Bemessung von Sicherheitsventilen für Wasser mit Austrittstemperaturen $t > 130$ °C

Dr. sc. techn. Bernd GLÜCK, VEB Kombinat Technische Gebäudeausrüstung – Institut
Dipl.-Ing. Klaus SEIDEL, Staatliches Amt für Technische Überwachung, Inspektion Karl-Marx-Stadt

Die technischen Forderungen und Berechnungen für Sicherheitsvorrichtungen gegen unzulässigen inneren Überdruck sind vom Staatlichen Amt für Technische Überwachung in den Werkstoff- und Bauvorschriften für Anlagen der Dampf- und Drucktechnik in der Ausrüstungsvorschrift AV 1-6/80 festgelegt. Die Bemessung von Sicherheitsventilen für Wasser wird dort unter Ziffer 4.9.2.2.2. behandelt. Weitere Anmerkungen und Kommentare zur vordem gültigen AV 1-9/74 sind in /1/ enthalten.
Obwohl in der AV 1-6/80 nicht mehr direkt auf die Kesselbauarten Naturlaufkessel und Zwanglaufkessel bezogen, sondern allgemein von Dampf- und Wasserabströmung bei Heißwasserkesseln gesprochen wird, ist die Erweiterung auf andere Anwendungsfälle, z. B. auf Sicherheitsventile an Wärmeübertragern und hinter Druckminderern, möglich.
Weiterhin entspricht der in der AV 1-6/80 dargestellte formelmäßige Zusammenhang der Gln. (16 a) und (16 b) mit Bezug der Abblasemenge G auf Gl. (16) nicht den tatsächlichen Verhältnissen für alle Belastungsfälle. Gl. (16 d) ist infolge der Umstellung von i_1 auf das internationale Maßsystem nicht mehr exakt wiedergegeben. Eine verbindliche Richtigstellung erfolgte in der Fachzeitschrift „Schweißtechnik" vom VEB Verlag Technik.
Aufbauend auf dieser neuen Grundlage, sollen im folgenden einige Beispiele für ein einheitliches Berechnungsverfahren für heißwasserabströmende Sicherheitsventile gegeben werden.
Typische Belastungsfälle sind:

1. Heißwasserkessel und Wärmeübertrager bei Unterbrechung der Heißwasserabgabe
2. Wärmeübertrager bei Rohrschäden

Der universelle Belastungsfall bestünde darin, daß vor dem Sicherheitsventil ein abzuführender Wasserstrom $\dot{m}_W$ und ein Dampfstrom $\dot{m}_D$ beim Vordruck p_1 und beim Außendruck p_a anstehen. Infolge der thermodynamischen Entspannung des Wasserstroms im Ventil entstehen ein Sattdampfanteil

$$\dot{m}_{W,D} = x \cdot \dot{m}_W \tag{1}$$

und ein Wasseranteil

$$\dot{m}_{W,W} = (1 - x)\, \dot{m}_W. \tag{2}$$

Der Dampfgehalt x errechnet sich bei adiabatischer Drosselung und Vernachlässigung der Strömungsenergien nach der Beziehung

$$x = \frac{h_1 - h}{r}, \tag{3}$$

wenn h die Enthalpie und r die Verdampfungswärme darstellen. Näherungsweise kann

$$x = \frac{h_1 - 418}{2258} \tag{4}$$

mit der Enthalpie des abzuführenden Wasserstroms beim Vordruck h_1 in kJ/kg und für den Außendruck $p_a \approx 0{,}1$ MPa geschrieben werden. Gl. (4) stellt die Gl. (16 d) der AV 1-6/80 richtig. Im Temperaturbereich zwischen 130 °C und 200 °C kann Gl. (4) auch

$$x = 1{,}869 \cdot 10^{-3}\, t - 0{,}185 \text{ mit } t \text{ in °C} \tag{4 a}$$

geschrieben werden.
Zusammengefaßt folgen für die Masseströme

$$\dot{m}_D' = \dot{m}_D + \dot{m}_{W,D} \tag{5}$$

$$\dot{m}_W' = \dot{m}_{W,W} \tag{6}$$

als Belastungen für das Sicherheitsventil.
Aus beiden Massesträmen dürfen die engsten freien Strömungsquerschnitte nach den bekannten Gleichungen zur Bemessung der Sicherheitsventile für Sattdampf und Wasser getrennt berechnet und zu einem Gesamtquerschnitt gemäß AV 1-6/80, Ziffer 4.9.2.2.2.1. vierter Anstrich, addiert werden. Der Einsatz von Vollhubventilen ist bei nachgewiesener Eignung und bei Beachtung der realen Ausflußziffer statthaft.
Vom Staatlichen Amt für Technische Überwachung wurde zugestimmt, daß die Formeln (16 a) bis (16 d) der AV 1-9/74 auch bei Ansprechen des Sicherheitsventils infolge einer hydraulischen gegebenen Druckdifferenz gelten /1/. Diese Zustimmung gilt auch für den Fall, daß vor dem Ventil bereits ein Dampf-Wasser-Gemisch ansteht. Die Forderung in TGL 23043/01 und /02, das Sicherheitsventil an der höchsten Stelle des Druckkörpers anzuordnen, ist daher unbedingt einzuhalten.

Heißwasserkessel und Wärmeübertrager bei Unterbrechung der Heißwasserabgabe

Prinzipiell sind verschiedene Belastungsfälle denkbar. Vor einer entsprechenden Zuordnung müssen die thermodynamischen und hydraulischen Grenzbelastungen festgestellt werden. Dies sind die maximal erzeugbare Dampfmenge bei Weiterbetrieb der Wassereinspeisung

$$\dot{m}_D = \frac{\dot{Q} - (t_s - t')\, c \cdot \dot{m}_W}{r} \tag{7}$$

sowie die hydraulisch bedingte Einspeisemenge gemäß Pumpenkennlinie

$$\dot{m}_W = f(\Delta p_p). \tag{8}$$

Die beiden Massesträme sind jeweils für den Einstelldruck p_o des Sicherheitsventils zu ermitteln.
Es bedeuten:

$\dot{Q}$ – maximale Leistung des Heißwasserkessels bzw. des Wärmeübertragers in kW
$\dot{m}_W$ – Zuspeisemenge in kg/s
r – Verdampfungswärme bei p_o in kJ/kg
t_s – Siedetemperatur bei p_o in °C
t' – Eintrittstemperatur des Wasserstromes $\dot{m}_W$ in °C
c – spezifische Wärme des Wassers in kJ/(kg · K)

Belastungsfall 1

Erfolgt keine Einspeisung oder hat das eintretende Wasser die Temperatur $t' = t_s$, dann ist Gl. (7) mit der in der AV 1-6/80 angegebenen Gl. (16) identisch, d. h., sie kann für diesen Belastungsfall angewendet werden.

Belastungsfall 2

Ergeben die Gln. (7) und (8) $\dot{m}_D > \dot{m}_W$, verringert sich der Wasserinhalt im Kessel oder Wärmeübertrager. Dies könnte beispielsweise vorkommen, wenn die Zuspeisung des Kessels ungenügend erfolgt oder der Rücklaufzufluß eines Wärmeübertragers gedrosselt ist. Das Sicherheitsventil muß für reine Dampfausströmung bemessen werden.

Belastungsfall 3

Liefern die Gln. (7) und (8) den Rechenwert $\dot{m}_D < 0$, entsteht kein Dampf. Das Wasser wird lediglich auf die Temperatur

$$t = t' + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_W c} \tag{9}$$

aufgeheizt. Vor dem Sicherheitsventil steht in diesem Fall immer Wasser an. Bei Temperaturen $t > 130$ °C ist das Sicherheitsventil

für eine Dampf-Wasser-Ausströmung entsprechend den Anteilen nach Gln. (1) und (2) zu bemessen.
Für Temperaturen $t \leqq 130$ °C gilt Gl. (15 a) der AV 1-6/80.

Belastungsfall 4

Folgen aus den Gln. (7) und (8) die Verhältnisse $0 < \dot{m}_D < \dot{m}_W$, steht vor dem Sicherheitsventil bereits ein Dampf-Wasser-Gemisch an. Es besteht aus den Anteilen Dampfstrom $\dot{m}_D$ und Wasserstrom $(\dot{m}_W - \dot{m}_D)$. Die Berechnung erfolgt nach den Gln. (1) bis (6).

Beispiel 1

Durch Fehlbedienung, z. B. Schließen des Vorlauf-Ventils oder Abschluß der Abnehmer, wird die Wasserumwälzung in einem Wärmeübertrager unterbrochen. Da die Temperaturregelung und -begrenzung ausfallen, beaufschlagt das Primärmedium den im Netz installierten Wärmeübertrager weiterhin. Die Schaltung der Anlage erlaubt es, daß die Umwälzpumpen eine gewisse Zeitspanne hindurch Wasser aus dem Ausdehnungsgefäß in den Wärmeübertrager fördern. Es sind die möglichen Belastungen für das Sicherheitsventil (Einstelldruck $p_o = 1$ MPa) bei folgenden Betriebsfällen zu ermitteln

a) Vollastpumpe fördert bei den gegebenen Druckverhältnissen $\dot{m}_W = 17\,000$ kg/h; maximal übertragene Wärmemenge $\dot{Q} = 1150$ kW; Wasser-Eintrittstemperatur $t' = 70$ °C
b) Teillastpumpe mit $\dot{m}_W = 2000$ kg/h; $\dot{Q} = 1020$ kW; $t' = 70$ °C
c) Umwälzpumpen sind abgestellt; $\dot{Q} = 880$ kW.

Lösung

a) mit $\dot{m}_W = 17\,000$ kg/h $\triangleq$ 4,72 kg/s liefert Gl. (7)

$$\dot{m}_D = \frac{1150 - (179{,}9 - 70) \cdot 4{,}2 \cdot 4{,}72 \text{ kg/s}}{2014} = -0{,}51 \text{ kg/s},$$

d. h. es entsteht kein Dampf. Die Wassertemperatur ergibt sich nach Gl. (9) zu

$$t = 70 \text{ °C} + \frac{1150}{4{,}72 \cdot 4{,}2} K = 128{,}0 \text{ °C}.$$

Das Sicherheitsventil ist für Wasserabströmung zu bemessen (AV 1-6/80, Gl. (15 a)).

b) für $\dot{m}_W = 2000$ kg/h $\triangleq$ 0,56 kg/s folgt aus Gl. (7)

$$\dot{m}_D = \frac{1020 - (179{,}9 - 70) \cdot 4{,}2 \cdot 0{,}56 \text{ kg/s}}{2014} = 0{,}38 \text{ kg/s}.$$

Dies bedeutet, daß nur ein Teilstrom verdampft, so daß vom Sicherheitsventil $\dot{m}_D = 0{,}38$ kg/s Dampf und $(\dot{m}_W - \dot{m}_D) = 0{,}18$ kg/s Wasser mit Siedetemperatur abzuführen sind. Im Ventil entspannt sich der Wasserstrom auf Atmosphärendruck ($p_a \approx 0{,}1$ MPa). Ausgehend von der Enthalpie des siedenden Wassers $h_1 = 762{,}6$ kJ/kg, liefert Gl. (4)

$$X = \frac{762{,}6 - 418}{2258} = 0{,}15.$$

Damit ergeben die Gln. (1) und (2)
$\dot{m}_{W,D} = 0{,}15 \cdot 0{,}18$ kg/s $= 0{,}03$ kg/s
$\dot{m}_{W,W} = (1 - 0{,}15) \cdot 0{,}18$ kg/s $= 0{,}15$ kg/s.
Die für die Bemessung des Sicherheitsventils anzunehmenden Werte folgen gemäß der Gln. (5) und (6)
$\dot{m}_D' = 0{,}38$ kg/s $+ 0{,}03$ kg/s $= 0{,}41$ kg/s
$\dot{m}_W' = 0{,}15$ kg/s.

c) Da kein Massestrom zufließt, entfällt die Wärmemenge zum Aufheizen. Die erzeugte Dampfmenge ergibt sich somit aus Gl. (7) zu

$$\dot{m}_D = \frac{880 \text{ kg/s}}{2014} = 0{,}44 \text{ kg/s}.$$

Das Sicherheitsventil ist in diesem Fall für reine Dampfabströmung zu bemessen.

Wärmeübertrager bei Rohrschaden

Tritt das Primärmedium in den Sekundärraum über, kann es je nach dem dort herrschenden Druck zu teilweiser Dampfbildung kommen. Bezogen auf den Einstelldruck p_o des Sicherheitsventils, wäre der nach /1/ zu berechnende Wasserstrom in einen Sattdampf- und einen Wasseranteil analog der Gln. (1) und (2) zu zerlegen. Der dabei entstehende Heißwasserstrom würde im Sicherheitsventil bei Entspannung auf den Außendruck erneut in Sattdampf und Wasser aufgeteilt werden. Da im Ergebnis der beiden aufeinanderfolgenden Zustandsänderungen nur der Dampfgehalt x interessiert und beide Verläufe näherungsweise einer Isenthalpen (h = const.) folgen, kann für die Bemessung des Sicherheitsventils der Zustand im Sekundärraum des Wärmeübertragers bei Aufteilung der Masseströme übersprungen werden.
Somit folgen in Zusammenfassung der Gln. (1) bis (6) aus dem Massestrom $\dot{m}_W$ und der Primärenthalpie h_1 sofort $\dot{m}_D$ und $\dot{m}_W$.

Beispiel

Ein Wärmeübertrager ist sekundärseitig mit einem Einstelldruck $p_o = 0{,}7$ MPa abgesichert. Auf der Primärseite stehen ein Druck $p_1 = 1{,}7$ MPa und eine Temperatur $t_1 = 180$ °C an. Das Heizregister besteht aus Rohren mit einem Innendurchmesser $d_i = 15$ mm. Es sollen die Dampf- und Wasserströme ermittelt werden, die der Berechnung des Sicherheitsventils bei einem Rohrschaden zugrunde zu legen sind, wenn die Entspannung auf den Außendruck $p_a = 0{,}1$ MPa erfolgt.

Lösung

Nach TGL 23043/01 und /02 ergibt sich für zwei freie Rohrquerschnitte und der Ausflußziffer $\alpha = 0{,}5$

$$\dot{m}_W = 2 \frac{\pi d_i^2}{4} \alpha \sqrt{2 \varrho_1 (p_1 - p_o)}$$

$$= 2 \frac{\pi \cdot 0{,}015^2}{4} 0{,}5 \sqrt{2 \cdot 887 (1{,}7 - 0{,}7)\, 10^6 \text{ kg/s}}$$

$$= 7{,}44 \text{ kg/s}.$$

Der Dampfgehalt ergibt sich mit der Enthalpie des Heißwassers $h_1 = 763{,}5$ kJ/kg nach Gl. (4) zu

$$x = \frac{763{,}5 - 418}{2258} = 0{,}15.$$

Daraus folgen sofort

$\dot{m}_{W,D} = 0{,}15 \cdot 7{,}44$ kg/s $= 1{,}12$ kg/s

$\dot{m}_{W,W} = (1 - 0{,}15) \cdot 7{,}44$ kg/s $= 6{,}32$ kg/s

als Bemessungsgrundwert $\dot{m}_D'$ und $\dot{m}_W'$ für die Auslegung des Sicherheitsventils.
Es sei angenommen, daß im Sekundärraum des Wärmeübertragers, also vor dem Sicherheitsventil, bereits ein Dampf-Wasser-Gemisch vorhanden ist.
Der Dampfgehalt beträgt nach Gl. (3)

$$x = \frac{763{,}5 - 697{,}1}{2066} = 0{,}03.$$

Daraus ergeben sich entsprechend der Gln. (1) und (2) ein Dampfstrom von 0,22 kg/s und ein Wasserstrom von 7,22 kg/s.

Literatur

/1/ *Seidel, K./Glück, B.:* Bemessung von Sicherheitsventilen an Wärmeübertragern und Ausdehnungsgefäßen in der Heizungstechnik. *„Stadt- und Gebäudetechnik"*, **35** (1981) 9, S. 282 bis 283