

DIN EN ISO 4126-10



ICS 13.240

Entwurf

Einsprüche bis 2021-07-28
Vorgesehen als Ersatz für
DIN ISO 4126-10:2019-10

**Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck –
Teil 10: Auslegung von Sicherheitsventilen und Berstscheiben bei
Zweiphasenströmung (flüssig/gas) (ISO/DIS 4126-10:2021);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 4126-10:2021**

Safety devices for protection against excessive pressure –
Part 10: Sizing of safety valves and bursting discs for gas/liquid two-phase flow
(ISO/DIS 4126-10:2021);
German and English version prEN ISO 4126-10:2021

Dispositifs de sécurité pour protection contre les pressions excessives –
Partie 10: Dimensionnement des soupapes de sûreté pour les débits diphasiques
(liquide/gaz) (ISO/DIS 4126-10:2021);
Version allemande et anglaise prEN ISO 4126-10:2021

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2021-05-28 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 oder 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 172 Seiten

DIN-Normenausschuss Armaturen (NAA)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 4126-10:2021) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 185 „Safety devices for protection against excessive“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 69 „Industriearmaturen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

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 beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

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

ISO 4126-1	siehe	DIN EN ISO 4126-1
ISO 4126-7	siehe	DIN EN ISO 4126-7
ISO 4126-9	siehe	DIN ISO 4126-9*
ISO 23251:2019	siehe	DIN EN ISO 23251:2020-11

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN ISO 4126-10:2019-10 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Erweiterung der Norm um Berstscheiben;
- b) Aufnahme eines Anhangs ZA;
- c) das Dokument wurde inhaltlich und redaktionell überarbeitet.

* Norm wurde zurückgezogen

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

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

DIN EN ISO 4126-7, *Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck — Teil 7: Allgemeine Daten*

DIN EN ISO 23251:2020-11, *Erdöl-, petrochemische und Erdgasindustrie — Druckentlastungs- und Druckausgleichssysteme (ISO 23251:2019); Englische Fassung EN ISO 23251:2020*

DIN ISO 4126-9, *Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck — Teil 9: Anwendungen und Einbau von Sicherheitseinrichtungen, ausgenommen eigenständige Berstscheibeneinrichtungen*

— Leerseite —

<i>Titel de:</i>	Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck — Teil 10: Auslegung von Sicherheitsventilen und Berstscheiben bei Zweiphasenströmung (flüssig/gas) (ISO/DIS 4126-10:2021)
<i>Titel en:</i>	Safety devices for protection against excessive pressure — Part 10: Sizing of safety valves and bursting discs for gas/liquid two-phase flow (ISO/DIS 4126-10:2021)
<i>Titel fr:</i>	Dispositifs de sécurité pour protection contre les pressions excessives — Partie 10: Dimensionnement des soupapes de sûreté pour les débits diphases (liquide/gaz) (ISO/DIS 4126-10:2021)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Anhang ZA (informativ) Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der abzudeckenden Richtlinie 2014/68/EU (Druckgeräte-Richtlinie)	5
Vorwort	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	9
3.1 Allgemeines	9
3.2 Druck	10
3.3 Durchfluss	14
3.4 Engster Strömungsquerschnitt	14
3.5 Fluidzustand	15
3.6 Temperatur	15
4 Symbole und Abkürzungen	16
5 Anwendungsbereich des Verfahrens	21
5.1 Allgemeines	21
5.2 Einschränkungen des Verfahrens zur Berechnung des Zweiphasen-Massenstroms in Sicherheitseinrichtungen	22
5.2.1 Ausdampfströmung	22
5.2.2 Kondensierende Strömung	22
5.2.3 Ausdampfströmung für Mehrkomponenten-Flüssigkeiten	23
5.2.4 Gelöste Gase	23
5.2.5 Kompressibilitätskoeffizient ω	23
5.3 Einschränkungen des Verfahrens zur Berechnung des auszulassenden Massenstroms	24
5.3.1 Temperatur- und Druckanstiegsrate	24
5.3.2 Nicht mischbare Flüssigkeiten	24
6 Bemessungsschritte	24
6.1 Allgemeine Beschreibung der Bemessungsschritte	24
6.2 Schritt 1 — Identifikation des Bemessungsfalls	26
6.3 Schritt 2 — Strömungsregime am Einlass des Abblasleitungssystems	26
6.3.1 Allgemeines	26
6.3.2 Phänomen des Aufwallens	27
6.3.3 Einfluss der Flüssigkeitsviskosität und des Schäumverhaltens auf das Strömungsregime	27
6.3.4 Schätzung des Strömungsregimes (Gas-/Dampf- oder Zweiphasen-Strömung)	29
6.4 Schritt 3 — Berechnung des abzublasenden Massenstroms	33
6.4.1 Allgemeines	33
6.4.2 Druckanstieg aufgrund eines übermäßigen Zustroms	33
6.4.3 Druckanstieg aufgrund externer Erwärmung	35
6.4.4 Druckanstieg aufgrund von thermischen Kettenreaktionen	39
6.5 Schritt 4 — Berechnung des abblasbaren Massenstroms und der Druckänderung im Abblasleitungssystem	43
6.5.1 Allgemeines	43

6.5.2	Kombinierte-Ausflussziffer für Zweiphasen-Strömung, $K_{dr,2ph}$	47
6.5.3	Dimensionsloser Massenstrom, C	48
6.5.4	Kompressibilitätskoeffizient, ω (numerisches Verfahren)	48
6.5.5	Berechnung der stromabwärtigen Stagnationsbedingung.....	50
6.5.6	Schlupfkorrektur für nicht ausdampfende Zweiphasen-Strömung	50
6.6	Schritt 5— Sicherstellung des ordnungsgemäßen Betriebs eines Sicherheitsventils im Abblasleitungssystem unter Anlagenbedingungen	51
6.7	Berechnung des abblasbaren Massenstroms und der Druckänderung im Abblasleitungssystem.....	51
Anhang A (informativ) Identifikation von Bemessungsszenarien.....		60
Anhang B (informativ) Beispiel für die Berechnung des abzublasenden Massenstroms.....		62
B.1	Allgemeines	62
B.2	Schritt 1 — Identifikation des Bemessungsfalls	62
B.2.1	Allgemeines	62
B.2.2	Eingabedaten	62
B.2.3	Bemessung einer Sicherheitseinrichtung — Anwendungsbereich des Verfahrens	64
B.3	Schritt 2 — Strömungsregime am Einlass des Abblasleitungssystems	64
B.4	Schritt 3 — Berechnung des abzublasenden Massenstroms	65
Anhang C (informativ) Beispiel für die Berechnung des abblasbaren Massenstroms und der Druckänderung im Abblasleitungssystem.....		66
C.1	Eingabedaten	67
C.2	Schritt 4 – Berechnung des abblasbaren Massenstroms und der Druckänderung im Abblasleitungssystem.....	68
C.2.1	Erste Schätzung des abblasbaren Massenstroms	68
C.2.2	Berechnung des Druckverlustes zwischen Position 0 und 1.....	70
C.2.3	Berechnung der stromabwärtigen Stagnationsbedingungen	71
C.2.4	Berechnung des Druckverlustes zwischen Position 1 und 2.....	72
C.3	Berechnung des Druckverlustes in der Sicherheitseinrichtung	74
C.3.1	Sicherheitsventile.....	74
C.4	Berechnung des Druckverlustes in der Abblasleitung	76
C.4.1	Auswahl des Durchmessers der Auslassleitung.....	76
C.4.2	Berechnung des Druckverlustes am Auslass der Sicherheitseinrichtung.....	76
C.5	Vereinfachte Berechnung des Durchflusses durch eine Berstscheibe und Abblasleitung.....	78
C.5.1	Einleitung	78
C.5.2	Eingabedaten	79
C.5.3	Berechnung der Durchflussrate.....	80
Literaturhinweise.....		84

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 4126-10:2021) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 185 „Safety devices for protection against excessive“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 69 „Industriearmaturen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wurde im Rahmen eines Mandats erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinien.

Zum Zusammenhang mit EU-Richtlinien siehe informativen Anhang ZA, der Bestandteil dieses Dokuments ist.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 4126-10:2021 wurde von CEN als prEN ISO 4126-10:2021 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Anhang ZA (informativ)

Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der abzudeckenden Richtlinie 2014/68/EU (Druckgeräte Richtlinie)

Diese Europäische Norm wurde im Rahmen eines von der Europäischen Kommission erteilten Mandats M/071 erarbeitet, um ein freiwilliges Mittel zur Erfüllung der grundlegenden Anforderungen der Richtlinie 2014/68/EU zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt bereitzustellen.

Sobald diese Norm im Amtsblatt der Europäischen Union im Sinne der Richtlinie 2014/68/EU in Bezug genommen ist, berechtigt die Übereinstimmung mit den in Tabelle ZA.1 aufgeführten normativen Abschnitten dieser Norm innerhalb der Grenzen des Anwendungsbereichs dieser Norm zu der Annahme, dass eine Übereinstimmung mit den entsprechenden grundlegenden Anforderungen der Richtlinie 2014/68/EU und den zugehörigen EFTA-Vorschriften gegeben ist.

**Tabelle ZA.1 — Übereinstimmung zwischen dieser Europäischen Norm und
Anhang I der Richtlinie 2014/68/EU**

Grundlegende Anforderungen der Richtlinie 2014/68/EU	Abschnitt(e)/Unterabschnitt(e) dieser Europäischen Norm	Erläuterungen/ Anmerkungen
2.11.1	6	Ausrüstungsteil mit Sicherheitsfunktion

WARNHINWEIS 1 — Die Konformitätsvermutung bleibt nur bestehen, solange die Fundstelle dieser Europäischen Norm in der im Amtsblatt der Europäischen Union veröffentlichten Liste erhalten bleibt. Anwender dieser Norm sollten regelmäßig die im Amtsblatt der Europäischen Union zuletzt veröffentlichte Liste einsehen.

WARNHINWEIS 2 — Für Produkte, die in den Anwendungsbereich dieser Norm fallen, können weitere Rechtsvorschriften der EU anwendbar sein.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO 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 staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

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. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 185 *Safety devices for protection against excessive pressure* erarbeitet.

Die Norm ISO 4126 besteht aus den folgenden Teilen unter dem allgemeinen Titel „Safety devices for protection against excessive pressure“:

- *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*

In dieser Norm wird die Einheit bar für den Druck verwendet. 100 000 Pa = 1 bar.

Einleitung

Für die Bemessung von Sicherheitsventilen und Berstscheiben und die angeschlossenen Einlass- und Auslassleitungen für gleichförmige Einphasen-Gas-/Dampf- oder Flüssigkeitsströmung sind gut etablierte Empfehlungen vorhanden. Im Falle einer Zweiphasen-Dampf-/Flüssigkeitsströmung ist die Entlastungsfläche, die zum Schutz eines Systems vor Überdruck erforderlich ist, jedoch größer als die Entlastungsfläche für eine Einphasen-Strömung, wenn dieselbe Behälterbedingung und Wärmefreisetzung berücksichtigt werden. Ist eine größere Entlastungsfläche erforderlich, da die Flüssigkeit bei einer Zweiphasen-Strömung die Entlastungsfläche für die Dampfströmung teilweise blockiert, durch die der Großteil der Energie durch Verdampfung im Behälter entfernt wird.

Dieser Teil von ISO 4126 enthält ein weithin verwendetes Werkzeug für die Maße der am häufigsten verwendeten Sicherheitsventile und Berstscheiben für die Fluidversorgung in verschiedenen industriellen Bereichen. Es basiert auf dem Omega-Parameterverfahren, welcher durch einen thermodynamischen Nichtgleichgewicht-Parameter erweitert wird. Zwischen der Genauigkeit des Verfahrens und der nicht vermeidbaren Unsicherheiten der Eingabe- und Eigenschaftsdaten unter den tatsächlichen Bemessungsbedingungen wird ein Gleichgewicht angestrebt.

Bei einer Zweiphasenströmung können die Abmessungen der Sicherheitseinrichtung den Fluidzustand und damit den abzublasenden Massenstrom beeinflussen. Zudem hängt der Zweiphasen-Massenstrom durch eine Sicherheitseinrichtung wesentlich von der Massenstromqualität (Massenanteil des Dampfes) des Fluids am Eintritt der Einrichtung ab. Da diese Parameter in den meisten Fällen beim Gestaltungsverfahren einer Druckentlastungseinrichtung nicht sofort vorhanden sind, beschreibt dieser Teil von ISO 4126 zudem ein umfassendes Verfahren zur Bestimmung der Zusammensetzung der Fluidphase am Eintritt der Sicherheitseinrichtung. Diese Zusammensetzung der Fluidphase hängt vom Szenario ab, durch das es zu einer Druckerhöhung kommt. Das empfohlene Bemessungsverfahren beginnt aus diesem Grund mit der Definition des Bemessungsfalls und enthält ein Verfahren für die Vorhersage des auszulassenden Massenstroms sowie der daraus entstehenden Massenstromqualität am Eintritt der Sicherheitseinrichtung.

Die Gleichungen aus ISO 4126-7 für Einphasenströme bis zum engsten Strömungsquerschnitt sind auch in diesem Teil von ISO 4126 angepasst an SI-Einheiten enthalten, um die Durchflussraten bei einschränkenden Bedingungen einer Einphasen-Gas- und Flüssigkeitsströmung zu berechnen.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von ISO 4126 legt die Bemessung von Sicherheitsventilen und Berstscheiben für Zweiphasen-Strömung (flüssig/gasförmig) in druckbeaufschlagten Systemen wie Reaktoren, Speichertanks, Säulen, Wärmetauschern, Rohrsystemen oder Transporttanks/-behältern fest. Die möglichen Fluidzustände am Eintritt der Sicherheitseinrichtung, die bei einer Zweiphasen-Strömung auftreten können, sind in Tabelle 1 dargestellt.

ANMERKUNG Der Ausdruck „Sicherheitsventil“ ist ein Synonym für die in ISO 4126-1, ISO 4126-4 und ISO 4126-5 beschriebenen Ventile. Der Ausdruck „Berstscheibe“ ist ein Synonym für die in ISO 4126-2, ISO 4126-3 und ISO 4126-6 beschriebene Berstscheibeneinrichtung.

Tabelle 1 — Mögliche Fluidzustände am Eintritt des Sicherheitsventils oder der Berstscheibe, die bei einer Zweiphasen-Strömung auftreten können

Fluidzustand am Eintritt der Einrichtung	Fälle	Beispiele
flüssig	unterkühlt (mögliches Ausdampfen in der Sicherheitseinrichtung) gesättigt mit gelöstem Gas	Kaltwasser kochendes Wasser CO ₂ /Wasser
gas-/dampfförmig	nahezu gesättigter Dampf (möglicherweise in der Sicherheitseinrichtung kondensierend)	Dampf
gasförmig/flüssig	dampfförmig/flüssig nicht verdampfende Flüssigkeit und nicht kondensierendes Gas (konstante Qualität) Gas-/Flüssigkeitsmischung, wenn Gas desorbiert oder erzeugt wird	Dampf/Wasser Luft/Wasser

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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).

EN ISO 21013-3:2016, *Kryo-Behälter — Druckentlastungseinrichtungen für den Kryo-Betrieb — Teil 3: Bestimmung von Größe und Durchfluss*

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

ISO 4126-7, *Safety devices for protection against excessive pressure — Part 7: Common data*

API Standard 521:2014-01, *Pressure-Relieving and Depressuring Systems*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 4126-7 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

3.1 Allgemeines

3.1.1

druckbeaufschlagtes System

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

3.1.2

kritische Füllgrenze

ϕ_{limit}

maximale anfängliche Flüssigkeitsgrenze (Füllstand) im druckbeaufschlagten System unter Bemessungsbedingungen, bis zu dem eine Dampfauflösung auftritt und eine Einphasen-Gas- oder Dampfströmung erwartet werden kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Die kritische Füllgrenze wird als Verhältnis zum Gesamtvolumen des Systems ausgedrückt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei Füllgraden oberhalb der kritischen Füllgrenze wird von einer Zweiphasenströmung ausgegangen.

3.1.3

anfänglicher Flüssigkeitsstand

ϕ_0

anfängliche Flüssigkeitshöhe im druckführenden System bei Auslegungsbedingungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Der anfängliche Flüssigkeitsstand wird als Verhältnis zum Gesamtvolumen des Systems ausgedrückt.

3.1.4

Einlassleitung

Rohrleitungen und zugehörige Armaturen, über die das druckbeaufschlagte System mit dem Eintritt der Sicherheitseinrichtung verbunden ist

3.1.5

Auslassleitung

Rohrleitungen und zugehörige Armaturen, über die der Austritt des Sicherheitsventils mit einem Sicherheitsbehälter oder mit der Atmosphäre verbunden ist

3.1.6

Abblasleitungssystem

Kombination aus Sicherheitseinrichtung, Einlass- und Auslassleitung

3.1.7

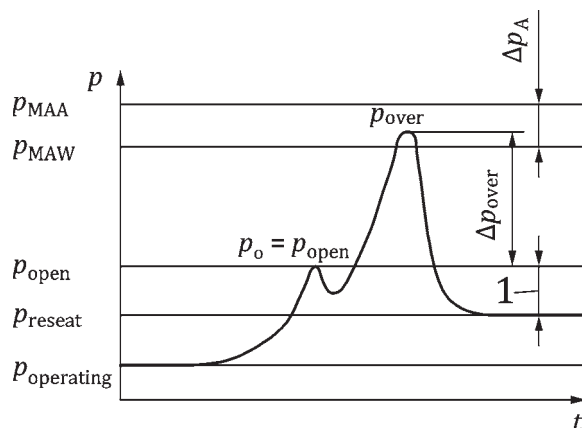
kryogener Behälter

Vakuumbehälter für den Einsatz bei niedrigen Temperaturen mit Flüssiggasen

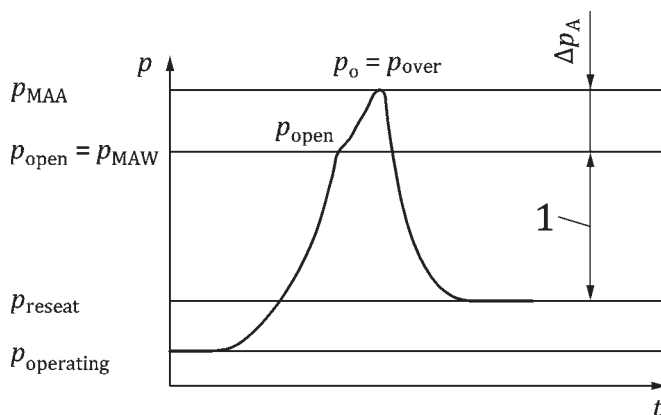
3.2 Druck

Siehe Bild 1 a) und Bild 1 b) für eine Darstellung der in 3.2. definierten Druckzusammenhänge.

Im Gegensatz zu den Definitionen, die in anderen Teilen dieser Internationalen Norm verwendet werden (z. B. ISO 4126-7), sind alle Drücke absolute Drücke und keine Manometerdrücke.



a) Druckverlauf eines typischen dampfdruckproduzierenden Systems, das korrekt bemessen ist



b) Typischer Druckverlauf für ein außenbeheiztes gasdurchströmtes System

Legende

p_{MAA}	maximal zulässiger Druckanstieg	p_0	Bemessungsdruck gleich p_{open} wie in Bild 1 a) und gleich p_{over} wie in Bild 1 b)
p_{MAW}	maximal zulässiger absoluter Arbeitsdruck		dargestellt
p_{open}	Ansprechdruck	p_{over}	Überdruck
p_{reseat}	Schließdruck	Δp_{MAA}	maximal zulässiger Druckanstieg
$p_{operating}$	Betriebsdruck	Δp_{over}	Änderung des Überdrucks
1	Δp_{BD} Schließdruckdifferenz		

Bild 1 — Zusammenhang zwischen den definierten Drücken

3.2.1

maximal zulässiger absoluter Arbeitsdruck

p_{MAW}

maximal zulässiger Druck im oberen Bereich eines druckbeaufschlagten Systems in seiner Betriebsstellung für eine bestimmte Temperatur

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.2

maximal zulässiger angesammelter Druck

p_{MAA}

Summe des maximal zulässigen Arbeitsdrucks und des maximal zulässigen Druckanstiegs

Anmerkung 1 zum Begriff: Der maximal zulässige Druckanstieg wird durch den gültigen Kode für Betriebs- und Brandgefahren festgelegt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.3

maximal zulässiger Anstieg

Δp_{MAA}

Druckanstieg über den maximal zulässigen Arbeitsdruck eines druckbeaufschlagten Systems während dem Entlasten durch die Sicherheitseinrichtung

Anmerkung 1 zum Begriff: Der maximal zulässige Anstieg wird in Druckeinheiten oder als Prozentanteil des maximal zulässigen Arbeitsdrucks angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.4

Ansprechdruck bei Beginn der Ventilöffnung

p_{open}

vorbestimmter absoluter Druck, bei dem ein Sicherheitsventil unter Betriebsbedingungen spätestens geöffnet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.6

absoluter Überdruck

Δp_{over}

Druckanstieg über den Ansprechdruck des Sicherheitsventils, p_{open}

Anmerkung 1 zum Begriff: Der maximal zulässige Überdruck ist identisch mit dem maximalen Anstieg, Δp_{MAA} , wenn der Ansprechdruck des Sicherheitsventils auf den maximal zulässigen Arbeitsdruck des druckbeaufschlagten Systems eingestellt ist.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der absolute Überdruck wird in Druckeinheiten oder als Prozentanteil des Ansprechdrucks angegeben.

Anmerkung 3 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.7

Überdruck

p_{over}

maximaler Druck im druckbeaufschlagten System während der Druckentlastung, d. h. Druck weniger oder gleich dem maximal angesammelten Druck

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.8

Bemessungsdruck

p_0

Druck, bei dem alle Eigenschaftsdaten, insbesondere der Kompressibilitätskoeffizient, ω , zur Bemessung der Sicherheitseinrichtung kalkuliert werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Falle von dampfdruckproduzierenden und hybriden reaktiven Systemen muss der Bemessungsdruck so niedrig wie vernünftigerweise möglich sein, sollte aber den Normalbetrieb nicht beeinträchtigen. Im Falle von nicht reaktiven und gasproduzierenden Systemen, kann der Konstrukteur einen höheren Wert für den Bemessungsdruck wählen. Dieser darf jedoch den maximal zulässigen angesammelten Druck nicht übersteigen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.9

kritischer Druck

p_{crit}

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei diesem Druck nähert sich der Massenstrom einem Maximalwert bei einer bestimmten Bemessungsbedingung im druckbeaufschlagten System. Ein weiterer Druckabfall des Abwärtsdrucks erhöht den Massenstrom nicht weiter. In der Regel tritt der kritische Druck entweder im Ventilsitz, in der Einlassdüse und/oder im Ventilkörper des Sicherheitsventils auf. Bei der Berstscheibe kann der kritische Druck stromabwärts bei einem minimalen Strömungsquerschnitt, am Ausgang des Behälters oder bei einer Änderung des Rohrdurchmessers auftreten. In langen Auslassleitungen von Sicherheitseinrichtungen können auch mehrere kritische Drücke auftreten.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.10

kritisches Druckverhältnis

η_{crit}

Verhältnis des kritischen Drucks zum Bemessungsdruck

3.2.11

kritischer thermodynamischer Druck

p_c

Zustandseigenschaft, in Kombination mit der thermodynamischen kritischen Temperatur, am kritischen thermodynamischen Punkt

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.12

Gegendruck

p_b

Druck, der aufgrund eines Drucks im Entlastungssystem am Austritt einer Sicherheitseinrichtung vorhanden ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Gegendruck kann entweder variabel oder konstant sein; er ist die Summe aus Fremdegendruck und Eigengegendruck.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.13

Eigengegendruck

Druck, der aufgrund eines Stroms durch das Ventil oder die Berstscheibe und das Entlastungssystem am Austritt der Sicherheitseinrichtung vorhanden ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.14

Fremdegendruck

Druck, der zu dem Zeitpunkt am Austritt der Sicherheitseinrichtung vorhanden ist, zu dem die Einrichtung betrieben werden muss

Anmerkung 1 zum Begriff: Fremdegendruck tritt aufgrund von Druck im Entlastungssystem verursacht durch andere Quellen auf.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.15

Einlassdruckverlust

Δp_{loss}

nicht wiederherstellbarer Druckabfall aufgrund des Stroms in den Rohren von Einrichtungen, die am Eintritt der Sicherheitseinrichtung geschützt sind

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.16

Schließdruckdifferenz

Δp_{BD}

Differenz zwischen Ansprechdruck und Schließdruck eines Sicherheitsventils

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Schließdruckdifferenz wird in der Regel als Prozent des Ansprechdrucks angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei diesem Druck handelt es sich um einen Absolutdruck, nicht um einen Überdruck.

3.2.17

dimensionslos reduzierter Druck

p_{red}

lokaler Druck geteilt durch den kritischen thermodynamischen Druck des Stoffes

3.3 Durchfluss

3.3.1

Massenstrom, der aus einem druckbeaufschlagten System abgeblasen werden muss

$Q_{m,out}$

Massenstrom, der aus einem druckbeaufschlagten System ausgeblasen werden muss, damit der Druck den maximal zulässigen angesammelten Druck im druckbeaufschlagten System während der Druckentlastung nicht übersteigt

3.3.2

dem druckbeaufschlagten System zugeführter Massenstrom

$Q_{m,feed}$

Maximaler Massenfluss, der dem geschützten druckbeaufschlagten System durch eine Zuleitung oder über ein Steuerventil zugeführt wird

3.3.3

durch eine Sicherheitseinrichtung abblasbarer Massenstrom

$\dot{m}_{SD}$

Massenstrom je Fläche durch eine Sicherheitseinrichtung bei unter Bemessungsbedingungen, der anhand der zertifizierten kombinierten Ausflussziffern für Gas- und Flüssigkeitsströme berechnet wurde

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Gleichung (49).

3.3.4

kombinierte Ausflussziffer für Gas- und Flüssigkeitsströme

$K_{dr,g}$ (für Gas)

$K_{dr,l}$ (für Flüssigkeiten)

Korrekturfaktor definiert durch das Verhältnis des theoretisch abzulassenden Massenstroms durch die Sicherheitseinrichtung zu einem experimentell bestimmten Massenfluss durch einen Einrichtungstyp desselben Herstellers

Anmerkung 1 zum Begriff: Die kombinierte Ausflussziffer eines Sicherheitsventils bezieht sich auf den Ventilsitz-Querschnitt und berücksichtigt die Unvollkommenheit einer Strömung durch eine Sicherheitseinrichtung im Vergleich zu einer Strömung durch ein Referenzmodell (ideale Düse). Die zertifizierten Werte für die Gas- und Flüssigkeitsströmung, K_d , werden für gewöhnlich vom Ventilhersteller bereitgestellt oder durch einen Versuch bestimmt. Kombinierte Nennausflussziffern K_{dr} , die 0,9 K_d entsprechen, werden zur Berechnung der Bemessungsfläche des Sicherheitsventils verwendet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die kombinierte Ausflussziffer einer Berstscheibe bezieht sich auf den Scheibenquerschnitt und berücksichtigt die Unvollkommenheit einer Strömung durch eine Sicherheitseinrichtung im Vergleich zu einer Strömung durch ein Referenzmodell.

3.4 Engster Strömungsquerschnitt

3.4.1

Bemessungsfläche der Sicherheitseinrichtung

A_0

wichtigstes Ergebnis des Bemessungsverfahrens in Übereinstimmung mit diesem Teil von ISO 4126, das erforderlich ist, um ein ordnungsgemäß bemessenes Sicherheitsventil auszuwählen und das als Mindestquerschnitt des Strömungsquerschnitts definiert ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Es ist wichtig, dass der durch die Sicherheitseinrichtung abblasbarer Massenstrom auf diese spezifische Fläche bezogen wird.

3.4.2

effektiver engster Strömungsquerschnitt der Zuleitung oder des Steuerventils

A_{feed}

Entlastungsströmungsfläche einer Zuleitung oder eines Steuerventils in der Leitung zum druckbeaufschlagten System

3.5 Fluidzustand

3.5.1

Gas-/Flüssigkeitsgemisch

Fluidgemisch aus einem flüssigen und einem gasförmigen Teil, in dem das Gas nicht zwingend die gleiche chemische Zusammensetzung wie die Flüssigkeit aufweisen muss

3.5.2

dampfdruckproduzierendes System

Fluidsystem, in dem ein Teil der Energie durch Verdampfen oder Entspannungsverdampfen verloren geht

3.5.3

gasproduzierendes System

Fluidsystem, in dem Permanentgas erzeugt wird (z. B. durch chemische Reaktion oder Evolution aus einer Lösung) und aus dem durch Verdampfen bei den Bemessungsbedingungen keine wesentlichen Mengen an Energie aus der Flüssigkeit verloren geht

3.5.4

hybrides System

Fluidsystem, das in hohem Maße bei den Bemessungsbedingungen sowohl Eigenschaften eines dampfdruckproduzierenden und gasproduzierenden Systems aufweist

3.5.5

thermische Kettenreaktion

unkontrollierte exotherme chemische Reaktion

3.6 Temperatur

3.6.1

kritische thermodynamische Temperatur

T_c

Zustandseigenschaft, in Kombination mit dem thermodynamischen kritischen Druck, am kritischen thermodynamischen Punkt

3.6.2

Bemessungstemperatur

T_0

Temperatur des druckbeaufschlagten Systems zu den Bemessungsbedingungen

3.6.3

Übertemperatur

T_{over}

maximale Temperatur im druckbeaufschlagten System während der Druckentlastung

3.6.4

Sättigungstemperaturdifferenz

ΔT_{over}

Differenz zwischen der Sättigungstemperatur bei maximalem Druck während der Druckentlastung, p_{over} , und der Sättigungstemperatur bei Bemessungsdruck, p_0

3.6.5

dimensionslos reduzierte Temperatur

T_{red}

lokale Temperatur geteilt durch die kritische thermodynamische Temperatur des Stoffes

4 Symbole und Abkürzungen

Symbol	Definition	Einheit
A_{feed}	effektiver engster Strömungsquerschnitt der Zuleitung oder des Steuerventils	m ²
A_{fire}	benetzte Fläche, die für die Wärmeübertragung durch Feuerbelastung zu berücksichtigen ist. Im Einzelnen handelt es sich um die teilweise Oberfläche eines vertikalen zylindrischen Behälters, die mit Flüssigkeit bedeckt ist und sich innerhalb von 7,5 m vertikal vom Boden oder einer beliebigen Fläche befindet, auf der ein Lachendbrand aufrechterhalten werden kann. Je nach betrachtetem Brandfall darf entweder die Bodenwand einbezogen werden oder die Bodenwand des Behälters wird nicht einbezogen.	m ²
A_{heat}	Wärmeaustauschfläche im druckbeaufschlagten System im Falle einer externen Wärmebelastung	m ²
A_0	erforderliche Mindestfläche für den Sicherheitseinrichtungssitz (Sicherheitseinrichtungs-Bemessungsfläche). Im Allgemeinen ist dies bei Sicherheitsventilen die Sicherheitsventilsitzfläche und bei Berstscheiben der minimale Nettoströmungsquerschnitt.	m ²
A_R	Querschnittsbereich in einem vertikalen zylindrischen Behälter	m ²
B_{heat}	(maximale) gesamte Wärmeübertragungsziffer, siehe Gleichung (25)	W/(m ² ·K)
C	dimensionsloser Massenstrom	—
C_1	der Strömungskonversionsfaktor ist 1	
C_2	der Strömungskonversionsfaktor ist 2	
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	J/(kg·K)
D	Innendurchmesser eines vertikalen zylindrischen Behälters	m
d	Durchmesser	m
$\frac{dp}{dt}$	Druckanstieg im druckbeaufschlagten System	Pa/s
$\frac{dT}{dt}$	Reaktions-Eigenerwärmungsrate im druckbeaufschlagten System	K/s
F	Umweltfaktor für die Wärmebelastung durch Feuer (siehe 6.4.3.2)	—
g	Beschleunigung durch Schwerkraft	m/s ²
H_l	Höhe des Flüssigkeitsstands in einem vertikalen zylindrischen Behälter (Unterseite des Behälters zum Füllstand)	m
H_{fire}	maximale Höhe der Flammen über dem Boden	m
H_{vessel}	Höhe des Bodens der Flammen im Behälter über dem Boden	m

Symbol	Definition	Einheit
k_{∞}	Korrelierender Parameter zur Berechnung der charakteristischen Blasenauftiegs geschwindigkeit	—
$K_{dr,2ph}$	kombinierte Ventil-Ausflussziffer bei Zweiphasenströmung	—
$K_{dr,g}$	zertifizierte kombinierte Ventil-Ausflussziffer bei Einphasengas-/Einphasendampfströmung	—
$K_{dr,l}$	zertifizierte kombinierte Ventil-Ausflussziffer bei Einphasen-Flüssigkeitsströmung	—
K_R	Geschwindigkeit des Druckabfalls der Berstscheibe	—
K_{vs}	Flüssigkeitsauslassfaktor für ein vollständig geöffnetes Steuerventil in der Zuleitung, der bei gleicher Druckdifferenz bei gleichem Durchfluss A_{feed} der Zuleitung oder des Steuerventils eines reibungslosen Ventils charakterisiert.	m ³ /h
L	vertikale Länge einer Strömungsbegrenzung zur Berücksichtigung der potenziellen Energieänderung. Für Sicherheitsventile und Berstscheiben kann L auf 0 eingestellt werden. Für Einlass- und Auslassleitungen müssen die Höhen des Systems berücksichtigt werden	m
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/(m ² ·s)
$\dot{m}_{SD}$	durch ein Sicherheitsventil abblasbarer Massenstrom	kg/(m ² ·s)
M_0	gesamter Massenstrom im druckbeaufschlagten System bei Bemessungsbedingungen	kg
M	Molekülmasse	kg/kmol
N	Siedeverzugsfaktor unter Berücksichtigung des thermodynamischen Nichtgleichgewichts	—
p	Druck im druckbeaufschlagten System	Pa
p_b	Gegendruck	Pa
p_c	kritischer thermodynamischer Druck	Pa
p_{crit}	fluiddynamischer kritischer Druck	Pa
p_{MAW}	maximal zulässiger absoluter Arbeitsdruck	Pa
p_{MAA}	maximal zulässiger angesammelter Druck	Pa
p_0	Bemessungsdruck	Pa
p_{over}	maximaler Druck in einem druckbeaufschlagten System bei der Druckentlastung, siehe Bild 1	Pa
p_{open}	Ansprechdruck bei Beginn der Ventilöffnung	Pa
$\dot{q}_{fire}$	dimensionslose Feuerbelastung	—
$Q_{m,out}$	Massenstrom, der aus einem druckbeaufschlagten System abgeblasen werden muss	kg/s
$Q_{m,feed}$	dem druckbeaufschlagten System zugeführter Massenstrom	kg/s

Symbol	Definition	Einheit
$Q_{m,SD}$	durch eine Sicherheitseinrichtung abblasbarer Massenstrom	kg/s
$\dot{Q}$	auf das druckbeaufschlagte System wirkende Wärmebelastung, entweder durch Kettenreaktion oder externe Wärmequelle	W
$\dot{Q}_{acc}^*$	Verhältnis von fühlbarer Wärme zu latenter Wärme	—
$\dot{Q}_{in}^*$	Verhältnis von gesamter Wärmebelastung zu dem durch Verdampfung entfernten Energiestrom	—
$\dot{Q}_0$	Erwärmungsrate im druckbeaufschlagten System bei den Bemessungsbedingungen, siehe Gleichung (36)	W
R	universelle Gaskonstante (8 314,2 J/(kmol·K))	J/(kmol·K)
T	Temperatur im druckbeaufschlagten System	K
T_c	kritische thermodynamische Temperatur	K
T_{heat}	maximal mögliche Temperatur der externen Wärmequelle	K
T_0	Temperatur des druckbeaufschlagten Systems zu den Bemessungsbedingungen	K
T_{over}	maximale Temperatur im druckbeaufschlagten System während der Druckentlastung	K
$u_{g,0}$	Oberflächengasgeschwindigkeit im Freibord-Gasvolumen eines vertikalen zylindrischen Behälters unter Bemessungsbedingungen	m/s
u_∞	charakteristische Blasenauftiegs geschwindigkeit von Gas/Dampf in der Flüssigkeit	m/s
v	spezifisches Volumen im druckbeaufschlagten System	m ³ /kg
V	Volumen des druckbeaufschlagten System	m ³
$\dot{x}$	Massenstromqualität, d. h. Verhältnis von Gasmassenstrom zum gesamten Massenstrom eines Zweiphasen-Gemischs	—
Z	Realgasfaktor	—
β	Verhältnis des Durchmessers des Entlüftungseinlasses zum Durchmesser des Halses	—
ε_0	Leerraumfraktion im druckbeaufschlagten System bei Bemessungsbedingungen für ein homogenes Zweiphasen-Gemisch	—
ε_{seat}	Leerraumfraktion im engsten Querschnitt, siehe Gleichung (51)	—
$\zeta_{v,ref}$	Widerstandskoeffizient der Referenz, entweder Einlass oder Auslass	—
η	Druckverhältnis, entweder η_{crit} oder η_b	—
η_b	Verhältnis von Gegendruck zum Bemessungsdruck	—
η_{crit}	kritisches Druckverhältnis	—
η_s	Verhältnis des Sättigungsdrucks zur Bemessungstemperatur und Bemessungsdruck (Maßnahme zur Flüssigkeits-Unterkühlung), siehe Gleichung (66)	—

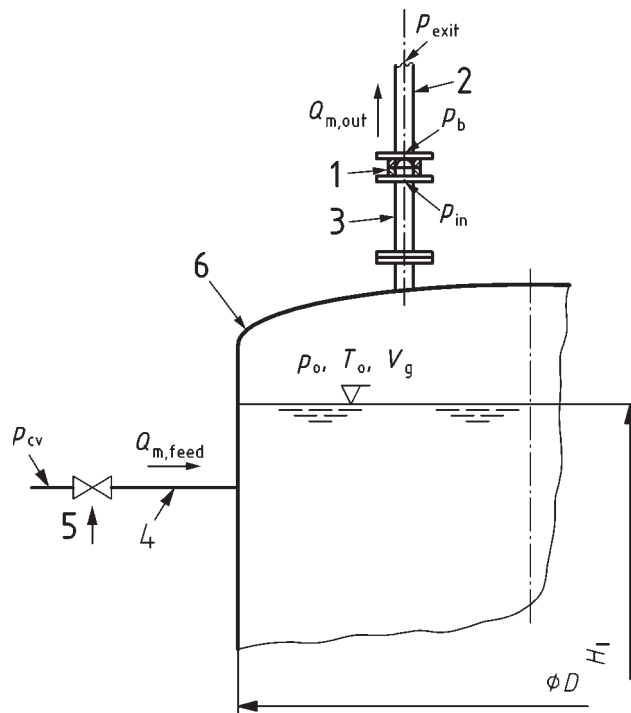
Symbol	Definition	Einheit
θ	Winkel einer Abblasleitung zur Horizontalen	°
κ	isentroper Koeffizient	—
ρ	Fluiddichte	kg/m ³
ρ_{H_2O}	Dichte von Wasser während Versuchen zum Messen des Werts K_{vs} bei einer Temperatur von 5 °C	kg/m ³
σ	Oberflächenspannung	N/m
ϕ_{limit}	kritische Füllgrenze	—
ϕ_0	anfänglicher Flüssigkeitsstand bei Bemessungsbedingung, d. h. Flüssigkeitsvolumen geteilt durch das Gesamtvolumen des betrachteten druckbeaufschlagten Systems	—
ω	Kompressibilitätskoeffizient	—
ω_{eq}	Kompressibilitätskoeffizient bei Gleichgewichtsbedingung ($N = 1$)	—
Γ_{Gas}	Gaserzeugungsrate je Flüssigkeitsmasse, d. h. Gasmassenstrom an Flüssigkeitsmassenbestand im druckbeaufschlagten System	kg/(s·kg)
Γ	dimensionsloses Geschwindigkeitsverhältnis	—
Δh_v	latente Verdampfungswärme	J/kg
Δp	Druckabfall in der Einlass- oder Auslassleitung	Pa
Δp_{MAA}	maximal zulässiger Anstieg (Anstieg nach Definition in ISO 4126-1)	Pa
Δp_{feed}	Druckverlust zwischen dem Austritt des Steuerventils in der Zuleitung und dem druckbeaufschlagten System	Pa
Δp_{H_2O}	Druckverlust in einem Steuerventil während Versuchen zur Messung des Wert K_{vs} definiert bei einer Druckdifferenz von 10 ⁵ Pa	Pa
Δp_{loss}	Druckverlust an Einlassleitung	Pa
Δp_{over}	absoluter Überdruck	Pa
ΔT_{over}	Sättigungstemperaturdifferenz	K
ψ	Siedeflächenverhältnis	—
Ω	dynamische Viskosität	Pa·s

Index	Bedeutung
0	Bemessungsbedingung
2ph	Zweiphasen-Strömung
b	back
CV	vorgelagerte Strömung am Steuerventil
c	kritische thermodynamische Eigenschaft
crit	kritischer Zustand in Bezug auf die Strömung

Index	Bedeutung
ct	aufschäumende Strömung
feed	in das druckbeaufschlagte System
fire	externe Wärmebelastung durch Feuer
g	Gasphase
HNE	homogene Nichtgleichgewichts-Strömung
H ₂ O	Wasser
heat	externe Wärmebelastung (Quelle)
<i>i</i>	Flüssigkeitsgemischkomponente
ideal	theoretisch perfekt (adiabatisch, reibungslos)
in	Einlass
is	isentrop
<i>j</i>	Identifikation einer bestimmten Flüssigkeitsgemischkomponente
l	flüssige Phase
limit	Grenzwert (Grenze)
loss	üblicher Druckverlust
MAA	maximal zulässige angesammelte Bedingung
MAW	maximal zulässige Arbeitsbedingung
max	Maximalwert
mean	Durchschnitt zwischen eingestellter Bedingung und Bedingung bei maximal zulässigem angesammeltem Druck
operating	Betriebsbedingungen
out	Auslass aus dem druckbeaufschlagten System
over	Überdruck oder Übertemperatur
r	herabgesetzter Wert (siehe 3.3.4)
red	reduzierte Bedingung, d. h. Bedingung in Bezug auf die kritische thermodynamische Eigenschaft
ref	Referenzquerschnitt, entweder Einlass oder Auslass
reseat	Schließbedingung
SD	durch die Sicherheitseinrichtung
sat	Sättigungsbedingung in der flüssigen Phase
seat	Zustand im engsten Strömungsquerschnitt des Geräts, z. B. dem Ventilsitz oder minimalen Strömungsquerschnitt einer Berstscheibe
open	Bedingung, bei der ein Sicherheitsventil unter Betriebsbedingungen spätestens geöffnet wird
s	Unterkühlen
th	Hals

Index	Bedeutung
vessel	Boden des Behälters
∞	charakteristische Blasenauftiegeigenschaft in der flüssigen Phase

Exponent	Bedeutung
a	Exponent in der Gleichung für den Siedeverzugskoeffizienten, N , siehe Gleichung (64)
*	dimensionslos



Legende

- | | |
|--------------------------|------------------------------|
| 1 Sicherheitseinrichtung | 4 Zuleitung |
| 2 Auslassleitung | 5 Steuerventil |
| 3 Einlassleitung | 6 druckbeaufschlagtes System |

Bild 2 — Sicherheitseinrichtung in einem druckbeaufschlagten System

5 Anwendungsbereich des Verfahrens

5.1 Allgemeines

Zur Bemessung der Sicherheitseinrichtung wird ein homogenes, Nichtgleichgewichts-Strömungsmodell für ein Einkomponentengas-/Einkomponentenflüssigkeitsgemisch verwendet. Der Durchfluss wird als quasi-gleichförmig angesehen. Es wird empfohlen, innerhalb des Anwendungsbereichs des Verfahrens zu bleiben, siehe 5.2 und 5.3.

5.2 Einschränkungen des Verfahrens zur Berechnung des Zweiphasen-Massenstroms in Sicherheitseinrichtungen

5.2.1 Ausdampfströmung

Das Verfahren ist geeignet für Dampf-/Flüssigkeits-Ausdampfsysteme, in denen entweder eine oder beide der folgenden Bedingungen zutreffen.

- a) Die Übertemperatur ist geringer als 90 % der kritischen thermodynamischen Temperatur des Fluids wie in Gleichung (1) dargestellt.

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

- b) Der Überdruck ist geringer als 50 % des kritischen thermodynamischen Drucks des Fluids wie in Gleichung (2) dargestellt.

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

Dabei ist:

T_{red} die dimensionslose reduzierte Temperatur;

p_{red} der dimensionslose reduzierte Druck;

T_{over} die Maximaltemperatur während der Druckentlastung, in K;

p_{over} der Maximaldruck während der Druckentlastung (maximaler angesammelter Druck oder geringer), in Pa;

T_c die kritische thermodynamische Temperatur des Fluids, in K;

p_c der kritische thermodynamische Druck des Fluids, in Pa.

Wenn sowohl der reduzierte Druck als auch die reduzierte Temperatur eines Dampf-/Flüssigkeits-Ausdampfsystems über den angegebenen Grenzen liegen, ändern sich die Eigenschaftsdaten in der Regel zu schnell, was zu nicht zulässigen Fehlern führen kann.

Die für dieses Bemessungsverfahren verwendeten Gleichungen zur Schätzung der Eigenschaften des Gas-/Flüssigkeitsstroms führen im Allgemeinen zu einer zu hohen Schätzung des erforderlichen engsten Strömungsquerschnitts, wenn Bedingungen über den Grenzen in Gleichung (1) und Gleichung (2) bis zum kritischen thermodynamischen Punkt berücksichtigt werden [2]. Weitere Bemerkungen in Bezug auf den Anwendungsbereich dieses Verfahren sind in 6.5.1 enthalten [36].

Die Einschränkungen des Modells aufgrund der linearen Approximation des Druckdichteverhältnisses werden in [26] angeführt.

5.2.2 Kondensierende Strömung

Aufgrund des Druckverlustes in der Sicherheitseinrichtung kann es auch bei Einphasen-Gasströmung am Eingang zur Kondensation kommen, was zu einer Zweiphasenströmung führt. Es sollte eine Zustandsgleichung für reale Gase verwendet werden und die Verdampfungsenthalpie berücksichtigt werden. Weitere Informationen sind in [36] angegeben.

5.2.3 Ausdampfströmung für Mehrkomponenten-Flüssigkeiten

Dieses Verfahren kann für Mehrkomponenten-Ausdampfsysteme verwendet werden, bei denen der Sättigungstemperaturbereich nicht über 100 K liegt, siehe Gleichung (3) für Gemische mit chemisch ähnlichen Flüssigkeiten:

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

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

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

5.2.4 Gelöste Gase

Das vorgeschlagene Verfahren kann nicht direkt in Fällen angewendet werden, in denen erhebliche Mengen an Gas im auszulassenden Fluid gelöst werden. Dies gilt typischerweise für Fälle, in denen ein hoher Druck von in Flüssigkeiten gelösten Gasen wie Stickstoff und Wasserstoff vorliegt.

Das Vorhandensein von gelösten Gasen kann die Eigenschaften des Gemischs sowie den Massenstrom durch die Sicherheitseinrichtung erheblich beeinträchtigen und muss daher berücksichtigt werden. Beispielsweise können sich die kritischen thermodynamischen Bedingungen des Gemischs stark von den kritischen thermodynamischen Bedingungen der reinen Komponenten in einem Gemisch unterscheiden. Dies führt zu einer Änderung der Sättigungsleitung. Andere Eigenschaften, wie beispielsweise die Verdampfungswärme, die Dichte des Flüssigkeitsgemischs (z. B. von Polymeren) oder die Viskosität des Flüssigkeitsgemischs können beeinträchtigt werden. Bereits kleine Mengen an gelöstem Gas, die aufgrund des Druckabfalls in einem nicht verdampfenden Flüssigkeitsstrom durch eine Sicherheitseinrichtung desorbiert werden, können den Massenstrom im Vergleich zu dem Massenstrom bei einem reinen Flüssigkeitsstrom erheblich reduzieren.

Wenn es erforderlich ist, die Desorption von Gasen zu berücksichtigen, weil sie die kritischen thermodynamischen Eigenschaften oder die Sättigungsleitung beeinflussen, besteht die Möglichkeit, die Konstruktionsgleichungen für gasproduzierende Systeme zu verwenden, wenn keine anderen zuverlässigen Informationen verfügbar sind. Die Zeitverzögerung (bis zum Erreichen eines Gleichgewichts) während der Desorption von Gasen sollte vernachlässigt werden. Bei einer konservativen Berechnung sollte die erforderliche Fläche der Sicherheitseinrichtung mit einer Massenstromqualität geschätzt werden, die zu dem Zweiphasengas-/Zweiphasenflüssigkeitsgemischs im Gleichgewicht bei dem geringsten Druck am engsten Strömungsquerschnitt (homogene Gleichgewichtsströmung zwischen dem Einlass der Sicherheitseinrichtung und dem engsten Querschnitt der Sicherheitseinrichtung) passt. Dies kann beispielsweise der kritische Druck an Fläche der Sicherheitseinrichtung sein. Da die Zeitverzögerung bei der Desorption vernachlässigt wird, wird die Massenstromqualität überschätzt und die Fläche der Sicherheitseinrichtung demnach zu groß bemessen.

5.2.5 Kompressibilitätskoeffizient ω

Das Verfahren ist genau, wenn der Kompressibilitätskoeffizient ω die folgende Beziehung erfüllt: $0 \leq \omega \leq 100$.

5.3 Einschränkungen des Verfahrens zur Berechnung des auszulassenden Massenstroms

5.3.1 Temperatur- und Druckanstiegsrate

Im Falle einer Kettenreaktion sollte die Reaktions-Eigenerwärmungsrate bei maximalem Druck, p_{over} , auf 2 K/s begrenzt werden, siehe Gleichung (4):

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

Dies wird durch das Verfahren für den auszulassenden Massenstrom für dampfdruckproduzierende Reaktionen in 6.4.4.2 begrenzt. Zudem ist die Druckanstiegsrate auf 20 kPa/s (12 bar/min) begrenzt, siehe Gleichung (5):

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

Wenn die Reaktions-Eigenerwärmungsrate und die Druckanstiegsrate deutlich höher als diese Werte sind, können nicht realisierbare Entlastungsgrößen die Folge sein.

Sicherheitsventile sollten nicht verwendet werden, wenn es bei der Ventilöffnungszeit zu einem übermäßigen Druckanstieg kommt. Typische Öffnungszeiten von federbelasteten Ventilen liegen zwischen 80 ms bis 120 ms. Die Druckanstiegsrate muss so niedrig sein, dass sich das Ventil vollständig öffnen kann, bevor p_{over} erreicht wird. Daher sollte die Druckanstiegsrate auf mindestens 10 % des absoluten Überdrucks über dem Ansprechdruck p_{open} des Sicherheitsventils innerhalb der Ventilöffnungszeit begrenzt werden. In den meisten Fällen führt das zu einem höheren Wert als dem empfohlenen Grenzwert von 20 kPa/s. Bei noch schnelleren Druckanstiegen kann die Verwendung von Berstscheiben angemessen sein.

5.3.2 Nicht mischbare Flüssigkeiten

Das Bemessungsverfahren ist unter Umständen nicht direkt anwendbar, wenn nicht mischbare Flüssigkeiten in dem System vorhanden sind, wie z. B. beim Entlasten eines Emulsionspolymerisationsreaktors. In diesem Fall hängt die in speziellen Laborversuchen entwickelte Reaktionskinetik vom spezifischen Agitationszustand ab, welcher im Allgemeinen nicht auf ein technisches Maß gebracht werden kann, siehe [22].

6 Bemessungsschritte

6.1 Allgemeine Beschreibung der Bemessungsschritte

Die Bemessung eines Abblasleitungssystems umfasst die folgenden grundlegenden Schritte (Bild 3):

Schritt 1: Identifikation des Bemessungsfalls, siehe 6.2.

Alle hinreichend denkbaren Abweichungen vom üblichen Anlagenbetrieb sind bei der Identifikation des Bemessungsfalls für das Ventil zu berücksichtigen. Es kann vom Gefahrenpotenzial und den lokalen behördlichen Anforderungen abhängen, ob es erforderlich ist, Fehlfunktionen als hinreichend möglich zu betrachten oder nicht. Der Bemessungsfall ist von höchster Wichtigkeit für die Dimensionierung eines Sicherheitsventils und häufig wichtiger, als die Art der Berechnung. Zwar geht eine detaillierte Beschreibung der Gefahrenanalyse über den Anwendungsbereich dieses Teils von ISO 4126 hinaus, jedoch ist eine Einführung in 6.2 enthalten.

Schritt 2: Strömungsregime am Einlass des Abblasleitungssystems, siehe 6.3.

Schritt 3: Berechnung des abzublasenden Massenstroms, siehe 6.4.

Schritt 4: Berechnung des abblasbaren Massenstroms und der Druckänderung im Abblasleitungssystem, siehe 6.5.

Schritt 5: Sicherstellung des ordnungsgemäßen Betriebs eines Sicherheitsventils im Abblasleitungssystem unter Anlagenbedingungen, siehe 6.6.

In den vorangegangenen Schritten wurde das Sicherheitsventil ohne Berücksichtigung jeglicher Einflüsse der angeschlossenen Einlass- und/oder Auslassleitung bemessen, was zu einer Verringerung der Kapazität oder Funktion des Sicherheitsventils führen kann. Ein Öffnen und Schließen mit geringer Frequenz (Pumpen) des Ventils oder ein hochfrequentiertes Flattern (Klappern) können auftreten. In letzterem Fall können das Ventil und/oder die Einlass- und Auslassleitung beschädigt werden.

Für die folgenden Bemessungsschritte stehen in 6.2 bis 6.6. Empfehlungen sowie ein Berechnungsverfahren für übliche Konstruktionspraktiken zur Verfügung.

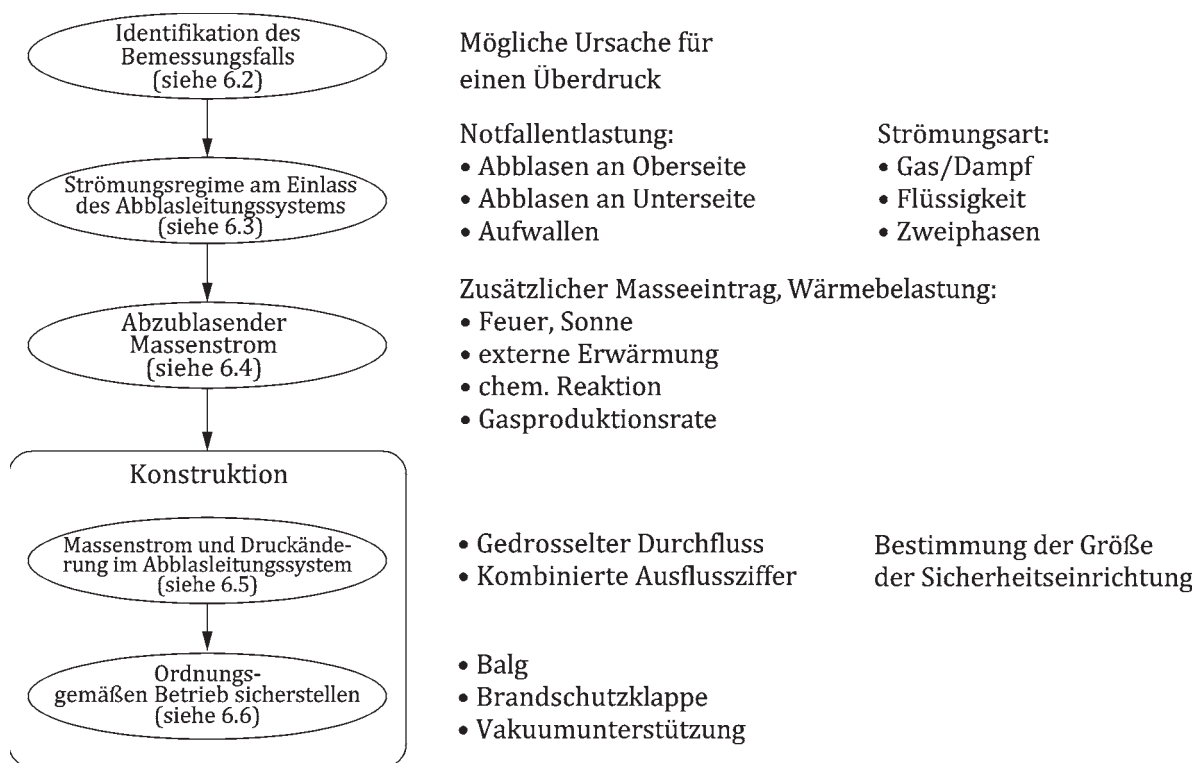


Bild 3 — Vorgehensweise bei der Bemessung von Sicherheitseinrichtungen

6.2 Schritt 1 — Identifikation des Bemessungsfalls

Der Bemessungsfall ist von höchster Wichtigkeit für die Dimensionierung einer Sicherheitseinrichtung und häufig wichtiger, als die Art der Berechnung.

Hinreichend denkbare Abweichungen vom üblichen Anlagenbetrieb sollten in Bezug zu ihrem potenziellen Gefahrenrisiko und der lokalen behördlichen Anforderungen anhand von Prozessgefahrenbewertungen und Sicherheitsbeurteilungen (PHASE) identifiziert und beurteilt werden [3]. Mehrere bewährte Verfahren, wie zum Beispiel

- HAZOP (Gefahren- und Betriebsfähigkeitsstudie) [4];
- PHA (vorläufige Risikobewertung) [5];
- LOPA (Analyse der Schutzebenen oder
- Wenn-Analysen,

oder quantitativere Verfahren, wie

- eine Fehlerstrukturanalyse [6] sowie
- Ereignisstrukturanalysen [7]

werden in der Praxis eingesetzt. Diese Verfahren werden häufig durch Checklisten [8] mit mehreren Detailebenen ergänzt. Diese Verfahren dienen alle als Mittel zur Bewertung der Ursachen für einen Druckanstieg. Diese Ursachen können in Verbindung mit Massen- und Energieübertragung an das oder von dem druckbeaufschlagten System oder in Verbindung mit einer Abweichung von dem üblichen Reaktionssystem stehen, z. B., wenn eine thermische Kettenreaktion auftritt.

In Tabelle A.1 werden die häufigsten Ursachen für einen Druckanstieg zusammengefasst. Einige dieser Ursachen können gleichzeitig oder direkt nacheinander auftreten, weshalb es erforderlich sein kann, eine oder mehrere unabhängige Prozessabweichungen als mögliche Bemessungsfälle für das Ventil oder die Berstscheibe zu berücksichtigen. Die tatsächliche Beschreibung der möglichen Bemessungsfälle hängt vom Risiko- und Verlustpotenzial ab, das aufgrund der Abweichungen vom üblichen Anlagenbetrieb auftreten kann. Die Abweichungen sollten jedoch nicht zu konservativ quantifiziert werden. Ansonsten ist die Ventilsitzfläche oder die Berstscheibe überdimensioniert. Dies kann zu unnötig großen Durchflussraten, Überlastungen der nachgeschalteten Prozessausrüstung und unter Umständen zu zusätzlichen Umweltrisiken führen.

Zusätzliche Angaben sind ISO 23251 zu entnehmen.

6.3 Schritt 2 — Strömungsregime am Einlass des Abblasleitungssystems

6.3.1 Allgemeines

Zur Bemessung ist es enorm wichtig, zu wissen, ob am Einlass der Abblasleitung eine Zweiphasen-Strömung auftritt. Dementsprechend werden Kriterien bereitgestellt, mit denen das Auftreten einer Zweiphasen-Strömung erkannt werden kann.

6.3.2 Phänomen des Aufwallens

Sicherheitseinrichtungen sind häufig an der Oberseite (Gasseite) eines Behälters angebracht. Es ist beispielsweise ein System zu berücksichtigen, das während des Abblasens (dampfdruckproduzierendes System) Dampf erzeugt: Der Druck fällt umgehend, wenn sich die Einrichtung öffnet, da Dampf aus dem Freiboard-Behältervolumen freigesetzt wird. Eine anfangs unterkühlte oder gesättigte Flüssigkeit überhitzt, d. h., die Temperatur bleibt über der Sättigungstemperatur, die dem Ist-Druck entspricht. Wenn die Dampferzeugungsrate die Dampfauflösungsrate die Schnittstelle übersteigt, beginnt nach einer Siedeverzugszeit (typischerweise 0,1 s bis 1,0 s) eine Massenverdampfung der Flüssigkeit, wodurch der Flüssigkeitsstand überschwillt. Wenn das Gemisch den Ventileintritt erreicht, ändert sich das Strömungsregime von Einphasengas zu einer Zweiphasen-Strömung.

Ein Aufwallen tritt hauptsächlich durch eine begrenzte Blasenauftiegs geschwindigkeit auf; die charakteristische Anstiegsgeschwindigkeit von Gas/Dampf in der Flüssigkeit wird als u_{∞} bezeichnet. Dieses Phänomen tritt besonders häufig bei hochgradig viskosen Flüssigkeiten und Schaumsystemen auf. Behälter mit diesen Inhalten werden daher bei einem Abblasen in Notfallsituationen fast vollständig entleert. Bei schäumenden und hochgradig viskosen Fluiden gilt dies selbst bei anfänglichen Flüssigkeitsständen auf 15 % [9].

In gasdesorbierenden oder gaserzeugenden Systemen treten entsprechende Phänomene, d. h. Desorptionsverzug, Aufwallen usw., ebenso auf.

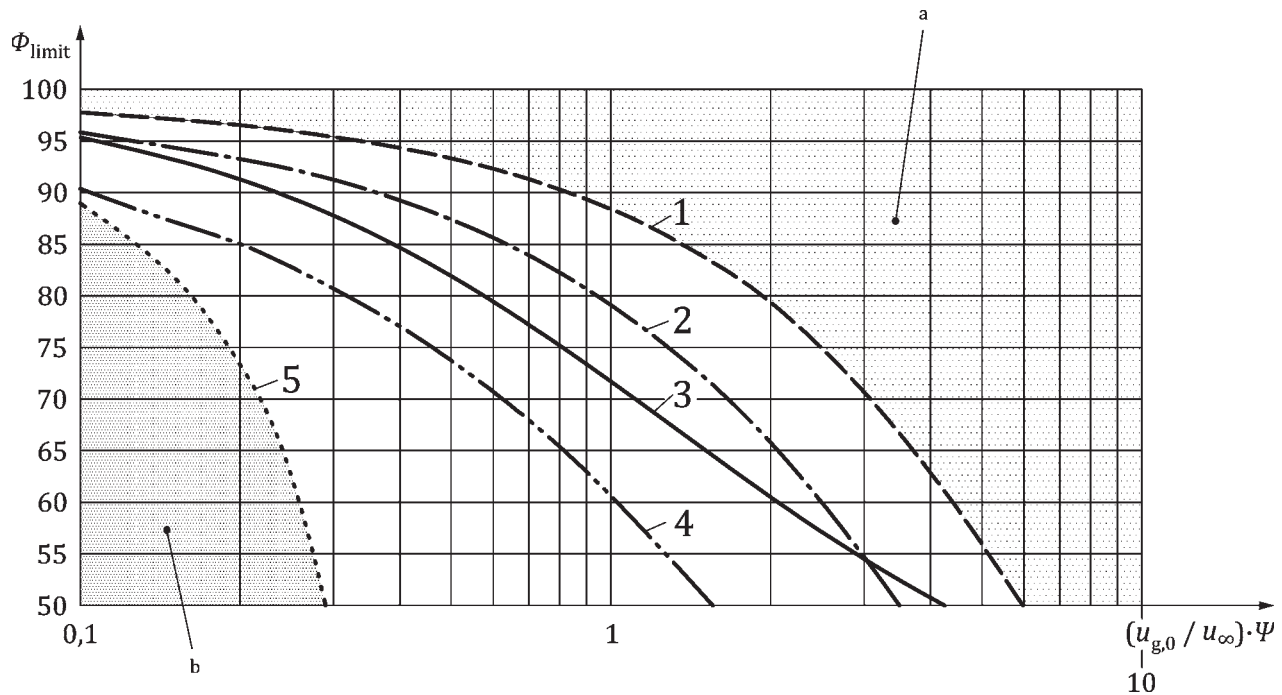
In extern erwärmten Behältern (z. B. nicht reagierenden, nicht wärmeerzeugenden Systemen) bilden sich die Dampfbläschen an der Behälterwand und nicht in der Flüssigkeitsmasse. Dies kann zu einem geringeren Grad an Aufwallen führen, mit dem möglichen Resultat einer Einphasen-Strömungsentlastung, die bei geringeren anfänglichen Flüssigkeitsständen auftritt [37].

6.3.3 Einfluss der Flüssigkeitsviskosität und des Schäumverhaltens auf das Strömungsregime

Zur Unterscheidung zwischen Einphasen- und Zweiphasen-Strömung wird der anfängliche Flüssigkeitsstand, die Gas- oder Dampferzeugungsrate, die Viskosität der Flüssigkeit und das Schäumverhalten verwendet. Die Viskosität der Flüssigkeit ist bei den Bedingungen zu berücksichtigen, bei denen p_{MAA} im druckbeaufschlagten System erreicht wird. Im Falle von hochgradig viskosen Flüssigkeiten ($\Omega_{l,0} > 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), wird empfohlen, von einem homogenen Abblasen des druckbeaufschlagten Systems auszugehen, siehe Bild 4. Bei homogenem Abblasen des druckbeaufschlagten Systems ist die Leerraumfraktion des Abwassers gleich der mittleren Leerraumfraktion im Behälter. Daher muss am Einlass der Sicherheitseinrichtung eine Zweiphasen-Strömung berücksichtigt werden.

Die Vorhersage des Strömungsregimes am Einlass der Sicherheitseinrichtung ist dann im Falle eines *nicht homogenen* Behältermodells erforderlich. In diesem Fall sollte Bild 4 verwendet werden, um festzustellen, ob am Einlass der Sicherheitsvorrichtung bei Bemessungsbedingungen eine Einphasen- oder Zweiphasen-Strömung vorhanden ist.

Falls das Schäumverhalten der Flüssigkeit aus der allgemeinen Praxis nicht bekannt ist, sind Versuche erforderlich, um diese Eigenschaft bei den Bemessungsbedingungen der Sicherheitseinrichtung zu ermitteln, da es schwierig ist, das Schäumverhalten nur auf Basis von physikalischen Eigenschaften vorherzusagen.



Legende

- 1 externe Wärmebelastung durch Feuerbelastung, $H/D = 1$
- 2 externe Wärmebelastung durch Feuerbelastung, $H/D = 2$
- 3 nicht schäumend und niedrige Viskosität ($\Omega_{l,0} \leq 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) (aufschäumende Strömung, $k_{\infty} = 1,53$)
- 4 externe Wärmebelastung durch Feuerbelastung, $H/D = 5$
- 5 schäumend oder viskos, $\Omega_{l,0} > 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Bläschenströmung, $k_{\infty} = 1,18$)
- a Zweiphasen-Strömung.
- b Gas/Dampf.

Bild 4 — Strömungsregime am Einlass der Sicherheitseinrichtung (Einphasen- oder Zweiphasen-Strömung) [23] — Kritische Füllgrenze, ϕ_{limit} , als Funktion der dimensionslosen Blasenauftiegs geschwindigkeit

Die dimensionslose Blasenauftiegs geschwindigkeit wird nach Gleichung (6) berechnet:

$$u^* = \frac{u_{g,0}}{u_{\infty}} \cdot \psi \quad (6)$$

Dabei ist:

$$u_{g,0} = Q_{m,g,out} \cdot \frac{v_{g,0}}{A_R} \quad (7)$$

$$u_{\infty} = k_{\infty} \frac{[\sigma_{l,0} \cdot g(\rho_{l,0} - \rho_{g,0})]^{1/4}}{\sqrt{\rho_{l,0}}} \quad (8)$$

Wird eine innere Wärmefreisetzung oder ein Massenwärmeeintrag berücksichtigt, z. B. durch eine chemische Reaktion, ist das Siedeflächenverhältnis Ψ per Definition 1, $\Psi = 1$.

Im Falle einer externen Beheizung des Behälters, z. B. durch Dampf, ist eine konservative Schätzung für das Siedeflächenverhältnis $\Psi = 1$.

Für einen externen Wärmeeintrag durch Feuerbelastung neben dem Behälter, aber keine Unterfeuerung des Behälters, können Gleichung (15) und Gleichung (16) angewendet werden, um das Aufwallen zu bestimmen. Dabei muss A_{fire} als teilweise Oberfläche (benetzte Fläche der Haube) eines senkrecht zylindrischen Behälters mit den Höhen zwischen Behälterboden und Fundament (Boden) H_{vessel} und einer maximalen Höhe des Brandes $H_{\text{fire}} \leq 7,5$ m bestimmt werden.

$$\psi = \frac{A_R}{A_{\text{fire}}} = \frac{1}{4 \cdot \left(\frac{H_{\text{fire}} - H_{\text{vessel}}}{D_R} \right)} \quad (9)$$

6.3.4 Schätzung des Strömungsregimes (Gas-/Dampf- oder Zweiphasen-Strömung)

6.3.4.1 Allgemeines

Wenn ϕ_0 den Grenzwert ϕ_{limit} überschreitet, wird bei einer oben montierten Sicherheitseinrichtung höchstwahrscheinlich ein Zweiphasen-Gemisch für einen Teil der Abblaszeit abgeblasen. Wenn ϕ_{limit} nicht überschritten wird, kann die Auslegung auf einer Einphasen-Strömung basieren. ϕ_{limit} ist mit $u_{g,0}$ und u_{∞} korreliert (siehe Bild 4), was für eine Vielzahl von (nicht schäumenden) Flüssigkeiten verifiziert wurde [9] [10].

Abhängig von der Art der Wärmeerzeugung bzw. -belastung werden zwei Berechnungsverfahren für die Bestimmung des Strömungsregimes am Einlass des Abblasleitungssystems unterschieden:

- a) Bildung von homogen verteilten Bläschen in der Flüssigkeit, z. B. im Falle einer thermischen Kettenreaktion, siehe 6.3.4.2;
- b) Bildung von Bläschen an der Innenwand des Behälters des druckbeaufschlagten Systems, z. B. im Falle von Feuer oder externer Wärme, siehe 6.3.4.3.

6.3.4.2 Empfohlenes Berechnungsverfahren im Falle einer Erzeugung von homogen verteilten Bläschen (z. B. thermische Kettenreaktion)

Zur Unterscheidung zwischen Einphasen- und Zweiphasen-Strömung wird das folgende Verfahren empfohlen.

- a) Es ist davon auszugehen, dass das Strömungsregime am Einlass der Abblasleitung eine Einphasen-Gas-/Einphasen-Dampfströmung ist.
- b) $Q_{\text{m,out}}$ wird entsprechend dem Flüssigkeitsreaktionssystem wie folgt bestimmt:

- 1) Bei einem dampfproduzierenden System wird $Q_{\text{m,out}}$ durch Gleichung (10) ermittelt:

$$Q_{\text{m,out}} = \frac{\dot{Q}}{\Delta h_{v,0}} \cdot \frac{1}{\dot{Q}_{\text{in}}^*} \quad (10)$$

Dabei wird $\dot{Q}_{\text{in}}^*$ iterativ anhand von Gleichung (11) berechnet:

$$0 = \dot{Q}_{\text{acc}} - \dot{Q}_{\text{in}}^* + v^* \left(1 - \ln \left[\frac{v^*}{\dot{Q}_{\text{in}}^*} \right] \right) \quad (11)$$

Dabei ist:

$Q_{m,out}$ der Massenstrom, der aus einem druckbeaufschlagten System abgeblasen werden muss

$\dot{Q}$ die Wärmebelastung im druckbeaufschlagten System aufgrund einer Kettenreaktion; siehe Gleichungen (36); ausgedrückt in W;

$\dot{Q}_{in}^*$ das Verhältnis von gesamter Wärmebelastung zu dem durch Verdampfung entfernten Energiestrom;

$\dot{Q}_{acc}^*$ das Verhältnis von fühlbarer Wärme zu latenter Wärme; siehe Gleichung (71);

v^* das dimensionslose spezifische Volumen; siehe Gleichung (69), (70) oder (68);

$\Delta h_{v,0}$ die latente Verdampfungswärme unter Bemessungsbedingung; in J/kg.

2) Bei einem gasproduzierenden System ist $Q_{m,out}$ in Gleichung (12) angegeben:

$$Q_{m,out} = \Gamma_{Gas,0} \cdot M_0 \quad (12)$$

Dabei ist:

$\Gamma_{Gas,0}$ die Gaserzeugungsrate je Flüssigkeitsmasse, d. h. Gasmassenstrom an Flüssigkeitsmassenbestand im druckbeaufschlagten System bei Bemessungsbedingungen, in kg/(s kg);

M_0 die gesamte Flüssigkeitsmasse im druckbeaufschlagten System, in kg.

Im Falle von reaktiven Systemen ist Γ_0 durch Versuche zu bestimmen. Beispielsweise ist der Druckanstieg während einer Kettenreaktion in einem adiabatischen Reaktionskalorimeter ein Maß von Γ . Γ muss der maximalen unter adiabatischen Bedingungen erwarteten Rate entsprechen, vorausgesetzt, das System ist nicht dampfdruckproduzierend und die Temperatur steigt während dem Abblasen.

3) Bei hybriden Systemen (Gas- und Dampferzeugung) wird $Q_{m,out}$ in Gleichung (13) angegeben:

$$Q_{m,out} = \frac{\dot{Q}}{\Delta h_{v,0}} + \Gamma_{Gas,0} \cdot M_0 \quad (13)$$

Dabei ist:

$\dot{Q}$ die Wärmebelastung im druckbeaufschlagten System aufgrund einer Kettenreaktion, in W; siehe Gleichungen (36);

$\Gamma_{Gas,0}$ die Gaserzeugungsrate je Flüssigkeitsmasse, d. h. Gasmassenstrom an Flüssigkeitsmassenbestand im druckbeaufschlagten System bei Bemessungsbedingungen, in kg/(s kg);

M_0 die gesamte Flüssigkeitsmasse im druckbeaufschlagten System, in kg.

Obwohl das System aufgrund der verdampfenden Flüssigkeit Dampfdruck erzeugt, sollte p_0 so eingestellt werden, dass er p_{MAA} entspricht, d. h. $\dot{Q}_{in}^* = 1$.

- c) Unter Verwendung von Bild 4 ist ϕ_{limit} aus $u_{g,0}$ und u_{∞} zu bestimmen. Im Falle einer nicht schäumenden Flüssigkeit mit geringer Viskosität ($\Omega_{l,0} \leq 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) gilt die Kurve der durchgezogenen Linie mit $k_{\infty} = 1,53$. Bei einem viskosen Flüssigkeitssystem ($\Omega_{l,0} > 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) und für ein schäumendes System gilt die gepunktete Linie mit $k_{\infty} = 1,18$. Diese Werte gelten für vertikale Behälter mit einem Höhe-Durchmesser-Verhältnis von etwa 2 : 1 bis 3 : 1. Höhere Höhe-Durchmesser-Verhältnisse, horizontale oder sphärische Behälter müssen gesondert berücksichtigt werden [10].
- d) Vergleiche ϕ_0 mit ϕ_{limit}
- 1) Wenn $\phi_0 \geq \phi_{\text{limit}}$ ist von einer Zweiphasen-Strömung auszugehen.
 - 2) Wenn $\phi_0 < \phi_{\text{limit}}$ ist von einer Einphasen-Strömung auszugehen.

Dies gilt nur für eine Sicherheitseinrichtung mit einer Abblasleistung $Q_{m,SD}$ von weniger als oder gleich $Q_{m,g,out}$. In der Praxis wird häufig eine Sicherheitseinrichtung mit einer Nenngroße von mehr als der erforderlichen Größe aus der Standardauswahl eines Herstellers gewählt. Wenn die Einrichtung größer als erforderlich ist, kommt es zu einem höheren Ergebnis von $u_{g,0}$, was zu einem niedrigeren Wert von ϕ_{limit} führt; siehe Bild 4. Als Konsequenz kann dies zu einer Zweiphasen-Strömung führen. A_0 , die ursprünglich für eine Einphasen-Gasströmung bemessen wurde, kann dadurch zu klein sein, wodurch unter Umständen eine Neubeurteilung erforderlich ist.

In diesem Fall sollte $Q_{m,out}$ entsprechend $Q_{m,SD}$ eingestellt werden, siehe Gleichung (14):

$$Q_{m,SD} = \dot{m}_{SD,g} \cdot A_0 \quad (14)$$

Dabei ist:

$\dot{m}_{SD,g}$ der durch die Sicherheitseinrichtung abblasbarer Massenstrom, in $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;

A_0 der engste Strömungsquerschnitt der Sicherheitseinrichtung, in m^2 .

$\dot{m}_{SD,g}$ sollte anhand der Gleichung (49) für Gas-/Dampfströmung berechnet werden. Unter Verwendung des neuen Wertes $Q_{m,SD}$ sind die Schritte a) bis d) zu wiederholen, bis die neu beurteilten geschätzten Strömungsregimes einander entsprechen. Wenn als Strömungsregime am Einlass der Einrichtung eine Zweiphasen-Strömung identifiziert wird, ist keine Iteration erforderlich.

Wie in Bild 4 gezeigt, liegt ϕ_{limit} für hochgradig viskose oder schäumende Flüssigkeiten in der Regel unter 10 %. Dies führt häufig zur Annahme einer Zweiphasen-Strömung.

6.3.4.3 Empfohlenes Berechnungsverfahren im Falle einer externen Erwärmung durch Feuerbelastung auf einen Behälter, der eine nicht schäumende Flüssigkeit mit niedriger Viskosität enthält

Wenn Sieden aufgrund einer externen Erwärmung des Inhalts des druckbeaufschlagten Systems auftritt und das Fluid nicht schäumend ist, können sich Bläschen hauptsächlich an den Wänden anstelle in der Masse der Flüssigkeit bilden. Vorausgesetzt es sind innerhalb der Ausrüstung keine Drosselscheiben vorhanden, bilden sich im Behälter Rezirkulationsmuster und eine Zweiphasen-Strömung ist unwahrscheinlicher als im Falle einer homogen verteilten Bläschenbildung, was in 6.3.4.2 erläutert wird [11]. Diese empirischen Gleichungen sind nur für vertikale zylindrische Behälter ohne Feuerwärmeübertragung an die Unterseite des Behälters gültig.

Zur Feuerbelastung wird die Gleichung (15) und die Gleichung (16) bereitgestellt [12]:

$$\phi_{\text{limit}} = 1 - \left[2,2794 \cdot 10^{-4} \cdot \dot{q}_{\text{fire}}^{0,667} (0,089 + 1,00031 \cdot 10^{-7} \cdot \dot{q}_{\text{fire}}) \cdot \left(\frac{H_1}{D} \right) \right] \quad (15)$$

$$\dot{q}_{\text{fire}} = \frac{3,218 \cdot 10^5}{(\rho_{g,0} \cdot \Delta h_{v,0} \cdot u_{\infty})} \frac{\dot{Q}}{A_{\text{fire}}} \quad (16)$$

Dabei ist:

- $\dot{q}_{\text{fire}}$ der dimensionslose Feuerbelastungsstrom in nicht viskosen und wenig schäumenden Fluiden aufgrund einer über die Fläche A_{fire} verteilten Feuerbelastung in einen vertikalen zylindrischen Behälter ohne Feuerwärmeübertragung an die Unterseite des Behälters unter Bemessungsbedingungen;
- A_{fire} die teilweise Oberfläche eines vertikalen zylindrischen Behälters, die mit Flüssigkeit bedeckt ist und sich innerhalb von 7.5 m vertikal vom Gitter oder einer beliebigen Fläche befindet, auf der ein Lachenbrand aufrechterhalten werden kann und die nur die Wand und nicht der Unterseite des Behälters umfasst, in m²;
- u_{∞} die charakteristische Aufstiegs geschwindigkeit des Gases/Dampfes in der Flüssigkeit. Der Wert dieser Variable wird anhand der Gleichung (8) (siehe Bild 4) unter Verwendung des Wertes $k_{\infty} = 1,53$; berechnet;
- $\rho_{g,0}$ die Gasphasendichte im druckbeaufschlagten System unter Bemessungsbedingungen, in kg/m³;
- $\Delta h_{v,0}$ die latente Verdampfungswärme unter Bemessungsbedingung; in J/kg;
- $\dot{Q}$ die Wärmebelastung im druckbeaufschlagten System (in diesem Fall in einem vertikalen zylindrischen Behälter) durch Feuer, in W; siehe Gleichung (26);
- H_1 die Höhe des Flüssigkeitsstands in einem vertikalen zylindrischen Behälter, ausgedrückt in m;
- D der Innendurchmesser des Behälters im Freibord-Gasvolumen eines vertikalen zylindrischen Behälters, in m;
- ϕ_{limit} die kritische Füllgrenze für die Feuerbelastung.

Wenn $\phi_0 \geq \phi_{\text{limit}}$ ist von einer Zweiphasen-Strömung auszugehen.

Sie lassen zudem jegliche Zweiphasen-Strömung aufgrund von Tropfenmitriss anstatt aufgrund von Aufwallen außer Acht. Dies ist nur für Drucktanks mit niedriger Bauweise wichtig (drucklose Behälter). Ein Verfahren, um zu bestimmen, ob eine Zweiphasen-Strömung aufgrund von Tropfenmitriss in Drucktanks mit niedriger Bauweise zu berücksichtigen ist, wird in [12] angegeben.

6.4 Schritt 3 — Berechnung des abzublasenden Massenstroms

6.4.1 Allgemeines

In 6.4.2 bis 6.4.4 sind Gleichungen für die Schätzung des erforderlichen Massenstroms angegeben, mit denen sichergestellt wird, dass der Behälterdruck unter p_{MAA} bleibt. Die zu verwendenden Gleichungen hängen von der Art der Prozessabweichung ab, die zum Druckanstieg führt. Es ist nicht möglich, alle möglichen Abweichungen in diesem Teil von ISO 4126 zu behandeln. Aus diesem Grund werden nur einige typischerweise in der Industrie auftretenden Abweichungen anhand von Beispielen erläutert.

Ein Druckanstieg kann entstehen durch:

- a) übermäßige Einströmung in die zu schützende Anlage (z. B. Fehlfunktion des Zuleitungs-Steuerventils); siehe 6.4.2;
- b) erhöhte Wärmebelastung aufgrund einer Feuerbelastung oder externen Erwärmung; siehe 6.4.3.;
- c) Kettenreaktion, siehe 6.4.4.

6.4.2 Druckanstieg aufgrund eines übermäßigen Zustroms

Eine typische Ursache für einen übermäßigen Zustrom kann eine Fehlfunktion des Steuerventils in einer Zuleitung sein. In diesem Fall kann bei einer hohen Druckdifferenz Ausdampfung im druckbeaufschlagten System auftreten, wobei es erforderlich ist, eine Zweiphasen-Mischung abzublasen, um einen übermäßigen Druckanstieg zu verhindern.

Solange es sich bei dem einströmenden Fluid um reine Flüssigkeit handelt und es nicht zum Sieden der sich bereits im druckbeaufschlagten System befindlichen Flüssigkeit kommt, kann $Q_{m,out}$ anhand einer einfachen Massenbalancegleichung bestimmt werden, wobei ein Abstrom aus dem geschützten System über andere Kanäle, die nicht von der Fehlfunktion des Zuleitungs-Steuerventils betroffen sind, berücksichtigt werden muss, damit $Q_{m,out}$ Gleichung (17) entspricht (siehe auch Richtlinien in Tabelle A.1):

$$Q_{m,out} = \sum Q_{m,feed} \quad (17)$$

$Q_{m,feed}$ kann mithilfe von K_{vs} berechnet werden. Bei einem nicht verdampfenden Flüssigkeitsstrom durch das Steuerventil sollte dies anhand Gleichung (18) berechnet werden:

$$A_{feed} \cong \frac{K_{vs}}{3\,600} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{H_2O}}{2 \cdot \Delta p_{H_2O}}} = K_{vs} \cdot C_1 \quad (18)$$

Dabei ist:

$$C_1 = 1,964 \cdot 10^{-5} \quad (19)$$

C_1 eine Konstante einschließlich der Umrechnung von typischen Einheiten von K_{vs} in SI-Einheiten, in $\frac{h}{m}$;

A_{feed} der engste effektive Strömungsquerschnitt, m^2 , der Zuleitung oder des Steuerventils;

K_{vs} der Flüssigkeitsausflussfaktor für ein vollständig geöffnetes Steuerventil in der Zuleitung, in m^3/h , wie von Ventilhersteller für gewöhnlich angegeben;

ρ_{H2O} die Wasserdichte bei der Temperatur während des Versuchs zum Messen des Wertes K_{VS} , d. h. bei einer Temperatur von 5 °C bis 50 °C, was etwa 1 000 kg/m³ entspricht;

Δp_{H2O} der Druckverlust in einem Steuerventil während Versuchen zur Messung des Wertes K_{VS} definiert bei einer Druckdifferenz von 10⁵ Pa.

K_{VS} entspricht dem Wasservolumen-Massenstrom für Δp_{H2O} von 10⁵ Pa bei einer Temperatur von 5 °C bis 50 °C; siehe IEC 60534-2-1.

$Q_{m,feed}$ für einen nicht ausdampfenden Flüssigkeitsstrom kann dann anhand Gleichung (20) berechnet werden:

$$Q_{m,feed} = A_{feed} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{l,0} \cdot (p_{CV} - [p_0 + \Delta p_{feed}])} \quad (20)$$

Durch den Austausch von Gleichung (18) durch Gleichung (20) kann $Q_{m,feed}$, wie in Gleichung (21) ermittelt werden:

$$Q_{m,feed} = K_{VS} \cdot C_2 \cdot \sqrt{\rho_{l,0} \cdot (p_{CV} - [p_0 + \Delta p_{feed}])} \quad (21)$$

Dabei ist:

$$C_2 = 2,778 \cdot 10^{-5} \quad (22)$$

C_2 eine Konstante einschließlich der Umrechnung von typischen Einheiten von K_{VS} in SI-Einheiten, in $\frac{h}{m}$;

$\rho_{l,0}$ die Flüssigkeitsphasendichte im druckbeaufschlagten System unter Bemessungsbedingungen, in kg/m³;

p_{CV} der dem Steuerventil in der Zuleitung vorgelagerte Druck, in Pa;

p_0 der Bemessungsdruck der zu schützenden Anlage, in Pa;

Δp_{feed} der Druckverlust zwischen dem Austritt des Steuerventils in der Zuleitung und dem druckbeaufschlagten System, in Pa.

p_{CV} kann entweder der maximale Betriebsdruck vor dem Steuerventil oder p_{MAW} im vorgelagerten druckbeaufschlagten System sein. Der verwendete Druck sollte in den Spezifikationen des Bemessungsfalls in Übereinstimmung mit 6.2 definiert worden sein.

Die Gleichungen (18) bis (22) sind nur für reine Flüssigkeitsströme durch das Steuerventil gültig. Falls von einer Ausdampfung im Steuerventil auszugehen ist, wird das in [33] angegebene Verfahren empfohlen.

ANMERKUNG Die effektive Fläche kann bei kompressiblen Fluiden von der nach Gleichung (18) geschätzten abweichen, da die Strömungskontraktion im Steuerventil im Allgemeinen geringer ist und somit $Q_{m,feed}$ größer werden kann. Am konservativsten ist es, den geometrisch kleinsten Strömungsquerschnitt im Steuerventil zu betrachten und dabei bewegliche Strömungsbegrenzungen und Strömungskontraktionen zu vernachlässigen.

6.4.3 Druckanstieg aufgrund externer Erwärmung

6.4.3.1 Allgemeines

Zu einer externen Erwärmung, die zu einer Zweiphasen-Strömung führt, zählt Wärmebelastung aufgrund einer Übertragung von Prozesswärme, Feuerbelastung oder Sonnenstrahlung usw. Der Druck kann sich aufgrund von Verdampfung, Desorption oder Expansion einer nicht eingeschlossenen Flüssigkeit (z. B. Flüssiggas) erhöhen.

Der Feuerfall ist einer der primären Gestaltungsfälle für Installationen in der Raffinerieindustrie sowie für Anlagen zur Lagerung/zum Transport von Flüssiggasen an Land oder auf See. Einzelheiten sind in den Codes [13] [14] [15] und [41] zu finden. Der Schlüsselparameter für die Bemessung von Sicherheitseinrichtungen ist der Wärmestrom. Abhängig vom Anwendungsgebiet wird dieser Wärmestrom modifiziert, was zu unterschiedlichen Größen von Sicherheitseinrichtungen führt. In 6.4.3.2 wird beispielhaft das von der API empfohlene Verfahren angewendet.

6.4.3.2 Massenstrom, der aus einem druckbeaufschlagten System ausgeblasen werden muss

Die Gleichungen zur Berechnung von $Q_{m,feed}$ sind in Tabelle 3 enthalten und basieren auf unterschiedlichen Wärmebelastungsmechanismen und Fluidzusammensetzungen, d. h. Zweiphasen-Strömung und Einzelphasen-Gas-/Einzelphasen-Dampf- bzw. Einzelphasen-Flüssigkeitsströmung.

$Q_{m,out}$ ist anhand von Gleichung (23) im Falle von Dampf-/Flüssigkeits-Zweiphasen-Strömung und externer Erwärmung zu berechnen:

$$Q_{m,out} = \frac{\dot{Q}}{\Delta h_{v,0}} \cdot \frac{1}{\dot{Q}_{in}^*} \quad (23)$$

Dabei wird $\dot{Q}_{in}^*$ iterativ anhand von Gleichung (24) berechnet:

$$\frac{1}{\dot{Q}_{in}^*} (v^* - \dot{Q}_{in}^* - \dot{Q}_{acc}^*) - \ln \left(\frac{v^*}{\dot{Q}_{in}^*} \right) = 0 \quad (24)$$

Dabei ist:

$\Delta h_{v,0}$ die latente Verdampfungswärme unter Bemessungsbedingung; in J/kg;

$\dot{Q}_{in}^*$ das Verhältnis von gesamter Wärmebelastung zu dem durch Verdampfung entfernten Energiestrom;

$\dot{Q}_{acc}^*$ das Verhältnis von fühlbarer Wärme zu latenter Wärme; siehe Gleichung (71);

v^* das dimensionslose spezifische Volumen des homogenen Zweiphasen-Gemischs unter Bemessungsbedingungen im druckbeaufschlagten System; siehe Gleichung (69), Gleichung (70) oder Gleichung (68);

$\dot{Q}$ die auf das druckbeaufschlagte System wirkende Wärmebelastung; siehe Gleichung (25) oder Gleichung (26).

Für Fälle mit $\dot{Q}_{acc}^*$, d. h. Fälle mit $p_0 = p_{over}$, d. h. $\Delta T_{over} = 0$, und Gleichung (24) führt zur Reduzierung auf $\dot{Q}_{in}^* = v^*$.

Abhängig von der Art der Wärmeübertragung, wird $\dot{Q}$ folgendermaßen berechnet:

- a) Im Falle von einer Übertragung von Prozesswärme wird $\dot{Q}$ anhand von Gleichung (25) berechnet:

$$\dot{Q} = B_{\text{heat}} \cdot A_{\text{heat}} \cdot (T_{\text{heat}} - T_{\text{sat}}(p_{\text{over}})) \quad (25)$$

Dabei ist:

B_{heat} die gesamte Wärmeübertragungsziffer (ohne Verschmutzung in der Anlage), in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, für den berücksichtigten Bemessungsfall;

A_{heat} die Wärmeaustauschfläche im druckbeaufschlagten System im Falle einer externen Wärmebelastung, in m^2 ;

T_{heat} die maximal mögliche Temperatur der Wärmequelle, ausgedrückt in K;

T_{sat} die Sättigungstemperatur, berechnet bei p_{over} (dem maximalen Druck während der Druckentlastung, ausgedrückt in Pascal) anstelle von p_0 (dem Bemessungsdruck, in Pa); berücksichtigt wird zudem Δp_{MAA} , siehe Bild 1.

- b) Im Falle einer Feuerbelastung wird $\dot{Q}$ anhand von Gleichung (26) berechnet, siehe ISO 23251:2019, 5.15:

$$\dot{Q} = 43\,200 \cdot F \cdot A_{\text{fire}}^{0,82} \text{ für Lachenbrände} \quad (26)$$

$$\dot{Q} = 43\,200 \cdot F \cdot A_{\text{fire}} \text{ für eingegrenzte Brände} \quad (27)$$

Dabei ist:

F der Umweltfaktor für die Wärmebelastung durch Feuer;

A_{fire} die gesamte Oberfläche, die mit interner Flüssigkeit bedeckt ist und sich innerhalb von 7,5 m vertikal vom Boden oder einer beliebigen Fläche befindet, auf der ein Lachendbrand aufrechterhalten werden kann, in m^2 .

Der Faktor 43 200 basiert auf Versuchen [14] und der Annahme, dass umgehend Brandbekämpfungs- und Löschnmaßnahmen eingeleitet werden. Sollten diese Bedingungen nicht zutreffen, ist ein Faktor von 70 900 zu verwenden. F ist in Tabelle 3 für isolierte und nicht isolierte druckbeaufschlagte Systeme aufgeführt. Der Wert von A_{fire} , der nur die Haube und nicht die Unterseite des Behälters umfasst, wird hoch 0,82 genommen, um die Tatsache zu berücksichtigen, dass große Anlagen nicht vollkommen von einem Feuer eingeschlossen werden können.

Wie in 6.3.4.3 beschrieben, ist das Auftreten einer Zweiphasen-Strömung unwahrscheinlicher im Falle von externer Erwärmung im Vergleich zur Erzeugung von homogen verteilten Bläschen. Wenn für den Feuerfall Richtlinien wie die von ISO 23251 oder CGA S-1 [15] angewendet werden, wird $\dot{Q}$ in den meisten Fällen in der Praxis überschätzt.

Kann ein Feuer als Quelle des Energieeintrags in das druckbeaufschlagte System nicht ausgeschlossen werden, wobei weitere Energiequellen wie chemische Reaktion oder Wärmebelastung vorhanden sind, sollte die Gesamtsumme der Energiefreisetzung für die Bemessung der Sicherheitseinrichtung berücksichtigt werden.

6.4.3.3 Erwärmen eines kryogenen Behälters im Falle eines Vakuumverlustes

Bei Vakuumverlust kann der Raum zwischen Innen- und Außengehäuse entweder mit Luft oder mit dem gespeicherten Gas gefüllt werden. Die Wärmebelastung ist abhängig von der Bemessungstemperatur und der Art der Isolierung.

Wenn die Bemessungstemperatur, T_0 , gleich oder höher als 75 K ist, sollte unabhängig von der Art der Isolierung die Wärmebelastung anhand von Gleichung (28) berechnet werden:

$$\dot{Q} = \left(\frac{k_v A_s}{\delta_{\text{ins}}} + k_p \sum_{1}^n \frac{A_n}{l_n} \right) (T_A - T_0) \quad (28)$$

Wenn die Bemessungstemperatur, T_0 , unter 75 K liegt, was bedeutet, dass Luft oder Stickstoff im Raum zwischen dem Innen- und Außengehäuse kondensieren kann, und die Isolierung aus Perlit besteht, sollte die Wärmebelastung der Gleichung (28) entsprechen, wobei der Wert der Wärmeleitfähigkeit der Isolierung verdoppelt wird.

Wenn die Bemessungstemperatur, T_0 , unter 75 K liegt, die Isolierung jedoch mehrschichtig ist, sollte die Wärmebelastung anhand von Gleichung (28) oder Gleichung (29) ermittelt werden, je nachdem, welcher Wert höher ist.

$$\dot{Q} = \frac{38400 + X^{0,73}}{0,96 + X^{0,73}} A_i + k_p \sum_{1}^n \frac{A_n}{l_n} (T_A - T_0) \quad (29)$$

Dabei ist:

$\dot{Q}$	die Wärmebelastung im druckbeaufschlagten System, in W;
k_v	die mittlere Wärmeleitfähigkeit des isolierenden Werkstoffs bei Vakuumverlust, basierend auf dem höchsten der in Tabelle 2 angegebenen Werte für die Luft und für das im kryogenen Behälter gespeicherte Gas;
A_s	der Durchschnitt der Flächen des Innen- und Außengehäuses des kryogenen Behälters, in m^2 ;
A_i	die Fläche des Innengehäuses des kryogenen Behälters, in m^2 ;
δ_{ins}	die Dicke der Isolierung, die im Falle eines Vakuumverlustes erwartungsgemäß erhalten bleibt, in m;
T_A	die Umgebungstemperatur, in K;
T_0	die Bemessungstemperatur, in K;
k_p	die mittlere Wärmeleitfähigkeit von Rohrleitungen und -abstützungen zwischen T_A und T_0 , in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
n	die Anzahl der Rohrleitungen und Abstützungen, die an den kryogenen Behälter angeschlossen sind;
$A_1, A_2, \dots, A_n$	die Querschnittsfläche der Rohrleitung bzw. der Abstützung 1 bis n, in m^2 ;
$l_1, l_2, \dots, l_n$	die Länge der Rohrleitung bzw. der Abstützung 1 bis n innerhalb des Vakuumzwischenraums, in m;
X	die Anzahl der Isolationslagen.

6.4.3.4 Erwärmen eines kryogenen Behälters im Falle einer Feuerbelastung mit Isolierung

Wenn im Falle einer Feuerbelastung davon ausgegangen wird, dass das Gehäuse und die darin befindliche Isolierung nicht zerstört werden, ist die Wärmebelastung abhängig von der Bemessungstemperatur und der Art der Isolierung.

Wenn die Bemessungstemperatur, T_0 , gleich oder höher als 75 K ist, sollte unabhängig von der Art der Isolierung die Wärmebelastung anhand von Gleichung (30) berechnet werden:

$$\dot{Q} = \left(2,6 \frac{k_f A_s^{0,82}}{\delta_{ins}} + k_f \sum_{1}^n \frac{A_n}{l_n} \right) (922 - T_0) \quad (30)$$

Wenn die Bemessungstemperatur, T_0 , unter 75 K liegt, was bedeutet, dass Luft oder Stickstoff im Raum zwischen dem Innen- und Außengehäuse kondensieren kann, und die Isolierung aus Perlit besteht, sollte die Wärmebelastung der Gleichung (30) entsprechen, wobei der Wert der Wärmeleitfähigkeit verdoppelt wird.

Wenn die Bemessungstemperatur, T_0 , unter 75 K liegt, die Isolierung jedoch mehrschichtig ist, sollte die Wärmebelastung anhand von Gleichung (30) oder Gleichung (31) ermittelt werden, je nachdem, welcher Wert höher ist.

$$\dot{Q} = 1,95 \frac{92160 + X^{0,73}}{0,96 + X^{0,73}} A_i^{0,82} + k_f \sum_{1}^n \frac{A_n}{l_n} (922 - T_0) \quad (31)$$

Dabei ist k_f die mittlere Wärmeleitfähigkeit des isolierenden Werkstoffs unter Feuerbedingungen, basierend auf dem höchsten der in Tabelle 2 angegebenen Werte für die Luft und für das im kryogenen Behälter gespeicherte Gas nach EN ISO 21013-3:2016, 4.2.3.

Tabelle 2 — Wärmeübergangskoeffizienten für die Fälle Vakuumverlust (k_v) und Beflammung (k_f)

Flüssigkeit	k_v W/(m ¹ ·K ¹)	k_f W/(m ¹ ·K ¹)
Luft	0,019	0,043
Argon	0,013	0,027
Kohlenstoffdioxid	0,017	0,039
Kohlenstoffmonoxid	0,020	0,039
Helium	0,104	0,211
Wasserstoff	0,116	0,217
Methan	0,024	0,074
Neon	0,034	0,067
Stickstoff	0,019	0,040
Sauerstoff	0,019	0,043
Krypton	0,007	0,015
Xenon	0,005	0,009
Ethan	0,016	0,064

Flüssigkeit	k_v W/(m ¹ ·K ¹)	k_f W/(m ¹ ·K ¹)
Trifluormethan	0,012	0,027
Ethylen (Ethen)	0,015	0,056
Distickstoffoxid	0,014	0,038

6.4.3.5 Erwärmen eines kryogenen Behälters im Falle einer Feuerbelastung ohne Isolierung

Wenn im Falle einer Feuerbelastung davon ausgegangen wird, dass das Gehäuse und die darin befindliche Isolierung zerstört werden, sollte die Wärmebelastung anhand von Gleichung (32) berechnet werden.

$$\dot{Q} = 70900 A_i^{0,82} \quad (32)$$

Dabei ist:

$\dot{Q}$ die Wärmebelastung im druckbeaufschlagten System, in W;

A_i ist die Fläche des Innengehäuses des kryogenen Behälters, in m².

In diesem Fall kann die durch Rohrleitungen und Abstützungen übertragene Wärme vernachlässigt werden.

6.4.4 Druckanstieg aufgrund von thermischen Kettenreaktionen

6.4.4.1 Allgemeines

Zur Berechnung von $Q_{m,out}$ ist zuerst die Art des (homogenen) Flüssigkeitsphasen-Reaktionssystems, durch das der Druck erzeugt wird, zu identifizieren. Dabei kann es sich um dampfdruckproduzierende, gasproduzierende und hybride Systeme handeln, siehe 3.5.

Bei einem dampfdruckproduzierenden System wird der Großteil der durch die chemische Reaktion freigegebene Wärme in Form von Dampf abgeblasen, der durch Verdampfung einer oder mehrerer Komponenten entsteht. Die Temperaturanstiegsrate wird im Falle einer geeigneten Entlastungskonstruktion reduziert oder sogar vollständig gestoppt. In gasproduzierenden Systemen wird das Gas durch eine chemische Reaktion erzeugt und der Dampfdruck der Reaktionskomponenten ist im Vergleich so klein, dass er vernachlässigt werden kann. In diesem Fall steigen die Temperatur- und Reaktionsrate trotz Druckentlastung weiter, da mit dem Gas eine relativ kleine Menge an Wärmeenergie freigesetzt wird. Die Temperatur steigt weiter an, bis die Reaktion fast vollständig abgeschlossen ist. Bei einem hybriden System entsteht der Druck aufgrund der Entwicklung eines Permanentgases und eines steigenden Dampfdrucks bei steigender Temperatur.

Die kinetischen Kennwerte und Wärme- oder Gasfreisetzungsraten sind unter Notfallbedingungen selten verfügbar. Die Bestimmung dieser muss daher durch Laborversuche mit dafür vorgesehenen Vorrichtungen (z. B. Reaktionskalorimetern) erfolgen. Es ist in der Tat möglich, dass sich die Art des Flüssigphasenreaktionssystems während des Entlastungsprozesses ändert.

Abhängig von der Art des Flüssigkeitsphasenreaktionssystems gelten unterschiedliche Gleichungen zur Berechnung des abzublasenden Massenstroms. Es sind Gleichungen für Zweiphasen-Gas-/Zweiphasen-Flüssigkeitsgemische sowie einen Einphasen-Gas- und Einphasen-Flüssigkeitsstrom vorhanden.

6.4.4.2 Dampfdruckproduzierende Systeme

$Q_{m,out}$ kann anhand von Gleichung (33) ermittelt werden:

$$Q_{m,out} = \frac{\frac{\dot{Q}}{\Delta h_{v,0}}}{\left(\sqrt{v^*} + \sqrt{\dot{Q}_{acc}^*}\right)^2} \quad (33)$$

Dabei ist:

- $\dot{Q}$ die auf das druckbeaufschlagte System wirkende Wärmebelastung, in W; siehe Gleichung (36);
- $\Delta h_{v,0}$ die latente Verdampfungswärme unter Bemessungsbedingung; in J/kg;
- v^* das dimensionslose spezifische Volumen des Zweiphasen-Gemischs in der druckbeaufschlagten Anlage unter Bemessungsdruck; siehe Gleichung (69), Gleichung (70) oder Gleichung (68);
- $\dot{Q}_{acc}^*$ das Verhältnis von fühlbarer Wärme zu latenter Wärme; siehe Gleichung (71).

In Gleichung (33) kennzeichnet $\dot{Q}_{acc}^*$ einen zulässigen weiteren Temperaturanstieg, ΔT_{over} , siehe Gleichung (34):

$$\Delta T_{over} = T_{sat}(p_{over}) - T_{sat}(p_0) \quad (34)$$

Dabei ist:

- T_{over} die Differenz zwischen der Sättigungstemperatur bei maximalem Druck während der Druckentlastung, p_{over} , und der Sättigungstemperatur unter Bemessungsbedingungen, p_0 , in K;
- T_{sat} die Sättigungstemperatur der Flüssigkeit, in K;
- p_{over} der maximale Druck während der Druckentlastung, in Pa;
- p_0 der Bemessungsdruck, in Pa.

Hier sollte p_{over} p_{MAA} nicht überschreiten, sodass Δp_{over} Gleichung (35) entspricht:

$$\Delta p_{over} = p_{over} - p_0 \leq p_{MAA} - p_0 \quad (35)$$

Dabei ist:

- p_{over} der maximale Druck während der Druckentlastung, in Pa;
- p_0 der Bemessungsdruck, in Pa;
- p_{MAA} der maximal zulässige angesammelte Druck des druckbeaufschlagten Systems, in Pascal.

Δp_{over} wird häufig im Bereich von 10 % bis 30 % von p_{open} gewählt. Wenn $\Delta p_{over} = 0$, dann $\dot{Q}_{acc}^* = 0$. Indem eine Druckdifferenz sichergestellt wird, kann die erforderliche GröÙte der Sicherheitseinrichtung für gewöhnlich deutlich reduziert werden.

Im Falle von reaktiven Systemen sollte p_{open} in der Regel geringer sein als p_{MAW} der Anlage. Indem p_{open} gering gehalten wird, tritt die Entlastung bei geringer Temperatur auf, sodass die Reaktionsrate relativ niedrig bleibt.

Die Wärmebelastung $\dot{Q}$, die aufgrund der chemischen Reaktion auf das druckbeaufschlagte System wirkt, wird durch Mittelung der adiabatischen Temperaturanstiegsrate, die p_0 und p_{over} entspricht, erhalten, siehe Gleichung (36):

$$\dot{Q} = \frac{M_0 \cdot c_{p,l,0}}{2} \left(\left. \frac{dT}{dt} \right|_0 + \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{over}} \right) \quad (36)$$

Dabei ist:

- M_0 die gesamte Flüssigkeitsmasse im druckbeaufschlagten System, in kg;
- $c_{p,l,0}$ die spezifische Wärmekapazität des Flüssigkeitsgemisches unter Bemessungsbedingungen, in J/(kg·K);
- $\left. \frac{dT}{dt} \right|_0$ die Temperaturanstiegsrate in dem druckbeaufschlagten System unter Bemessungsbedingungen;
- $\left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{over}}$ die Temperaturanstiegsrate in dem druckbeaufschlagten System bei maximalem Druck während der Druckentlastung, in K/s. Falls die maximale Temperaturanstiegsrate zwischen p_0 und p_{over} auftritt, sollte diese maximale Reaktions-Eigenerwärmungsrate anstelle des Temperaturanstiegs bei maximalem Druck während der Druckentlastung angewendet werden.

Gleichung (36) ist nicht anzuwenden, wenn die maximale Temperaturanstiegsrate zwischen p_0 und p_{over} auftritt. In diesem Fall wird empfohlen, stattdessen die maximale Reaktions-Eigenerwärmungsrate bei p_{over} zu verwenden. Es ist wichtig, dass die Reaktions-Eigenerwärmungsrate der in einem adiabatischen Reaktionssystem entspricht.

6.4.4.3 Gasproduzierende und hybride Systeme

$Q_{\text{m,out}}$ kann anhand von Gleichung (37) ermittelt werden:

$$Q_{\text{m,out}} = \Gamma_{\text{Gas},0} M_0 v_{g,0} / v_0 \quad (37)$$

Dabei ist:

- $\Gamma_{\text{Gas},0}$ die Gaserzeugungsrate je Flüssigkeitsmasse, d. h. Gasmassenstrom an Flüssigkeitsmassenbestand im druckbeaufschlagten System bei Bemessungsbedingungen, in kg/(s·kg);
- M_0 die gesamte Flüssigkeitsmasse im druckbeaufschlagten System, in kg;
- v_0 das spezifische Volumen eines homogenen Zweiphasen-Gemischs in dem System unter Bemessungsbedingungen, in m³/kg; siehe Gleichung (39);
- $v_{g,0}$ das spezifische Volumen der Gasphase unter Bemessungsbedingungen, in m³/kg; siehe Gleichung (83).

Im Gegensatz zur Bemessung für dampfdruckproduzierende Systeme, ist eine Berücksichtigung eines Massenverlusts bei gasproduzierenden und den meisten hybriden Systemen nicht vorgesehen, um das Bemessungsverfahren einfach und gleichzeitig konservativ zu belassen. Eine präzisere und realistischere Schätzung ist möglich, wenn der Verlust der reaktiven Masse aus dem Behälter während der Entlastungsperiode berücksichtigt wird. Dieser Massenverlust wird erheblich durch das Aufwallverhalten in

dem Behälter beeinflusst, welches wiederum die Qualität des Fluids am Eintritt der Sicherheitseinrichtung beeinflusst. Es ist nicht konservativ, wenn von einem homogenen Strömungsregime in dem Behälter ausgegangen wird, da der Massenverlust überschätzt und der Druckanstieg daher unterschätzt werden würde. Da die Berücksichtigung des Massenverlustes daher stark von einem realistischen Strömungsregime-Modell abhängt, wird bei dem hier beschriebenen Verfahren kein Massenverlust während der Druckentlastungsperiode berücksichtigt. Weitere Informationen zu diesem Thema sind den Literaturhinweisen [26] - [30] zu entnehmen.

Es ist wichtig, dass der maximale Wert von Γ der Rate bei einer adiabatischen Kettenreaktion mit gleichem Anfangsdruck, gleichen Konzentrationen usw. des Bemessungsfalles aus Schritt 1 entspricht, siehe 6.2. Γ wird häufig anhand von speziellen Versuchen ermittelt [16]. Die Verwendung von Γ kann manchmal zu einer übermäßigen Bemessung führen, wenn während des Druckentlastungsprozesses der Reaktor geleert wird, bevor der maximale Wert von Γ auftritt.

Die Entlastung von als hybride Systeme identifizierten Gemischen kann konservativ anhand der Gleichungen für gasproduzierende Systeme behandelt werden.

Bei hybriden Systemen, die während der gesamten Druckentlastungszeit Dampfdruck produzieren, ist Gleichung (38) im Vergleich zu Gleichung (37) weniger konservativ [40]:

$$Q_{m,out} = \frac{\Gamma_{Gas,0} M_0 v_{g,0}}{v_0} + \frac{\dot{Q}}{\Delta h_{v,0} \left(\sqrt{v^*} + \sqrt{\dot{Q}_{acc}^*} \right)^2} \quad (38)$$

6.4.4.4 Qualität des stagnierenden Massenstroms und spezifisches Volumen des Gemisches am Einlass des Abblasleitungssystems

$\dot{x}_0$ und v_0 , die in das Abblasleitungssystem eintreten, sind zu berechnen. Bei hochviskosen und bei schäumenden Flüssigkeiten und wenn die Eigenschaften des Reaktorbestandes nicht im Einzelnen bekannt sind, muss von einem homogenen Abblasen der Behälter ausgegangen werden.

Der Mittelwert von v_0 des homogenen Zweiphasen-Gemischs ist in Gleichung (39) angegeben.

$$v_0 = \dot{x}_0 \cdot v_{g,0} + (1 - \dot{x}_0) \cdot v_{l,0} \quad (39)$$

$\dot{x}_0$ wird anhand von Gleichung (40) ermittelt:

$$\dot{x}_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot v_{l,0}}{(1 - \varepsilon_0) \cdot v_{g,0} + \varepsilon_0 \cdot v_{l,0}} \quad (40)$$

$$\varepsilon_0 = 1 - \phi_0 = 1 - \frac{V_{l,0}}{V} \quad (41)$$

Dabei ist:

- 0 die Leerraumfraktion im druckbeaufschlagten System unter Bemessungsbedingungen;
- $v_{l,0}$ das spezifische Flüssigkeitsvolumen unter Bemessungsbedingungen in dem druckbeaufschlagten System, ausgedrückt in m^3/kg ;
- $v_{g,0}$ das spezifische Gasvolumen unter Bemessungsbedingungen in dem druckbeaufschlagten System, ausgedrückt in m^3/kg .

Falls die Flüssigkeitsviskosität $\eta_{l,0} > 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ oder nicht bekannt ist, muss von einem homogenen Abblasen des Behälters nach Gleichung (40) am Einlass der Abblasleitung der Sicherheitseinrichtung ausgegangen werden [37].

Bei einer nicht schäumenden Flüssigkeit mit einer Viskosität $\Omega_{l,0} \leq 0,1$ Pa·s bei Bemessungsbedingungen, oder wenn experimentelle Nachweise eine wesentliche Dampf-/Flüssigkeitsauflösung während der Druckentlastung gezeigt haben, darf $\dot{x}_0$ anhand von Gleichung (42) bestimmt werden.

$$\dot{x}_0 = \frac{v_l - v_{0,ct}}{v_l - v_{0,g}} \quad (42)$$

$$v_{0,ct} = v_{l0} + \phi_\infty \left(\frac{v_{g0} - v_{l0}}{v_{g0}} \right) \frac{1}{\frac{Q_{m,out}}{A_R \cdot u_\infty}} \quad (43)$$

$$\phi_\infty = \frac{2(1-\phi_0)}{1 - C_0(1-\phi_0)} \quad (44)$$

Dabei ist:

ϕ_0 der anfängliche maximale Flüssigkeitsstand bei Bemessungsbedingungen;

$v_{0,ct}$ das spezifische Volumen des Gemisches bei aufschäumender Strömung unter Bemessungsbedingungen, in m³/kg;

A_R der Querschnittsbereich in einem vertikalen zylindrischen Behälter.

Der Verteilungsfaktor C_0 liegt üblicherweise zwischen 1 und 1,5. Falls ein aufschäumendes Aufwallen vernünftigerweise angenommen werden kann, muss der abzublasende Massenstrom bekannt sein, um $v_{0,ct}$ zu berechnen. Daher kann $Q_{m,out}$ nur iterativ berechnet werden [38].

6.5 Schritt 4— Berechnung des abblasbaren Massenstroms und der Druckänderung im Abblasleitungssystem

6.5.1 Allgemeines

$\dot{m}_{SD}$ durch ein Abblasleitungssystem hängt von der Begrenzung der Flüssigkeit in allen Elementen des Abblasleitungssystems ab, bis entweder ein kritischer Durchfluss oder das Ende der Abblasleitung erreicht ist. Der aktuelle Stand der Technik ist die gleichzeitige Berechnung von $\dot{m}_{SD}$ und Δp in der Abblasleitung, bestehend aus Einlassleitung, Sicherheitsventil oder Berstscheibe und Auslassleitung. In Abblasleitungssystemen von Sicherheitsventilen ist der Einlass Δp häufig von untergeordneter Bedeutung, da die Drosselung üblicherweise in der Sicherheitseinrichtung erfolgt. Historisch gesehen führte dies zu einer getrennten Bemessung des Sicherheitsventils und der Anschlussleitung für den Gasbetrieb. Dies ist bei Zweiphasen-Ausdampfströmungssystemen nicht immer konservativ, insbesondere bei niedrigen Einlass-Massenstromqualitäten. Daher sollte das Abblasleitungssystem gleichzeitig bemessen werden. In Abblasleitungssystemen mit Berstscheiben wird der Widerstand im Allgemeinen von den Rohrleitungselementen und nicht von der Berstscheibe bestimmt. Daher ist eine gleichzeitige Berechnung der Einlass- und der Auslassleitung mit Berstscheibe erforderlich.

Anhang C enthält ein Beispiel für ein Verfahren zur Bestimmung von Δp in einem angeschlossenen Abblasleitungssystem. Es stehen alternative Verfahren zur Verfügung. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass jedes gewählte Verfahren für die jeweilige Anwendung angemessen ist und von entsprechend qualifizierten und erfahrenen Personen korrekt angewendet wird.

Grundlage für die Bemessung der Sicherheitseinrichtung ist die Gleichung für die Energieerhaltung bei gleichförmiger Strömung durch eine adiabatische Begrenzung. Daher wird $\dot{m}_{ideal}$ durch Gleichung (45) angegeben [36]:

$$\dot{m}_{\text{ideal}} = \sqrt{2 \cdot \frac{p_0}{v_0} \cdot \frac{1}{v_{\text{th}}^*} \cdot \frac{-\int_{\eta_{\text{in}}}^{\eta_{\text{th}}} v^* \cdot d\eta - \frac{g \cdot \sin\theta \cdot L}{v_0 \cdot p_0}}{1 - \Gamma + \zeta_{v,\text{ref}} \cdot \left(\frac{A_{\text{th}} \cdot v_{\text{ref}}^*}{A_{\text{in}} \cdot v_{\text{th}}^*}\right)^2}} \quad (45)$$

$$\eta = \frac{p}{p_0}$$

$$v^* = \frac{v}{v_0}$$

$$\beta = \frac{d}{d_{\text{in}}}$$

$$\Gamma = \left(\frac{A_{\text{th}} \cdot v_{\text{in}}}{A_{\text{in}} \cdot v_{\text{th}}}\right)^2 = \left(\frac{\beta_{\text{th}}^2}{v_{\text{th}}^*}\right)^2 \quad (46)$$

Dabei ist:

- v_{seat} das spezifische Volumen am engsten Strömungsquerschnitt zwischen dem druckbeaufschlagten System und dem Ventilsitz und minimalem Strömungsquerschnitt für Berstscheiben, in m^2/kg ;
- p_{seat} der Druck am engsten Strömungsquerschnitt (in der Regel der Ventilsitz), in Pa;
- p_0 der Bemessungsdruck, in Pa;
- A_{th} der engste Strömungsquerschnitt; bei einer Rohrleitung oder einer Berstscheibe, bei der die Berstscheibe beim Bersten eine größere Fläche zur Verfügung hat als der Querschnitt der Abblasleitung gilt $A_{\text{th}} = A_{\text{in}}$.
- A_{in} der Strömungsquerschnitt bei Einlassbedingungen;
- L die vertikale Länge einer Strömungsbegrenzung zur Berücksichtigung der potenziellen Energieänderung. Für Sicherheitsventile und Berstscheiben kann L auf 0 eingestellt werden. Für Einlass- und Auslassleitungen müssen die Höhen des Systems berücksichtigt werden
- v das spezifische Volumen an der Düse zwischen dem Eintritt und dem engsten Strömungsquerschnitt, in m^2/kg ;
- $\zeta_{v,\text{ref}}$ der Widerstandsbeiwert am Referenzquerschnitt;
- p der Druck an der Düse, in Pa;
- Γ das dimensionslose Geschwindigkeitsverhältnis zwischen dem Einlass und des Halses einer Düse;
- g die Fallbeschleunigung;
- θ der Winkel der Abblaseleitung zur Horizontalen.

Gleichung (45) ist ein direktes Integrationsverfahren, das die Verwendung einer Zustandsgleichung für das spezifische Volumen des Gemisches v zwischen dem Einlass und dem Hals einer Düse ermöglicht. Sie beinhaltet die Einlassgeschwindigkeit, die Reibung, den Wärmeaustausch und die hydrostatische Energieänderung bei Aufwärtsströmung. Thermische, mechanische und chemische Nichtgleichgewichtseffekte aufgrund sehr kurzer Relaxationszeiten des Fluids in der Düse wie Siede- oder

Kondensationsverzögerung und Schlupf sind implizit im spezifischen Volumen v enthalten. Für eine ideale (adiabatische, reibungsfreie) Strömung von einem Sammelsaugrohr durch eine Düse ergibt sich Gleichung (45) [36]:

$$\dot{m}_{\text{ideal}} = \frac{1}{v_{\text{th}}^*} \sqrt{- \int_1^{\eta_{\text{th}}} v^* v^* d\eta} \quad (47)$$

Um dieses Integral auswerten zu können, ist es notwendig, v als Funktion des Drucks entlang des Düsenwegs von p_0 bis p_{seat} zu kennen. In der Literatur wurden einige Modelle zur Angleichung an diese $v(p)$ -Beziehung vorgeschlagen. Grundsätzlich basieren sie auf der Annahme einer homogenen Gleichgewichtsströmung, und für ein thermisches und mechanisches Nichtgleichgewicht werden empirische Korrekturen vorgenommen [25].

In der Industrie sind thermodynamische Eigenschaftsdaten z. B. in einer Datenbank verfügbar oder können anderweitig gemessen werden. Diese Daten werden für jede Phase separat unter Gleichgewichtsbedingungen gemessen. Anschließend werden für gewöhnlich Zweiphasen-Volumendaten anhand einer linearen Summierung der spezifischen Einphasen-Volumen, gewichtet nach Qualität, erstellt. Falls von einer homogenen Gleichgewichtsströmung auszugehen ist, kann das Integral numerisch beurteilt werden, d. h. Siedeverzug und Verschiebung werden vernachlässigt.

Gleichgewichtsmodelle sind für den Strom durch kurze Düsen und eine Fluidströmung niedriger Qualität unter Umständen nicht geeignet. Aus diesem Grund wird das thermische Nichtgleichgewicht empirisch berücksichtigt [18] [24] [26] [27] und [38]. Der Nichtgleichgewicht-Effekt wird typischerweise stärker hervorgehoben als die Änderung der Eigenschaftsdaten zwischen Eintritt und Düsenhals [34].

Falls von einer linearen Beziehung für $v(p)$ ausgegangen wird, sind thermophysikalische Eigenschaftsdaten nur an einen Druckpunkt erforderlich, z. B. p_0 . Dadurch kann das Integral analytisch beurteilt werden, z. B. anhand dem Omega-Vernach Leung [21]. Diener und Schmidt [18] änderten dieses Verfahren ab, um Nichtgleichgewichts-Effekte zu berücksichtigen, und bildeten die Basis für das in 6.5 vorgestellte Verfahren. Die letzte Änderung wurde als HNE-CSE-Omega-Verfahren [36] veröffentlicht, hauptsächlich um bestimmte Schwächen der klassischen Omega-Verfahren zu beheben, um

- 1) konsistente Ergebnisse mit ISO 4126-7 für Gas- und Flüssigkeitsströmungen zu erzielen,
- 2) die Einlassgeschwindigkeit zur Sicherheitseinrichtung zu berücksichtigen,
- 3) die Einlassbedingungen von anfänglich unterkühlter Flüssigkeit und niedrigen Massenstromqualitäten abzudecken,
- 4) ein Modell für das kritische Druckverhältnis unter Berücksichtigung der Siedeverzögerung aufzunehmen, das für die integrierte Bemessung von Einlassleitung, Sicherheitseinrichtung und Auslassleitung anwendbar ist (siehe 6.7).

Eine vereinfachte Gleichung für den Kompressibilitätskoeffizienten ω bei den Bemessungsbedingungen für Sicherheitsventile und Berstscheiben mit wesentlicher Strömungsbegrenzung ist in Gleichung (48) angegeben:

$$\omega = \frac{\left(\frac{v_{\text{seat}}}{v_0} - 1\right)}{\left(\frac{p_0}{p_{\text{seat}}} - 1\right)} \quad (48)$$

Dabei ist:

- v_{seat} das spezifische Volumen des Zweiphasengas-/Zweiphasen-Flüssigkeitsgemisches am engsten Strömungsquerschnitt des Sicherheitsventils, oder das spezifische Volumen am minimalen Strömungsquerschnitt einer Berstscheibe, in m^3/kg ;
- v_0 das spezifische Volumen in dem druckbeaufschlagten System unter Bemessungsbedingungen, in m^3/kg ;
- p_0 der Bemessungsdruck, in Pa;
- v_{seat} der Druck am engsten Strömungsquerschnitt des Sicherheitsventils, oder der Druck am minimalen Strömungsquerschnitt einer Berstscheibe, in Pa.

Wenn η_{crit} in der Sicherheitseinrichtung bestimmt worden ist, gilt $p_{\text{seat}} = p_{\text{crit}}$. Andernfalls ist $p_{\text{seat}} = p_b$.

Diese Definition von ω beinhaltet Eigenschaftsdaten an zwei Druckpunkten und ist präziser als die Beurteilung bei einem Druck. Sie gilt auch für Einzel- oder Mehrkomponentensysteme nahe der Grenzen von p_{red} und T_{red} . Diese Definition hat den Nachteil, dass die Eigenschaftsdaten im engsten Strömungsquerschnitt der Sicherheitseinrichtung bekannt sein müssen, die vom Grad des thermodynamischen Nichtgleichgewichts (Siedeverzug, Verschiebung der Gasphase) im Ventil abhängen. In der Regel sind diese Daten nicht vorhanden. Zur Vereinfachung kann ω auf Gleichung (48) basieren, wobei p_{seat} bei 80 % oder 90 % von p_0 ist, oder auf den Bemessungsbedingungen (siehe 6.5.4), d. h. typischerweise η_{crit} und unter der Annahme von thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen zur Berechnung von v_{seat} bei p_{crit} . Ein Vergleich der Genauigkeit der beiden Verfahren ist [34] und [26] zu entnehmen.

Wenn der Durchfluss nicht wesentlich eingeschränkt ist, z. B. bei geraden Rohrleitungen oder weit öffnenden Berstscheiben, kann Gleichung (48) nicht angewendet werden. Hier sollte die allgemeinere Definition in 6.5.4 verwendet werden.

Die Berechnung von $\dot{m}_{\text{SD}}$ ist in Gleichung (49) gegeben.

$$\dot{m}_{\text{SD}} = K_{\text{dr}} \cdot \dot{m}_{\text{ideal}} = K_{\text{dr}} \cdot C \cdot \sqrt{\frac{2p_0}{v_0}} \quad (49)$$

Dabei ist:

- K_{dr} die kombinierte Ausflussziffer des Ventils, siehe Tabelle 4;
- $\dot{m}_{\text{ideal}}$ der Massenstrom durch eine theoretisch perfekte (adiabatische, reibungslose) Düse, in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
- C der dimensionslose Massenstrom; siehe Gleichung (54);
- p_0 der Bemessungsdruck, in Pa;
- v_0 das spezifische Volumen des homogenen Zweiphasen-Gemischs unter Bemessungsbedingungen in dem druckbeaufschlagten System, in m^3/kg ; siehe Gleichung (39).

Diese Berechnung wird in zwei Schritten durchgeführt. Zuerst wird $\dot{m}_{\text{ideal}}$ durch eine theoretisch perfekte (adiabatische, reibungslose) Düse berechnet. Es setzt sich zusammen aus C (siehe 6.5.3), das eine Funktion von p_0 , und v_0 ist. Anschließend wird $\dot{m}_{\text{ideal}}$ durch die Verwendung von K_{dr} reduziert, der direkt mit diesem Modell zusammenhängt.