

DIN ISO 4126-10



ICS 13.240

Einsprüche bis 2019-03-25

Entwurf**Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck –
Teil 10: Auslegung von Sicherheitsventilen bei Zweiphasenströmung
(flüssig/gas) (ISO 4126-10:2010);
Text Deutsch und Englisch**

Safety devices for protection against excessive pressure –
Part 10: Sizing of safety valves for gas/liquid two-phase flow (ISO 4126-10:2010);
Text in German and English

Dispositifs de sécurité pour protection contre les pressions excessives –
Partie 10: Dimensionnement des soupapes de sûreté pour les débits diphasiques
gaz/liquide (ISO 4126-10:2010);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-01-25 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an naa@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Armaturen (NAA), 10772 Berlin, Saatwinkler Damm 42/43, 13627 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 107 Seiten

DIN-Normenausschuss Armaturen (NAA)

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort	4
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	5
Vorwort	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Symbole und Abkürzungen	15
5 Anwendungsbereiche der Methoden	20
5.1 Allgemeines	20
5.2 Anwendungsgrenzen der Methode bei der Berechnung der Zweiphasen-Massenstromdichte in Sicherheitsventilen	20
5.2.1 Allgemeines	20
5.2.2 Verdampfende Strömung	21
5.2.3 Verdampfende Strömung bei Gemischen	21
5.2.4 Gelöste Gase	22
5.3 Grenzen der Methode zur Berechnung des mindestens abzuführenden Massenstroms	22
5.3.1 Temperatur- und Druckanstiegsgeschwindigkeit	22
5.3.2 Nicht mischbare Flüssigkeiten	23
6 Auslegungsschritte	23
6.1 Allgemeiner Überblick über die Auslegungsschritte	23
6.2 Schritt 1 — Identifizierung des Auslegungsfalls	24
6.3 Schritt 2 — Strömungsregime am Eintritt in das Sicherheitsventil	25
6.3.1 Allgemeines	25
6.3.2 Phänomen des Aufwallens	25
6.3.3 Einfluss der Viskosität und der Schaumbildungsneigung der Flüssigkeit auf das Strömungsregime	25
6.3.4 Vorhersage des Strömungsregimes (Gas/Dampf oder Zweiphasenströmung)	26
6.4 Schritt 3 — Berechnung des mindestens abzuführenden Massenstroms	30
6.4.1 Allgemeines	30
6.4.2 Druckanstieg infolge von unzulässigem Zustrom	30
6.4.3 Druckanstieg durch externe Beheizung	32
6.4.4 Druckanstieg infolge thermischer Durchgehireaktionen	34
6.5 Schritt 4 — Berechnung des abführbaren Massenstroms durch ein Sicherheitsventil	37
6.5.1 Allgemeines	37
6.5.2 Ausflussziffer des Ventils für Zweiphasenströmung, $K_{dr,2ph}$	40
6.5.3 Durchflusskoeffizient, C	41
6.5.4 Kompressibilitätsfaktor, ω	41
6.5.5 Kritisches Druckverhältnis, η_{crit}	43
6.6 Schritt 5 — Ordnungsgemäße Funktion von Sicherheitsventilen mit angeschlossenen Zuström- und Abströmleitungen	44
Anhang A (informativ) Identifizierung von Auslegungsszenarien	50
Anhang B (normativ) Auslegung eines Sicherheitsventils	52
B.1 Allgemeines	52
B.2 Schritt 1 — Identifizierung des Auslegungsfalls	52
B.2.1 Eingabedaten	52
B.2.2 Auslegung eines Sicherheitsventils — Anwendungsbereich des Verfahrens	53
B.3 Schritt 2 — Strömungsregime am Eintritt in das Sicherheitsventil	54
B.4 Schritt 3 — Berechnung der mindestens abzuführenden Massenstromdichte (Gas/Flüssigkeits-Gemisch)	55

B.5 Schritt 4 — Berechnung des abführbaren Massenstroms durch ein Sicherheitsventil (Gas/Flüssigkeits-Gemisch)	55
Literaturhinweise	57

Bilder

Bild 1 — Zusammenhang zwischen den definierten Drücken	10
Bild 2 — Sicherheitsventil in einem druckführenden System	20
Bild 3 — Verfahren zur Ventilauslegung	24
Bild 4 — Strömungsregime am Ventileintritt (Einphasen- oder Zweiphasenströmung) [23] — Grenzfüllgrad ϕ_{limit} als Funktion der dimensionslosen Blasenauftiegs- geschwindigkeit	26
Bild 5 — Kompressibilitätsfaktor als eine Funktion des Strömungsmassendampfgehalts für ein Gemisch aus Styrol und Ethylbenzol während der Polymerisation	43
Bild 6 — Kritisches Druckverhältnis und Durchflusskoeffizient bei kritischer Strömung eines Gas/Flüssigkeits-Gemischs durch ein Sicherheitsventil	44

Tabellen

Tabelle 1 — Mögliche Fluidzustände am Eintritt in das Sicherheitsventil, die eine Zweiphasenströmung ergeben können	8
Tabelle 2 — Gleichungen zur Berechnung des mindestens abzuführenden Massenstroms	46
Tabelle 3 — Gleichungen zur Berechnung der Massenstromdichte durch das Sicherheitsventil	47
Tabelle A.1 — Mögliche Ursachen für Überdruck in einem abzusichernden System	50

Nationales Vorwort

Dieses Dokument ist die Übersetzung der Internationalen Norm ISO 4126-10:2010, die im Technischen Komitee ISO/TC 185 „Safety devices for protection against excessive pressure“ erarbeitet wurde.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 003-01-10 AA „Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung“ im DIN-Normenausschuss Armaturen (NAA).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 4126-1 siehe DIN EN ISO 4126-1

Nationaler Anhang NA
(informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 4126-1, *Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck — Teil 1: Sicherheitsventile*

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung von Nationalen Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird normalerweise von ISO Technischen Komitees durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale Organisationen, staatlich und nicht-staatlich, in Liaison mit ISO, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) bei allen elektrotechnischen Themen zusammen.

Internationale Normen werden in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet.

Die Hauptaufgabe der Technischen Komitees besteht in dem Erarbeiten von Internationalen Normen. Die von den Technischen Komitees angenommenen Norm-Entwürfe werden den Mitgliedsorganisationen zur Umfrage zur Verfügung gestellt. Für eine Veröffentlichung als Internationale Norm wird eine Zustimmung von mindestens 75 % der Mitgliedsländer, die abgestimmt haben, benötigt.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

ISO 4126-10 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 185, *Safety devices for protection against excessive pressure*, erarbeitet.

ISO 4126 besteht unter dem allgemeinen Titel *Safety devices for protection against excessive pressure* aus den folgenden Teilen:

- *Part 1: Safety valves*
- *Part 2: Bursting disc safety devices*
- *Part 3: Safety valves and bursting disc safety devices in combination*
- *Part 4: Pilot-operated safety valves*
- *Part 5: Controlled safety pressure-relief systems (CSPRS)*
- *Part 6: Application, selection and installation of bursting disc safety devices*
- *Part 7: Common data*
- *Part 9: Application and installation of safety devices excluding stand-alone bursting disc safety devices*
- *Part 10: Sizing of safety valves for gas/liquid two-phase flow*

Einleitung

Zur Auslegung von Sicherheitsventilen und daran angeschlossenen Zuström- und Abströmleitungen bei stationärer Einphasenströmung aus nicht-kondensierenden Gasen/Dämpfen oder nicht-verdampfenden Flüssigkeiten gibt es fundierte Empfehlungen. Bei einer Zweiphasenströmung aus Dampf/Flüssigkeit ist jedoch der mindestens erforderliche Entlastungsquerschnitt zum Schutz eines Systems vor einem unzulässigen Überdruck größer als der für eine Einphasenströmung erforderliche Querschnitt, wenn die gleichen Zustandsbedingungen für den Druckbehälter und die gleiche Wärmefreisetzung betrachtet werden. Die Notwendigkeit eines größeren Entlastungsquerschnitts ergibt sich aus der Tatsache, dass die Flüssigkeit in einer Zweiphasenströmung teilweise den Entlastungsquerschnitt für die Dampfströmung blockiert, wodurch nur ein Teil der Energie mit dem Dampf aus dem Behälter entweicht.

Dieser Teil von ISO 4126 enthält vielfältig einsetzbare technische Werkzeuge zur Auslegung von typischen, fluiddurchströmten Sicherheitsventilen, die in verschiedenen Industriebereichen zum Einsatz kommen. Es basiert auf der Omega-Parameter-Methode, die um einen Parameter für das thermodynamische Ungleichgewicht erweitert wurde. Ohne diese Erweiterung zur Betrachtung des Ungleichgewichts entspricht das vorgeschlagene Verfahren der API RP 520. Es wird ein Ausgleich zwischen der Genauigkeit der Methode und den unvermeidbaren Unsicherheiten bei den Eingabedaten und Stoffeigenschaften unter den realen Bedingungen bei der Auslegung angestrebt. Es gibt weitere Verfahren zur Auslegung, auf die in diesem Teil von ISO 4126 Bezug genommen wird.

Bei einer Zweiphasenströmung sind der Fluidzustand und damit der Massenstrom, der abzuführen ist, von den Abmessungen des Sicherheitsventils abhängig. Des Weiteren hängt der durch ein Sicherheitsventil strömende Zweiphasen-Massenstrom grundlegend von dem Strömungsmassendampfgehalt des Fluidmassenstroms am Ventileintritt ab. Da diese Parameter für die Auslegung einer Entlastungseinrichtung in den meisten Fällen nicht vorliegen, enthält dieser Teil von ISO 4126 außerdem eine umfassende Methodik zur Bestimmung der Phasenzusammensetzung am Eintritt des Sicherheitsventils. Diese Zusammensetzung hängt von dem Ereignis ab, das zum Druckanstieg führt. Aus diesem Grund beginnt das empfohlene Verfahren zur Festlegung der Auslegung bei der Definition des Auslegungsfalls und schließt ein Verfahren zur Vorhersage des abzuführenden Massenstroms und dem sich daraus ergebenden Strömungsmassendampfgehalt am Eintritt des Sicherheitsventils ein.

Wenn die Strömung bis in den engsten Strömungsquerschnitt einphasig ist, dann kann ISO 4126-1 angewendet werden. Die Gleichungen von ISO 4126-1 sind ebenfalls im vorliegenden Teil von ISO 4126 enthalten und an die SI-Einheiten angepasst worden, um die Massenströme für die Grenzbedingungen einer Einphasenströmung zu berechnen.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von ISO 4126 enthält Festlegungen für die Auslegung von Sicherheitsventilen für eine Zweiphasenströmung aus Gas/Flüssigkeit in druckführenden Systemen, z. B. Reaktoren, Lagertanks, Kolonnen, Wärmeübertragern, Rohrleitungssystemen oder Transporttanks/-behältern. Tabelle 1 enthält die möglichen Fluidzustände am Eintritt in das Sicherheitsventil, die eine Zweiphasenströmung ergeben können.

ANMERKUNG Der Ausdruck „Sicherheitsventil“ ist gleichbedeutend mit den in ISO 4126-1, ISO 4126-4 und ISO 4126-5 beschriebenen Ventilen.

Tabelle 1 — Mögliche Fluidzustände am Eintritt in das Sicherheitsventil, die eine Zweiphasenströmung ergeben können

Fluidzustand am Ventileintritt	Auslegungsfälle	Beispiele
flüssig	unterkühlt (möglicherweise Verdampfen (Flashing) im Sicherheitsventil) gesättigt mit gelöstem Gas	kalt Wasser siedendes Wasser CO ₂ /Wasser
gasförmig/dampf- förmig	annähernd gesättigter Dampf (mögliche Kondensation im Sicherheitsventil)	Dampf
gasförmig/flüssig	dampfförmig/flüssig nicht verdampfende Flüssigkeit und nicht kondensierbares Gas (gleichbleibender Massengehalt) Gas/Flüssigkeits-Gemisch, wenn das Gas desorbiert oder gebildet wird	Dampf/Wasser Luft/Wasser

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 4126-1, *Safety devices for protection against excessive pressure — Part 1: Safety valves*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 4126-1 und die folgenden Begriffe.

3.1

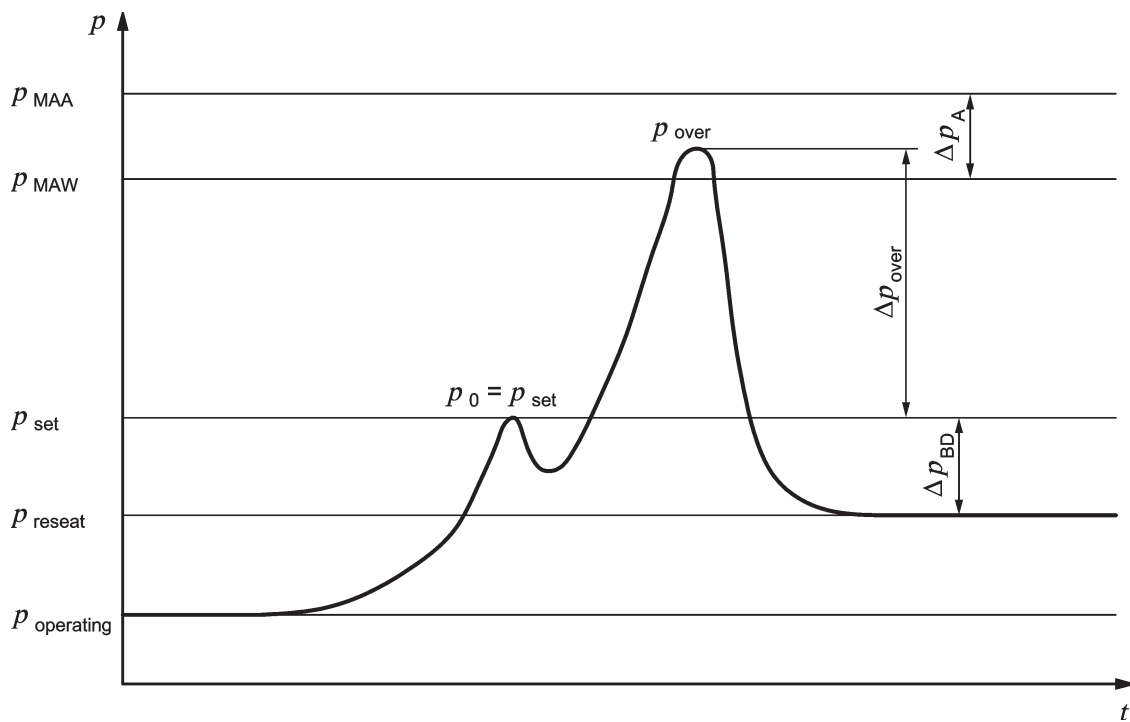
druckführendes System

Anlage, z. B. Reaktoren, Lagertanks, Kolonnen, Wärmeübertrager, Rohrleitungssysteme und Transporttanks/-behälter, die durch ein Sicherheitsventil gegen unzulässige Drucküberschreitung abgesichert ist

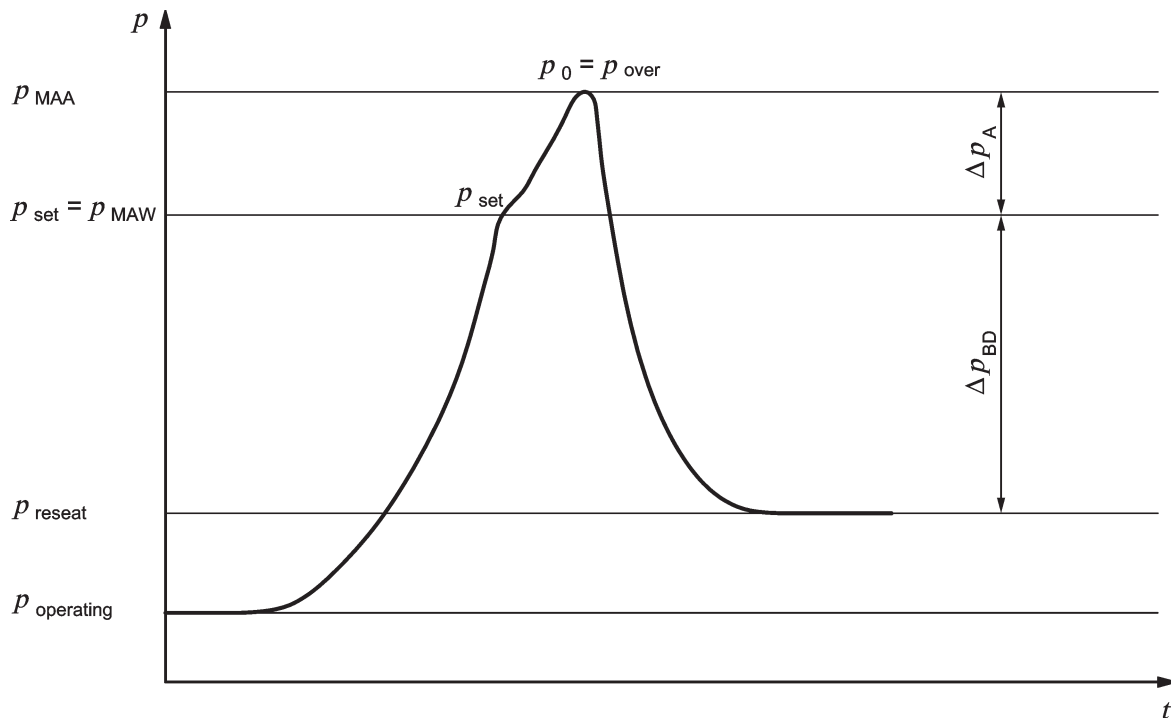
3.2 Druck

ANMERKUNG 1 Siehe Bilder 1 a) und 1 b) für eine Darstellung des Zusammenhangs zwischen den in 3.2.1 bis 3.2.7 definierten Drücken.

ANMERKUNG 2 Im Unterschied zu der in den anderen Teilen dieser Internationalen Norm verwendeten Definition, z. B. in ISO 4126-1, sind alle Drücke Absolutdrücke und keine Überdrücke.



- a) Zeitlicher Druckverlauf in einem üblichen dampfdruckbildenden Reaktionssystem mit ausreichenden Abmessungen



b) Üblicher zeitlicher Druckverlauf in einem außenbeheizten System mit Gasentlastung

Legende

p_{MAA}	maximal zulässiger akkumulierter Druck
p_{MAW}	maximal zulässiger absoluter Betriebsdruck
p_{set}	Öffnungsdruck
p_{reseat}	Schließdruck
$p_{\text{operating}}$	Betriebsdruck
Δp_{BD}	Schließdruckdifferenz
p_0	Auslegungsdruck gleich p_{set} , wie in Bild 1 a) gezeigt, und gleich p_{over} , wie in Bild 1 b) gezeigt
p_{over}	Überdruck
Δp_{A}	maximal zulässige Drucküberschreitung
Δp_{over}	Öffnungsdruckdifferenz

Bild 1 — Zusammenhang zwischen den definierten Drücken

3.2.1

maximal zulässiger absoluter Betriebsdruck

p_{MAW}

maximal zulässiger Druck im Gasraum eines druckführenden Systems in Betriebsstellung bei Auslegungstemperatur

3.2.2

maximal zulässiger akkumulierter Druck

p_{MAA}

Summe aus maximal zulässigem Betriebsdruck und maximal zulässiger Drucküberschreitung

ANMERKUNG Die maximal zulässige Drucküberschreitung wird anhand geltender Vorschriften für Betriebs- und Brandereignisse festgelegt.

3.2.3

maximal zulässige Drucküberschreitung

Δp_A

Druckanstieg oberhalb des maximal zulässigen Betriebsdrucks eines druckführenden Systems während des Entlastens durch das Sicherheitsventil

ANMERKUNG Die maximal zulässige Drucküberschreitung wird als Druck oder als Prozentsatz des maximal zulässigen Betriebsdrucks angegeben.

3.2.4

Öffnungsdruck

p_{set}

vorgegebener Absolutdruck, bei dem ein Sicherheitsventil unter Betriebsbedingungen spätestens beginnt sich zu öffnen

ANMERKUNG 1 Der Öffnungsdruck ist der Ansprechdruck nach ISO 4126-1, angegeben als Absolutdruck.

ANMERKUNG 2 Siehe Bilder 1 a) und 1 b) für Einzelheiten.

3.2.5

absolute Öffnungsdruckdifferenz

Δp_{over}

Drucksteigerung über dem Öffnungsdruck des Sicherheitsventils, p_{set}

ANMERKUNG 1 Die größte absolute Öffnungsdruckdifferenz entspricht der maximalen Drucküberschreitung Δp_A , wenn der Öffnungsdruck des Sicherheitsventils auf den maximal zulässigen Betriebsdruck des druckführenden Systems eingestellt ist.

ANMERKUNG 2 Die absolute Öffnungsdruckdifferenz wird in Druckeinheiten oder als prozentualer Anteil am Öffnungsdruck angegeben.

3.2.6

Überdruck

p_{over}

maximaler Druck im druckführenden System während der Entlastung, d. h. der Druck ist kleiner als oder gleich dem maximalen akkumulierte Druck

3.2.7

Auslegungsdruck

p_0

Druck, bei dem alle Stoffdaten, insbesondere der Kompressibilitätsfaktor ω , für die Auslegung des Sicherheitsventils berechnet werden

ANMERKUNG Für dampfdruckbildende und hybride Reaktionssysteme muss der Auslegungsdruck dem Öffnungsdruck entsprechen. Für nicht reaktive und gasbildende Systeme darf der Konstrukteur einen höheren Wert für den Auslegungsdruck wählen, der jedoch den maximal zulässigen akkumulierten Druck nicht überschreiten darf.

3.2.8

kritischer Druck

p_{crit}

fluidodynamischer kritischer Druck, der im engsten Strömungsquerschnitt des Sicherheitsventils und/oder in einem erweiterten Bereich in der Abströmleitung auftritt

ANMERKUNG Bei diesem Druck nähert sich der Massenstrom bei vorgegebenen Auslegungsbedingungen im druckführenden System einem Höchstwert. Ein weiteres Absinken des Drucks stromabwärts bewirkt keinen weiteren Anstieg des Massenstroms. Üblicherweise tritt der kritische Druck im Sicherheitsventil entweder im Ventilsitz, in der Düse des Ventils

(engster Zuströmquerschnitt) und/oder im Ventilkörper auf. In langen Abströmleitungen von Sicherheitsventilen können auch mehrere kritische Drücke auftreten.

3.2.9

kritisches Druckverhältnis

η_{crit}

Verhältnis von kritischem Druck zum Auslegungsdruck

3.2.10

Gegendruck

p_b

Überdruck auf der Austrittsseite eines Sicherheitsventils, der durch den Druck im Entlastungssystem entsteht

ANMERKUNG Der Gegendruck kann entweder konstant oder veränderlich sein; er ist die Summe aus Fremdegendruck und Eigengegendruck.

3.2.11

Eigengegendruck

Überdruck auf der Austrittsseite eines Sicherheitsventils, der beim Entlasten des Ventils in das Entlastungssystem entsteht

3.2.12

Fremdegendruck

Überdruck, der auf der Austrittsseite eines Sicherheitsventils zum Zeitpunkt unmittelbar vor dem Öffnen herrscht

ANMERKUNG Fremdegendruck resultiert aus Überdruck im Entlastungssystem, der aus anderen Quellen herrührt.

3.2.13

Eintrittsdruckverlust

Δp_{loss}

irreversibler Druckabfall, der auf die Strömung in der Rohrleitung zwischen dem abgesicherten druckführenden System und dem Eintritt des Sicherheitsventils zurückzuführen ist

3.2.14

Schließdruckdifferenz

Δp_{BD}

Differenz zwischen dem Öffnungs-^{N1)} und dem Schließdruck

ANMERKUNG Die Schließdruckdifferenz wird üblicherweise als prozentualer Anteil des Öffnungsdrucks angegeben.

3.3 Massenstrom

3.3.1

mindestens abzuführender Massenstrom aus einem druckführenden System

$Q_{\text{m,out}}$

Massenstrom, der aus einem druckführenden System abzuführen ist, damit der Druck den maximal zulässigen akkumulierten Druck im druckführenden System während der Entlastung nicht überschreitet

3.3.2

dem druckführenden System zugeführter Massenstrom

$Q_{\text{m,feed}}$

durch eine Zuführleitung oder durch ein Stellventil strömender maximaler Massenstrom, der dem abzusichernden druckführenden System zugeführt wird

N1) Nationale Fußnote: Fehler in der Referenzfassung. Gemeint ist der Ansprechdruck.

3.3.3

durch das Sicherheitsventil abführbare Massenstromdichte

$\dot{m}_{SV}$

durch ein Sicherheitsventil bei Auslegungsbedingungen abgeführter Massenstrom je Flächeneinheit, der mithilfe der zuerkannten Ausflussziffern für die Gas- und Flüssigkeitsströmung berechnet wird

ANMERKUNG Siehe Gleichung (35).

3.3.4

Ausflussziffer für die Gas- und Flüssigkeitsströmung

$K_{dr,g}$ <für Gas>

$K_{dr,l}$ <für Flüssigkeit>

Korrekturfaktor, definiert durch das Verhältnis des theoretisch durch das Sicherheitsventil abführbaren Massenstroms zu einem experimentell bestimmten Massenstrom, der durch ein baugleiches Ventil abgeführt wird

ANMERKUNG Die Ausflussziffer ist bezogen auf den Ventilsitzquerschnitt und berücksichtigt die tatsächliche Strömung in einem Sicherheitsventil verglichen mit der Strömung zu dem Referenzmodell (ideale Ventildüse). Zuerkannte Werte für die Gas- und die Flüssigkeitsströmung K_d , werden üblicherweise vom Ventilhersteller bereitgestellt oder in Durchströmungsversuchen bestimmt. Gewichtete Ausflussziffern, K_{dr} , mit einem Wert von 0,9 K_d , werden angewendet, um den Auslegungsquerschnitt des Sicherheitsventils zu berechnen.

3.4 Strömungsquerschnitt

3.4.1

Auslegungsquerschnitt des Sicherheitsventils

A_0

wichtigstes Ergebnis des Auslegungsvorgangs in Übereinstimmung mit dem vorliegenden Teil von ISO 4126, das für die Auswahl eines Sicherheitsventils mit ausreichenden Abmessungen notwendig ist

ANMERKUNG Es ist wichtig, dass die gewichtete Ausflussziffer und der durch das Sicherheitsventil abführbare Massenstrom sich auf diesen spezifischen Querschnitt beziehen. Der Auslegungsquerschnitt ist als der Ventilsitzquerschnitt/-durchmesser definiert.

3.4.2

effektiver engster Strömungsquerschnitt der Zuführleitung oder des Stellventils

A_{feed}

engster Strömungsquerschnitt für den Durchfluss in einer Zuführleitung oder einem Stellventil in der Leitung zum druckführenden System

3.5 Fluidzustand

3.5.1

Gas/Flüssigkeits-Gemisch

Fluidgemisch aus sowohl einem flüssigen Bestandteil als auch einem gasförmigen Bestandteil, in dem das Gas nicht unbedingt die gleiche chemische Zusammensetzung aufweist wie die Flüssigkeit

3.5.2

dampfdruckbildendes System

Fluidsystem, in dem ein Teil der Energiemenge durch Verdampfen (Flashing) aus der Flüssigphase entweicht

3.5.3

gasbildendes System

Fluidsystem, in dem Gas gebildet wird (z. B. durch chemische Reaktion oder durch Freisetzung von gelöstem Gas) und in dem bei Auslegungsbedingungen keine signifikante Energiemenge durch Verdampfen aus der Flüssigkeit entweicht

3.5.4

hybrides System

Fluidsystem, das bei Auslegungsbedingungen signifikante Merkmale von sowohl dampfdruckbildenden als auch von gasbildenden Systemen aufweist

3.5.5

thermische Durchgehreaktion

unkontrollierte exotherme chemische Reaktion

3.6

thermodynamischer kritischer Druck

p_c
Zustandsgröße, zusammen mit der thermodynamischen kritischen Temperatur, am thermodynamischen kritischen Punkt

3.7

thermodynamische kritische Temperatur

T_c
Zustandsgröße, zusammen mit dem thermodynamischen kritischen Druck, am thermodynamischen kritischen Punkt

3.8

Auslegungstemperatur

T_0
Temperatur im druckführenden System bei Auslegungsbedingungen

3.9

Übertemperatur

T_{over}
maximale Temperatur im druckführenden System während der Entlastung

3.10

Sättigungstemperaturdifferenz

ΔT_{over}
Differenz zwischen der Sättigungstemperatur bei maximalem Druck während der Entlastung, p_{over} , und der Sättigungstemperatur bei Auslegungsdruck, p_0

3.11

Auslegungsbedingung

Bedingung im druckführenden System, die durch den Auslegungsdruck und die Auslegungstemperatur gekennzeichnet ist

3.12

Grenzfüllgrad

ϕ_{limit}
maximaler anfänglicher Flüssigkeitsfüllgrad (Flüssigkeitshöhe) im druckführenden System bei Auslegungsbedingungen, bei dem während der Entlastung noch eine Einphasenströmung aus Gas oder Dampf auftritt

ANMERKUNG Bei höheren Füllständen wird davon ausgegangen, dass eine Zweiphasenströmung auftritt.

3.13

anfänglicher Flüssigkeitsfüllgrad

ϕ_0
anfänglicher Flüssigkeitsfüllgrad (Flüssigkeitshöhe) im druckführenden System bei Auslegungsbedingungen

3.14

Zuströmleitung

Rohrleitungen und daran angeschlossene Formstücke, die das druckführende System mit dem Sicherheitsventil-Eintritt verbinden

3.15

Abströmleitung

Rohrleitungen und daran angeschlossene Formstücke, die den Sicherheitsventil-Austritt mit einem geschlossenen System oder der Atmosphäre verbinden

4 Symbole und Abkürzungen

Symbol	Definition	Einheit
A_{feed}	effektiver engster Strömungsquerschnitt in der Zuführleitung oder im Stellventil	m^2
A_{fire}	benetzte Gesamtoberfläche, die der Brandeinwirkung unterliegt	m^2
A_{heat}	Wärmeaustauschfläche im druckführenden System bei externem Wärmeeintrag	m^2
A_0	mindestens erforderlicher Sitzquerschnitt des Sicherheitsventils (Auslegungsquerschnitt des Sicherheitsventils)	m^2
A_v	Querschnittsfläche in einem stehenden zylindrischen Behälter	m^2
B_{heat}	(maximaler) Gesamtwärmedurchgangskoeffizient; siehe Gleichung (23)	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
C	Durchflusskoeffizient	–
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
D	Innendurchmesser eines stehenden zylindrischen Behälters	m
$\frac{dp}{dt}$	Druckanstiegsgeschwindigkeit im druckführenden System	Pa/s
$\frac{dT}{dt}$	Temperaturanstiegsgeschwindigkeit im druckführenden System	K/s
F	Umgebungsfaktor bei Wärmeeintrag durch Brandeinwirkung (siehe 6.4.3.2)	–
g_n	Beschleunigung im Schwerfeld der Erde	m/s^2
H_l	Flüssigkeitsfüllhöhe in einem stehenden zylindrischen Behälter (vom Behälterboden bis zur Flüssigkeitsoberfläche)	m
k_∞	Anpassungsparameter zur Berechnung der charakteristischen Gasaufstiegsgeschwindigkeit	–
$K_{\text{dr},2\text{ph}}$	Ausflussziffer des Ventils für Zweiphasenströmung	–
$K_{\text{dr},g}$	Zuerkannte Ausflussziffer des Ventils für Einphasenströmung aus Gas oder Dampf	–
$K_{\text{dr},l}$	Zuerkannte Ausflussziffer des Ventils für Einphasenströmung aus Flüssigkeit	–
K_{vs}	Ausflussziffer des voll geöffneten Stellventils in der Zuführleitung bei Standardbedingungen	m^3/h
$\dot{m}$	Massenstromdichte	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

Symbol	Definition	Einheit
$\dot{m}_{SV}$	durch das Sicherheitsventil abführbare Massenstromdichte	kg/(m ² · s)
M_0	gesamte Flüssigkeitsmasse im druckführenden System bei Auslegungsbedingungen	kg
M	Molmasse	kg/kmol
N	Siedeverzugsfaktor zur Berücksichtigung des thermodynamischen Ungleichgewichts	–
p	Druck im druckführenden System	Pa
p_b	Gegendruck	Pa
p_c	thermodynamischer kritischer Druck	Pa
p_{crit}	strömungsdynamischer kritischer Druck	Pa
p_{MAW}	maximal zulässiger absoluter Betriebsdruck	Pa
p_{MAA}	maximal zulässiger akkumulierter Druck	Pa
p_0	Auslegungsdruck	Pa
p_{over}	maximaler Druck in einem druckführenden System während der Entlastung; siehe Bilder 1 a) und 1 b)	Pa
p_{set}	Ansprechdruck	Pa
q_{fire}	dimensionsloser Fluidstrom unter Brandeinwirkung	–
$Q_{m,out}$	mindestens abzuführender Massenstrom aus einem druckführenden System	kg/s
$Q_{m,feed}$	dem druckführenden System zugeführter Massenstrom	kg/s
$Q_{m,SV}$	durch das Sicherheitsventil abführbarer Massenstrom	kg/s
$\dot{Q}$	Wärmeeintrag in das druckführende System, entweder infolge einer Durchgeheaktion oder durch Wärmezufuhr von außen	W
$\dot{Q}_{acc}^*$	Verhältnis von fühlbarer Wärme zu latenter Wärme	–
$\dot{Q}_{in}^*$	Verhältnis von zugeführtem Gesamtwärmestrom zur Energiemenge, die je Zeiteinheit mit dem Dampf entweicht	–
$\dot{Q}_{mean}^*$	mittlerer dimensionsloser Wärmeeintrag; siehe Tabelle 2, Gleichung (50)	–
$\dot{Q}_0$	Wärmeeintrag in das druckführende System bei Auslegungsbedingungen; siehe Tabelle 2, Gleichung (52)	W
R	universelle Gaskonstante (8 314,2 J/(kmol · K))	J/(kmol · K)
T	Temperatur im druckführenden System	K
T_c	thermodynamische kritische Temperatur	K
T_{heat}	maximal erreichbare Temperatur der externen Wärmequelle	K
T_0	Temperatur des druckführenden Systems bei Auslegungsbedingungen	K
T_{over}	maximale Temperatur im druckführenden System während der Entlastung	K

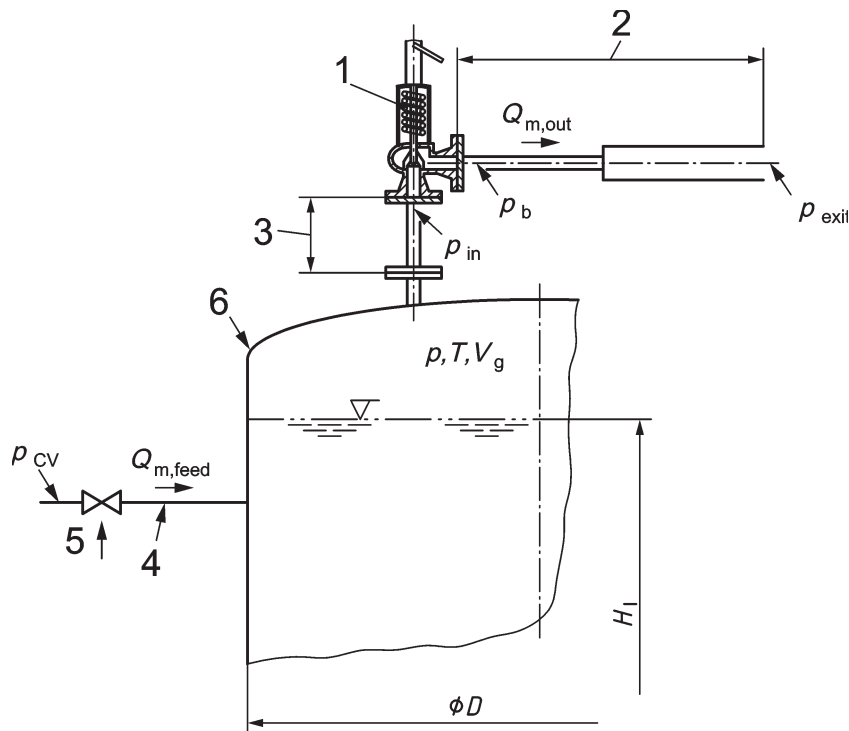
Symbol	Definition	Einheit
$u_{g,0}$	Gas-Leerrohrgeschwindigkeit im Gasraum eines stehenden zylindrischen Behälters bei Auslegungsbedingungen	m/s
u_{∞}	charakteristische Aufstiegsgeschwindigkeit der Gas-/Dampfblasen in der Flüssigkeit	m/s
v	spezifisches Volumen im druckführenden System	m ³ /kg
V	Volumen des druckführenden Systems	m ³
$\dot{x}$	Strömungsmassendampfgehalt/-gasgehalt, d. h. das Verhältnis des Gasmassenstroms zum Gesamtmassenstrom eines Zweiphasengemischs	–
Z	Realgasfaktor	–
ε_0	Volumetrische Gasgehalt im druckführenden System bei Auslegungsbedingungen bei einem homogenen Zweiphasengemisch	–
$\varepsilon_{\text{seat}}$	Volumetrische Gasgehalt im engsten Strömungsquerschnitt; siehe Gleichung (37)	–
η	Druckverhältnis, entweder η_{crit} oder η_b	–
η_b	Verhältnis von Gegendruck zum Auslegungsdruck des Sicherheitsventils	–
η_{crit}	kritisches Druckverhältnis	–
η_s	Verhältnis des Sättigungsdrucks bei Auslegungstemperatur zum Auslegungsdruck (Maß der Flüssigkeitsunterkühlung), siehe Gleichung (55)	–
κ	Isentropenexponent	–
ρ	Fluiddichte	kg/m ³
ρ_{H2O}	Dichte des Wassers bei Durchströmungsversuchen zur Messung des K_{VS} -Werts bei einer Temperatur von 5 °C	kg/m ³
σ	Oberflächenspannung	N/m
ϕ_{limit}	Grenzfüllgrad	–
ϕ_0	anfänglicher Flüssigkeitsfüllgrad bei Auslegungsbedingungen	–
ω	Kompressibilitätsfaktor	–
ω_{eq}	Kompressibilitätsfaktor im Gleichgewichtszustand ($N = 1$)	–
Γ	Gasbildungsrate je kg Flüssigkeit, d. h. der Gasmassenstrom je kg Flüssigkeitsinhalt im druckführenden System	(kg/s)/kg
Δh_v	Verdampfungswärme	J/kg
Δp	Druckabfall in der Zuström- oder Abströmleitung	Pa
Δp_A	maximal zulässige Drucküberschreitung (Drucküberschreitung, wie in ISO 4126-1 festgelegt)	Pa
Δp_{feed}	Druckverlust zwischen der Austrittsseite des Stellventils in der Zuführleitung und dem druckführenden System	Pa

Symbol	Definition	Einheit
Δp_{H_2O}	Druckabfall in einem Stellventil bei Durchströmungsversuchen zur Messung des K_{vs} -Werts, definiert bei einer Druckdifferenz von 10^5 Pa	Pa
Δp_{loss}	Druckverlust in der Zuströmleitung	Pa
Δp_{over}	Absoluter Überdruck	Pa
ΔT_{over}	Sättigungstemperaturdifferenz	K
Ω	dynamische Viskosität	Pa · s

Index	Bedeutung
0	Auslegungsbedingung
c	thermodynamische kritischer Zustand
crit	kritischer Zustand im Hinblick auf die Strömung
CV	stromaufwärts des Stellventils
exit	Ausgang des Rohrleitungssystems
feed	Zulauf zum druckführenden System
g	Gasphase
i	Bestandteil des Flüssigkeitsgemischs
ideal	theoretisch perfekt (adiabat, reibungsarm)
j	Identifizierung eines bestimmten Bestandteils eines Flüssigkeitsgemischs
l	Flüssigphase
MAA	maximal zulässiger Zustand bei akkumuliertem Überdruck
MAW	maximal zulässiger Betriebszustand
max	maximaler Wert
mean	Mittelwert zwischen Ansprechzustand und dem Zustand bei maximal zulässigem akkumulierten Druck
out	aus dem druckführenden System abführbar
red	reduzierter Zustand, d. h. Zustand in Bezug auf die thermodynamische kritischer Zustand
seat	Zustand im engsten Strömungsquerschnitt des Ventils, z. B. dem Ventilsitz
set	Ansprechzustand
loss	üblicher Druckverlust
fire	Wärmezufuhr von außen durch Brandeinwirkung
heat	externer Wärmeeintrag (Wärmequelle)
b	gegen

Index	Bedeutung
over	Überdruck oder Übertemperatur
H ₂ O	Wasser
in	Zuströmung
2ph	Zweiphasenströmung
s	Unterkühlung
∞	charakteristische Aufstiegsgeschwindigkeit der Gasblasen in der Flüssigphase
limit	Grenzwert (Schwellenwert)
operating	Betriebszustand
reseat	Schließzustand
sat	Sättigungszustand der Flüssigphase
SV	durch das Sicherheitsventil
r	gewichteter Wert (siehe 3.3.4)

Exponent	Bedeutung
a	Exponent in der Gleichung für den Siedeverzugsfaktor N ; siehe Gleichung (41)
*	dimensionslos



Legende

- 1 Sicherheitsventil
- 2 Abströmleitung
- 3 Zuströmleitung
- 4 Zuführleitung
- 5 Stellventil
- 6 druckführendes System

Bild 2 — Sicherheitsventil in einem druckführenden System

5 Anwendungsbereiche der Methoden

5.1 Allgemeines

Für die Auslegung des Ventils wird ein homogenes Einkomponentengemisch aus Gas/Flüssigkeit mit einem Ungleichgewicht beider Phasen angenommen. Mehrkomponentengemische in der Gas- oder Flüssigphase werden als Einkomponentensysteme mit den (gemittelten) Stoffdaten des Gemisches betrachtet. Von der Strömung wird angenommen, dass sie sich im quasi-stationären Zustand befindet. Es wird empfohlen, die Anwendungsgrenzen der Methoden, wie in 5.2 und 5.3 angegeben, zu beachten.

5.2 Anwendungsgrenzen der Methode bei der Berechnung der Zweiphasen-Massenstromdichte in Sicherheitsventilen

5.2.1 Allgemeines

Die Anwendungsgrenzen des in diesem Teil von ISO 4126 verwendeten Berechnungsmodells sind in 5.2.2 bis 5.2.4 angegeben.

5.2.2 Verdampfende Strömung

Die Berechnungsmethode ist für Systeme geeignet, in denen mindestens eine der beiden folgenden Bedingungen erfüllt ist.

- a) Die Übertemperatur beträgt weniger als 90 % der thermodynamischen kritischen Fluidtemperatur, wie in Gleichung (1) angegeben.
- b) Der Überdruck beträgt weniger als 50 % des thermodynamischen kritischen Fluiddrucks, wie in Gleichung (2) angegeben.

$$T_{\text{red}} = \frac{T_{\text{over}}}{T_c} < 0,9 \quad (1)$$

$$p_{\text{red}} = \frac{p_{\text{over}}}{p_c} < 0,5 \quad (2)$$

Dabei ist

T_{red} die reduzierte Temperatur;

p_{red} der reduzierte Druck;

T_{over} die maximale Temperatur während der Entlastung, angegeben in K;

p_{over} der maximale Druck während der Entlastung (maximaler akkumulierter Druck oder ein geringerer Druck), angegeben in Pa;

T_c die thermodynamische kritische Temperatur des Fluids, angegeben in K;

p_c der thermodynamische kritische Druck des Fluids, angegeben in Pa.

Bei Fluidzuständen, bei denen sowohl der reduzierte Druck als auch die reduzierte Temperatur oberhalb der festgelegten Grenzwerte liegen, ändern sich üblicherweise die Stoffdaten so schnell, sodass nicht-akzeptable Fehler bei der Berechnung entstehen können.

Die Gleichungen, die in der Auslegungsmethode verwendet werden, um die Stoffdaten der Gas-/Flüssigkeitsströmung vorauszuberechnen, führen in der Regel zu einer Überdimensionierung des mindestens erforderlichen Ventilsitzquerschnitts, wenn Bedingungen oberhalb der Grenzen von Gleichung (1) und Gleichung (2) bis hin zum thermodynamischen kritischen Punkt betrachtet werden; siehe [2]. In Fällen, in denen es notwendig ist, die den Ventilsitzquerschnitts genauer zu berechnen, sollten die Empfehlungen aus [2] befolgt werden. Weitere Kommentare zum Anwendungsbereich des Verfahrens sind in 6.5.1 angegeben.

Beschränkungen des Modells, die auf die lineare Annäherung der Druck/Dichte-Beziehung zurückzuführen sind, werden in [26] beschrieben.

5.2.3 Verdampfende Strömung bei Gemischen

Diese Methode darf bei verdampfenden Mehrkomponentensystemen näherungsweise angewendet werden, deren Sättigungstemperaturbereich 100 K nicht überschreitet, wie in Gleichung (3) für Gemische aus Flüssigkeiten mit ähnlichen chemischen Eigenschaften angegeben:

$$T_{\text{sat},i} - T_{\text{sat},j} < 100 \quad (3)$$

Dabei sind $T_{\text{sat},i}$ und $T_{\text{sat},j}$ die Sättigungstemperaturen bei Auslegungsdruck für die Komponenten i und j , angegeben in K.

Die Komponente i weist die höchste Sättigungstemperatur des Gemischs auf und die Komponente j weist die niedrigste Sättigungstemperatur des Gemischs auf.

5.2.4 Gelöste Gase

Sind beträchtliche Gasmengen im abzuführenden Medium gelöst, darf das vorgeschlagene Verfahren nicht direkt angewendet werden; dies trifft üblicherweise für Fälle mit hohem Druck zu und wenn Gase, z. B. Stickstoff oder Wasserstoff, in der Flüssigkeit gelöst sind.

Die gelösten Gase können die Stoffdaten des Gemischs und den Massenstrom im Sicherheitsventil stark beeinflussen und müssen daher berücksichtigt werden. Beispielsweise können sich die thermodynamischen kritischen Bedingungen des Gemischs deutlich von den thermodynamischen kritischen Bedingungen der einzelnen Komponenten des Gemischs unterscheiden. Dadurch verändert sich die Sättigungslinie. Andere Stoffdaten, z. B. die Verdampfungswärme, die Dichte des Flüssigkeitsgemischs (z. B. aus Polymeren) oder die Viskosität des Flüssigkeitsgemischs, können ebenfalls betroffen sein. Selbst kleine Mengen gelöster Gase, die in einer nicht verdampfenden Flüssigkeitsströmung im Sicherheitsventil durch den Druckabfall desorbiert werden, können den Massenstrom, verglichen mit dem in der ausschließlichen Flüssigkeitsströmung, deutlich reduzieren.

Falls es erforderlich ist, die Desorption von Gasen zu berücksichtigen, ist es zulässig, die Auslegungsgleichungen für gasbildende Systeme zu verwenden, sofern keine anderen zuverlässigen Informationen verfügbar sind. Der Entlöseverzögerung (bis zum Erreichen des Gleichgewichts) bei der Desorption von Gasen sollte vernachlässigt werden. Bei einer konservativen Berechnung sollte der Ventilsitzquerschnitt mit einem Strömungsmassendampfgehalt abgeschätzt werden, der dem Zweiphasengemisch aus Gas/Flüssigkeit im Gleichgewicht beim niedrigsten Druck im engsten Strömungsquerschnitt entspricht (homogene Gleichgewichtsströmung zwischen Ventileintritt und Ventilsitzquerschnitt). Dies kann z. B. der kritische Druck im Sitzquerschnitt des Sicherheitsventils sein. Da der Entlöseverzögerung bei der Desorption vernachlässigt worden ist, wird der Strömungsmassendampfgehalt zu hoch abgeschätzt und somit wird der Ventilsitzquerschnitt zu groß bemessen.

5.3 Grenzen der Methode zur Berechnung des mindestens abzuführenden Massenstroms

5.3.1 Temperatur- und Druckanstiegsgeschwindigkeit

Im Fall einer Durchgehrreaktion sollte die Temperaturanstiegsgeschwindigkeit, angegeben in K/s, im druckführenden System bei maximalem Druck, p_{over} , weniger als 2 K/s während der Entlastung betragen, wie mit Gleichung (4) angegeben:

$$\left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{over}} < 2 \quad (4)$$

Dies wird durch das Verfahren für den mindestens abzuführenden Massenstrom bei dampfdruckbildenden Reaktionen nach 6.4.4.2 begrenzt. Des Weiteren ist die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit auf 20 kPa/s (12 bar/min) beschränkt, wie mit Gleichung (5) angegeben:

$$\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\text{over}} < 20 \quad (5)$$

Falls die Temperaturanstiegsgeschwindigkeit und die Druckanstiegsgeschwindigkeit deutlich höher sind als diese Werte, können sich unrealistische Ventilgrößen ergeben.

Die Erfahrungen in der Industrie zeigen, dass Sicherheitsventile nicht verwendet werden sollten, falls während der Ventilöffnungszeit ein unzulässiger Druckanstieg auftritt. Typische Öffnungszeiten von federbelasteten Ventilen belaufen sich auf 80 ms bis 120 ms. Es ist erforderlich, dass die Druckanstiegsgeschwindigkeit langsam genug ist, um eine vollständige Öffnung des Ventils zu ermöglichen, bevor p_{over} erreicht ist. Aus diesem Grund sollte die Druckanstiegsgeschwindigkeit während der Ventilöffnung mindestens auf 10 % der absoluten Öffnungsdruckdifferenz oberhalb des Öffnungsdrucks begrenzt werden. In den meisten Fällen führt dies zu

Werten, die höher sind als der empfohlene Grenzwert von 20 kPa/s. Bei einem noch schnelleren Druckanstieg können Berstscheiben geeignet sein.

5.3.2 Nicht mischbare Flüssigkeiten

Das Auslegungsverfahren ist möglicherweise nicht direkt anwendbar, wenn nicht mischbare Flüssigkeiten im System vorhanden sind, z. B. bei der Entlastung eines Emulsionspolymerisationsreaktors. In diesem Fall hängt die Reaktionskinetik, abgeleitet aus Laborversuchen, vom jeweiligen Mischungsgrad beim Versuch ab. Die Durchmischung im Laborversuch lässt sich in der Regel nicht auf einem technischen Maßstab übertragen; siehe [22].

6 Auslegungsschritte

6.1 Allgemeiner Überblick über die Auslegungsschritte

Die Auslegung eines Abblaseleitungssystems mit Sicherheitsventil umfasst die folgenden grundlegenden Schritte (Bild 3):

Schritt 1: Identifizierung des Auslegungsfalls; siehe 6.2.

Alle vernünftigerweise nicht auszuschließenden Abweichungen vom normalen Anlagenbetrieb müssen betrachtet werden, um den Auslegungsfall für das Ventil zu ermitteln. Ob Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb als vernünftigerweise möglich zu berücksichtigen sind, kann vom Gefährdungspotential und von den gesetzlichen Anforderungen, die vor Ort gelten, abhängen. Der Auslegungsfall ist von wesentlicher Bedeutung für die Dimensionierung eines Sicherheitsventils und oftmals wichtiger als die Art des Berechnungsverfahrens. Auch wenn es nicht in den Anwendungsbereich dieses Teils von ISO 4126 fällt einen Überblick über die Gefährdungsanalyse zu liefern, ist eine Einführung in 6.2 angegeben.

Schritt 2: Bestimmung der Zusammensetzung in der Fluidphase am Eintritt in das Sicherheitsventil (Einphasen- oder Zweiphasenströmung); siehe 6.3.

Schritt 3: Berechnung des mindestens abzuführenden Massenstroms aus einem druckführenden System; siehe 6.4.

Schritt 4: Bestimmung der abführbaren Massenstromdichte durch das Sicherheitsventil; siehe 6.5.

Schritt 5: Überprüfung der stabilen Ventilfunktion von Abblaseleitungssystemen im Einbauzustand; siehe 6.6.

In den vorhergehenden Schritten erfolgte die Auslegung des Sicherheitsventils ohne Berücksichtigung des Einflusses durch die angeschlossene Zuström- und/oder Abströmleitung, die eine Minderung der Sicherheitsventilkapazität oder eine instabile Funktion des Ventils verursachen können. Niederfrequentes Öffnen und Schließen (Pumpen) des Ventils oder ein höherfrequentes Flattern (Schwingen) können auftreten. Im letztgenannten Fall können das Ventil und/oder die Zuström- und Abströmleitung beschädigt werden.

Für die folgenden Auslegungsschritte sind in 6.2 bis 6.6 Empfehlungen und ein Berechnungsverfahren für die übliche technische Praxis angegeben.

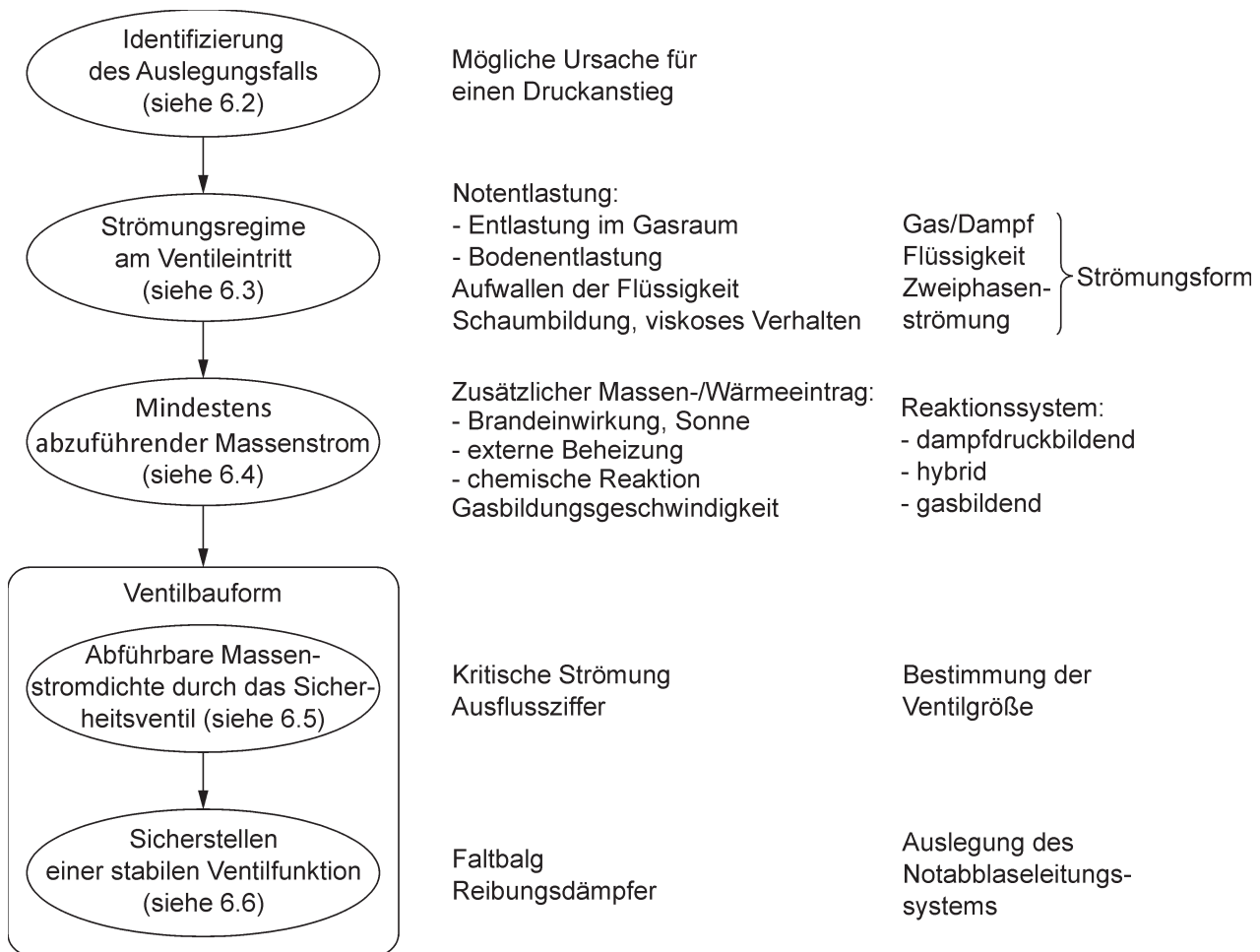


Bild 3 — Verfahren zur Ventilauslegung

6.2 Schritt 1 — Identifizierung des Auslegungsfalls

Vernünftigerweise nicht auszuschließende Abweichungen vom normalen Anlagenbetrieb müssen ermittelt und mithilfe einer Gefährdungsbeurteilung und einer sicherheitstechnischen Bewertung des Prozesses in Bezug auf das Risikopotential (en: Process Hazard Assessment and Safety Evaluation, PHASE) bewertet werden; siehe [3]. Verschiedene etablierte Verfahren — z. B. eine HAZOP-Studie (Hazard and Operability study), siehe [4]; eine PHA (vorläufige Untersuchung von Gefährdungen, en: Preliminary Hazard Analysis), siehe [5]; oder eine Was-wäre-wenn-Analyse — oder eher quantitative Analysen — z. B. eine Fehlerbaumanalyse, siehe [6]; und eine Ereignisbaumanalyse, siehe [7] — werden in der Praxis eingesetzt. Diese Verfahren werden oftmals durch Checklisten (siehe [8]) mit verschiedenen Detailierungsgraden ergänzt. Alle diese Verfahren ermöglichen die Beurteilung der Ursachen für einen Druckanstieg. Die Ursachen können auf Änderungen bei der Masse- und Energieübertragung in das oder aus dem druckführenden System oder auf eine Abweichung vom normalen Reaktionssystem, z. B. bei einer thermischen Durchgehreaktion, zurückzuführen sein.

In Tabelle A.1 sind die häufigsten Ursachen für einen Druckanstieg zusammengefasst. Einige dieser Ursachen können gleichzeitig auftreten oder unmittelbar nacheinander, und anschließend kann es notwendig sein, eine oder mehrere eigenständige Prozessabweichungen als mögliche Auslegungsfälle für das Ventil zu berücksichtigen. Der tatsächliche Überblick über die möglichen Auslegungsfälle hängt vom Risiko- und Schadenspotential ab, das aus den Abweichungen vom normalen Anlagenbetrieb resultieren kann. Die Abweichungen sollten jedoch nicht auf zu konservative Weise quantifiziert werden. Sonst wird der Ventilsitzquerschnitt zu stark überdimensioniert. Dies kann zu unnötig großen Massenströmen, zu Überbelastungen der nachgeschalteten Prozesseinrichtungen und zu möglicherweise zusätzlichen Risiken für die Umgebung führen.

Für weitere Informationen siehe ISO 23251.

6.3 Schritt 2 — Strömungsregime am Eintritt in das Sicherheitsventil

6.3.1 Allgemeines

Bei der Auslegung ist es von grundlegender Bedeutung zu wissen, ob eine Zweiphasenströmung am Ventileintritt auftritt. Dazu sind im Folgenden Kriterien festgelegt.

6.3.2 Phänomen des Aufwallens

Sicherheitsventile werden häufig im Dom (gasraumseitig) von Behältern angeordnet. Wenn z. B. ein System betrachtet wird, in dem sich während der Entlastung Dampf bilden kann (dampfdruckbildendes System), passiert folgendes: sobald das Ventil öffnet, fällt der Druck aufgrund der Freisetzung des Dampfs im Gasraum des Behälters sofort ab. Eine zu Beginn unterkühlte oder gesättigte Flüssigkeit überhitzt, d. h. die Temperatur bleibt oberhalb der Sättigungstemperatur, die dem zugehörigen Druck im System entspricht. Falls die Dampfbildungsrate die Dampffreisetzungsrates nach einer Siedeverzugszeit (üblicherweise 0,1 s bis 1,0 s) an der Flüssigkeitsoberfläche überschreitet, beginnt die Verdampfung in der Flüssigkeit und lässt den Spiegel ansteigen. Erreicht das aufwallende Gemisch den Ventileintritt, dann ändert sich dort das Strömungsregime von einer Einphasenströmung aus Gas zu einer Zweiphasenströmung.

Das Aufwallen findet hauptsächlich durch die limitierte Aufstiegsgeschwindigkeit der Gasblasen statt; die charakteristische Aufstiegsgeschwindigkeit von Gas/Dampf in der Flüssigkeit wird mit u_{∞} bezeichnet. Das Aufwallen ist besonders in hochviskosen Flüssigkeiten und schäumenden Systemen bekannt. Behälter mit solchen Inhalten werden deshalb während der Notentlastung fast vollständig geleert. Bei schäumenden und hochviskosen Flüssigkeiten trifft dies sogar für einen anfänglichen Flüssigkeitsfüllgrad von unter 15 % zu; siehe [9].

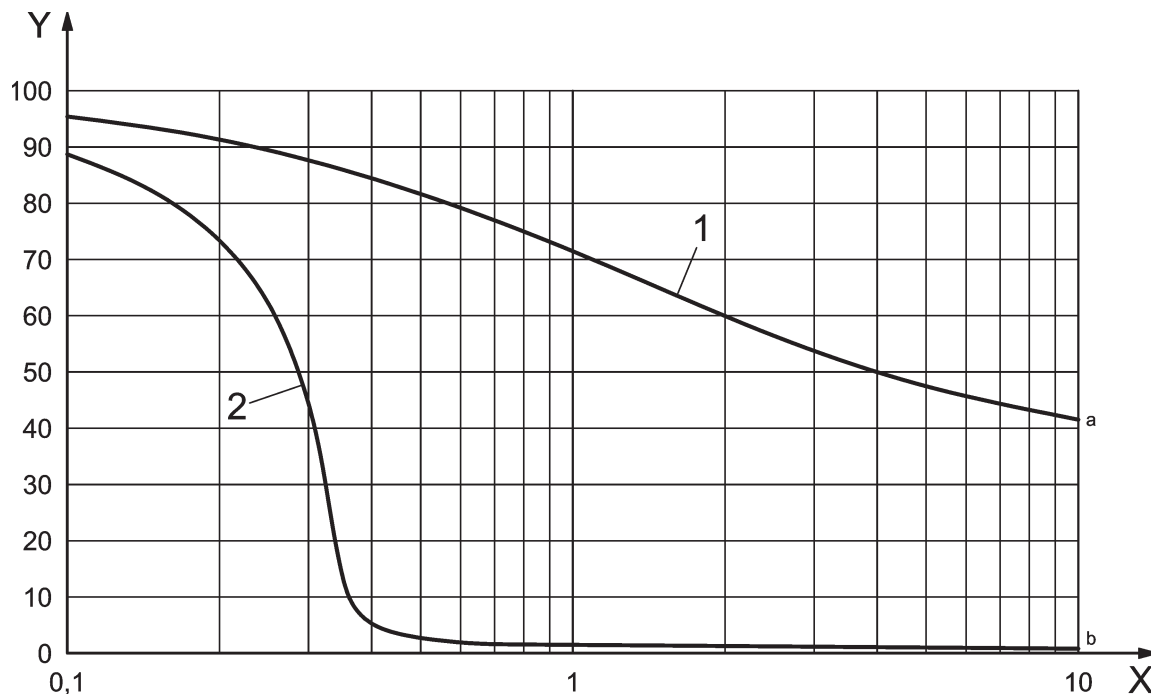
In gasentlösenden oder gasbildenden Systemen treten analoge Phänomene auf, d. h. Entlöseverzug während der Desorption, Aufwallen usw.

In extern beheizten Behältern (z. B. nicht reagierende, nicht exotherme Systeme) bilden sich die Dampfblasen an der Behälterwand und nicht im Flüssigkeitskörper. Dies kann zu einem verringerten Aufwallen führen, mit der möglichen Folge, dass schon bei niedrigeren anfänglichen Flüssigkeitsfüllgraden die Entlastung einphasig erfolgt.

6.3.3 Einfluss der Viskosität und der Schaumbildungsneigung der Flüssigkeit auf das Strömungsregime

Zum Unterscheiden zwischen einer Einphasenströmung und einer Zweiphasenströmung werden der anfängliche Flüssigkeitsfüllgrad, die Gas- bzw. Dampfbildungsrate, die Viskosität der Flüssigkeit und die Schaumbildungsneigung berücksichtigt. Die Viskosität der Flüssigkeiten muss unter den Bedingungen berücksichtigt werden, bei denen der maximal zulässige akkumulierte Druck im druckführenden System erreicht wird. Bei hochviskosen Flüssigkeiten ($\eta_{l,0} < 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) wird empfohlen, eine Zweiphasenströmung mit homogen durchmischten Phasen während der Entlastung des druckführenden Systems anzunehmen; siehe Bild 4.

Für den Fall, dass die Schaumbildungsneigung der Flüssigkeit aus Betriebserfahrungen nicht bekannt ist, sind Versuche durchzuführen, um diese Kenngröße bei den Auslegungsbedingungen des Sicherheitsventils zu ermitteln. Es ist kaum möglich, die Schaumbildungsneigung allein anhand von physikalischen Stoffeigenschaften vorherzusagen.



Legende

Y Grenzfüllgrad ϕ_{limit} , angegeben in %

X dimensionslose Aufstiegsgeschwindigkeit der Gasblasen, gleich $\frac{u_{g,0}}{u_{\infty}}$

Dabei ergibt sich $u_{g,0}$ aus Gleichung (6) und u_{∞} ergibt sich aus Gleichung (7):

$$u_{g,0} = Q_{m,g,out} \cdot \frac{v_{g,0}}{A_v} \quad (6)$$

$$u_{\infty} = k_{\infty} \frac{[\sigma_{l,0} \cdot g_n (\rho_{l,0} - \rho_{g,0})]^{1/4}}{\sqrt{\rho_{l,0}}} \quad (7)$$

1 nicht-schäumend und wässrig, $\Omega_{l,0} < 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [voll ausgebildete turbulente Strömung ($k_{\infty} = 1,53$)]

2 schäumend oder viskos, $\Omega_{l,0} > 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [homogene Strömung ($k_{\infty} = 1,18$)]

Bild 4 — Strömungsregime am Ventileintritt (Einphasen- oder Zweiphasenströmung) [23] — Grenzfüllgrad ϕ_{limit} als Funktion der dimensionslosen Blasenauftstiegsgeschwindigkeit

6.3.4 Vorhersage des Strömungsregimes (Gas/Dampf oder Zweiphasenströmung)

6.3.4.1 Allgemeines

Bei einem domseitig installierten Sicherheitsventil wird zeitweise ein Zweiphasengemisch entlastet, wenn der anfängliche Flüssigkeitsfüllgrad im Behälter, ϕ_0 , den Grenzfüllgrad, ϕ_{limit} , überschreitet. Wenn der Grenzfüllgrad dagegen nicht überschritten wird, dann wird nur eine Strömung aus Gas oder Dampf entlastet. Der Grenzfüllgrad hängt ab von dem Verhältnis der Gas-Leerrohrgeschwindigkeit im Gasraum des stehenden zylindrischen Behälters bei Auslegungsbedingungen, $u_{g,0}$, und der charakteristischen Aufstiegsgeschwindigkeit des gebildeten Gases bzw. des gebildeten Dampfes in der Flüssigkeit, u_{∞} (siehe Bild 4), die anhand einer Vielzahl unterschiedlicher (nicht-schäumender) Medien experimentell bestimmt worden ist; siehe [9], [10].

Es werden zwei Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Strömungsregimes am Eintritt in das Sicherheitsventil je nach Art der Wärmeerzeugung oder des Wärmeeintrags unterschieden:

- a) Bildung von homogen verteilten Blasen in der Flüssigkeit, z. B. im Fall einer thermischen Durchgeheaktion, wie in 6.3.4.2 beschrieben;
- b) Bildung von Blasen an der Behälterinnenwand des druckführenden Systems, z. B. im Fall von Brandeinwirkung oder externer Beheizung, wie in 6.3.4.3 beschrieben.

6.3.4.2 Empfohlene Berechnungsverfahren bei homogener Bildung von Blasen in der Flüssigkeit (z. B. bei einer thermischen Durchgeheaktion)

Zur Unterscheidung zwischen Einphasen- und Zweiphasenströmung wird die folgende Vorgehensweise empfohlen:

- a) Es wird zunächst angenommen, dass das Strömungsregime am Eintritt in das Sicherheitsventil eine Einphasenströmung aus Gas/Dampf ist.
- b) Der Gas/Dampf-Massenstrom, der aus dem druckführenden System mindestens abzuführen ist, wird entsprechend der Gasbildung in der Flüssigkeit wie folgt bestimmt:
 - 1) Bei einem dampfdruckbildenden System ergibt sich der Massenstrom aus Gas/Dampf, der aus dem druckführenden System mindestens abzuführen ist (siehe Tabelle 2), $Q_{m,out}$, angegeben in kg/s, aus Gleichung (8):

$$Q_{m,out} = \frac{\dot{Q}}{\Delta h_{v,0}} \cdot \frac{1}{\dot{Q}_{in}^*} \quad (8)$$

Dabei wird $\dot{Q}_{in}^*$ iterativ aus Gleichung (9) berechnet:

$$0 = \dot{Q}_{acc}^* - \dot{Q}_{in}^* + v^* \left(\dot{Q}_{mean}^* - \ln \left[\frac{v^* \dot{Q}_{mean}^*}{\dot{Q}_{in}^*} \right] \right) \quad (9)$$

Dabei ist

- $\dot{Q}$ der Wärmeeintrag in das druckführende System infolge einer Durchgeheaktion, angegeben in W; siehe Gleichungen (30) und (52);
- $\dot{Q}_{in}^*$ das Verhältnis von Gesamtwärmeeintrag zu der Energie, die mit dem Dampf abgeführt worden ist;
- $\dot{Q}_{acc}^*$ das Verhältnis von fühlbarer Wärme zu latenter Wärme; siehe Tabelle 2, Gleichung (48);
- v^* das dimensionslose spezifische Volumen; siehe Tabelle 2, Gleichung (45), (46) oder (47);
- $\dot{Q}_{mean}^*$ der mittlere dimensionslose Wärmeeintrag infolge einer Durchgeheaktion zwischen dem Ansprechen und dem Zustand bei maximal zulässigem akkumulierten Druck; der Wärmeeintrag bezieht sich auf den eingetragenen Wärmestrom bei Auslegungsbedingungen; siehe Tabelle 2, Gleichung (50);

$\Delta h_{v,0}$ die Verdampfungswärme bei Auslegungsbedingungen, angegeben in J/kg.

- 2) Bei einem gasbildenden System ergibt sich der Massenstrom aus Gas/Dampf, der aus dem druckführenden System mindestens abzuführen ist (siehe Tabelle 2), $Q_{m,out}$, angegeben in kg/s, aus Gleichung (10):

$$Q_{m,out} = I_0 \cdot M_0 \quad (10)$$

Dabei ist

Γ_0 die Gasbildungsrate je kg Flüssigkeit, d. h. der Gasmassenstrom je kg Flüssigkeitsinhalt im druckführenden System bei Auslegungsbedingungen, angegeben in (kg/s)/kg;

M_0 die gesamte Flüssigkeitsmasse im druckführenden System, angegeben in kg.

Bei Reaktionssystemen sollte Γ_0 durch Versuche bestimmt werden. Der Druckanstieg während einer Durchgehreaktion in einem adiabaten Reaktionskalorimeter ist beispielsweise ein Maß für die Gasbildungsrate je kg Flüssigkeit. Die Gasbildungsrate muss die unter adiabaten Bedingungen zu erwartende maximale Rate sein unter der Voraussetzung, dass das System keinen Dampf bildet und dass die Temperatur während der Entlastung ansteigt.

- 3) Bei hybriden Systemen (Gas- und Dampfbildung) ergibt sich der Massenstrom aus Gas/Dampf, der aus dem druckführenden System mindestens abzuführen ist, $Q_{m,out}$, angegeben in kg/s, aus Gleichung (11):

$$Q_{m,out} = \frac{\dot{Q}}{\Delta h_{v,0}} + \Gamma_0 \cdot M_0 \quad (11)$$

Dabei ist

$\dot{Q}$ der Wärmeeintrag in das druckführende System infolge einer Durchgehreaktion, angegeben in W; siehe Gleichungen (30) und (52);

$\Delta h_{v,0}$ die Verdampfungswärme bei Auslegungsbedingungen, angegeben in J/kg;

Γ_0 die Gasbildungsrate je kg Flüssigkeit, d. h. der Gasmassenstrom je kg Flüssigkeitsinhalt im druckführenden System bei Auslegungsbedingungen, angegeben in (kg/s)/kg;

M_0 die gesamte Flüssigkeitsmasse im druckführenden System, angegeben in kg.

Obwohl das System dampfdruckbildend ist, sollte der Auslegungsdruck mit dem maximal zulässigen akkumulierten Druck gleichgesetzt werden, d. h. $\dot{Q}_{in}^* = 1$.

- c) Mithilfe von Bild 4 lässt sich der Grenzfüllgrad, ϕ_{limit} , aus der Gas-Leerrohrgeschwindigkeit im Gasraum eines stehenden zylindrischen Behälters, $u_{g,0}$, und der charakteristischen Aufstiegs geschwindigkeit von Gas/Dampf in der Flüssigkeit, u_{∞} , bestimmen. Für eine nicht-schäumende Flüssigkeit mit niedriger Viskosität (mit einer Viskosität von höchstens 0,1 Pa · s) gilt die obere Kurve mit einem Wert von $k_{\infty} = 1,53$. Für ein viskoses Flüssigkeitssystem (Viskosität über 0,1 Pa · s) und für ein schäumendes System gilt die untere Kurve mit einem Wert von $k_{\infty} = 1,18$. Diese Werte gelten für stehende Behälter mit einem Höhe-zu-Durchmesser-Verhältnis von ungefähr 2 : 1 bis 3 : 1. Größere Höhe-zu-Durchmesser-Verhältnisse, liegende Behälter oder halbkugelförmige Behälter müssen gesondert betrachtet werden; siehe [10].
- d) Der anfängliche Flüssigkeitsfüllgrad, ϕ_0 , im betrachteten Reaktor wird mit dem Grenzfüllgrad, ϕ_{limit} , verglichen.

- 1) Fall 1: $\phi_0 \geq \phi_{limit}$

Falls der anfängliche Flüssigkeitsfüllgrad dem Grenzfüllgrad entspricht oder diesen überschreitet, sollte für die Auslegung des Sicherheitsventils eine Zweiphasenströmung angenommen werden.

- 2) Fall 2: $\phi_0 < \phi_{limit}$

In diesem Fall sollte eine Einphasenströmung angenommen werden.

Dies ist nur richtig für ein Sicherheitsventil dessen tatsächlicher Ausflussmassenstrom kleiner oder gleich dem mindestens durch das Ventil abzuführenden Gasmassenstrom ist. In der Praxis wird aus dem Angebot vom

Ventilhersteller oftmals ein Ventil ausgewählt, dessen Nennweite größer ist als mindestens erforderlich. In diesem Fall sollte der Ausflussmassenstrom des Sicherheitsventils begrenzt werden, indem z. B. der Hub nach ISO 4126-1 auf den mindestens abzuführenden Gasmassenstrom, $Q_{m,out}$, beschränkt wird. Andernfalls führt die höhere Ventilkapazität zu einer höheren Gas-Leerrohrgeschwindigkeit, $u_{g,0}$, im Gasraum des Behälters und einem niedrigeren Grenzfüllgrad; siehe Bild 4. Dies kann zu einer Zweiphasenströmung führen. Der Ventilsitzquerschnitt, A_0 , der ursprünglich für eine Einphasenströmung aus Gas ausgelegt wurde, kann jetzt zu klein sein und erforderlich, ihn neu zu bewerten.

In diesem Fall sollte $Q_{m,out}$ dem tatsächlich abführbaren Gasmassenstrom durch das gewählte Sicherheitsventil, $Q_{m,SV}$, angegeben in kg/s gleichgesetzt werden, wie in Gleichung (12) angegeben:

$$Q_{m,SV} = \dot{m}_{SV,g} \cdot A_0 \quad (12)$$

Dabei ist

$\dot{m}_{SV,g}$ die abführbare Gasmassenstromdichte durch das Sicherheitsventil, angegeben in kg/(m²·s);

A_0 der Sitzquerschnitt des Sicherheitsventils, das aus dem Angebot eines Ventilherstellers ausgewählt wurde, angegeben in m².

Der abführbare Massenstrom durch das Sicherheitsventil sollte mithilfe von Gleichung (35) in Tabelle 3 für eine Gas-/Dampfströmung berechnet werden. Bei Einsatz des tatsächlich abführbaren Gasmassenstroms, $Q_{m,SV}$, sollten die Schritte a) bis d) so lange wiederholt werden, bis die neue Abschätzung des Strömungsregimes mit dem berechneten übereinstimmt. Falls am Ventileintritt eine Zweiphasenströmung als Strömungsregime ermittelt wird, ist keine Wiederholung notwendig.

In Bild 4 liegen die Werte des Grenzfüllgrades für hochviskose oder schäumende Fluide meistens unter 10 %. Dies führt bei solchen Fluiden in der Praxis meistens zur Annahme einer Zweiphasenströmung.

6.3.4.3 Empfohlene Berechnungsverfahren bei externer Beheizung von nicht-schäumenden, wässrigen Flüssigkeiten (z. B. Brandeinwirkung und externer Wärmeeintrag)

Wenn durch externe Beheizung der Inhalt des druckführenden Systems aufwallt und das Fluid nicht-schäumt, bilden sich die Blasen eher an den Behälterwänden als im Flüssigkeitskörper. Unter der Voraussetzung, dass im Behälter keine Stromstörer vorhanden sind, entstehen in der Flüssigkeit Wirbel und eine Zweiphasenströmung tritt mit geringerer Wahrscheinlichkeit auf als bei einer homogen verteilten Bildung von Blasen, die in 6.3.4.2 behandelt wird; siehe [11].

In [12] sind z. B. die Gleichungen (13) und (14) für die Brandeinwirkung angegeben:

$$\phi_{\text{limit}} = 1 - \left[2,279 \cdot 10^{-4} \cdot \dot{q}_{\text{fire}}^{0,667} (0,089 + 1,003 \cdot 10^{-7} \cdot \dot{q}_{\text{fire}}) \cdot \left(\frac{H_1}{D} \right) \right] \quad (13)$$

$$\dot{q}_{\text{fire}} = \frac{3,218 \cdot 10^5}{(\rho_{g,0} \cdot \Delta h_{v,0} \cdot u_{\infty})} \frac{\dot{Q}}{A_{\text{fire}}} \quad (14)$$

Dabei ist

$\dot{q}_{\text{fire}}$ die dimensionslose Wärmebelastungsdichte bei Auslegungsbedingungen während der Brandeinwirkung auf einen stehenden zylindrischen Behälter mit einer wässrigen Flüssigkeit, bei dem die Wärme durch die Fläche A_{fire} des Behälters übertragen wird und über den Behälterboden keine Wärmeübertrag erfolgt bei Auslegungsbedingungen;

A_{fire} der Teil der Oberfläche eines stehenden zylindrischen Behälters, der innen mit Flüssigkeit benetzt wird und sich innerhalb von 7,5 m Höhe senkrecht zu einer Ebene oder zu einer beliebigen Ober-

fläche mit einem möglichen Lachenbrand befindet einschließlich des Behältermantels ohne den Behälterboden, angegeben in m^2 ;

u_∞ die charakteristische Blasenauftiegs geschwindigkeit in der Flüssigkeit. Der Wert dieser Variable wird mit Gleichung (7) berechnet (siehe Bild 4) und dem Wert $k_\infty = 1,53$;

$\rho_{g,0}$ die Dichte der Gasphase im druckführenden System bei Auslegungsbedingungen, angegeben in kg/m^3 ;

$\Delta h_{v,0}$ die Verdampfungswärme bei Auslegungsbedingungen, angegeben in J/kg ;

$\dot{Q}$ der Wärmeeintrag in das druckführende System (in diesem Fall ein stehender zylindrischer Behälter) durch einen Brand, angegeben in W ; siehe Gleichung (24);

H_l die Flüssigkeitsfüllhöhe in einem stehenden zylindrischen Behälter, angegeben in m ;

D der Behälterinnendurchmesser im Gasraum eines stehenden zylindrischen Behälters, angegeben in m ;

ϕ_{limit} der Grenzfüllgrad bei Brandeinwirkung.

Falls $\phi_0 \geq \phi_{\text{limit}}$, dann ist eine Zweiphasenströmung anzunehmen.

Diese empirischen Gleichungen gelten nur für stehende zylindrische Behälter ohne Wärmeübertragung durch den Behälterboden. Außerdem wird Zweiphasenströmung durch Tröpfchenmitriss während des Aufwallens von Flüssigkeit vernachlässigt. Der Mitriss ist nur in Tanks mit niedrigem Auslegungsdruck (drucklose Behälter) relevant. Eine Methode zur Entscheidung, ob es notwendig ist, eine Zweiphasenströmung infolge von Tröpfchenmitriss für Tanks mit niedrigem Auslegungsdruck zu berücksichtigen, ist in [12] angegeben.

6.4 Schritt 3 — Berechnung des mindestens abzuführenden Massenstroms

6.4.1 Allgemeines

In 6.4.2 bis 6.4.4 sind Gleichungen für die Vorausberechnung des mindestens abzuführenden Massenstroms angegeben, um sicherzustellen, dass der Behälterdruck unter dem maximal zulässigen akkumulierten Druck bleibt. Die anzuwendenden Gleichungssätze hängen von der Art der Störung im Betrieb ab, die zum Druckanstieg führt. Es ist nicht möglich, alle möglichen Abweichungen in diesem Teil von ISO 4126 zu behandeln; deshalb werden nur ausgewählte Beispiele beschrieben, die üblicherweise in der Industrie vorkommen.

Ein Druckanstieg kann zurückzuführen sein auf:

- a) unzulässigen Zustrom in die abzusichernde Anlage (z. B. Ventilstörung);
- b) erhöhten Wärmeeintrag infolge von Brandeinwirkung oder externer Beheizung; siehe Tabelle 2;
- c) Durchgehareaktion; siehe Tabelle 2.

6.4.2 Druckanstieg infolge von unzulässigem Zustrom

Eine typische Ursache für einen unzulässigen Zustrom kann eine Störung in einem Stellventil in einer Zuführung zum druckführenden System sein. In diesem Fall kann Flüssigkeit bei einem großen Druckunterschied im druckführenden System verdampfen (Flashing). Ein Zweiphasengemisch ist abzuführen, um einen unzulässigen Druckanstieg zu verhindern. Der Strömungsmassendampfgehalt vor dem Sicherheitsventil kann durch eine isenthalpe Flash-Berechnung vom Eingangsdruck des Stellventils auf den Auslegungsdruck berechnet werden.

Solange das zuströmende Fluid eine reine Flüssigkeit ist und ein Aufwallen der Flüssigkeit nicht bereits im druckführenden System auftritt, kann der mindestens abzuführende Massenstrom anhand einer vereinfachten Massenbilanz bestimmt werden, wobei das Abströmen aus dem abgesicherten System über weitere Auslässe, die nicht von der Ventilstörung betroffen sind, berücksichtigt werden darf. Der aus dem druckführenden System mindestens abzuführende Massenstrom $Q_{m,out}$, angegeben in kg/s, ist in Gleichung (15) angegeben (siehe auch Leitlinien von Tabelle A.1):

$$Q_{m,out} = \sum Q_{m,feed} \quad (15)$$

Dabei ist $Q_{m,feed}$ der dem druckführenden System zugeführte Massenstrom, angegeben in kg/s.

Der dem druckführenden System zugeführte Massenstrom, $Q_{m,feed}$, kann mithilfe der Ausflussziffer, K_{vs} , für das vollständig geöffnete Ventil berechnet werden. Diese Ausflussziffer charakterisiert den effektiven engsten Strömungsquerschnitt, A_{feed} , angegeben in m^2 , in der Zuführleitung oder im Stellventil bei einer reibungsfreien Strömung mit nicht-verdampfender Flüssigkeit und der gleichen Druckdifferenz sowie dem gleichen Durchfluss. Er sollte anhand von Gleichung (16) berechnet werden:

$$A_{feed} \cong \frac{K_{vs}}{3\,600} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{H_2O}}{2 \cdot \Delta p_{H_2O}}} \\ = K_{vs} \cdot C_1 \quad (16)$$

Dabei ist

$$C_1 = 1,964 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{h}{m} \quad (17)$$

A_{feed} der effektive engste Strömungsquerschnitt in der Zuführleitung oder vom Stellventil, angegeben in m^2 ;

K_{vs} die Ausflussziffer für das voll geöffnete Stellventil in der Zuführleitung, angegeben in m^3/h , wie üblicherweise vom Ventilhersteller angegeben;

ρ_{H_2O} die Dichte von Wasser bei der Temperatur, die während der Durchströmungsversuche zur Messung des K_{vs} -Werts vorherrscht, d. h. die Dichte bei einer Temperatur zwischen 5 °C und 50 °C, sie entspricht ungefähr 1 000 kg/ m^3 ;

Δp_{H_2O} der Druckabfall im Stellventil während der Durchströmungsversuche zur Messung des K_{vs} -Werts, der bei einem Druckabfall von 10^5 Pa bestimmt wird.

Die Ausflussziffer, K_{vs} , wird üblicherweise vom Hersteller angegeben und entspricht dem Volumenstrom von Wasser, in m^3/h , bei einem Druckabfall, Δp_{H_2O} , von 10^5 Pa und einer Temperatur zwischen 5 °C und 50 °C; siehe IEC 60534-2-1.

Der erforderliche Massenstrom für eine nicht-verdampfende Flüssigkeitsströmung kann demnach mithilfe von Gleichung (18) berechnet werden:

$$Q_{m,feed} = A_{feed} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{l,0} \cdot (p_{CV} - [p_0 + \Delta p_{feed}])} \quad (18)$$

Das Einsetzen von Gleichung (16) in Gleichung (18) erlaubt die Angabe des dem druckführenden System zugeführten Massenstroms, $Q_{m,feed}$, angegeben in kg/s, wie in Gleichung (19) dargestellt:

$$Q_{m,feed} = K_{vs} \cdot C_2 \cdot \sqrt{\rho_{l,0} \cdot (p_{CV} - [p_0 + \Delta p_{feed}])} \quad (19)$$

Dabei ist

K_{VS} die Ausflussziffer für das voll geöffnete Stellventil in der Zuführleitung, angegeben in m^3/h , wie üblicherweise vom Ventilhersteller angegeben:

$$C_2 = 2,778 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\text{h}}{\text{m}} \quad (20)$$

$\rho_{l,0}$ die Dichte der Flüssigphase im druckführenden System bei Auslegungsbedingungen, angegeben in kg/m^3 ;

p_{CV} der Druck stromaufwärts des Stellventils in der Zuführleitung, angegeben in Pa;

p_0 der Auslegungsdruck der abzusichernden Anlage, angegeben in Pa;

Δp_{feed} der Druckabfall zwischen dem Stellventil-Austritt in der Zuführleitung und dem druckführenden System, angegeben in Pa.

Der Druck, p_{CV} , stromaufwärts des Stellventils in der Zuführleitung kann entweder der maximale Betriebsdruck oder der maximal zulässige Druck im vorgeschalteten druckführenden System sein. Der verwendete Druck sollte in der Spezifikationen des Auslegungsfalls nach 6.2 festgelegt sein. Eine exaktere Abschätzung des mindestens abzuführenden Massenstroms kann durch Einhaltung der Richtlinie in IEC 60534-1 erhalten werden.

Die Gleichungen (16) bis (20) gelten nur für reine Flüssigkeitsströmungen durch das Stellventil. Falls Verdampfung im Stellventil zu erwarten ist, wird das in Literaturhinweis [33] angegebene Verfahren empfohlen.

6.4.3 Druckanstieg durch externe Beheizung

6.4.3.1 Allgemeines

Eine Zweiphasenströmung durch einen externen Wärmeeintrag kann verursacht werden durch Beheizung, Brandeinwirkung oder Sonneneinstrahlung, usw. Der Druck kann dabei infolge von Verdampfung, Desorption oder Volumenexpansion einer eingeblockten Flüssigkeit (z. B. Flüssiggas) ansteigen.

Der Brandfall ist einer der häufigsten Auslegungsfälle für Anlagen in der petrochemischen Industrie und für Anlagen zur Lagerung/zum Transport von Flüssiggas an Land oder auf See. Einzelheiten hierzu sind in den Vorschriften des American Petroleum Institute (API), der Compressed Gas Association (CGA) und in den International Gas Carrier (IGC) Codes enthalten. Der wichtigste Parameter für die Auslegung des Sicherheitsventils ist die zugeführte Wärmestromdichte. Je nach Anwendungsfall sind unterschiedliche Wärmestromdichten zu berücksichtigen, die zu verschiedenen Abmessungen für ein Sicherheitsventil führen. In Abschnitt 6.4.3.2 wird die Vorgehensweise nach API als Beispiel beschrieben.

6.4.3.2 Mindestens abzuführender Massenstrom

Die Gleichungen zur Berechnung des mindestens abzuführenden Massenstroms sind in Tabelle 2 aufgeführt. Sie basieren auf unterschiedlichen Mechanismen für den Wärmeeintrag und verschiedenen Fluidzusammensetzungen wie Zweiphasenströmung und Einphasenströmung aus Gas/Dampf oder Flüssigkeit.

Der aus dem druckführenden System mindestens abzuführende Massenstrom, $Q_{m,out}$, angegeben in kg/s , sollte für eine Zweiphasenströmung aus Dampf/Flüssigkeit bei externer Beheizung mit Gleichung (21) berechnet

werden:

$$Q_{m,out} = \frac{\dot{Q}}{\Delta h_{v,0}} \cdot \frac{1}{\dot{Q}_{in}^*} \quad (21)$$

Dabei ist $\dot{Q}_{in}^*$ iterativ mithilfe von Gleichung (22) zu berechnen:

$$\frac{1}{\dot{Q}_{in}^*} (v^* - \dot{Q}_{in}^* - \dot{Q}_{acc}^*) - \ln \left(\frac{v^*}{\dot{Q}_{in}^*} \right) = 0 \quad (22)$$

Dabei ist

$\Delta h_{v,0}$ die Verdampfungswärme bei Auslegungsbedingungen, angegeben in J/kg;

$\dot{Q}_{in}^*$ das Verhältnis von zugeführtem Gesamtwärmestrom zur Energiemenge, die mit dem Dampf entweicht;

$\dot{Q}_{acc}^*$ das Verhältnis von fühlbarer Wärme zu latenter Wärme; siehe Tabelle 2, Gleichung (48);

v^* das dimensionslose spezifische Volumen des homogenen Zweiphasengemischs bei Auslegungsbedingungen im druckführenden System; siehe Tabelle 2, Gleichung (45), (46) oder (47);

$\dot{Q}$ der Wärmeeintrag in das druckführende System; siehe Gleichung (23) oder Gleichung (24).

Wenn $\dot{Q}_{acc}^* = 0$, d. h. wenn der Auslegungsdruck, p_0 , dem Überdruck, p_{over} , entspricht, bedeutet dies $\Delta T_{over} = 0$ und Gleichung (22) vereinfacht sich zu $\dot{Q}_{in}^* = v^*$.

Je nach Art der Wärmeübertragung wird $\dot{Q}$ wie folgt berechnet:

- a) Im Fall einer Beheizung wird der Wärmeeintrag, $\dot{Q}$, in das druckführende System, angegeben in W, nach Gleichung (23) berechnet:

$$\dot{Q} = B_{heat} \cdot A_{heat} \cdot (T_{heat} - T_{sat}) \quad (23)$$

Dabei ist

B_{heat} der maximale Gesamtwärmedurchgangskoeffizient (saubere Wärmeaustauschfläche ohne Belegung (Fouling)), angegeben in $(W/m^2 \cdot K)$, für den betrachteten Auslegungsfall;

A_{heat} die Wärmeaustauschfläche im druckführenden System bei externem Wärmeeintrag, angegeben in m^2 ;

T_{heat} die maximal erreichbare Temperatur der Wärmequelle, angegeben in K;

T_{sat} die Sättigungstemperatur bei dem Druck p_{over} (dem maximalen Druck während der Entlastung, angegeben in Pa) und nicht bei p_0 (dem Auslegungsdruck, angegeben in Pa) unter Berücksichtigung von Δp_A , siehe Bilder 1 a) und 1 b).

- b) Im Fall von Brandeinwirkung wird der Wärmeeintrag, $\dot{Q}$, in das druckführende System angegeben in W, nach Gleichung (24) berechnet, siehe ISO 23251:2006, 5.15:

$$\dot{Q} = 43\,200 \cdot F \cdot A_{fire}^{0,82} \quad (24)$$

Dabei ist

F der Umgebungsfaktor für den Wärmeeintrag durch Brandeinwirkung, siehe Tabelle 2;