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

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

Die Sicherheitsventile stellen derzeit noch die wichtigsten Sicherheitsvorrichtungen gegen unzulässigen inneren Überdruck in Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung dar. Über die Anordnung dieser Vorrichtungen und die zu beachtenden Gefahrensituationen gibt es eine Vielzahl von Normen, Vorschriften und Hinweisen, die länderbezogen gelten und zeitlichen Änderungen unterliegen. In der Regel aber fehlen Angaben zur genauen Ermittlung der Lastannahmen. Es sind deshalb die **physikalisch-technischen Sachverhalte,** die zur Drucksteigerung in den **Anlagenteilen** führen können, zu untersuchen. Sie werden **Lastfall** genannt. Unter Bezugnahme auf den Anbringungsort der Sicherheitsvorrichtung ist deren **Belastung,** die auch als **Lastannahme** bezeichnet wird, zu ermitteln.

Die Arbeitsweise der Sicherheitsvorrichtungen wird durch drei relevante Drücke markiert. Beim **Ansprechdruck** (= Abblasedruck) p_A beginnt das Ventil zu öffnen bis beim **Öffnungsdruck** $p_{Öff}$ der volle Kegelhub erreicht ist. Der Ventilquerschnitt muß so bemessen sein, daß im Havariefall kein weiterer Druckanstieg auftreten kann. Das Ventil schließt bei dem unter dem Ansprechdruck p_A liegenden **Schließdruck** p_{Sch} (Bild 1). Um das Ansprechen der Sicherheitsvorrichtung auf den äußersten Gefahrenfall zu begrenzen, werden Regeleinrichtungen installiert, die den Betrieb im **Normaldruckbereich** zwischen $p_{N,min}$ und $p_{N,max}$ gewährleisten. Versagt diese Regelung, so ist der weitere Betrieb prinzipiell noch bis zum Ansprechdruck möglich. Zusätzlich wird vielfach eine Druckbegrenzungseinrichtung vorgesehen, die zwischen $p_{N,max}$ und p_A – beispielsweise beim **Grenzdruck** p_{Gr} – wirksam wird. Sie schaltet das außerhalb des Normaldruckbereiches arbeitende Anlagenteil ab. Ist eine Wiederinbetriebnahme erst nach Beseitigung der Ursachen, die zu dem unkontrollierten Druckanstieg führten, von Hand möglich, so spricht man von einem **Sicherheitsbegrenzer.**

Der Zusammenhang zwischen **Berechnungsdruck** p_B, **maximalem Anlagendruck** p_{Anl} und **Ansprechdruck** p_A, wird durch die Beziehung

$$p_B \geqq p_{Anl} \geqq p_A \tag{1}$$

hergestellt. Nach den meisten Vorschriften /1, 2, 3/ (Druckbehälter, Kessel, Rohrleitungen) darf der Öffnungsüberdruck den Berechnungsüberdruck bis 10 Prozent überschreiten. Diese eindeutige Definition gilt nicht für alle Anlagenteile (Raumheizkörper, Armaturen).

Der maximale Anlagendruck ist unter Beachten der Regelungstoleranz, der Sicherheitszuschläge und der Berechnungsdrücke zusammengeschalteter Anlagenteile festzulegen. Er dient als Bezugsgröße für die Ermittlung des Ansprechdruckes.

Ansprechdrücke und Grundsätze zur Lastannahme

Als allgemeingültige Modellierung eines abgesicherten Bauteils wird ein **Behälter** betrachtet, der im unteren Teil mit **Wasser** und darüber mit **Druckmedium** (Stickstoff, Luft, Wasserdampf) gefüllt ist (Bild 2). Vier **Absicherungsvarianten** sind zu unterscheiden:

Variante	Absicherung
V = 1	druckmedienseitig, nur SV1
V = 2	wasserseitig, nur SV2
V = 3	druckmedien- und wasserseitig, SV1 und SV2 SV1 spricht zuerst an
V = 4	druckmedien- und wasserseitig, SV1 und SV2 SV2 spricht zuerst an

Wird der hydrostatische Druck der Druckmediensäule vernachlässigt und für die Wassersäule der Größtwert eingesetzt, so ergeben sich für die **Ansprechdrücke** der Sicherheitsventile SV1 und SV2

$$p_{A,1} \leqq p_{Anl} - g\,\varrho_W H_1 \tag{2}$$

$$p_{A,2} \leqq p_{Anl} - g\,\varrho_W H_2. \tag{3}$$

Die kleinsten Ansprechdrücke ergeben sich für die höchsten Dichten, d. h. für das Wasser im Behälter ist die niedrigste Temperatur t_{min} anzusetzen.

Gemäß Bild 1 bläst das aktivierte Ventil wegen der ihm eigenen Hysterese im Bereich $p_A \ldots p_{Öff} \ldots p_{Sch}$ ab. Dies bedeutet, daß der höchste Druck (Öffnungsdruck)

$$p_{Öff} = \omega p_A \tag{4}$$

und der niedrigste Druck (Schließdruck)

$$p_{SCH} = \sigma p_A \tag{5}$$

beträgt. Die Koeffizienten ω und σ sind konstruktionsabhängig.

Für **Variante 3** leitet sich aus der Ungleichung

$$\omega p_{A,1} + g\,\varrho_W (H_W - H_2) < p_{A,2}$$

bei höchstem Wasserstand der Kleinstwert des Ansprechdruckes ab:

$$p_{A,1} < \frac{p_{A,2} - g\,\varrho_W (H_1 - H_2)}{\omega}. \tag{6}$$

Im Bild 3 ist eine mögliche chronologische Druckentwicklung dieser Variante gezeigt.

Bei **Variante 4** soll zuerst SV2 aktiviert werden (Druckmedium z. B. Stickstoff). Während $p_{A,1}$ gemäß Gl. (2) zu ermitteln ist, folgt der Ansprechdruck für SV2 aus der Ungleichung

$$p_{A,1} + g\,\varrho_W (H_W - H_2) > \omega\, p_{A,2}$$

für den niedrigsten Wasserstand zu

$$p_{A,2} < \frac{p_{A,1}}{\omega}. \tag{7}$$

Ist bei **Variante 1** der Wasserstrom $\dot{m}_{W,1}$ mit der Dichte $\varrho_{W,1}$ abzuführen, so muß vorher der volumengleiche Druckmedienstrom

$$\dot{m}_{D,1} = \dot{m}_{W,1} \frac{\varrho_{DN}}{\varrho_{W,1}} \tag{8}$$

abblasen.

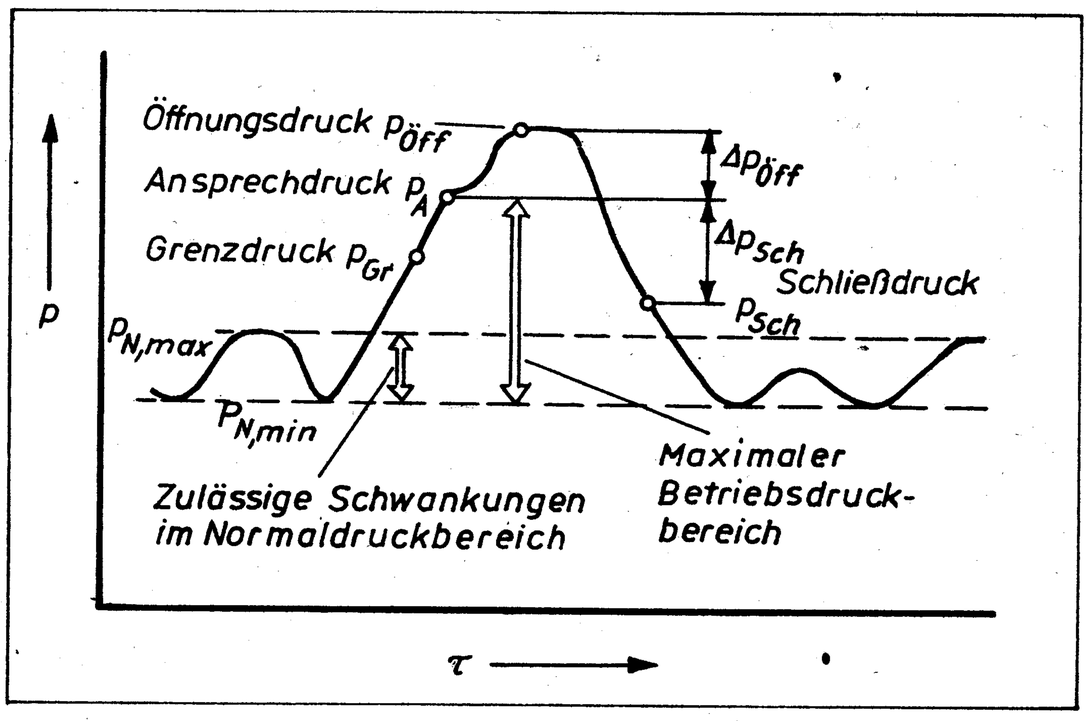
Wäre bei **Variante 2** der Druckmedienstrom $\dot{m}_{D,2}$ mit der Dichte $\varrho_{D,2}$ abzuleiten, so müßte vorher der Wasserstrom

$$\dot{m}_{W,2} = \dot{m}_{D,2} \frac{\varrho_{WN}}{\varrho_{D,2}} \tag{9}$$

über SV2 abfließen.

Die Dichten ϱ_{DN} und ϱ_{WN} gelten für das Druckmedium bzw. das Wasser bei normaler Behältertemperatur.

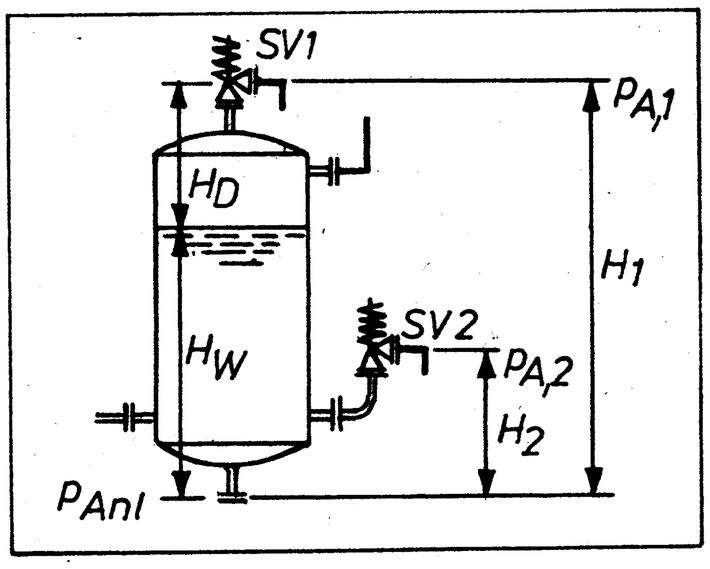
Temperaturunterschiede im gleichen Medium – beispielsweise oberer Wasserzufluß der Temperatur $t_W = 110\,°C$ bei einer Wasservorlage $t_{WN} = 40\,°C$ und Ableitung über SV2 – bleiben unberücksichtigt. Der Fehler bezüglich des Abblasequerschnittes beträgt etwa 2 Prozent.



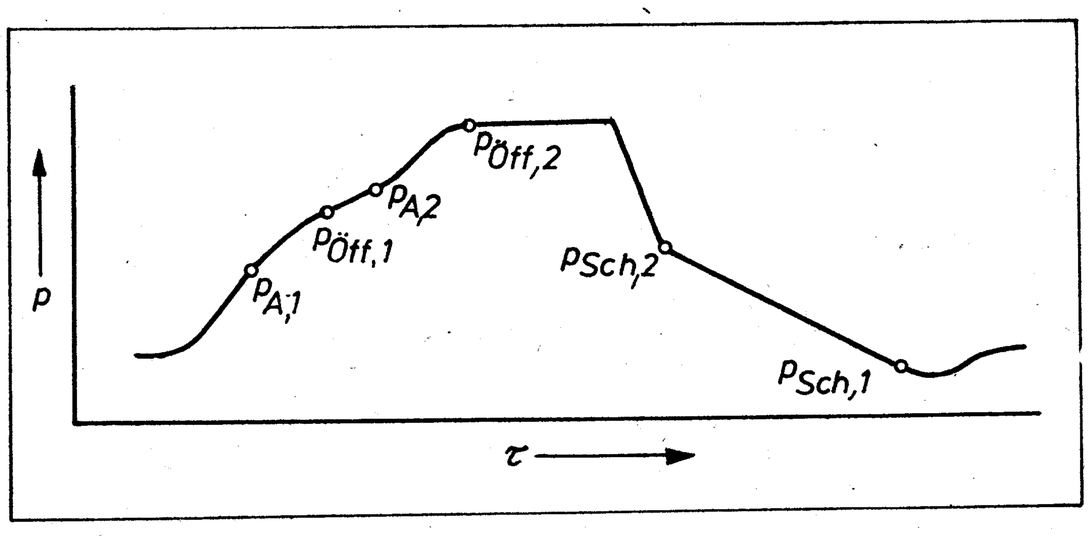
1 Kennzeichnung der in einem Anlagenteil mit installiertem Sicherheitsventil auftretenden Drücke und Druckbereiche

Lastannahme bei Phasenwechsel des Zuflußmediums durch Entspannung

Fließt über eine Drosselstelle, z. B. ein Stellventil, der Wasserstrom $\dot{m}$ mit der Temperatur t_V in den mit p_A abgesicherten Behälter, so tritt dann



2 Behälter mit den Sicherheitsventilen SV1 am Druckmedienraum sowie SV2 am Wasserraum. Die Höhen und die Druckebenen (Ansprechdrücke) sind vermerkt.



3 Möglicher Druckverlauf beim gestaffelten Ansprechen der Sicherheitsventile SV1 und SV2 (Variante 3)

Nachverdampfung auf, wenn p_A kleiner als der zu t_V gehörige Siededruck ist [$p_A < p_S(t_V)$]. Diese Aussage gilt wegen der geringen Druckabhängigkeit der Enthalpie des Wassers mit sehr guter Näherung. Der Dampfgehalt des Wasser-Dampf-Gemisches (Naßdampf) berechnet sich zu

$$x_{WD} = \frac{h_W - h_{WS}}{\Delta h_V} \tag{10}$$

mit

h_W Spezifische Enthalpie des Wassers vor der Drosselstelle
h_{WS} Spezifische Enthalpie des Siedewassers bei p_A ($h_{WS} \equiv h'$)
Δh_V Spezifische Verdampfungsenthalpie bei p_A.

Erfolgt im Behälter keine Separation der Gemischkomponenten, so muß das Sicherheitsventil den Naßdampfstrom $\dot{m}$ abführen. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn die Drosselstelle direkt am Behältereintritt liegt, keine Wasservorlage existiert und der Gemischstrom eine große Geschwindigkeit besitzt. Ein homogenes Wasser-Dampf-Gemisch ist auch dann zu erwarten, wenn es sich nicht um einen Behälter sondern um eine Rohrleitung mit vorgeschaltetem Drosselorgan handelt.
Bei Separation der Gemischkomponenten entstehen der Dampfstrom

$$\dot{m}_{WD} = x_{WD}\,\dot{m} \tag{11}$$

mit der Dichte des Sattdampfes $\varrho_{WD} = \varrho''$ und der Wasserstrom

$$\dot{m}_W = \dot{m} - \dot{m}_{WD} \tag{12}$$

der Dichte des siedenden Wassers $\varrho_W = \varrho'$. Diese Stoffströme sind bei Erreichen des Abblasedruckes gleichzeitig abzuführen.
Da die jeweilige Separationswirkung der Behälter nicht voraussehbar ist, wird die Existenz von Naßdampf angenommen und dem Sicherheitsventil an der höchsten Stelle des Druckbehälters SV1 als Belastung zugewiesen.
Befindet sich zusätzlich noch ein **Druckmedienpolster** im Behälter, so ist die Ermittlung der ungünstigsten Belastung des Sicherheitsventils problematisch. Der Strömungsverlauf im Behälter, die Phasenwandelreaktion und der Ablauf der Mischung können nicht allgemeingültig angegeben werden. Zwei Modellbetrachtungen, bei denen von einer Separation von Dampf und Wasser ausgegangen bzw. ein homogenes Naßdampfgemisch mit darüber schwimmendem Druckmedienpolster angesetzt wurde, ergaben schlußfolgernd:

Entsteht in einem Behälter mit Druckmedienauflastung (Luft, Stickstoff) durch Entspannung eines eintretenden Wasserstromes Naßdampf, so ist für die ungünstigste Belastung anzunehmen, daß während der I. Phase das Druckmedium und in der II. Phase der Naßdampf abzuführen ist.
Der abzublasende Druckmedienstrom berechnet sich bezugnehmend auf die Gln. (11) und (12) zu

$$\dot{m}_{D,1} = \dot{m}_{WD}\frac{\varrho_{DN}}{\varrho''} + \dot{m}_W\frac{\varrho_{DN}}{\varrho'} = \left[\frac{1}{\varrho'} + x_{WD}\left(\frac{1}{\varrho''} - \frac{1}{\varrho'}\right)\right]\dot{m}\,\varrho_{DN}, \tag{13}$$

wobei sich die Dichte des Druckmediums ϱ_{DN} auf die normale Behältertemperatur t_{DN} und auf den Ansprechdruck des SV1 $p_{A,1}$ bezieht.

Lastannahme bei Dampfzufuhr in Mischvorwärmern

Die Arbeitsweise von konventionellen Mischvorwärmern und von modernen Strömungsmischvorwärmern basiert auf dem engen Kontakt von Heizdampf und Umlaufwasser mit dem Ergebnis der Dampfkondensation.
Versagt die Regelung der Dampfzufuhr, so muß der überschüssige Dampf über das an der höchsten Stelle installierte Sicherheitsventil SV1 abgeführt werden.
Die Prüfung, ob das Ableiten der zugeführten Dampfmenge oder eine nach dem Kontakt mit dem zuströmenden Wasser entstandene größere Sattdampfmenge die maßgebliche Belastung für das Sicherheitsventil darstelllt, wurde für die Einsatzbereiche

Heizdampf	Mischvorwärmer
1,5 MPa; (250 ... 200) °C	1,0 MPa
1,0 MPa; (230 ... 180) °C	0,8 MPa
0,6 MPa; (200 ... 160) °C	0,4 MPa

durchgeführt. Die Unterschiede bezüglich des erforderlichen Sicherheitsventil-Querschnittes liegen im Genauigkeitsbereich der üblichen technischen Annahmen.
Als Lastannahme für das Sicherheitsventil wird vereinfachend der zugeführte Dampfmassestrom und die Dichte bei Entspannung auf Ansprechdruck zugrunde gelegt.
Weichen die Parameter stark von den überprüften Verhältnissen ab, so sind entsprechende Kontrollrechnungen durchzuführen.
Bei Strömungsmischvorwärmern ist für eine wirksame Separation von Dampf und Wasser vor dem Sicherheitsventil zu sorgen.

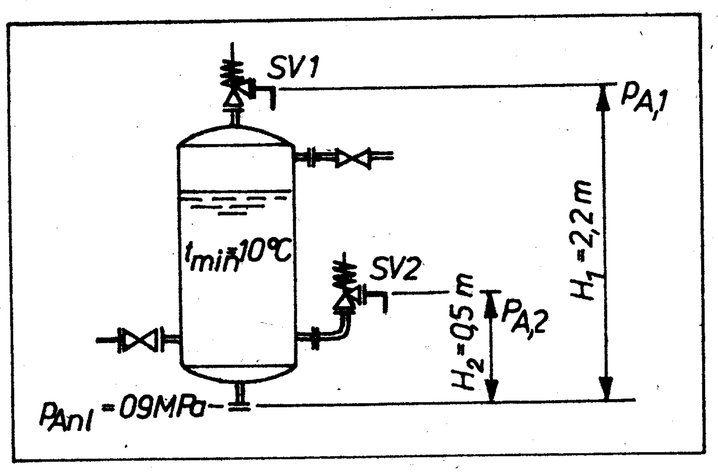
Lastannahme bei Phasenwechsel des Behälterinhaltes durch Beheizung

Kommt in einem Dampf- bzw. Wasserkessel oder in einem Wärmeübertrager das Behälterinhaltswasser zum Verdampfen, so kann angenommen werden, daß sich an der höchsten Stelle trocken gesättigter Wasserdampf (Sattdampf) sammelt. Da der Verdampfungsvorgang an eine Heizfläche erfolgt und die Dampfblasen aufgrund des Auftriebs emporsteigen, werden in der Regel keine Wassertropfen mitgerissen, wie dies bei der Entspannung mit großer aufgeprägter Geschwindigkeit geschieht.
Der entstandene Sattdampf ist durch das Sicherheitsventil SV1 abzuführen.
Die zusätzliche Anbringung eines wasserseitig angeordneten Sicherheitsventils SV2 ist unzulässig, da es durch Abspeisen von Wasser zu einer schnelleren Trockenlegung der Heizfläche führt und die Ausbrenngefahr vergrößert.

Zusammenfassende Prämissen

Die bisherigen Ausführungen zeigen, daß jeder Belastungsfall, jede Behälterfüllung und jede Sicherheitsventilanordnung der speziellen Untersuchung bedarf. Um allgemeingültig, aber dennoch praxisbezogen die Detailuntersuchungen vornehmen zu können, werden vorab nachfolgende **Prämissen** formuliert:

I. Bei möglicher Dampfbildung im abzusichernden Anlagenteil (Behälter, Rohrleitung) oder bei Vollfüllung des Anlagenteils mit einem kompressiblen Medium ist stets an der höchsten Stelle des Druckkörpers ein Sicherheitsventil SV1 ohne Entstehungsmöglichkeit einer Wasservorlage vorzusehen. Kommt es durch Beheizung des Wassers im Behälter zur Dampfbildung (Kessel, Wärmeübertrager), so darf der Druckraum nur durch Variante 1 abgesichert werden.



4 Geometrische und hydrostatische Gegebenheiten des abgesicherten Druckbehälters

II. Bei Sicherheitsventil-Doppelanordnung SV1 und SV2 am gleichen Anlagenteil, werden die abzuleitenden kompressiblen Medienströme (Wasserdampf, Gas) stets dem an der höchsten Stelle des Druckkörpers angebrachten Sicherheitsventil SV1 und der Wasserstrom stets dem tiefergelegenen Sicherheitsventil SV2 zugeordnet. Da keine allgemeingültigen Aussagen über die Separationswirkung der Behälter getroffen weden können, sei auch der bei Heißwasserentspannung entstehende Naßdampf als kompressibles, über SV1 abzublasendes Medium verstanden.

III. Anlagenteile mit Dampf- oder Gasvollfüllung müssen an der tiefsten Stelle eine Kondensatentwässerung erhalten.

IV. Bei Sicherheitsventil-Doppelanordnungen sind trotz der unter II. getroffenen Lastzuweisungen zu beachten, daß bei Variante 3 das zuerst ansprechende SV1 auch für Wasserabströmung zugelassen sein muß und dieses gefahrlos ableitet sowie daß umgekehrt bei Variante 4 das zuerst ansprechende SV2 auch mit Wasserdampf bzw. Gas beaufschlagt werden darf und dieses Fluid ebenfalls gefahrlos abführt.

Bei den Varianten 3 und 4 kann es vorkommen, daß durch die unter II. getroffene Medienzuordnung und durch die vorgegebene Ansprechreihenfolge nicht immer die druckerhöhenden Medienströme zuerst abgeführt werden. Die theoretischen Lastzuordnungen treten in praxi dann nicht in voller Größe auf. In den Tabellen 1 bis 7 (siehe Teil II, Heft 3/89) wird dies durch „Lastannahme nicht eindeutig" gekennzeichnet.

Beispiel

An einem Behälter können zwei Sicherheitsventile SV1 und SV2 installiert werden. Die höhenmäßige Lage der Ventile, der maximale Anlagedruck und die minimale Wassertemperatur sind im Bild 4 vermerkt.
Für die Absicherungsvarianten V = 1 und V = 4 sind unter Annahme des Öffnungsdruckverhältnisses $\omega = 1{,}1$ die Ansprechdrücke der Sicherheitsventile zu ermitteln.

Lösung

Die Dichte des Wassers beträgt bei 10 °C: $\varrho_W = 1000\ \mathrm{kg/m^3}$.
Der maximale Ansprechdruck des SV1 bei Variante 1 ergibt sich gemäß Gl. (2) zu

$$p_{A,1} = (0{,}9 - 9{,}81 \cdot 1000 \cdot 2{,}2 \cdot 10^{-6})\ \mathrm{MPa} = 0{,}878\ \mathrm{MPa}.$$

Bei Variante 4 bläst SV2 zuerst ab. Ausgehend vom bereits ermittelten Ansprechdruck des SV1 folgt mit Gl. (7)

$$p_{A,2} < \frac{0{,}878}{1{,}1}\ \mathrm{MPa} = 0{,}798\ \mathrm{MPa}.$$

Literatur

/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