleich nicht notwendig, da Bild 2 bereits die jeweils ungünstigsten Bedingungen beinhaltet.

Beispiel 2 (Sattdampfabströmung)

In einem speziellen Havariefall ist ein Sattdampfstrom $\dot{m}_{WD} = 2$ kg/s bei einem Ansprechdruck von $p_A = 1{,}3$ MPa ohne zusätzlich wirkenden Gegendruck in die Atmosphäre abzuführen. Es soll ein Vollhubventil noch nicht fixierter Bauart ausgewählt werden. Das spezifische Dampfvolumen beträgt $v_1 \equiv v'' = 0{,}15112$ m³/kg.

Lösung
Wegen des überkritischen Druckgefälles folgt aus Bild 1 die Ausflußfunktion $\Psi_{max} = 0{,}449$.
Da die spezielle Ventilkonstruktion nicht bekannt ist, wird die Mindestausflußziffer für Vollhubventile gemäß /1/ in Ansatz gebracht. Es gilt $\alpha = 0{,}656$, woraus die zuerkannte Ausflußziffer $\alpha_d = 0{,}9 \cdot 0{,}656 = 0{,}590$ folgt.
Der erforderliche Sicherheitsventil-Querschnitt berechnet sich nach Gl. (4) zu

$$A_0 = \frac{707 \cdot 2 \cdot \sqrt{0{,}15112}}{0{,}590 \cdot \sqrt{1{,}3} \cdot 0{,}449} \text{ mm}^2 = 1820 \text{ mm}^2.$$

Beispiel 3 (Heißdampfabströmung)

Es ist ein Heißdampfstrom mit geringer Überhitzung ($\dot{m}_{WD} = 2$ kg/s; $p_A = 1{,}3$ MPa; $t_1 = 210$ °C über ein Sicherheitsvollhubventil ($\alpha_d = 0{,}590$) abzuleiten.
Welcher Sicherheitsventil-Querschnitt wird benötigt?

Lösung
Gemäß Wasserdampftafel beträgt das spezifische Volumen $v_1 = 0{,}1597$ m³/kg.
Die maximale Ausflußfunktion folgt aus Bild 1 zu $\Psi_{max} = 0{,}472$.
Damit liefert Gl. (4)

$$A_0 = \frac{707 \cdot 2 \cdot \sqrt{0{,}1597}}{0{,}590 \cdot \sqrt{1{,}3} \cdot 0{,}472} \text{ mm}^2 = 1780 \text{ mm}^2.$$

Nach vorgenannter Forderung sollte bei gering überhitztem Dampf eine weitere Rechnung für Sattdampf erfolgen und der Größtwert Verwendung finden. Diese Rechnung entspricht dem Beispiel 2. Tatsächlich sollte auch $A_0 = 1820$ mm² realisiert werden.
Die Querschnittsberechnung nach Gl. (6) ergibt mit dem Druckmittelbeiwert $x = 1{,}94$ aus Bild 2

$$A_0 = 360 \cdot \frac{1{,}94 \cdot 2}{0{,}590 \cdot 1{,}3} \text{ mm}^2 = 1821 \text{ mm}^2.$$

Abblasen von Heißwasser

Bei der Entspannung von Heißwasser bildet sich bei der Unterschreitung des Siededruckes Dampf. In Abhängigkeit der Strömungsform, die wiederum von den Druckparametern und der Armaturengeometrie beeinflußt wird, kann Kavitation, Flashing und Critical flashing auftreten. Für die Größe des Abblasestromes ist es maßgebend, an welcher Stelle die Dampfbildung erfolgt. Diese Fragen sind derzeit noch weitestgehend ungeklärt. Vorhandene Annahmen und theoretische Modelle bedürfen noch der versuchstechnischen Überprüfung.
Im weiteren sollen zwei Berechnungsmethoden vorgestellt werden, wobei das Abblasen auf einen Druck, der weit unterhalb des kritischen Druckes liegt – beispielsweise auf Atmosphärendruck – angenommen wird.

Getrenntes Phasenmodell

Der abzuführende Heißwasserstrom $\dot{m}$ wird aufgeteilt in einen Dampf- und einen Wasserstrom. Grundlage bildet der Dampfgehalt x_{WD}, der bei der adiabaten Drosselung unter Vernachlässigung der Strömungsenergie entsteht:

$$x_{WD} = \frac{h_1 - h'_z}{\Delta h_{V,z}}. \qquad (7)$$

Es bedeuten:

h_1 Enthalpie der Flüssigkeit bei Eintrittsdruck p_1 (≡ Ansprechdruck) und Eintrittstemperatur t_1

h'_z Enthalpie der siedenden Flüssigkeit bei Entspannungsdruck p_z

$\Delta h_{V,z}$ Spezifische Verdampfungsenthalpie bei Entspannungsdruck p_z.

Das konservativste Modell nimmt im Ventilsitz eine Entspannung auf den **Umgebungsdruck** an. Bei freiem Ausblas wäre dies der **Atmosphärendruck** $p_z = p_a = 0{,}1$ MPa. Unter diesen Bedingungen gilt

$$x_{WD} = \frac{h_1 - 418}{2258} \tag{8}$$

mit h_1 in kJ/kg.

Ein verbessertes Modell geht von einer Entspannung auf den kritischen Druck mit Bezug auf den zu t_1 gehörigen Siededruck p_S im engsten Strömungsquerschnitt aus:

$$p_z = 0{,}577\, p_S. \tag{9}$$

Zugehörig zu p_z sind h'_z und $\Delta h_{V,z}$ zu bilden und Gl. (7) auszuwerten. Unabhängig vom gewählten Modell ergeben sich dann:

Dampfstrom (Sattdampfzustand) $\dot{m}'' = x_{WD}\, \dot{m}$

Wasserstrom (Siedezustand) $\dot{m}' = (1 - x_{WD})\, \dot{m}$. (10)

Für beide Massestromanteile erfolgt eine getrennte Berechnung der erforderlichen Ventilquerschnitte A''_0 nach Gl. (4) und A'_0 nach Gl. (2).

Die jeweils einzusetzenden Ausflußziffern können dabei phasenabhängig sein.

Die Teilquerschnitte A''_0 und A'_0 sind zu einem Gesamtquerschnitt zu addieren. Bei Annahme einer Entspannung auf **Umgebungsdruck** (1. Modell) gilt

$$A_0 = A''_0 + A'_0, \tag{11}$$

bei Entspannung auf den **kritischen Druck** (2. Modell) sollte

$$A_0 = 1{,}2\,(A''_0 + A'_0) \tag{12}$$

gebildet werden.

Der 20prozentige Zuschlag berücksichtigt Abweichungen des realen Strömungsverlaufs vom Modell.

Anmerkung

Da beim Durchströmen des Sitzquerschnittes nicht mit einer spontanen Verdampfung zu rechnen ist, ergibt die vorgestellte Methode einerseits zu große Querschnitte. Andererseits kann der Siedeverzug bewirken, daß in einem anderen, hinter dem Ventilsitz liegenden Querschnitt der kritische Strömungszustand auftritt /6/. Diese Durchströmfläche ist aber keine übliche Bemessungsgröße.

Die im Strömungskanal rechnerisch „vorverlegte" Verdampfung läßt auch die Frage offen, welche zugehörigen spezifischen Volumina bei der Querschnittsberechnung verwendet werden sollten. Üblicherweise setzt man die zur Eintrittstemperatur t_1 gehörigen Volumina v' und v'' ein.

Die genannten Unsicherheiten sind nur durch reale Ausströmversuche typabhängig zu klären.

Die dargestellte Berechnung ist in /1/ für Flüssigkeiten außer Heißwasser, deren Austrittstemperatur über der zum Atmosphärendruck gehörigen Siedetemperatur liegt, als Näherung empfohlen. Es sollten wegen der relativ unsicheren Lastermittlung Proportionalsicherheitsventile für diesen Einsatzfall vorgesehen werden.

In /2/ fehlen entsprechende Festlegungen, da derzeit erst Versuche in Vorbereitung sind. Nach /3/ wird das 1. Modell bei Abblasen von Heißwasser und nach /4/ das 2. Modell bei Beaufschlagung mit Flüssiggasen empfohlen.

Einheitliches Phasenmodell

Neske und *Kemnitz* erarbeiteten auf der Grundlage von /5, 6/ den für Heißwasser vorgeschlagenen Algorithmus, der in /1/ übernommen wurde. Ergänzend gelten die Definitionen

μ_d	kg/(m² s)	Kritische Massestromdichte nach *Gyarmathy* für Siedewasser
p_S	MPa	Siededruck bei t_1
p_d	MPa	Kritischer Druck nach *Gyarmathy*
t_1	°C	Heißwassertemperatur am Ventileintritt
v'	m³/kg	Spezifisches Volumen des Wassers bei p_S.

Bei phasenabhängiger Ausflußziffer ist auf $\alpha_{Flüssigkeit}$ zu beziehen!

Es gelten die zugeschnittenen Größengleichungen:

$$\dot{m} = 10^{-6}\, \alpha_{dp} A_0 \mu \quad \text{in kg/s} \tag{13}$$

$$A_0 = \frac{10^6\, \dot{m}}{\alpha_{dp}\, \mu} \quad \text{in mm}^2 \tag{14}$$

Einzusetzende Massestromdichte

1. Für $p_1 = p_S$ gilt $\mu = \mu_d$. (15)
2. Für $p_1 > p_S$ gilt

$$\text{wenn } \mu_1 \leqq \frac{\mu_d}{\alpha_{dp}}, \text{ dann } \mu = \mu_1$$

$$\text{sonst } \mu = \mu_2. \tag{16}$$

Berechnung der Massestromdichte

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{2}{v'}\,(p_1 - p_S)\,10^6 + \mu_d^2} \quad \text{in kg/(m}^2\text{s)} \tag{17}$$

$$\mu_2 = \sqrt{\frac{2}{v'}\,(p_1 - p_d)\,10^6} \quad \text{in kg/(m}^2\text{s)} \tag{18}$$

$$\mu_d = 14\,500\, p_S^{0{,}52} \quad \text{in kg/(m}^2\text{ s)} \tag{19}$$

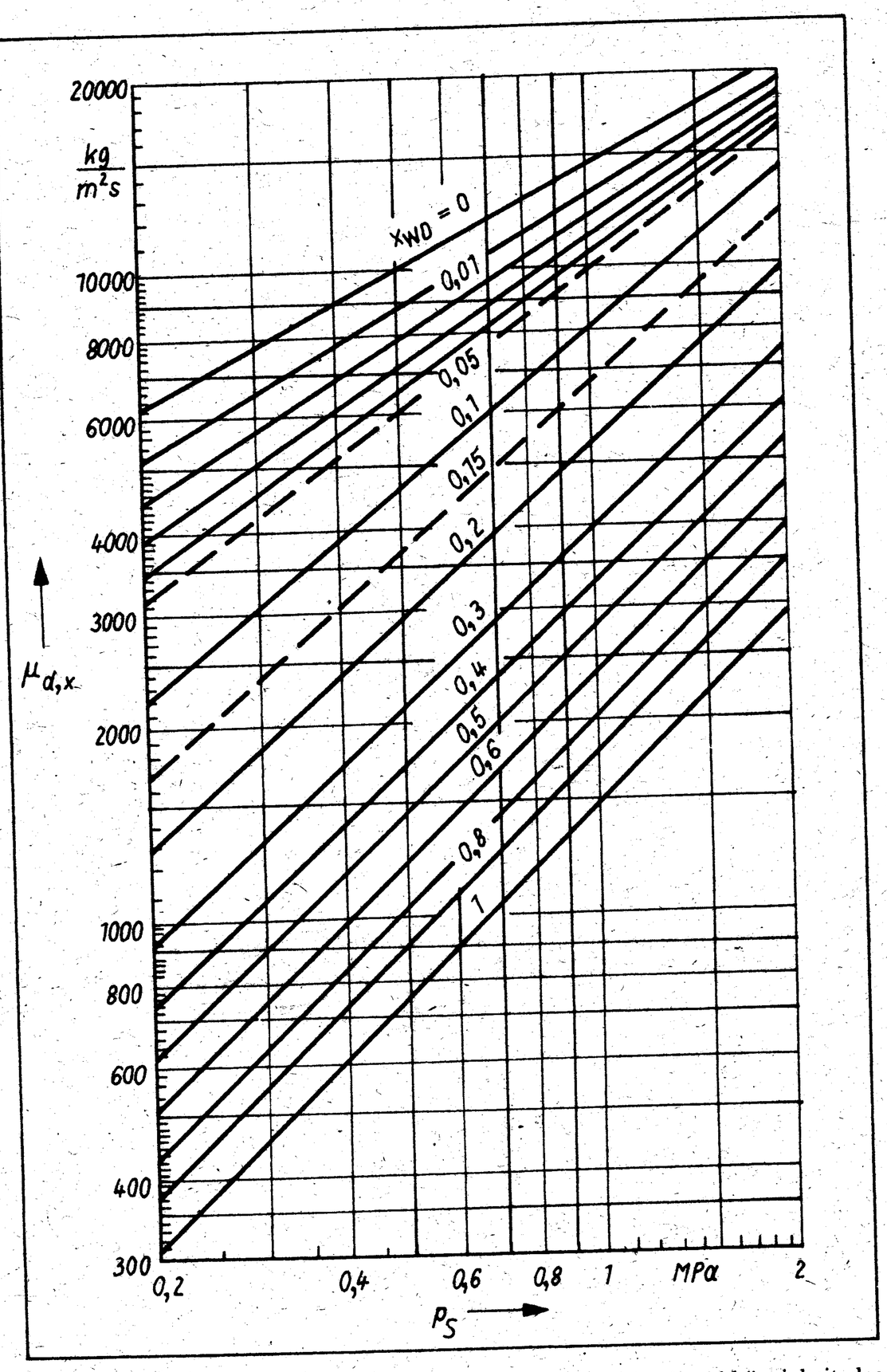
$$p_d = 0{,}752\, p_S^{0{,}946} \quad \text{in MPa.} \tag{20}$$

Die Gl. (19) ist impliziert im Bild 3 enthalten.

Beispiel 4 (Heißwasserabströmung)

Aus einem Heißwassersystem ist im Havariefall ein Massestrom $\dot{m}_W = 7{,}3$ kg/s der Temperatur $t_1 = 160$ °C bei einem Ansprechdruck $p_A \equiv p_1 = 1{,}8$ MPa und atmosphärischem Gegendruck $p_G = p_a = 0{,}1$ MPa abzuführen. Zum Einsatz kommt ein Proportionalsicherheitsventil mit der zuerkannten Ausflußziffer $\alpha_d = 0{,}25$.

Der erforderliche Abblasequerschnitt ist zu ermitteln.



3 Kritische Massestromdichte ungesättigten Wasserdampfes in Abhängigkeit des Dampfgehaltes x_{WD} und des Sättigungsdruckes p_S

Lösung

Die Berechnung nach dem **„Einheitlichen Phasenmodell“** liefert:

$\alpha_{dp} = 0{,}89 \cdot 0{,}25 = 0{,}22$

$t_1 = 160\,°C \rightarrow p_S = 0{,}618\,MPa;\ v' = 0{,}0011022\,m^3/kg$

Gl. (19): $\mu_d = 14\,500 \cdot 0{,}618^{0{,}52}\,\frac{kg}{m^2 s} = 11\,290\,kg/(m^2 s)$

Gl. (20): $p_d = 0{,}752 \cdot 0{,}618^{0{,}946}\,MPa = 0{,}477\,MPa$

Gl. (17): $\mu_1 =$

$$\sqrt{\frac{2}{0{,}0011022} \cdot (1{,}8 - 0{,}618) \cdot 10^6 + 11\,290^2\,\frac{kg}{m^2 s}} = 47\,668\,kg/(m^2 s)$$

Gl. (18): $\mu_2 =$

$$\sqrt{\frac{2}{0{,}0011022} \cdot (1{,}8 - 0{,}477) \cdot 10^6\,\frac{kg}{m^2 s}} = 48\,996\,kg/(m^2 s)$$

Gl. (16): $\mu_1 \leqq \frac{11\,290}{0{,}22}\,\frac{kg}{m^2 s} = 51\,318\,kg/(m^2 s) \rightarrow \mu = \mu_1$

Gl. (14): $A_0 = \frac{10^6 \cdot 7{,}3}{0{,}22 \cdot 47\,668}\,mm^2 = 696\,mm^2.$

Die Ergebnisse nach dem **„Getrennten Phasenmodell“** lauten:

1. Modell: $A_0 = 2\,630\,mm^2$
2. Modell: $A_0 = 1\,541\,mm^2.$

Abblasen von ungesättigtem Wasserdampf (Naßdampf)

Grundlage für diese Berechnungen bildet das bereits vorgestellte „Einheitliche Phasenmodell“, wobei auf die Originalarbeit /7/ zurückgegriffen wird. Die kritische Massestromdichte $\mu_{d,x}$ ist dabei eine Funktion des Dampfdruckes $p_s \equiv p_1$ und der Eintrittsenthalpie h_1 des Naßdampfstromes. Vorteilhaft bezüglich Handhabung und mathematischer Approximation erscheint der funktionelle Zusammenhang $\mu_{d,x} = f\,(p_S, x_{WD})$. Außer dem Abblasedruck p_S wird der Dampfgehalt x_{WD} als unabhängige Variable verwendet. Die Zuordnung ist im Bild 3 vorgenommen, die Grenzfälle Sattdampf ($x_{WD} = 1$) und Siedewasser ($x_{WD} = 0$) sind eingeschlossen. Näherungsweise gelten die analytischen Beziehungen:

$$\mu_{d,x} = C\,p_S^n \tag{21}$$

$$n = 0{,}98 - 0{,}46\,\exp\,(-12{,}54\,x_{WD} + 28{,}70\,x_{WD}^2 - 28{,}86\,x_{WD}^3) \tag{22}$$

für $x_{WD} \leqq 0{,}3$

$$C = \frac{14\,500}{1 + 11{,}772\,x_{WD} - 76{,}009\,x_{WD}^2 + 449{,}599\,x_{WD}^3 - 766{,}049\,x_{WD}^4} \tag{23}$$

für $x_{WD} \geqq 0{,}3$

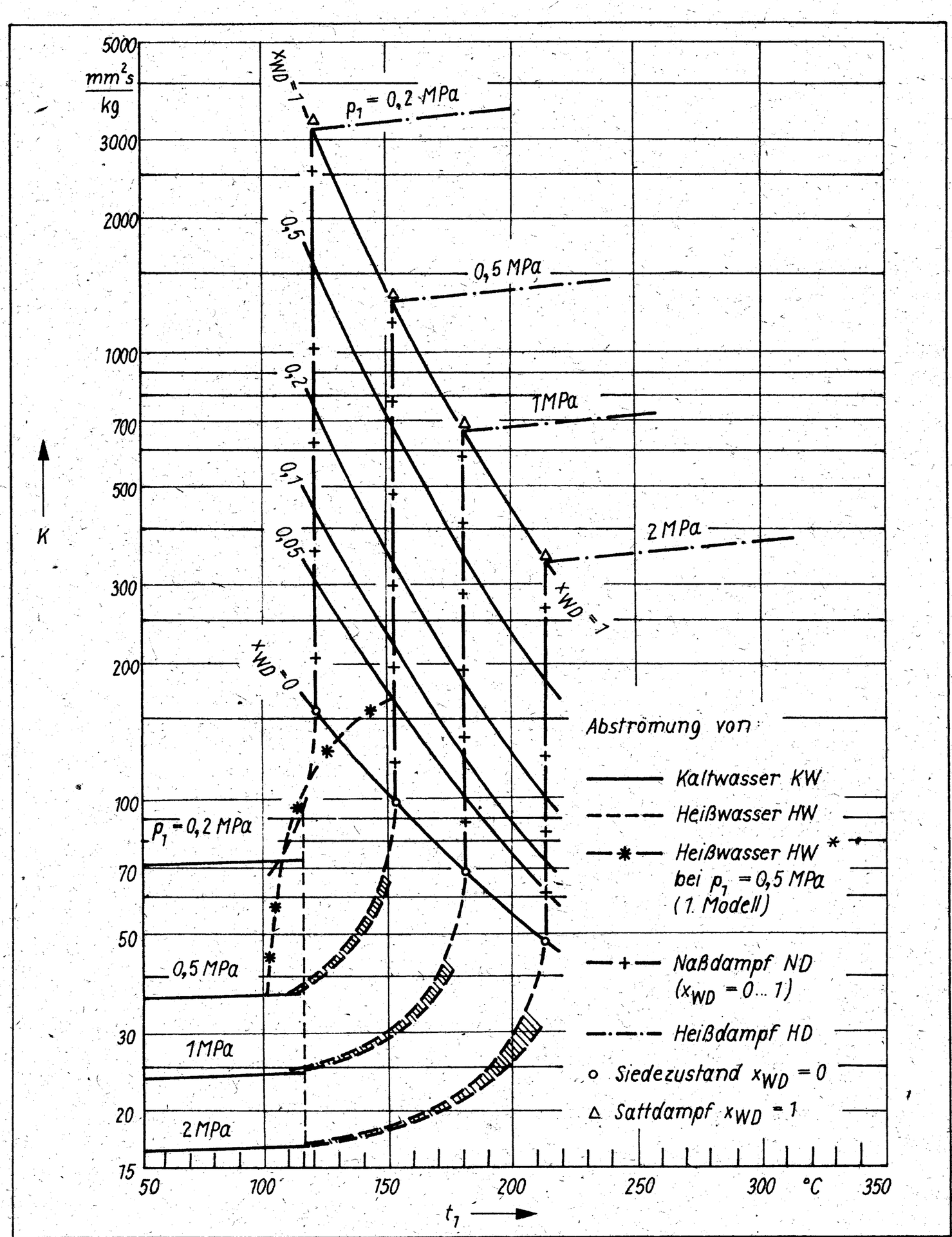
$$C = \frac{1}{0{,}001377\,x_{WD} - 0{,}002800\,x_{WD}^2 + 0{,}003810\,x_{WD}^3 - 0{,}001720\,x_{WD}^4} \tag{24}$$

Mit $\mu_{d,x}$ lassen sich die zugeschnittenen Bemessungsgleichungen auswerten:

$$\dot{m} = 10^{-6}\,\alpha_{dp} A_0 \mu_{d,x} \quad \text{in kg/s} \tag{25}$$

$$A_0 = \frac{10^6\,\dot{m}}{\alpha_{dp}\mu_{d,x}} \quad \text{in mm}^2. \tag{26}$$

In /1/ und /2/ sind derzeit noch keine Aussagen zur Berechnung von Naßdampfströmungen enthalten. Nach /4/ wäre das im Abschnitt „Abblasen von Heißwasser“ vorgestellte „Getrennte Phasenmodell“ mit Entspannung auf den kritischen Druck (2. Modell) verwendbar.



4 Gegenüberstellung der spezifischen Abblasequerschnitte ($K = A_0\,\alpha/\dot{m}$) für Wasser und Wasserdampf in Abhängigkeit der Druck- und Temperaturparameter bei atmosphärischem Gegendruck unter Verwendung verschiedener Berechnungsansätze

Beispiel 5 (Naßdampfabströmung)

Infolge eines Rohrbruchs in einem Wärmeübertrager, der mit den Primärparametern $p_R = 1{,}7$ MPa und $t_R = 190$ °C betrieben wird, tritt ein Massestrom $\dot{m} = 5{,}94$ kg/s in den Mantelraum. Dieser ist mit einem Sicherheitsventil, das bei $p_1 = 0{,}85$ MPa anspricht, verbunden.
Wie groß ist der Ventilquerschnitt zu wählen, wenn ein Proportionalsicherheitsventil mit einer zuerkannten Ausflußziffer $\alpha_d = 0{,}25$ zum Einsatz kommt und der Abblasestrom ohne zusätzlichen Gegendruck ins Freie geführt wird?

Lösung

Die zuerkannte Außflußziffer bei auftretendem Phasenwechsel berechnet sich zu $\alpha_{dp} = 0{,}89\,\alpha_d = 0{,}89 \cdot 0{,}25 = 0{,}22$.
Die Entspannung des Heißwassers vom Rohrraumdruck auf Mantelraumdruck führt zu einer Teilverdampfung mit dem Dampfgehalt

$$x_{WD} = \frac{h_R - h_1'}{\Delta h_{V,1}} = \frac{807{,}7 - 732{,}0}{2038{,}7} = 0{,}037.$$

Mit diesem Parameter und dem bekannten $p_S = 0{,}85$ MPa ergibt das im Bild 3 aufgezeichnete Diagramm bzw. die Gln. (22), (23) und (21) $\mu_{d,x} = 9\,600$ kg/(m² s).
Der erforderliche Sicherheitsventil-Querschnitt beträgt gemäß Gl. (26)

$$A_0 = \frac{10^6 \cdot 5{,}94}{0{,}22 \cdot 9\,600}\ \text{mm}^2 = 2\,813\ \text{mm}^2$$

Die Berechnung nach dem „Getrennten Phasenmodell" liefert
$A_0 = 2\,594$ mm².

Qualitativer Vergleich der Berechnungsmodelle für Wasser und Dampf

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Modelle tangieren teilweise. Diese Berührungsbereiche werden nachfolgend detailliert untersucht und die Ergebnisse im Bild 4 eingetragen. Als charakteristische Größe sei $K = A_0\,\alpha_d/\dot{m}$ bzw. $K = A_0\,\alpha_{dp}/\dot{m}$ verwendet. Der Gegendruck betrage stets $p_a = 0{,}1$ MPa.
Die Kurven im Bild 4 zeigen:

- Der erforderliche Ventilquerschnitt wird bei Kalt- und Warmwasserabströmung KW nur gering von der Medientemperatur beeinflußt.
- Bei Heißwasserabströmung nimmt der Ventilquerschnitt stark mit steigender Temperatur zu. Bei Rechnung nach dem „Einheitlichen Phasenmodell" HW wächst der Querschnitt in der Nähe des Siedepunktes progressiv. Im schraffierten Ergebnisbereich liegen die Einflüsse der Ausflußziffern [Gl. (16)]. Sie sind gegenüber der Grundtendenz unbedeutend.
  Die Ergebnisse nach dem „Getrennten Phasenmodell" HW* erscheinen unlogisch, da der Querschnittsverlauf beim Übergang zur Kaltwasserabströmung eine Singularität aufweist und im Anfangsteil stark progressiv ist.
- Die in /1/ vorgegebene Temperaturgrenze von 115 °C bewirkt bei niedrigen Drücken große Abweichungen zwischen den Kurven KW und HW. Bei $p = 0{,}2$ MPa sind dies etwa 30 Prozent.
- Der Übergang zwischen Heißwasserabströmung – Kurve HW – und Naßdampf – Kurve ND – paßt auf Grund der verwendeten Modelle sehr gut.
- Der starke Anstieg der Naßdampfkurve ND verdeutlicht die Gefahr falscher Berechnungsannahmen. So kann eine Fehleinschätzung des Dampfgehaltes um 5 Prozent im Anfangsbereich einen Fehler bei der Querschnittsbemessung von (30 ... 100) Prozent bewirken. Hier liegt auch der Grund, warum frühere Vorschriften die Heißwasser- bzw. Naßdampfmengenströme bei der Ventilbemessung sicherheitshalber als Sattdampfströme in Ansatz brachten.
- An der Grenze $x_{WD} = 1$ enden die Naßdampfkurven ND zwischen den K-Werten für Sattdampf und den beginnenden Heißdampfkurven HD. Da letztere aber nur etwa 5 Prozent unter den Sattdampfwerten liegen, ist die Modellübereinstimmung bei $x_{WD} = 1$ völlig ausreichend.
- Die Heißdampfkurven HD steigen mit zunehmender Temperatur an.

Bei dem im Bild 4 gezeigten Modellvergleich wurden die Ausflußziffern eliminiert, da diese in der Größe K enthalten sind. Durch die unterschiedliche Verwendung von α_d werden Querschnittssprünge bei der realen Ventilbemessung beim Übergang von KW zu HW sowie von ND zu HD auftreten.
Besteht eine Phasenabhängigkeit der Ausflußziffer, so sollte bei Naßdampf ein gewichteter Mittelwert der Form

$$\alpha = (1 - x_{WD})\,\alpha_{Flüssigkeit} + x_{WD}\,\alpha_{Dampf} \qquad (27)$$

gebildet werden.

Hinweis

Im VEB Forschung und Rationalisierung TGA befindet sich ein Rechenprogramm zur Auswahl und Nachrechnung der Sicherheitsventilquerschnitte in Bearbeitung. Im Jahre 1990 erscheint außerdem im VEB Verlag für Bauwesen in der Reihe „Bausteine der Heizungstechnik" das Buch „Sicherheitsventile", in dem der gesamte Komplex ausführlich behandelt wird.

Literatur

/1/ WBV–AV 2: Werkstoff- und Bauvorschriften für Anlagen der Dampf- und Drucktechnik, Ausrüstung, Sicherheitsventile. 1988 (Entwurf)
/2/ AD-Merkblatt A 2: Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung – Sicherheitsventile –. Essen: Vereinigung der Technischen Überwachungsvereine 1980
DIN 3320: Sicherheitsventile – Sicherheitsabsperrventile 1984
/3/ Sicherheitsventile – Das Handbuch für Planer und Anwender. Werksunterlagen der Fa. Bopp & Reuther. Mannheim: 1982
/4/ VdTÜV-Merkblatt Sicherheitsventil 100/2 „Bemessungsvorschlag für Sicherheitsventile für Gase im flüssigen Zustand". Vereinigung Technischer Überwachungsvereine e. V. Essen
/5/ *Kemnitz, R.; Nestke, C.:* Untersuchung zur Kavitation und Sattwasserströmung in Armaturen. Technische Information Armaturen (1985) 3/4
/6/ *Kemnitz, R.; Nestke, C.:* Auslegung von Sicherheitsventilen in Heißwasseranlagen. *„Stadt- und Gebäudetechnik"* **43** (1989) 5, S. 149 bis 152
/7/ *Dzung, L.; Gyarmathy, G.:* Kritische Durchfluß-Stromdichte in Zweiphasenströmung. Brown Boveri Mitteilungen (1978) 1

Neuauflage

KDT-Empfehlung zum Einsatz von Heizkesseln für feste Brennstoffe im Leistungsbereich bis 1 MW

Die große Nachfrage veranlaßte den Trägerbetrieb, den VEB Ingenieurbüro für Bauwesen Erfurt, kurzfristig eine Neuauflage der KDT-Empfehlung herauszugeben. In diesem Zusammenhang wurden Druckfehler der 1. Auflage korrigiert sowie auf Wunsch der Betreiber weitere Baumaße und Ergänzungen eingearbeitet. Aus kosten- und papiersparenden Gründen wurden die einzelnen Blätter zweiseitig bedruckt, so daß dem Nutzer ein handliches DIN A 4 – Heft zur Verfügung steht. Der Verkaufspreis beträgt 45,– M.
Bestellungen sind zu richten an:
VEB Ingenieurbüro für Bauwesen Erfurt
Informationsleitstelle
Hochheimer Str. 47, Erfurt, 5082