

DIN EN 17527

ICS 13.240; 23.020.40

Einsprüche bis 2020-08-19

Entwurf**Helium-Kryostate –
Schutz gegen Drucküberschreitung;
Deutsche und Englische Fassung prEN 17527:2020**

Helium cryostats –
Protection against excessive pressure;
German and English version prEN 17527:2020

Cryostats pour hélium –
Protections contre les surpressions;
Version allemande et anglaise prEN 17527:2020

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-06-19 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 ndg@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 Druckgasanlagen (NDG), 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 243 Seiten

DIN-Normenausschuss Druckgasanlagen (NDG)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17527:2020) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 268 „Kryo-Behälter und spezielle Einsatzgebiete der Wasserstofftechnologie“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 016-00-05 AA „Kryo-Behälter; Spiegelausschuss zu CEN/TC 268 und ISO/TC 220“ im DIN-Normenausschuss Druckgasanlagen (NDG).

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

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

IEC 61882:2016 siehe DIN EN 61882 (VDE 0050-8):2017-02

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

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 61882 (VDE 0050-8):2017-02, *HAZOP-Verfahren (HAZOP-Studien) — Anwendungsleitfaden (IEC 61882:2016)*; Deutsche Fassung EN 61882:2016

- Entwurf -

Juli 2020

prEN 17527

Titel de: Helium-Kryostate - Schutz gegen Drucküberschreitung
Titel en: Helium cryostats - Protection against excessive pressure
Titel fr: Cryostats pour hélium - Protections contre les surpressions

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Symbole	12
5 Prozessablaufdiagramme	15
5.1 Prozessablaufdiagramm bezüglich Risikobeurteilung und Schutzkonzepten, siehe Bild 1	15
5.2 Prozessablaufdiagramm zur szenariospezifischen Dimensionierung von Heliumkreislauf-PRD, siehe Bild 2	16
6 Risikobeurteilung	17
6.1 Allgemeine Informationen zur Risikobeurteilung	17
6.2 Für die Dimensionierung relevante Quellen für Drucküberschreitung	17
6.3 Quellen für Drucküberschreitung, die einzuschränken sind	19
6.4 Kombinierte Szenarien	21
6.5 Risikobeurteilung vor der Bestellung	21
6.6 Risikobeurteilung in der Auslegungsphase	21
6.7 Bewertung der Risiken durch den Endbenutzer	22
7 Schutzkonzepte	22
7.1 Allgemeines	22
7.2 Einstufiges Schutzkonzept	22
7.3 Mehrstufige Schutzkonzepte	23
8 Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen	26
8.1 Verfahren zur Bemessung von Druckentlastungseinrichtungen	26
8.2 Berechnung des Mindest-Abblasequerschnitts	26
8.3 Berechnung der Fluidzustandseigenschaften unter Abblasebedingungen	27
8.4 Berechnung des Abblase-Massenstroms	29
8.5 Berechnung der Massenstromdichte	36
8.6 Berechnung der Ausflussziffer	39
8.7 Transferleitungssysteme	40
8.8 Dimensionierung der PRD des Vakuumbehälters	40
9 Druckentlastungseinrichtungen	41
9.1 Allgemeines	41
9.2 Druckentlastungsventile	41
9.3 Berstscheiben	42
9.4 Kombinationen von Druckentlastungsventilen und Berstscheiben	42
9.5 Magnetische Druckentlastungseinrichtungen	42
9.6 Druckentlastungseinrichtungen für Isoliervakuumbehälter	42
9.7 Mechanische Befestigung Druckentlastungseinrichtungen	43
9.8 Werkstoffe für Druckentlastungseinrichtungen	43
10 Stofffreisetzung	43
10.1 Allgemeines	43
10.2 Abblaseleitungen und Abblasesysteme	43

10.3	Freisetzung unmittelbar in die Umgebung	44
11	Betrieb von Helium-Kryostaten	44
11.1	Prüfung vor der Inbetriebnahme	44
11.2	Wiederkehrende Prüfungen von Druckentlastungseinrichtungen	45
Anhang A (informativ)	Thermodynamische Eigenschaften von Helium	47
Anhang B (informativ)	Risikobeurteilung	51
Anhang C (informativ)	Schutzkonzepte	66
Anhang D (informativ)	Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen	74
Anhang E (informativ)	Bauarten von Druckentlastungseinrichtungen	104
Literaturhinweise.....		115

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17527:2020) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 268 „Kryo-Behälter und spezielle Einsatzgebiete der Wasserstofftechnologie“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Einleitung

Helium-Kryostate, mit Ausnahme von Kryo-Behältern zur Lagerung tiefkalter Flüssigkeiten, die von EN ISO 21009-2 und EN 13458 abgedeckt sind, enthalten zusätzliche besondere Bauteile, wie supraleitende Magnete und Kavitäten, elektrische Heizelemente, Wärmeübertrager, Faltenbälge, Umwälzpumpen und interne Regelventile. Diese Bauteile sind mit zusätzlichen Risiken verbunden, wie z.B. plötzliche Drucküberschreitung, die die Auslegung von Druckentlastungssystemen stark beeinflussen und von bestehenden Normen nicht abgedeckt sind. Helium-Kryostate zeichnen sich durch eine Vielzahl von komplexen und individuellen Lösungen bei der Auslegung aus, wobei oft kleine Auslegungsreserven für Spitzenleistungen ausgenutzt werden. Daher kann eine allgemeine und spezifische technische Lösung für den Schutz gegen Drucküberschreitung nicht standardisiert werden. Vielmehr kann der Ansatz zum Erreichen des Schutzes nach dem Stand der Technik standardisiert werden und wird daher in diesem Dokument behandelt, wobei das Verfahren und die Mindestanforderungen für die verschiedenen Aspekte im Hauptteil des Dokuments festgelegt werden. Zusätzliche Informationen, Beispiellösungen und beispielhafte Maßnahmen werden im umfangreichen Anhang bereitgestellt, der die Struktur des Hauptteils widerspiegelt.

Dieses Dokument behandelt die typischen Quellen, die zu Drucküberschreitung in Helium-Kryostaten führen können sowie die Bedingungen, die für den Schutz gegen Drucküberschreitung bei Systemversagen relevant sind, um Risikobeurteilungen zu harmonisieren und bewährte Praktiken zu entwickeln. Das Dokument verwendet allgemeine SI-basierte Einheiten.

Der Anwender dieses Dokuments darf sich auf die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung, Teil 3, beziehen, die sich mit der Verwendung von verbalen Ausdrucksformen für die Ausformulierung von Festlegungen befasst.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die Mindestanforderungen für den Schutz von Helium-Kryostaten gegen Drucküberschreitung fest, einschließlich der spezifischen Risiken im Zusammenhang mit Kryostaten für supraleitende Magnete und Kryostaten für supraleitende Hochfrequenz-Kavitäten, Coldboxen von Helium-Kühlgeräten und -verflüssigern sowie Helium-Verteilersystemen einschließlich Ventilboxen. Es umfasst die Risikobeurteilung, Schutzkonzepte, Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen, Bauarten von Druckentlastungseinrichtungen, Stofffreisetzung und den Betrieb von Helium-Kryostaten.

Um den Zweck dieses Dokuments zu erfüllen, werden die Charakteristiken von Druckentlastungseinrichtungen berücksichtigt.

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 13445-2, *Unbefeuerte Druckbehälter — Teil 2: Werkstoffe*

EN 13445-3, *Unbefeuerte Druckbehälter — Teil 3: Konstruktion*

EN ISO 4126-1:2013, *Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck — Teil 1: Sicherheitsventile (ISO 4126-1:2013)*

EN ISO 4126-3:2006, *Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck — Teil 3: Sicherheitsventile und Berstscheibeneinrichtungen in Kombination (ISO 4126-3:2006)*

EN ISO 4126-6, *Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck — Teil 6: Berstscheibeneinrichtungen; Anwendung, Auswahl und Einbau (ISO 4126-6)*

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

ISO 4126-9, *Safety devices for protection against excessive pressure — Part 9: Application and installation of safety devices excluding stand-alone bursting disc safety devices*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten 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 <https://www.electropedia.org/>

3.1

zuständige nationale dritte Partei

nach nationalen Vorschriften zugelassene Inspektionsstelle

3.2

Gegendruck

p_b

Überdruck auf der Austrittsseite einer Druckentlastungseinrichtung, der durch den Druck im System stromaufwärts entsteht

[QUELLE: EN ISO 4126-1:2013, 3.11, modifiziert]

3.3

Badkühlung

Kühlverfahren, bei dem das zu kühlende Objekt in einen mit flüssigem Kühlmedium gefüllten Behälter eingetaucht wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Verdampfungsenthalpie wird zur Kühlung genutzt, wobei die Phasenänderung für eine nahezu konstante Kühltemperatur sorgt.

3.4

Schließdruckdifferenz

Δp_{reseat}

Differenz zwischen Ansprechdruck und Schließdruck

[QUELLE: EN ISO 4126-1:2013, 3.15]

3.5

Eigengegendruck

Δp_{bb}

Überdruck auf der Austrittsseite einer Druckentlastungseinrichtung, der beim Abblasen der Einrichtung in das System stromaufwärts entsteht

[QUELLE: EN ISO 4126-1:2013, 3.13]

3.6

Berstdruck

p_{burst}

Wert des Differenzdrucks zwischen Eintrittsseite und Austrittsseite, bei dem die Berstscheibe anspricht

[QUELLE: EN ISO 4126-2:2019, 3.10]

3.7

Flattern

instabiles Abblasen eines Druckentlastungsventils, gekennzeichnet durch sehr häufiges Öffnen und Schließen

3.8

zugehörige Temperatur

einem Berstdruck zugeordnete Temperatur der Berstscheibe

[QUELLE: EN ISO 4126-2:2019, 3.14, modifiziert]

3.9

kryogenes Fluid

Fluid mit einer Normsiedetemperatur unterhalb 120 K bzw. –153 °C

3.10

Kryotechnik

Untersuchung von Technologien, Verfahren und Apparaturen bei Temperaturen unterhalb 120 K bzw. –153 °C

3.11

Kryostat

vakuumisolierte Einrichtung für den Betrieb von Bauteilen bei kryogenen Temperaturen mit kryogenen Fluiden

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Kryostat wird als eine Baugruppe betrachtet.

3.12

Stromzuführung

elektrische Verbindung zwischen dem Netzgerät und dem supraleitenden Magneten zum Beladen, Betreiben oder Entladen des Magneten

Anmerkung 1 zum Begriff: Aufgrund der hohen Wärmeleitung und des großen Temperaturgradienten wird die Stromzuführung bei größeren Systemen aktiv gekühlt. Die Stromzuführung besteht z. B. aus einem Kupferteil als elektrischem Leiter und einem Wärmeübertrager zur Kühlung.

3.13

Dewar

vakuumisolierter Lager- und Transportcontainer zur Lagerung kryogener Fluide

3.14

Netzbetrieb

<supraleitender Magnet> Magnetbetrieb durch ein Netzgerät, wobei der Magnet immer an das Netzgerät bzw. im Quenchfall an eine äußere Schutzschaltung oder an einen Entladewiderstand angeschlossen ist

3.15

Vollhub-Druckentlastungsventil

PRV, en: pressure relief valve

PRV, das sich innerhalb von 5 % der Druckerhöhung bis zum konstruktiv begrenzten Hub sofort öffnet. Der Anteil des Hubs bis zur momentanen Öffnung (Proportionalbereich) darf 20 % des Gesamthubs nicht überschreiten

3.16

Leckagerate

pV-Durchfluss eines bestimmten Fluids, das unter festgelegten Bedingungen durch ein Leck strömt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Leckagerate wird in der Vakuum- bzw. kryogenen Technik oftmals in der Einheit mbar l/s angegeben.

[QUELLE: EN ISO 20484:2017, 4.3.5]

3.17

maximal zulässiger Druck

p_s

maximaler Überdruck, für die die Anlage ausgelegt ist, wie vom Hersteller festgelegt

[QUELLE: EN ISO 4126-1:2013, 3.6, modifiziert]

3.18

größter anzunehmender Störfall

MCI, en: maximum credible incident

schlimmster Störfall im Bereich des Möglichen, der eine Tendenz hat, wesentlichen Schaden anzurichten

Anmerkung 1 zum Begriff: Der MCI ist die Auslegungsgrundlage für die Dimensionierung der primären Druckentlastungseinrichtung (PRD, en: pressure relief device).

3.19

Superisolation

sehr wirksames thermisches Isolationsverfahren in der Kryotechnik, das den durch Wärmestrahlung verursachten Wärmetransport wesentlich verringert

Anmerkung 1 zum Begriff: Superisolation (MLI, en: multilayer insulation) besteht aus mehreren Lagen strahlungsreflektierender Folie, welche die tiefkalten Bauteile umgeben. Superisolation kommt in Verbindung mit Vakuumisolation zum Einsatz.

3.20

Nenn-Betriebsdruck

p_{operate}

während des normalen Betriebs erwarteter Druck

3.21

Öffnungsdruckdifferenz

Δp_{over}

Druckanstieg oberhalb des Ansprechdrucks

[QUELLE: EN ISO 4126-1:2013, 3.7]

3.22

Ansprechtoleranz

p_{burst}

Druckbereich zwischen dem minimalen festgelegten Berstdruck und dem maximalen festgelegten Berstdruck, oder Druckbereich in positiven und negativen Prozentzahlen oder Mengen, der zum festgelegten Berstdruck gehört

[QUELLE: EN ISO 4126-2:2019, 3.15]

3.23

Dauerstrombetrieb

<supraleitender Magnet> Magnetbetrieb ohne Anbindung an das Netzgerät, wobei nach dem Beladen des Magneten das Netzgerät abgetrennt wird und der supraleitende Magnet im Kurzschlussbetrieb arbeitet

3.24

pV-Durchfluss

Rate, mit der ein Gasvolumen bei festgelegtem Druck einen gegebenen Querschnitt des Systems passiert

Anmerkung 1 des Begriffs: Der pV-Durchfluss wird in mbar l/s angegeben.

[QUELLE: EN ISO 20484:2017, 4.2.3, modifiziert – Anmerkung 1 des Begriff wurde geändert]

3.25

Quench

<supraleitender Magnet> spontaner Übergang eines Supraleiters oder eines supraleitenden Bauteils vom supraleitenden Zustand in den normalleitenden Zustand

3.26

Abblasedruck

p_0

der für die Größenbestimmung von Druckentlastungseinrichtungen zugrunde gelegte Druck; bei einem Druckentlastungsventil ist der Abblasedruck größer oder gleich dem Ansprechdruck zuzüglich Öffnungsdruckdifferenz

[QUELLE: EN ISO 4126-1:2013, 3.10, modifiziert]

3.27

Schließdruck

p_{reseat}

statischer Druck auf der Eintrittsseite, bei dem der Ventilteller wieder den Sitz berührt oder bis zum Nullhub

Der genaue Wortlaut ist: Wert des statischen Drucks auf der Eintrittsseite, bei dem der Ventilteller wieder den Sitz berührt oder bei dem der Hub null ist

[QUELLE: EN ISO 4126-1:2013, 3.8, modifiziert]

3.28

Ansprechdruck

p_{set}

vorgegebener Überdruck, bei dem das Druckentlastungsventil zu öffnen beginnt

Anmerkung 1 zum Begriff: Es ist der Überdruck auf der Ventileintrittsseite, bei dem sich die Kräfte, die das Ventil unter den spezifischen Betriebsbedingungen öffnen, mit den Kräften, die den Ventilteller auf dem Sitz halten, im Gleichgewicht befinden.

[QUELLE: EN ISO 4126-1:2013, 3.5, modifiziert]

3.29

festgelegter Berstdruck

$p_{\text{sp,burst}}$

bei der Festlegung der Anforderungen an die Berstscheibe bei einer zugehörigen Temperatur berechneter Berstdruck (gilt in Verbindung mit einer Ansprechtoleranz)

[QUELLE: EN ISO 4126-2:2019, 3.11, modifiziert]

3.30

maximaler festgelegter Berstdruck

$p_{\text{burst,max}}$

bei der Festlegung der Anforderungen an die Berstscheibe bei einer zugehörigen Temperatur berechneter maximaler Druck (gilt in Verbindung mit dem minimalen Berstdruck)

[QUELLE: EN ISO 4126-2:2019, 3.12, modifiziert]

3.31

minimaler festgelegter Berstdruck

$p_{\text{burst,min}}$

bei der Festlegung der Anforderungen an die Berstscheibe bei einer zugehörigen Temperatur berechneter minimaler Druck (gilt in Verbindung mit dem maximalen Berstdruck)

[QUELLE: EN ISO 4126-2:2019, 3.13, modifiziert]

3.32

supraleitender Magnet

Magnet, dessen Spulen, üblicherweise mit Helium, auf eine Temperatur gekühlt werden, bei der der Leiter supraleitend wird, wodurch der gesamte elektrische Widerstand wirksam beseitigt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Supraleitende Materialien haben bei entsprechend tiefen Temperaturen und innerhalb bestimmter Betriebsparameter keinen ohmschen Widerstand, deshalb kann ein elektrischer Strom ohne Energieverlust fließen.

[QUELLE: IEC 60050-815]

3.33

Fremdgedruck

p_{bs}

Überdruck, der auf der Austrittsseite einer Druckentlastungseinrichtung zum Zeitpunkt unmittelbar vor dem Öffnen herrscht

[QUELLE: EN ISO 4126-1:2013, 3.13, modifiziert]

3.34

Prüfdruck

p_{test}

Druck, dem das Druckgerät zu Prüfzwecken ausgesetzt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei Helium-Kryostaten sind hydrostatische Prüfungen im Allgemeinen unpraktisch und sogar nachteilig, so dass nur pneumatische Prüfungen zulässig sind.

Anmerkung 2 zum Begriff: Nationale Vorschriften bezüglich der Risiken im Zusammenhang mit der Verwendung von kompressiblen Medien bei Nachweisprüfungen sind zu beachten.

[QUELLE: EN 764-1:2004]

3.35

thermoakustische Schwingung

spontan anklingende, resonante Gasschwingung innerhalb eines Verbindungsrohres zwischen hohem und tiefem Temperaturniveau

3.36

Vakuumbehälter

evakuierbarer Außenbehälter eines Kryostaten, der die tiefkalten Bauteile umgibt. Das Isoliervakuum hemmt die Wärmeleitung durch Restgas

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Vakuumbehälter selbst verbleibt normalerweise nahezu auf Umgebungstemperatur.

3.37

Ventilbox

Baugruppe zur Verteilung von Kühlmittel auf mehrere Kryostate und zur Durchflussregelung in Vor- und Rücklaufleitungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Ventilbox besteht aus einem Vakuumbehälter mit einer Anordnung von Kryovalven und Rohrleitungen.

4 Symbole

A_c	betroffene kryogene Oberfläche	cm ²
a_i	Anfangsfüllstand	–
A_{leak}	Querschnitt des Lecks	m ²
A_{scd}	betroffene Oberfläche der supraleitenden Vorrichtung	cm ²
A_{th}	Mindest-Abblasequerschnitt der PRD	m ²
C	Ausflussfunktion	–
c	spezifische Wärmekapazität von Behälter-/Rohrleitungswerkstoff	J/(kgK)
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	J/(kgK)
c_{th}	Geschwindigkeit am Hals der PRD	m/s
E_{mag}	im Magneten gespeicherte elektromagnetische Energie	J
E_{max}	maximale thermische Energie des elektrischen Lichtbogens	J
E_{wall}	thermische Energie, die bei einem dielektrischen Durchschlag direkt in die Behälter-/Rohrleitungswand übertragen wird	J
h	spezifische Enthalpie	J/kg
h'	spezifische Enthalpie von gesättigter Flüssigkeit	J/kg
h''	spezifische Enthalpie von gesättigtem Dampf	J/kg
Δh	spezifischer Wärmeeintrag	J/kg
$h_{0,x}$	angepasste spezifische Enthalpie	J/kg
Δh_{air}	Enthalpie-Differenz der Luft	J/kg
h_{th}	spezifische Enthalpie am Hals	J/kg
I	Strom	A
$\bar{k}$	durchschnittliche Wärmeübergangszahl zum Heliumstrom	W/(m ² K)
K_d	Ausflussziffer	–
K_{dr}	zuerkannte Ausflussziffer	–
l	Länge des Rohrabschnitts	m
L	Induktivität	H
L_c	Charakteristische Länge des Wärmeübergangsproblems	m
L_{fusion}	Latente Wärme bei Fusion des Behälter-/Rohrleitungswerkstoffs	J/kg
$\dot{M}$	Abblase-Massenstrom	kg/s
M_c	Gesamtmasse des kryogenen Fluids im System	kg
M_{He}	im Kryostaten gelagerte Heliummasse	kg
$\dot{M}_{LBV}$	Massenstrom zum Vakuumraum im Falle von Verlust des Strahlleitungsvakuums (LBV, en: loss of beamline vacuum)	kg/s
$\dot{M}_{lcf}$	Massenstrom zum Vakuumraum im Falle einer Leckage von kryogenem Fluid	kg/s
$\dot{m}_{th}$	Massenstromdichte am Hals der PRD	kg/(m ² s)
P	Umfang des Rohrabschnitts	m

Δp	Druckverlust	bar(a)
p_0	Abblasedruck	bar(a)
p_0^*	Abblasedruck, ab dem ein kritischer (Schall-)Fluss im Halsbereich A_{th} auftritt	bar(a)
$p_{0,x}$	angepasster Abblasedruck	bar(a)
p_{amb}	Umgebungsdruck	bar(a)
p_b	Gegendruck	bar(a)
Δp_{bb}	Eigengegendruck entlang der nachgelagerten Rohrleitungen	bar(a)
p_{bs}	Fremdgegendruck	bar(a)
p_{burst}	Berstdruck	bar(g)
$p_{burst,max}$	maximaler Berstdruck	bar(g)
$p_{burst,min}$	minimaler Berstdruck	bar(g)
p_c	Anfangsdruck innerhalb des kryogenen Kreislaufs	bar(a)
p_{crit}	Thermodynamischer kritischer Druck	bar(a)
Δp_{line}	Druckverlust entlang der Transferleitung	bar(a)
Δp_{over}	Öffnungsdruckdifferenz	bar(a)
p_{proj}	Umfang des projizierten Wärmeübergangs in Strömungsrichtung	cm
p_s	maximal zulässiger Druck	bar(a)
p_{set}	Ansprechdruck des PRV	bar(g)
p_{test}	Prüfdruck	bar(g)
p_{th}	Druck am Hals der PRD	bar(a)
p_v	Anfangsdruck innerhalb des Vakuumbehälters oder der Strahlleitung	bar(a)
p_x	unterkritischer Verdampfungsdruck	bar(a)
pd	Produkt aus Druck- und Abstand in der Paschenkurve	Pa m
$\dot{Q}$	Wärmelast	W
$\dot{Q}_{LIV}$	Wärmelast, verursacht durch Verlust des Isoliervakuums (LIV, en: loss of insulating vacuum)	W
$\dot{q}_{LIV}$	Wärmestromdichte, verursacht durch LIV	W/cm ²
$\dot{Q}_{quench}$	Wärmelast, verursacht durch einen Quench	W
$\dot{q}_{quench}$	Wärmestromdichte, verursacht durch einen Quench	W/cm ²
$\dot{Q}_{LVB}$	Wärmelast, verursacht durch einen LBV	W
Q_l	Leckagerate	mbar l/s
R	ideale Gaskonstante	J/(mol K)
R_c	fluidspezifische Gaskonstante	J/(kg K)
$s_{0,x}$	angepasste spezifische Entropie	J/(kg K)
T	Temperatur	K
T_{amb}	Temperatur bei Umgebungsbedingungen	K
T_{fusion}	Schmelztemperatur des Behälter-/Rohrleitungswerkstoffs	K

$T_{i,He}$	Nenntemperatur von He	K
T_0	Abblasetemperatur	K
$T_{0,in,i}$	Heliumtemperatur an der Eintrittsseite von Rohrabschnitt i	K
$T_{0,x}$	angepasste Abblasetemperatur	K
$T_{0,x,i}$	angepasste Abblasetemperatur von Rohrabschnitt i	K
T_c	Anfangstemperatur innerhalb des kryogenen Kreislaufs	K
T_{sat}	Sättigungstemperatur	K
T_{scd}	Oberflächentemperatur der supraleitenden Vorrichtung nach einem Quench	K
T_{wall}	Temperatur des Kryo-Behälters/der Rohrleitungswand	K
$T_{w,i}$	Oberflächentemperatur von Rohrabschnitt i	K
$U_{breakdown}$	Paschenkurve der Durchschlagsspannung	V
U_{ion}	Ionisierungsspannung von Gas	V
v	spezifisches Volumen	m ³ /kg
v'	spezifisches Volumen der gesättigten Flüssigkeit	m ³ /kg
v''	spezifisches Volumen des gesättigten Dampfs	m ³ /kg
$v_{0,x}$	spezifisches Volumen stromaufwärts der PRD	m ³ /kg
v_{amb}	spezifisches Volumen bei Umgebungsbedingungen der Umgebungsluft bei T_{amb} and p_{amb}	m ³ /kg
v_c	spezifisches Volumen innerhalb des kryogenen Kreislaufs	m ³ /kg
V_{He}	Heliumvolumen des Kryostats	m ³
v_i	spezifisches Anfangsvolumen	m ³ /kg
v_0	spezifisches Volumen unter Abblasebedingungen	m ³ /kg
v_{th}	spezifisches Volumen am Hals der PRD	m ³ /kg
V_v	Volumen des Vakuumraums	m ³
x	dimensionsloser Dampfmassenanteil (Qualität)	–
z	Dicke des Behälters/der Rohrleitungswand	m
α	Temperaturverhältnis	–
ε	dimensionsloser volumetrischer Gasgehalt	–
γ		
η_c	kritisches Druckverhältnis für Zweiphasenströmung	–
k	isentropen Ausdehnungskoeffizient der Umgebungsluft bei T_{amb} and p_{amb}	–
ξ	Längenverhältnis	–
ρ	Dichte von Behälter-/Rohrleitungswerkstoff	kg/m ³
φ	relative Luftfeuchte	%
ω	Omega-Parameter	–
ψ	Ausflussfunktion	–

5 Prozessablaufdiagramme

5.1 Prozessablaufdiagramm bezüglich Risikobeurteilung und Schutzkonzepten, siehe Bild 1

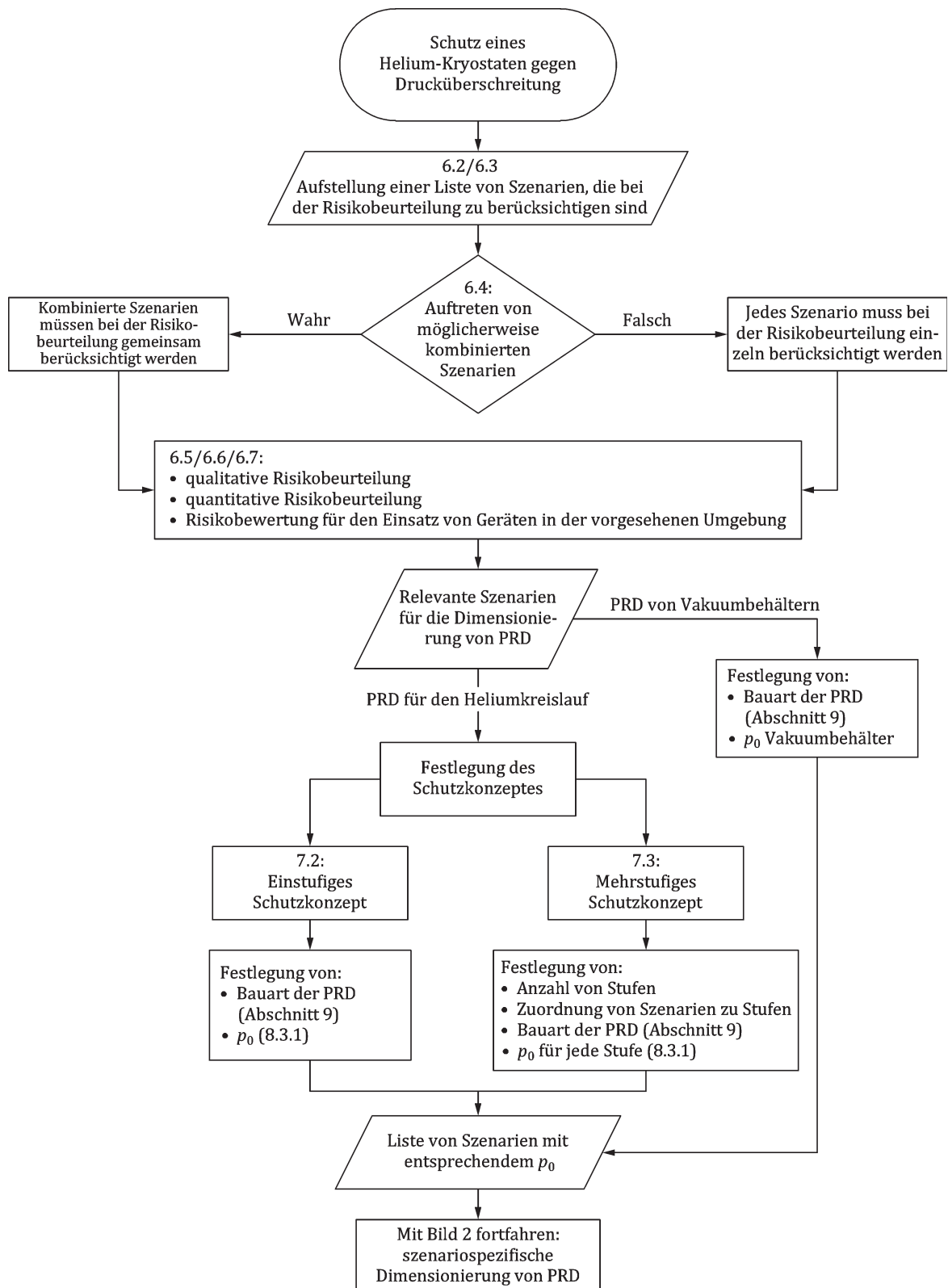


Bild 1

5.2 Prozessablaufdiagramm zur szenariospezifischen Dimensionierung von Heliumkreislauf-PRD, siehe Bild 2

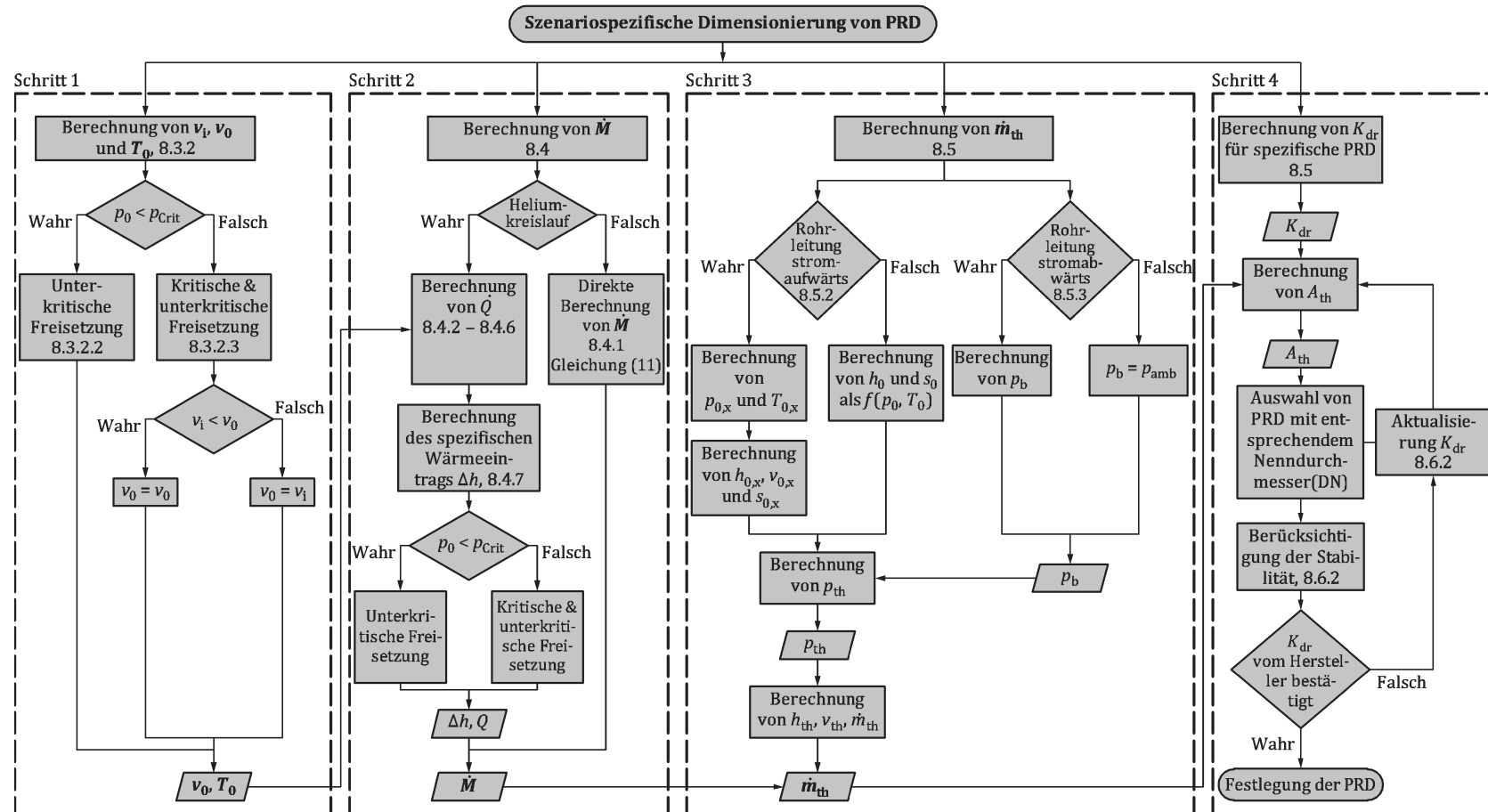


Bild 2

6 Risikobeurteilung

6.1 Allgemeine Informationen zur Risikobeurteilung

Als Grundlage für die Größenbestimmung von Druckentlastungseinrichtungen (PRD) nach Abschnitt 8 ist es erforderlich, eine Risikobeurteilung nach Abschnitt 6 durchzuführen und das Schutzkonzept nach Abschnitt 7 festzulegen.

Die in 6.2 und 6.3 angegebenen Quellen für Drucküberschreitung müssen bei der Risikobeurteilung eines Helium-Kryostaten berücksichtigt werden.

Die Quellen für Drucküberschreitung nach 6.2 sind für die Dimensionierung von PRD relevant. Die Quellen für Drucküberschreitung nach 6.3 müssen als Ergebnis der Risikobeurteilung gemindert werden.

6.2 Für die Dimensionierung relevante Quellen für Drucküberschreitung

6.2.1 Verlust des Isoliervakuums

Helium-Kryostate sind im allgemeinen vakuumisoliert. Während des Verlusts des Isoliervakuums (LIV) wird das Vakuumsystem mit atmosphärischer Luft belüftet, wodurch das Heliumsystem aufgrund der Luft-Desublimation und -Kondensation großen Wärmelasten ausgesetzt wird. Die tatsächliche Wärmelast hängt vom optionalen Einbau einer Superisolation (MLI, en: multi-layer insulation) auf der kryogenen Oberfläche ab. Der Verlust des Isoliervakuums definiert in Helium-Kryostaten oft den größten anzunehmenden Störfall (MCI), der die Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen beeinflusst.

Der LIV muss bei der Risikobeurteilung aller vakuumisolierten Helium-Kryostate berücksichtigt werden.

Die Bestimmung der Wärmelast aufgrund von LIV ist in 8.4.2 festgelegt. Weitere Informationen zum LIV sind in B.1 angegeben.

6.2.2 Verlust von Strahlleitungsvakuum

Der Verlust von Strahlleitungsvakuum durch Belüften mit atmosphärischer Luft ähnelt dem LIV-Szenario. Dies gilt insbesondere für supraleitende Beschleunigeranlagen, bei denen die innere Oberfläche der Strahlleitung im Allgemeinen nicht mit MLI abgedeckt werden kann. Dies erzeugt maximale Werte der Wärmestromdichte von der belüftenden Luft zur kryogenen Oberfläche. Solche Zwischenfälle können durch die Beschädigung von Verbindungsfaltenbälgen zwischen zwei supraleitenden Vorrichtungen in einer Strahlleitung entstehen.

Dieses Szenario muss insbesondere bei Helium-Kryostaten mit supraleitenden Hochfrequenz-Kavitäten berücksichtigt werden.

Die Bestimmung der Wärmelast aufgrund von LBV ist in 8.4.3 festgelegt. Weitere Informationen zum LBV sind in B.2 angegeben.

6.2.3 Quench einer supraleitenden Vorrichtung

Ein Quench bedeutet einen spontanen Übergang einer supraleitenden Vorrichtung vom supraleitenden Zustand in den normalleitenden Zustand. Der normalleitende Zustand bedeutet Widerstandsverluste, die nach dem Stromwärmegesetz an das Helium abgeleitet werden. Die Wärmelast, die z. B. durch das Quenchen einer supraleitenden Magnetspule entsteht, induziert einen signifikanten Druckanstieg. Quenches könnten absichtlich ausgelöst werden, um die supraleitende Vorrichtung zu prüfen oder zu schützen.

In Systemen, in denen die gespeicherte Energie in supraleitenden Vorrichtungen den Kryostaten auf Drücke nahe p_s unter Druck setzen kann, müssen Quenche generell erwartet werden und müssen in der Risikobeurteilung berücksichtigt werden.

Die Bestimmung der Wärmelast durch das Quenchen einer supraleitenden Vorrichtung ist in 8.4.4 festgelegt. Weitere Informationen zum Quenchen von supraleitenden Vorrichtungen sind in B.3 angegeben.

6.2.4 Leckage von kryogenem Fluid

Hierbei tritt entweder Helium aus dem Heliumsystem, Stickstoff aus einem Flüssigstickstoff-Isolationssystem oder ein anderes Systemfluid in den Isoliervakuumraum aus. Dies verursacht einen Druckanstieg sowohl im Vakuum- als auch im kryogenen Fluidsystem.

Dieses Szenario muss bei der Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen sowohl für das (die) kryogene(n) Fluidsystem(e) als auch für das Vakuumsystem berücksichtigt werden.

Die in Helium-Kryostaten typischerweise vorhandenen thermischen Schilde müssen neben den Vakuumanforderungen ausreichende Öffnungen vorsehen, um die Nenn-Abblaseleistung sicherzustellen.

Besonders hervorzuheben ist das Risiko, das entsteht, wenn Bauteile aus Kohlenstoffstahl mit tiefkalten Flüssigkeiten in Kontakt kommen.

Die Bestimmung des Abblase-Massenstroms aufgrund der Leckage von kryogenem Fluid ist in 8.4.5 festgelegt. Weitere Informationen zur Leckage von kryogenem Fluid sind in B.4 angegeben.

6.2.5 Dielektrischer Durchschlag

Elektrische Isolatoren können leitend werden, wenn die anliegende Spannung die Durchschlagsspannung übersteigt. Abhängig von der im System gespeicherten elektrischen Energie kann ein dielektrischer Durchschlag entweder kleine elektrische Entladungen nach dem Paschen-Gesetz oder größere Lichtbögen in Hochstromanlagen verursachen. Größere Lichtbögen können Rohrleitungen und Behälter kryogener Fluidkreisläufe zerstören und zu Druckanstiegen sowohl in den Fluid- als auch in den Vakuumsystem führen.

Das Risiko größerer Lichtbögen muss bei der Risikobeurteilung supraleitender Vorrichtungen mit großen Stromdichten und großer gespeicherter Energie berücksichtigt werden. Dieses Risiko sollte durch geeignete Auslegung und technische Ausrüstung der elektrischen Stromkreise gemindert werden.

Die Bestimmung des Abblase-Massenstroms durch dielektrischen Durchschlag ist in 8.4.6 festgelegt. Weitere Informationen zum dielektrischen Durchschlag sind in B.5 angegeben.

6.2.6 Einschluss von kryogenem Fluid

Der Einschluss von kryogenem Fluid in einem geschlossenen Volumen, z. B. zwischen zwei geschlossenen Ventilen, verursacht einen Druckanstieg aufgrund andauernder Wärmeeinträge oder bei Verlust des Isolationsvakuums. Einschlüsse können auch zwischen den Schichten von mehrschichtigen Faltenbälgen auftreten, was beim Aufwärmen zu einem Bruch führen kann. Dieses letztgenannte Risiko kann z. B. durch Löcher zwischen den Außenschichten solcher Faltenbälge gemindert werden.

Der Einschluss von kryogenem Fluid muss bei der Risikobeurteilung von Helium-Kryostaten berücksichtigt werden. Entsprechende Teilsysteme müssen durch individuelle Druckentlastungseinrichtungen geschützt werden.

Die Bestimmung der Wärmelast entspricht LIV, wie in 8.4.2 festgelegt.

6.3 Quellen für Drucküberschreitung, die einzuschränken sind

6.3.1 Thermoakustische Schwingung

Eine thermoakustische Schwingung (TAO, en: thermal acoustic oscillation) ist eine resonante Gasschwingung, die sich unter bestimmten Bedingungen in halboffenen Verbindungsleitungen zwischen einem tiefkalten Heliumreservoir und Anlagen bei Umgebungstemperatur, wie z. B. Manometern und Druckentlastungseinrichtungen, aufbaut. TAOs erhöhen den Wärmetransport entlang der entsprechenden Leitung stark und verursachen typischerweise auch Eisbildung an der umgebenden Anlage. Darüber hinaus kann die damit verbundene Druckschwingung das Ansprechen von Druckentlastungseinrichtungen verursachen.

Das Risiko thermoakustischer Schwingungen muss in der Auslegungsphase berücksichtigt und gemindert werden. Möglichkeiten, TAOs einzuschränken, sind in B.6 erläutert.

6.3.2 Kryogenes Pumpen

Die kryogene Oberfläche eines Helium-Kryostaten fungiert als Kryopumpe, auf der alle Gase außer Helium desublimiert werden. Geringfügige Einträge von entweder Umgebungsluft oder z. B. Stickstoff aus einem Stickstoff-Isolationssystem in das Vakuumsystem erhöhen nicht notwendigerweise den Vakuumdruck, sondern sammeln sich während des Betriebs als Frostschrift auf der kryogenen Oberfläche an. Beim Aufwärmen verdampfen die verfestigten Gase und setzen das Vakuumsystem unter Druck.

Das Risiko kryogenen Pumpens muss in der Auslegungsphase berücksichtigt und gemindert werden. Möglichkeiten, kryogenes Pumpen zu mindern, sind in B.7 erläutert.

6.3.3 Ausfall der Stromversorgung

Ein Ausfall der Stromversorgung führt zu einem Mangel an Kühlleistung, der die Wärmelast in Kryostaten während des normalen Betriebs kompensiert und somit einen Druckanstieg verursacht. Darüber hinaus verhindert ein Ausfall der Stromversorgung den normalen Betrieb von Regelventilen und anderen Aktuatoren.

Ein Ausfall der Stromversorgung muss bei der Auslegung von Helium-Kryostaten berücksichtigt werden, insbesondere bei der Festlegung von Fail-Safe-Stellungen von Regelventilen. Zufuhrventile sollten geschlossen und Rücklaufventile in sicherer Stellung geöffnet sein, abhängig von den betreffenden Prozessen.

6.3.4 Druckstoß

Ein Druckstoß wird durch eine plötzliche Änderung der Fluidgeschwindigkeit erzeugt, die instabile Bedingungen verursacht. Die Änderung der Fluidgeschwindigkeit kann z. B. durch das Starten/Stoppen von Pumpen, das Öffnen/Schließen von Ventilen oder die Verringerung der Leitungsgröße verursacht werden.

Das Risiko eines Druckstoßes muss durch die mechanische Auslegung und die geeignete Wahl der Zeitkonstanten im Steuersystem gemindert werden.

6.3.5 Gefrieren

Eine gefährdende Verfestigung von Flüssigkeiten sowohl innerhalb als auch außerhalb von Helium-Kryostaten muss durch geeignete Maßnahmen gemindert werden, z. B. durch Sicherheitsschalter zur Vermeidung von Überfüllung, Dichtheitsprüfungen von Druckentlastungseinrichtungen und Helium-Schutzeinrichtungen für Systeme unterhalb des Atmosphärendrucks.

6.3.6 Rückfließen

Ein Rückfließen kann beim Verbinden von Systemen mit unterschiedlichem Druck auftreten, z. B. beim Transfer von flüssigem Helium aus Lagerbehältern in Kryostate. Das Rückfließen von warmem Gas kann zu einem plötzlichen Verdampfen von flüssigem Helium führen.

Das Risiko durch Rückfließen muss entweder durch den Einbau von Rückschlagventilen, durch eine geeignete Auslegung, wie z. B. der Begrenzung des Durchmessers der Zuleitungen auf einen Massenstrom, der geringer ist als der Abblase-Massenstrom, durch Steuerroutrinen und durch Betriebsanweisungen gemindert werden.

6.3.7 Andere Quellen für Drucküberschreitung

Andere Quellen für einen Druckanstieg im Helium-Kryostat sind z. B. die unzureichende Kühlung aufgrund von Fehlfunktionen der Kryo-Anlage, menschliche Fehler, Steuerungsfehler und der nicht-standardmäßige Betrieb von Ventilen.

Sofern andere mögliche Quellen für eine Drucküberschreitung vorhanden sind, müssen diese bei der Risikobeurteilung berücksichtigt werden und es müssen geeignete Maßnahmen ergriffen werden.

6.3.8 Erdbeben

Erdbebenszenarien wirken sich typischerweise eher auf die mechanische Konstruktion von Helium-Kryostaten (festgelegt z. B. in EN 13445, alle Teile) aus als auf die Auslegung von Druckentlastungseinrichtungen. Dennoch können Erdbeben einen Bruch des Isoliervakuums und des Strahlleitungsvakuums durch eine Verschiebung des Kryostaten und eine Beschädigung der Verbindungsfaltenbälge auslösen.

Wenn Erdbebenszenarien für den Aufstellungsbereich eines Helium-Kryostaten vorzusehen sind, müssen die geltenden Normen und nationalen Vorschriften berücksichtigt werden.

6.3.9 Brand

Der Brandfall muss bei der Auslegung von Druckentlastungseinrichtungen nicht berücksichtigt werden, solange eine vernachlässigbare Brandlast im Sinne dieses Dokuments vorliegt.

ANMERKUNG Die Anforderung in der Richtlinie 2014/68/EU über Druckgeräte (PED) für externen Brand bezieht sich auf die Schadensbegrenzungsebene (siehe Bild C.3 und Bild C.4) und dient nicht der Druckabsicherung im Normalbetrieb, für Helium-Kryostate.

Als Brandlast gilt ein brennbarer Stoff in der Umgebung eines Helium-Kryostaten, der im Brandfall eine potentielle Gefährdung des Druckbehälters darstellt. Im Brandfall können infolge des Wärmeübergangs von der Brandlast Gefahren durch Flammenberührung oder Wärmestrahlung ausgehen.

Die Berücksichtigung eines Brandes würde zu einer großen Überdimensionierung der Druckentlastungseinrichtungen führen, was z. B. Leckagen und instabilen Betrieb (Flattern) mit verminderter Abblaseleistung und Beschädigung der federbelasteten Druckentlastungsventile verursacht. Es wird daher empfohlen, das Brandrisiko in der Umgebung von Helium-Kryostaten durch geeignete Maßnahmen wie Brandverhütungs-, Brandschutz-, Brandbekämpfungsmaßnahmen auszuschließen.

Bei Vorliegen einer Rest-Brandlast kann EN ISO 21013-3 für die Dimensionierung des Entlastungsdurchflusses von Druckentlastungseinrichtungen verwendet werden.

6.4 Kombinierte Szenarien

Im Allgemeinen werden die Ursachen für Drucküberschreitung als nicht zusammenhängend betrachtet (Single-Jeopardy-Theorie), wenn zwischen ihnen keine Prozessverbindung besteht oder wenn der Zeitraum zwischen zwei möglicherweise verbundenen Szenarien ausreichend groß ist.

Aufgrund der Prozessdynamik bei Störfällen in Helium-Kryostaten beinhaltet die Risikobeurteilung häufig die Berücksichtigung von Zeitkonstanten von Ereignissen nach einem Störfall. Beispiele für Zweitfehler sind der Quench eines supraleitenden Magneten, der durch den Verlust des Isoliervakuum ausgelöst wird oder ein elektrischer Durchschlag, der durch den Verlust des Strahlleitungsvakuums in Teilchenbeschleuniger- und Detektorsystemen ausgelöst wird.

Kombinierte Szenarien müssen berücksichtigt werden, da die Vernachlässigung oder die unrealistische Überlagerung von Störfällen entweder zu unterdimensionierten oder überdimensionierten Druckentlastungssystemen führen kann.

6.5 Risikobeurteilung vor der Bestellung

Bei der Bestellung eines Helium-Kryostaten muss vom Endbenutzer vor der Beschaffung eine qualitative Risikobeurteilung erstellt werden. Dies muss durch die Durchführung einer Gefährdung und Betreibbarkeits-Studie HAZOP, en: Hazard and Operability Study [14]) oder einem gleichwertigen anerkannten Verfahren erreicht werden. Die Risikobeurteilung muss enthalten:

- die Prozessintegration des Helium-Kryostaten in die Umgebung, in der er eingebaut wird;
- die Randbedingungen und der Einfluss von zugehörigen Anlagen, wie z. B. Magnetfelder;
- die Nennbetriebsbedingungen.

Bei individuell ausgelegten Helium-Kryostaten sollte die Risikobeurteilung zusätzlich enthalten:

- die vorläufige Festlegung eines ein- oder mehrstufigen Schutzkonzepts;
- die nachgelagerten Bedingungen und Heliumrückführsysteme.

Diese Risikobeurteilung muss in der technischen Spezifikation des Helium-Kryostaten enthalten sein.

Weitere Informationen und ein Beispiel für Verfahren der qualitativen Risikobeurteilung sind in B.8 enthalten.

6.6 Risikobeurteilung in der Auslegungsphase

In der Auslegungsphase muss eine Risikobeurteilung erstellt werden, die mindestens die Bewertung und Überprüfung der in 6.2 angegebenen Quellen für Drucküberschreitung umfasst. Dies wird durch die Durchführung einer Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA, en: Failure Mode and Effect Analysis [10] [11]) oder eines gleichwertigen anerkannten Verfahrens erreicht. Die Risikobeurteilung in der Auslegungsphase muss eine genaue Beschreibung der Betriebssicherheit des Helium-Kryostaten enthalten. Risiken müssen identifiziert und Maßnahmen festgelegt werden, um die Risiken auf ein annehmbares Niveau zu reduzieren oder zu mindern.

Der Helium-Kryostat muss entsprechend dieser Risikobeurteilung ausgelegt, hergestellt und dokumentiert werden, wozu auch die Dimensionierung der Druckentlastungseinrichtungen gehört.

6.7 Bewertung der Risiken durch den Endbenutzer

Zusätzlich zu den herkömmlichen Druckgeräten umfassen Helium-Kryostate spezifische Bauteile wie supraleitende Magnete und Kavitäten, elektrische Heizvorrichtungen, Wärmeübertrager, Faltenbälge, Umwälzpumpen und interne Regelventile.

ANMERKUNG 1 Die Risiko- und Gefährdungsanalyse nach PED deckt nicht die Risiken von Bauteilen ab, die entsprechend anderer Richtlinien und Vorschriften ausgelegt und gefertigt werden, z. B. Maschinenrichtlinie 2006/42/EG (MD, en: Machinery Directive), Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU (LVD, en: Low Voltage Directive) und Richtlinie 2004/108/EG über die elektromagnetische Verträglichkeit (EMC, en: Electromagnetic Compatibility).

Der Endbenutzer muss die Risikobeurteilung für die Verwendung des Helium-Kryostaten in seiner vorgesehenen Umgebung vor der Inbetriebnahme und der Endabnahme durchführen.

Der Endbenutzer muss alle erforderlichen Maßnahmen ergreifen, um sicherzustellen, dass die den Arbeitnehmern bereitgestellten Arbeitsmittel (z. B. Maschinen und Geräte) für die durchgeführten Arbeiten geeignet sind und von den Arbeitnehmern ohne Beeinträchtigung ihrer Gesundheit und Sicherheit verwendet werden dürfen [1].

Der Endnutzer muss die Anwendungsbedingungen des Helium-Kryostaten festlegen, wobei die Bedingungen für die Auslegung und Herstellung zu berücksichtigen und die Gebrauchsanweisungen des Geräteherstellers zu beachten sind.

Darüber hinaus muss der Endnutzer Sicherheitsmaßnahmen auf der Grundlage der Risikobeurteilung in Bezug auf die Verwendung des Geräts umsetzen, einschließlich kollektiver und personeller Schutzmaßnahmen während der Installation, der Inbetriebnahme, des Betriebs, der Instandhaltung und der Außerbetriebnahme.

Die Prüfung vor der Inbetriebnahme und die wiederkehrenden Prüfungen werden üblicherweise von der zuständigen nationalen dritten Partei durchgeführt.

ANMERKUNG 2 Dieses Verfahren ist in den nationalen Vorschriften/der Umsetzung der Bestimmungen der Europäischen Richtlinie über Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz [2] vorgesehen.

7 Schutzkonzepte

7.1 Allgemeines

Basierend auf der in Abschnitt 6 beschriebenen Risikobeurteilung muss vor der Dimensionierung und der Auswahl von Druckentlastungseinrichtungen das Gesamtschutzkonzept gegen Drucküberschreitung festgelegt werden.

7.2 Einstufiges Schutzkonzept

Ein einstufiges Schutzkonzept ist die Mindestanforderung für die Druckabsicherung eines Helium-Kryostaten.

Ein einstufiges Schutzkonzept muss eine Betriebsebene, eine Schutzebene und eine Schadenbegrenzungsebene umfassen.

Bild 3 zeigt ein Beispiel für ein einstufiges Abblasesystem, entweder mit einer Berstscheibe (BD, en: bursting disc, Option 1) oder einem Druckentlastungsventil (PRV, Option 2) in der Schutzebene.

Die Betriebsparameter des Helium-Kryostaten wie Druck, Durchflussraten, Füllmenge und Temperatur müssen in der Betriebsebene so gesteuert werden, dass sie in einem annehmbaren Bereich bleiben.

Bei einem Störfall verhindert die Schutzebene mit Hilfe einer Druckentlastungseinrichtung (PRD), dass der Druck die zulässige Grenze überschreitet. Der Schutz gegen Drucküberschreitung muss entweder durch nicht wiederverschließbare PRD, z. B. Berstscheiben (BD) mit einem Berstdruck p_{burst} kleiner oder gleich p_s oder durch wieder verschließbare PRD, z. B. federbelastete oder magnetische Druckentlastungsventile (PRV) mit einem Ansprechdruck p_{set} kleiner oder gleich p_s erreicht werden. Standardisierte Toleranzen der sich nicht wieder schließenden PRD und die Öffnungscharakteristiken der wieder verschließbaren PRD müssen den vorübergehenden Druckstoß auf maximal 10 % von p_s begrenzen.

Die Schadenbegrenzungsebene umfasst neben der Druckabsicherungsebene eines Helium-Kryostaten gegen äußere Gefährdungen zusätzliche Anforderungen, z. B. Schutzeinrichtungen, Brandschutz, Sauerstoffüberwachung, Absperrungen, Zugangsbeschränkungen und Heliumrückführsysteme.

Weitere Informationen sind in C.1 angegeben.

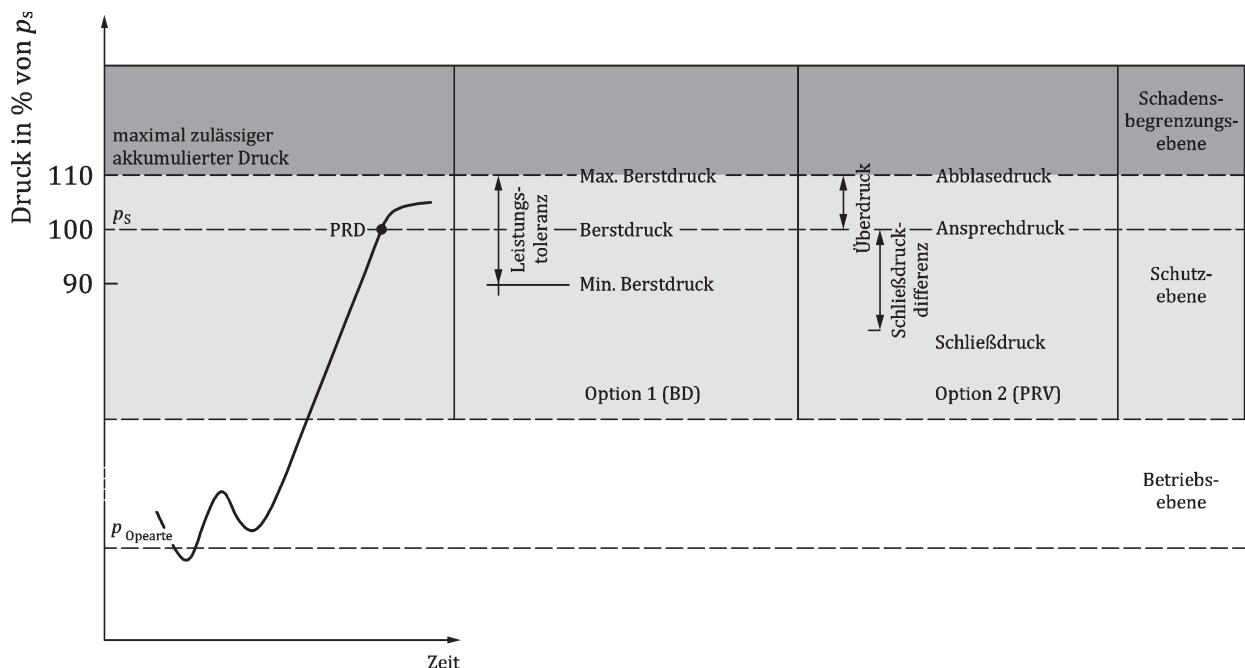


Bild 3— Beispiel für ein einstufiges Abblasesystem, entweder mit einer Berstscheibe (BD) als sich nicht wieder schließende Druckentlastungseinrichtung (Option 1) oder einem Druckentlastungsventil (PRV) als wieder verschließbare Druckentlastungseinrichtung (Option 2)

7.3 Mehrstufige Schutzkonzepte

7.3.1 Allgemeines

Nach EN ISO 4126-3:2006 sind Kombinationen von in Reihe geschalteten wieder verschließbaren und sich nicht wieder schließenden PRD, insbesondere die Kombination aus Druckentlastungsventilen (PRV) und Berstscheiben (BD), aus den folgenden Gründen zulässig:

- Schutz des PRV gegen Korrosion, Belagbildung oder Betriebsbedingungen, die die Funktionsfähigkeit beeinträchtigen können;
- Verhinderung von Undichtheit;
- Verhinderung des Verlusts der Inhalte des zu schützenden Systems nach dem Bersten der Berstscheibe.

Darüber hinaus sind mehrstufige Schutzkonzepte in Helium-Kryostaten zulässig, entweder in Reihe oder parallel:

- d) für die Heliumrückhaltung im Allgemeinen; und
- e) für den Schutz empfindlicher und teurer Ausrüstung.

Mehrstufige Schutzkonzepte dürfen in Helium-Kryostaten angewendet werden, bei denen eine primäre PRD die Druckabsicherung bei dem maximal zulässigen Druck p_s und auf Grundlage des größten anzunehmenden Störfalls (MCI) entsprechend der Risikobeurteilung in Abschnitt 6 vollständig erfüllt.

Bezüglich der primären PRD darf die sekundäre PRD entweder bei niedrigerem oder höherem Abblasedruck p_0 angewendet werden. Die sekundäre PRD darf die Funktionalität der primären PRD nicht beeinträchtigen.

Allerdings darf die sekundäre PRD die Festlegung des maximal zulässigen Drucks p_s in mehrstufigen Schutzkonzepten von Helium-Kryostaten beeinflussen. Die Werte von p_0 der primären und beziehungsweise der sekundären PRD müssen unter Berücksichtigung der Toleranzen und der Öffnungscharakteristiken sorgfältig festgelegt werden, um ein unbeabsichtigtes Ansprechen der primären PRD zu verhindern.

Bild 4 zeigt beispielhaft ein mehrstufiges Abblasesystem mit einer Berstscheibe (BD) als sich nicht wieder schließende primäre Druckentlastungseinrichtung und einem Druckentlastungsventil (PRV) als wieder verschließbare sekundäre Druckentlastungseinrichtung.

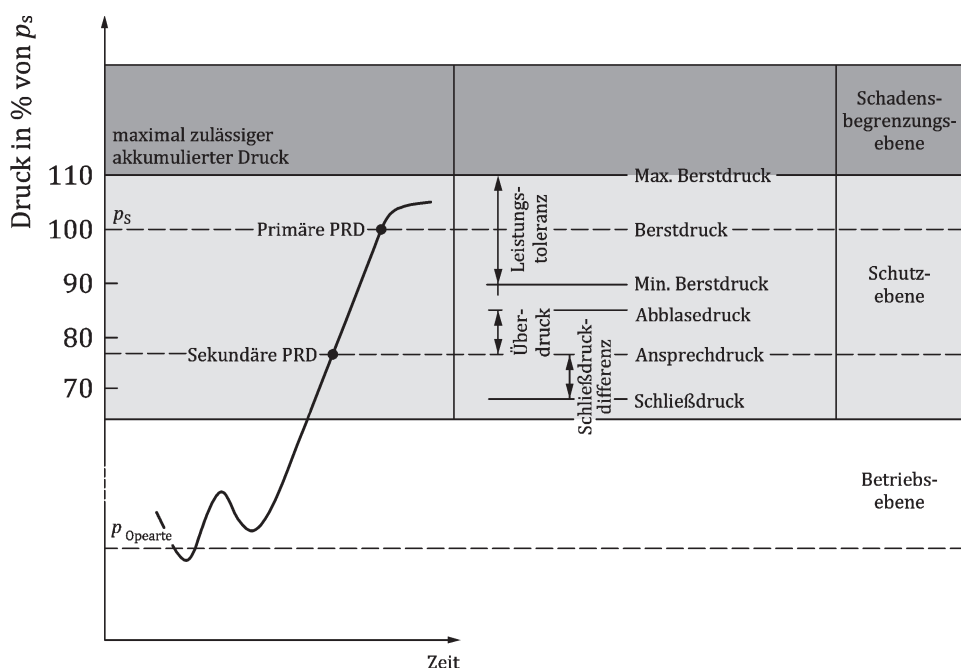


Bild 4— Beispiel für ein mehrstufiges Abblasesystem mit einer Berstscheibe (BD) als sich nicht wieder schließende primäre Druckentlastungseinrichtung und einem Druckentlastungsventil (PRV) als wieder verschließbare sekundäre Druckentlastungseinrichtung

7.3.2 Druckabsicherung von Hochdruck-Helium-Kryostaten

Hochdruck-Helium-Kryostate beziehen sich auf Systeme mit einem maximal zulässigen Druck, der größer oder gleich als der kritische Druck von Helium ist, d. h. $p_s \geq p_{\text{crit}} = 2,3 \text{ bar(a)} - p_{\text{amb}}$.

Mit Bezug auf 6.2.3 sind Quenche in Kryostaten mit supraleitenden Magneten zu berücksichtigen.

In Fällen, in denen Quenche oder andere Szenarien ein geringeres Risiko und eine geringere Wärmelast im Vergleich zum MCI hervorrufen, darf eine sekundäre PRD als Quenchentlastungsventil (QRV, en: Quench Relief Valve) mit einem Abblasedruck $p_0 < p_s$ verwendet werden.

Weitere Informationen sind in C.2.2 angegeben.

7.3.3 Druckabsicherung von Niederdruck-Helium-Kryostaten

Niederdruck-Helium-Kryostate beziehen sich auf Systeme mit einem maximal zulässigen Druck, der niedriger als der kritische Druck von Helium ist, d. h. $p_s < p_{\text{crit}} = 2,3 \text{ bar(a)} - p_{\text{amb}}$. In solchen Systemen ist es kaum möglich, eine sekundäre PRD bei $p_0 < p_s$ einzusetzen.

Zum Zweck der Schadensbegrenzung in Niederdruck-Helium-Kryostaten ist es zulässig, den Abblasedruck p_0 einer sekundären PRD auf den tatsächlichen Prüfdruck des Druckgerätes einzustellen. Immer wenn eine sekundäre PRD bei $p_0 \geq p_s$ ausgelöst wurde, muss das Druckgerät einer neuen Abnahmeprüfung unterzogen werden, die eine Druckprüfung umfassen darf.

Weitere Informationen sind in C.2.3 angegeben.

7.3.4 Druckabsicherung von unter dem Atmosphärendruck liegenden Helium-Kryostaten

Die primäre PRD von unter dem Atmosphärendruck liegenden Helium-Kryostaten darf durch Helium-Schutzeinrichtungen geschützt werden, die eine serielle Kombination von PRD bilden, um Leckagen in das Heliumsystem zu verhindern.

Es wird empfohlen, dass entweder die primäre oder die sekundäre PRD nicht wieder schließend ist.

Bei zwei in Reihe geschalteten wieder verschließbaren PRD muss die Funktionsfähigkeit der PRD-Kombination nachgewiesen werden.

Weitere Informationen sind in C.2.4 angegeben.

7.3.5 Druckabsicherung von He-II-Kryostaten

He-II-Kryostate dürfen zusätzliche Begrenzungen für den Abblase-Massenstrom enthalten, d. h. eine Lambda-Platte für die thermische Isolierung zwischen der He-II-Phase und der He-I-Phase.

Wenn eine Begrenzung eingebaut ist, muss sie mit einer Öffnung (z. B. einem Lambda-Ventil) ausgestattet sein, durch die das Helium entweichen kann, um eine Drucküberschreitung zu verhindern. Die Öffnung muss die gleiche Abblaseleistung sicherstellen wie die primäre PRD.

Weitere Informationen sind in C.2.5 angegeben.

7.3.6 Druckabsicherung von Ultra-Tiefkühlgerätesystemen

Ultra-Tiefkühlgerätesysteme können entweder ein ortsfester oder ein abnehmbarer Teil von Helium-Kryostaten sein, die die Förderung von ^3He im geschlossenen Kreislauf ermöglichen. Kühlgerätesysteme, die mit reinem ^3He arbeiten, können Temperaturen von $T \sim 300 \text{ mK}$ und Verdünnungskryostaten, die mit $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischungen arbeiten, bis zu $T \geq 2 \text{ mK}$ erreichen. Je nach Bauart des Kühlgerätes kann das ^3He entweder in einer integrierten Umwälzpumpe oder in einem externen Niederdruckbehälter gelagert werden.

Ultra-Tiefkühlgerätesysteme können auf verschiedene Weise arbeiten. Konfigurationen mit einem blockierten Joule-Thomson-Ventil an der Eintrittsseite definieren häufig den größten anzunehmenden Störfall. Diese Art von System kann sowohl einem hohen Eintrittsdruck von $p \geq p_{\text{crit}} = 2,3 \text{ bar(a)}$ als auch einem niedrigen Austrittsdruck in der Größenordnung von mbar (a) ausgesetzt sein.

Ultra-Tiefkühlgerätesysteme müssen mindestens mit einer wieder verschließbaren primären PRD ausgestattet sein.

Das sekundäre PRD muss es der ^3He - oder $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischung ermöglichen, verlustfrei und sicher zu ihrer Lagerung zurückzukehren.

Weitere Informationen sind in C.2.6 angegeben.

8 Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen

8.1 Verfahren zur Bemessung von Druckentlastungseinrichtungen

Die Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen (PRD) basiert auf der massenspezifischen Energie- und Impulserhaltung sowie der Kontinuitätsgleichung für eindimensionale, reibungsfreie, kompressible, stationäre und adiabate Fluidströmung durch kurze Düsen, wobei Abweichungen vom idealen Fluidverhalten durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden. In der Literatur sind verschiedene Modelle verfügbar, für die Dimensionierung von PRD muss jedoch das Homogene Gleichgewichtsmodell (HEM, en: Homogeneous Equilibrium Model oder G-Modell) [29] verwendet werden, da es für den gesamten für Helium-Kryostate relevanten Druck- und Temperaturbereich gültig ist.

Ein Flussdiagramm, das den Dimensionierungsprozess zusammenfasst, ist in 5.2 angegeben.

ANMERKUNG Ein Vergleich zu den dimensionsabhängigen Gleichungen in EN ISO 4126-7:2013 und in EN ISO 21013-3:2016 und die Umrechnungen werden in D.1 erläutert.

8.2 Berechnung des Mindest-Abblasequerschnitts

Die allgemeine Gleichung für die Berechnung des Mindest-Abblasequerschnitts A_{th} (der sogenannte Hals) einer PRD lautet

$$A_{\text{th}} = \frac{\dot{M}(p_0, v_0)}{\dot{m}_{\text{th}}(p_{0,x}, s_{0,x}) \times K_{\text{dr}}} \quad (1)$$

Dabei ist

- A_{th} der Mindest-Abblasequerschnitt der PRD in m^2 ;
- p_0, v_0 der Abblasedruck p_0 in bar(a) und das spezifische Volumen v_0 des Heliums innerhalb des Kryostats in m^3/kg , wie in 8.3 festgelegt;
- $p_{0,x}, s_{0,x}$ der Abblasedruck ($p_{0,x}$) und die spezifische Entropie ($s_{0,x}$) in J/kg/K , angepasst an den Druckverlust und den Temperaturanstieg in den Rohrleitungen stromaufwärts der PRD, wie in 8.5 festgelegt;
- $\dot{M}$ der Abblase-Massenstrom in kg/s , wie in 8.4 festgelegt;
- $\dot{m}_{\text{th}}$ die Massenstromdichte im Hals in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$, wie in 8.5 festgelegt; und
- K_{dr} die dimensionslose zuerkannte Ausflussziffer, wie in 8.6 festgelegt.

ANMERKUNG 1 Der Index „0“ bezieht sich auf die Abblasebedingungen des Kryostaten, „0,x“ bezieht sich auf die Fluidzustände stromaufwärts der PRD, angepasst an Druckverlust und Temperaturanstieg in den Rohrleitungen stromaufwärts, und „th“ bezieht sich auf die Zustände im Hals. Daher wird der Mindest-Abblasequerschnitt als A_{th} gekennzeichnet, im Gegensatz zur Nomenklatur in EN ISO 4126-7:2013 und EN ISO 21013-3:2016, in denen A_0 als Symbol für den Mindest-Abblasequerschnitt verwendet wird.

ANMERKUNG 2 Wenn keine Rohrleitungen eingebaut sind, d. h. die PRD direkt auf dem Kryostaten montiert ist, sind die Abblasebedingungen „0“ gleich den angepassten Abblasebedingungen „0,x“.

8.3 Berechnung der Fluidzustandseigenschaften unter Abblasebedingungen

8.3.1 Berechnung des Abblasedrucks

Der Abblasedruck p_0 ergibt sich aus dem Schutzkonzept in Abschnitt 7. Bei primären PRD muss der Abblasedruck p_0

$$p_0 \leq (1,1 \times p_s) + p_{\text{amb}} \quad (2)$$

betragen.

Bei Verwendung einer sekundären PRD in einem mehrstufigen Schutzkonzept nach 7.3 muss der Abblasedruck p_0 der sekundären PRD so gewählt werden, dass die Funktion der primären PRD nicht beeinträchtigt wird.

Bei Verwendung von Druckentlastungsventilen als wieder verschließbare PRD ist der Abblasedruck größer oder gleich dem Ansprechdruck plus Öffnungsdruckdifferenz.

$$p_0 \geq (p_{\text{set}} + p_{\text{amb}}) + \Delta p_{\text{over}} \quad (3)$$

Bei Verwendung von Berstscheiben als sich nicht wieder schließende PRD ist der Abblasedruck gleich dem maximalen Berstdruck

$$p_0 \leq p_{\text{burst,max}} + p_{\text{amb}} \quad (4)$$

Bei Verwendung von sekundären PRD zur Schadensbegrenzung in Niederdruck-Helium-Kryostaten (7.3.3) muss der Abblasedruck kleiner oder gleich dem tatsächlichen Prüfdruck sein, dem das Druckgerät ausgesetzt war.

$$p_0 \leq p_{\text{test}} + p_{\text{amb}} \quad (5)$$

8.3.2 Berechnung des spezifischen Volumens

8.3.2.1 Spezifisches Anfangsvolumen

Das spezifische Anfangsvolumen v_i hängt von der Füllmenge ab und ist festgelegt als

$$v_i = \frac{V_{\text{He}}}{M_{\text{He}}} \quad (6)$$

Bei Zweiphasensystemen muss das spezifische Anfangsvolumen aus den Massen sowohl in der Dampfphase als auch in der Flüssigphase bestimmt werden.

8.3.2.2 Spezifisches Volumen bei unterkritischem Abblasedruck

Mit Bezug auf Bild A.1 kann der Fluidzustand stromaufwärts der PRD bei unterkritischem Abblasedruck ($p_0 < p_{\text{crit}}$) entweder flüssig, zweiphasig oder dampfförmig sein, je nach dem isochoren Prozesspfad, der dem spezifischen Anfangsvolumen v_i folgt.

Während des Abführens nimmt das spezifische Volumen zu. Ein beispielhafter Prozesspfad ist in Bild 5 (a) dargestellt. Die Entwicklung des Mindest-Abblasequerschnitts je Watt Wärmelast muss unter Berücksichtigung aller relevanten Eintrittsbedingungen in die PRD während des Abführens, beginnend mit

dem spezifischen Anfangsvolumen v_i , berechnet werden, siehe Bild 5 (b). Für die Dimensionierung der PRD muss der ungünstigste Fall mit dem maximalen Wert A_{th} angenommen werden.

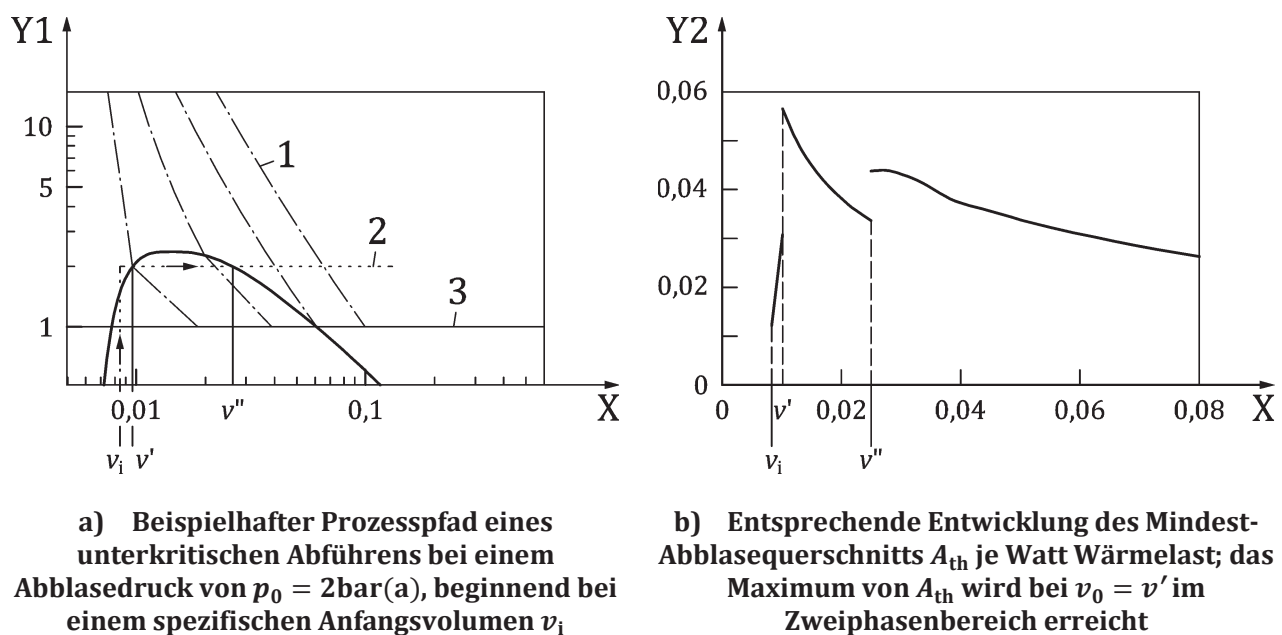
$$v_0 = v | \max_{v \geq v_i} [A_{th}(v)] \quad (7)$$

mit

$$T_0 = f(p_0, v_0) \quad (8)$$

Wenn das spezifische Volumen v_0 nicht bestimmt werden kann, ergibt $v_0 = v'$ den maximalen Wert von A_{th} .

ANMERKUNG ISO 21013-3 verwendet $v_0 = v''$, was die Möglichkeit flüssiger oder zweiphasiger Eintrittsbedingungen bei kleinen spezifischen Anfangsvolumina v_i (d.h. bei großen Anfangsfüllmengen) nicht berücksichtigt.



Legende

X spezifisches Volumen v [m^3/kg]
Y1 Druck p [bar(a)]
1 konstante Entropie
2 $p_0 = 2 \text{ bar(a)}$
3 p_{amb}

X spezifisches Volumen v [m^3/kg]
Y2 $A_{th}/\dot{Q}$ [mm^2/W]

Bild 5

8.3.2.3 Spezifisches Volumen bei kritischem und überkritischem Abblasedruck

Das spezifische Volumen v bei kritischem und überkritischem Abblasedruck $p_0 \geq p_{\text{crit}}$ wird angegeben durch

$$v = f(p_0, T_0) \quad (9)$$

dabei ist

T_0 die Temperatur in $\left\{ \begin{array}{l} v = f(p_0, T_0) \\ h = f(p_0, T_0) \end{array} \right\}$, wenn der Koeffizient

$$\frac{\sqrt{v}}{v \times \left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_{p_0}} \quad (10)$$

sein Maximum erreicht [18].

ANMERKUNG Siehe Beispiel in D.5.

Abhängig vom spezifischen Anfangsvolumen v_i müssen zwei Fälle unterschieden werden:

- a) $v_i < v$: v_0 wird durch Gleichung (9) mit dem Maximum des Ausdrucks (10) berechnet
- b) $v_i \geq v$: $v_0 = v_i$

ANMERKUNG Während des Abführens nimmt das spezifische Volumen kontinuierlich zu und Fall a) entspricht dem Zustand, der den maximalen Abblasequerschnitt erfordert. Im Fall b) ist die Verwendung von $v_0 = v_i$ gerechtfertigt, da das spezifische Volumen nicht unter v_i absinken kann.

8.4 Berechnung des Abblase-Massenstroms

8.4.1 Allgemeines

Für die Dimensionierung einer PRD muss der Abblase-Massenstrom $\dot{M}$ aus der Energiebilanz berechnet werden, die auf ein offenes System bei konstantem Abblasedruck p_0 angewendet wird

$$\dot{M} = \frac{\dot{Q}}{\Delta h} \quad (11)$$

Dabei ist

$\dot{M}$ der Abblase-Massenstrom in kg/s;

$\dot{Q}$ die Wärmelast in W für die relevanten Szenarien nach 8.4.2 bis 8.4.6; und

Δh der spezifische Wärmeeintrag in das Helium in J/kg nach 8.4.7.

Alle für die Berechnung des Massenstroms nach Gleichung (11) relevanten Schritte müssen unter Berücksichtigung der Abblasebedingungen des Kryostaten (Index „0“) durchgeführt werden.

Für die Vielzahl spezifischer und fortschrittlicher Auslegungslösungen von Helium-Kryostaten kann kein Gesamtalgorithmus zur Berechnung der Wärmelast $\dot{Q}$ festgelegt werden. Die Bestimmung der Wärmelast für einen bestimmten Störfall darf daher auf folgenden Grundlagen erfolgen:

- dem in 8.4.2 bis 8.4.6 angegebenen Algorithmus;
- den in Anhang B aufgeführten Angaben aus der Fachliteratur;
- den unveröffentlichten experimentellen Daten, die für die spezielle Kryostat-Auslegung erhalten wurden, einschließlich detaillierter Dokumentation; oder
- der numerischen Modellierung der Prozesse während des Störfall-Szenarios, einschließlich einer detaillierten Dokumentation.

8.4.2 Verlust des Isoliervakuums

Der Verlust des Isoliervakuums kann für die Dimensionierung der PRD des Helium-Kryostaten relevant sein.

Die durch den Verlust des Isoliervakuums $\dot{Q}_{LIV}$ verursachte Wärmelast ist definiert als

$$\dot{Q}_{LIV} = \dot{q}_{LIV} \times A_c \quad (12)$$

Die maximale Wärmestromdichte $\dot{q}_{LIV}$ zu freiliegenden vakuumisolierten kryogenen Oberflächen ohne Superisolation (MLI) bei freier Konvektion und relevant für die Dimensionierung von PRD sind:

— Unterkritischer Abblasedruck $p_0 < p_{crit}$

$$\dot{q}_{LIV} = 3,8 \text{ W/cm}^2 \quad (13)$$

wie angegeben in [19].

— Kritischer und überkritischer Abblasedruck $p_0 \geq p_{crit}$

$$\dot{q}_{LIV} = 2,0 \text{ W/cm}^2 \quad (14)$$

Bei einer Zwangskonvektion sowohl bei unter- als auch bei überkritischem Abblasedruck sollte eine numerische Modellierung der Wärmestromdichte durchgeführt werden.

Bei MLI-isolierten Oberflächen hängen die Werte von $\dot{q}_{LIV}$ von der Bauart und der jeweiligen Implementierung der MLI ab. In Ermangelung spezifischer experimenteller Daten kann die Wärmestromdichte als eine Funktion der Anzahl der Lagen der MLI verwendet werden, wie in EN ISO 21013-3 festgelegt. Weitere Beispielwerte sind in Anhang B angegeben.

In Fällen, in denen die Wärmestromdichte durch das Verhältnis zwischen der Leckagefläche und der betroffenen kryogenen Oberfläche nach Gleichung (15) begrenzt ist, darf das Verfahren nach 8.4.3 angewendet werden.

8.4.3 Verlust von Strahlleitungsvakuum

Der Verlust von Strahlleitungsvakuum kann für die Dimensionierung der PRD des Helium-Kryostaten relevant sein.

Bei Verlust des Strahlleitungsvakuums durch Belüftung mit atmosphärischer Luft ergibt die im Helium übertragene Wärmestromdichte aufgrund der fehlenden thermischen Isolation maximale Werte. Die in 8.4.2 angegebenen Werte der Wärmestromdichte für freiliegende vakuumisolierte Oberflächen müssen angewendet werden, vorausgesetzt, dass das Belüften mit Luft in den Vakuumraum ausreicht, um den Maximalwert zu erreichen.

Bei kleinen Leckagen in das Strahlleitungsvakuum, bei denen das Verhältnis zwischen der Leckagefläche und der betroffenen kryogenen Oberfläche

$$\frac{A_{leak}}{A_c 10^{-4}} < 8,0 \times 10^{-4} \quad (15)$$

folgt, ist die Wärmelast durch die im belüftenden Luftstrom gespeicherte Energie begrenzt. Das folgende Verfahren muss in diesem Fall angewendet werden:

1. Es wird Größe der Leckagefläche im Störfall als Ergebnis der Risikobeurteilung bestimmt.

2. Der Massenstrom durch die Leckage (abhängig davon, ob die Strömung unterkritisch oder kritisch ist) wird nach der Bernoulli-Gleichung für adiabate und kompressible Strömungen durch kurze Düsen berechnet:

$$\dot{M}_{\text{LBV}} = A_{\text{leak}} \times \sqrt{2 \times 10^5 \frac{p_{\text{amb}}}{v_{\text{amb}}}} \times \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{k-1} \times \left(\left(\frac{p_v}{p_{\text{amb}}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_v}{p_{\text{amb}}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)}, & \frac{p_v}{p_{\text{amb}}} < \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \sqrt{\frac{k}{k+1} \times \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}}, & \frac{p_v}{p_{\text{amb}}} \geq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (16)$$

dabei ist k der isentrope Ausdehnungskoeffizient der Umgebungsluft bei T_{amb} und p_{amb} .

3. Es wird die spezifische Enthalpie-Differenz (J/kg) von feuchter Luft Δh_{air} , einschließlich der fühlbaren Wärme und der latenten Wärme sowohl der Verdampfung als auch der Sublimation, bestimmt.

ANMERKUNG 1 Tabelle B.2 in B.2 enthält eine Liste von Werten von Δh_{air} für einen Bereich kryogener Wandtemperaturen, die als gleich der Heliumtemperatur im Inneren des Kryostaten angesehen werden können.

4. Die an die Wand der Strahlleitung abgeführte Wärmelast wird berechnet, indem die spezifische Enthalpie-Differenz mit dem Massenstrom multipliziert wird.

$$\dot{Q}_{\text{LBV}} = \Delta h_{\text{air}} \times \dot{M}_{\text{LBV}} \quad (17)$$

ANMERKUNG 2 Der Wert in (15) basiert auf Experimenten in der Prüfanlage [27].

ANMERKUNG 3 Der Faktor 10^{-4} im Nenner von (15) entspricht der Umrechnung von cm^2 in m^2 .

ANMERKUNG 4 Der Faktor 10^5 in Gleichung (16) entspricht der Umrechnung von bar in Pa.

8.4.4 Quench einer supraleitenden Vorrichtung

Ein Quench einer supraleitenden Vorrichtung (SCD, en: superconducting device) kann für die Dimensionierung einer PRD in einem Helium-Kryostaten relevant sein.

Um das Risiko einer durch einen Quench verursachten Drucküberschreitung zu verringern, sollte das Flüssigkeits-zu-Gas-Verhältnis von Helium im Volumen auf ein Minimum reduziert werden und/oder es sollte ein System zur Extraktion elektromagnetischer Energie (z. B. Dump-Widerstand) implementiert werden.

Die durch den Quench eines SCD verursachte Wärmelast des Heliumsystems ist definiert als

$$\dot{Q}_{\text{quench}} = \dot{q}_{\text{quench}} \times A_{\text{scd}} \quad (18)$$

Die auf das Helium übertragene Wärmestromdichte beträgt

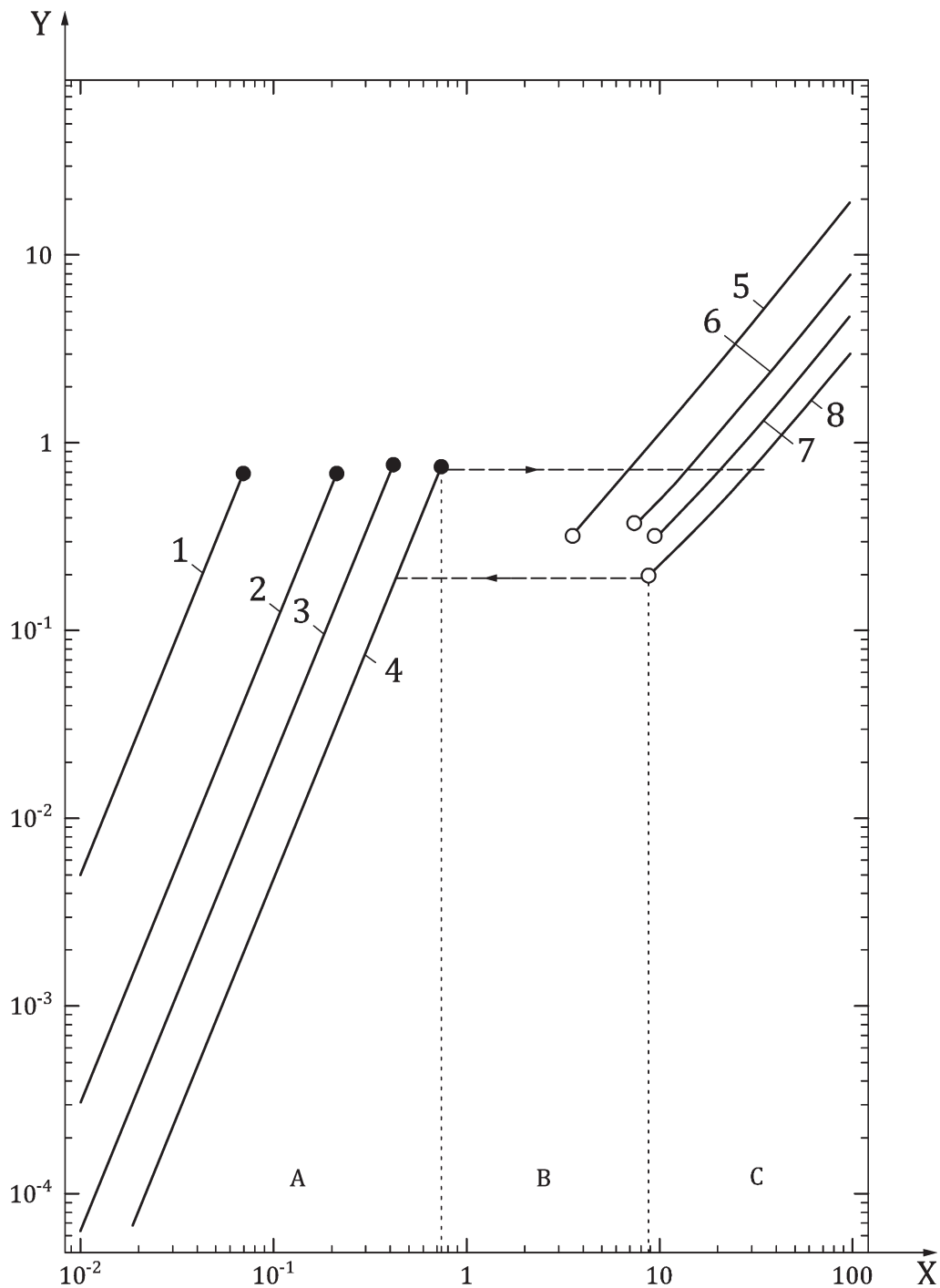
$$\dot{q}_{\text{quench}} = f[p_0, (T_{\text{scd}} - T_0)] \quad (19)$$

Dabei ist

p_0 der Abblasedruck nach 8.3.1;

T_{scd} die Oberflächentemperatur der supraleitenden Vorrichtung nach einem Quench, in K; und

T_0 die Abblasetemperatur in K.



Legende

X Temperaturdifferenz ($T_{\text{scd}} - T_0$) in K

Y1 $\dot{q}_{\text{quench}}$ in W/cm²

1 = 2,0 bar(a)

2 = 1,5 bar(a)

3 = 1,0 bar(a)

4 = 0,5 bar(a)

5 = 2,0 bar(a)

6 = 1,5 bar(a)

7 = 1,0 bar(a)

8 = 0,5 bar(a)

A Blasensiedenregime

B Metastabiler Übergangsbereich

C Filmsiedenregime

Bild 6— Wärmestromdichte $\dot{q}_{\text{quench}}$ gegenüber Temperaturdifferenz bei unterkritischem Abblasedruck

$$T_0 = T_s(p_0) \text{ im Fall } p_0 < p_{\text{crit}} \quad (20)$$

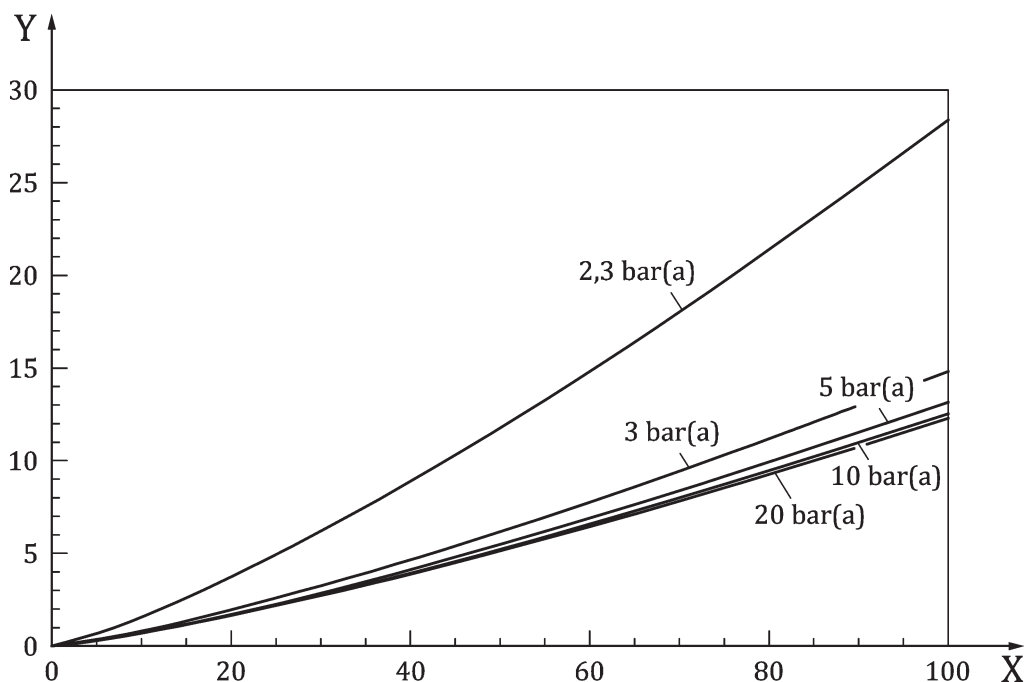
$$T_0 = T_0 \text{ nach 8.3.2.3 im Fall } p_0 \geq p_{\text{crit}} \quad (21)$$

Bei unterkritischem Abblasedruck $p_0 < p_{\text{crit}}$ und mit T_0 nach Gleichung (20) muss die Wärmestromdichte $\dot{q}_{\text{quench}}$ aus Bild 6 bestimmt werden, wobei die Entwicklung der Oberflächentemperatur T_{scd} zusammen mit dem Konstrukteur der supraleitenden Vorrichtung bestimmt werden sollte. Blasensieden erfolgt bis zur maximalen Wärmestromdichte des Blasensiedens, gefolgt von einem spontanen Übergang zum Filmsieden [29].

Bei kritischem und überkritischem Abblasedruck $p_0 \geq p_{\text{crit}}$ muss bei freier Konvektion die Wärmestromdichte $\dot{q}_{\text{quench}}$ aus Bild 7 bestimmt werden, wobei die charakteristische Länge L_c des Wärmeübergangsproblems entsprechend der spezifischen Geometrie festgelegt werden muss [11].

$$L_c = \frac{A_{\text{scd}}}{P_{\text{proj}}} \quad (22)$$

Bei einer Zwangskonvektion sowohl bei unter- als auch bei überkritischem Abblasedruck sollte eine numerische Modellierung der Wärmestromdichte durchgeführt werden.



Legende

X Temperaturdifferenz ($T_{\text{scd}} - T_0$) in K

Y $\dot{q}_{\text{quench}}/L_c^{-0,266}$ in $\text{W}/\text{cm}^{1,734}$

Bild 7— Wärmestromdichte $\dot{q}_{\text{quench}}$ je charakteristischer Länge $L_c^{-0,266}$ gegenüber Temperaturdifferenz bei überkritischem Abblasedruck bei freier Konvektion

ANMERKUNG 1 Der Exponent der charakteristischen Länge L_c ergibt sich aus der verwendeten Korrelation für den Wärmeübergang durch freie Konvektion auf überkritisches Helium [17].

ANMERKUNG 2 Der erwartete überkritische Wärmeübergang nimmt mit zunehmendem Druck aufgrund der Abhängigkeit des Abblasedrucks von der Abblasetemperatur und des Verhaltes der Heliumfluideigenschaften im betrachteten Bereich ab. [17]

BEISPIEL Bei einer Temperaturdifferenz von $T_{\text{scd}} - T_0 = 40 \text{ K}$ bei 3 bar(a) ergibt sich in Bild 7 eine Wärmestromdichte je charakteristischer Länge von $4,5 \text{ W/cm}^{1,734}$. Eine charakteristische Länge von $L_c = 10 \text{ cm}$ ergibt eine Wärmestromdichte von $4,5 \text{ W/cm}^{1,734} \times (10 \text{ cm})^{-0,266} = 2,4 \text{ W/cm}^2$.

Bei fehlender detaillierter Magnetmodellierung darf eine maximale Wärmestromdichte von

$$\dot{q}_{\text{quench,max}} = 1,0 \text{ W/cm}^2 \quad (23)$$

sowohl für unter- als auch überkritische Abblasedrücke angenommen werden.

8.4.5 Leckage von kryogenem Fluid

Kryogene Fluide, die in den Vakuumraum entweichen, können für die Dimensionierung der PRD des Vakuumbehälters von Bedeutung sein.

Die folgenden spezifischen Szenarien müssen berücksichtigt werden:

- a) Heliumleck aus dem Heliumkreislauf oder aus einem heliumgekühlten thermischen Schild,
- b) Stickstoffleck aus einem stickstoffgekühlten thermischen Schild.

Die Szenarien a) und b) können nur dann zu einem Drucküberschreitungszenario führen, wenn der Druck p den maximal zulässigen Druck des Vakuumbehälters $p_{s,v}$ überschreitet, wobei davon ausgegangen wird, dass die Gesamtmenge des kryogenen Fluids im System im Vakuumbehälter verdampft und auf Umgebungstemperatur erwärmt wird.

$$p = \frac{M_c \times R_c \times T_{\text{amb}}}{V_v} \geq p_{s,v} \quad (24)$$

Der Abblase-Massenstrom $\dot{M}$ im Falle eines Lecks kryogenen Fluids muss durch Anwendung der Bernoulli-Gleichung für adiabate und kompressible Strömung durch kurze Düsen berechnet werden, in Abhängigkeit davon, ob die Strömung unterkritisch oder kritisch ist:

$$\dot{M}_{\text{lcf}} = A_{\text{leak}} \times K_d \times \sqrt{2 \times 10^5 \frac{p_c}{v_c}} \times \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{k-1} \times \left(\left(\frac{p_v}{p_c} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_v}{p_c} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)}, & \frac{p_v}{p_c} < \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \sqrt{\frac{k}{k+1} \times \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}}, & \frac{p_v}{p_c} \geq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (25)$$

Dabei ist

k der isentrope Ausdehnungskoeffizient des kryogenen Fluids bei T_c und p_c und

K_d die Ausflussziffer der Leck-Öffnung im Bereich von 0 bis 1.

ANMERKUNG Der Faktor 10^5 in Gleichung (25) entspricht der Umrechnung von bar in Pa.

Die maximale Leckgröße A_{leak} sollte durch die Auslegung begrenzt sein und muss in der Risikobeurteilung nach Abschnitt 6 geschätzt werden.

8.4.6 Dielektrischer Durchschlag

Ein dielektrischer Durchschlag kann für die Dimensionierung der PRD des Vakuumbehälters relevant sein.

Die Bestimmung der Größe der Perforation nach einem Lichtbogen muss unter Berücksichtigung eines konservativen Szenarios geschätzt werden, bei dem die thermische Energie vollständig auf einen einzigen Punkt auf der Oberfläche des kryogenen Kreislaufts übertragen wird, wodurch das Schmelzen einer Öffnung in der Behälter-/Rohrleitungswand verursacht wird:

$$A_{\text{leak}}(t) = \frac{E_{\text{wall}}(t)}{\left[\left(\int_{T_{\text{i,He}}}^{T_{\text{fusion}}} c(T_{\text{wall}}) dT_{\text{wall}} \right) + L_{\text{fusion}} \right] \times \rho \times z} \quad (26)$$

Als konservative Schätzung entspricht die Lichtbogenspannung (U_{ion}) bei kurzen Lichtbögen (einige mm) der Ionisationsspannung des Gases. Bei Helium beträgt die Ionisationsspannung 24,6 V [30]. Zur Berechnung der maximalen auf die Wand abgeführten thermischen Kraft

$$E_{\text{max}}(t) = \int_0^t U_{\text{ion}} \times I(t) \times dt \quad (27)$$

kann die elektrische Stromschwankung $I(t)$ im Lichtbogen als gleich der Entwicklung des elektrischen Stroms während einer schnellen Entladung der supraleitenden Vorrichtung angesehen werden.

Im Falle eines Lichtbogens wird ein Bruchteil der Lichtbogenenergie $E_{\text{max}}(t)$ als thermische Energie auf die Behälter-/Rohrleitungswand $E_{\text{wall}}(t)$ übertragen. Der Prozentsatz sollte von den Magnetexperten von Fall zu Fall geschätzt werden. Weitere Informationen sind in B.5 angegeben.

Basierend auf der mit Gleichung (26) berechneten Leckgröße muss der Abblase-Massenstrom $\dot{M}$ nach Gleichung (44) berechnet werden.

8.4.7 Berechnung des spezifischen Wärmeeintrags

8.4.7.1 Allgemeines

Zur Berechnung des Abblase-Massenstroms aus dem Helium-Kryostaten nach Gleichung (11) lautet der allgemeine Ausdruck für den spezifischen Wärmeeintrag sowohl in Einphasen- als auch in Zweiphasenfluiden [29]

$$\Delta h = v_0 \times \left(\frac{\partial h}{\partial v} \right)_{p_0} \quad (28)$$

Dabei ist

v_0 das spezifische Volumen in m^3/kg nach 8.3.2; und

$\left(\frac{\partial h}{\partial v} \right)_{p_0}$ die partielle Ableitung der Enthalpie in Form des spezifischen Volumens in J/m^3 bei konstantem Abblasedruck p_0 .

8.4.7.2 Spezifischer Wärmeeintrag bei unterkritischem Abblasedruck

Bei unterkritischem Abblasedruck ($p_0 < p_{\text{crit}}$) mit koexistierenden Flüssigkeits- und Dampfphasen darf die partielle Ableitung $(\partial h / \partial v)_{p_0}$ in eine Differenzengleichung umgewandelt werden, die folgendes ergibt

$$\Delta h = v_0 \times \left(\frac{h'' - h'}{v'' - v'} \right)_{p_0} \quad (29)$$

Dabei ist

- v_0 das spezifische Volumen in m^3/kg nach 8.3.2.2;
- h'' die spezifische Enthalpie von gesättigtem Dampf in J/kg beim Abblasedruck p_0 ;
- h' die spezifische Enthalpie von gesättigter Flüssigkeit in J/kg beim Abblasedruck p_0 ;
- v'' das spezifische Volumen von gesättigtem Dampf in m^3/kg beim Abblasedruck p_0 ; und
- v' das spezifische Volumen von gesättigter Flüssigkeit in m^3/kg beim Abblasedruck p_0 .

Bei unterkritischem Abblasedruck ($p_0 < p_{\text{crit}}$) mit entweder unterkühlter Flüssigkeit oder überhitztem Dampf muss die allgemeine Gleichung (28) bewertet werden.

8.4.7.3 Spezifischer Wärmeeintrag bei kritischem und überkritischem Abblasedruck

Bei kritischem und überkritischem Abblasedruck ($p_0 \geq p_{\text{crit}}$) muss Gleichung (28) für den spezifischen Wärmeeintrag beim Abblasedruck p_0 und bei der Abblasetemperatur bewertet werden.

$$T_0 = f(p_0, v_0) \quad (30)$$

Dabei ist

- p_0 der Abblasedruck nach 8.3.1; und
- v_0 das spezifische Volumen in m^3/kg nach 8.3.2.3.

ANMERKUNG Nach 8.3.2.3 sind zwei Fälle möglich.

8.5 Berechnung der Massenstromdichte

8.5.1 Allgemeines

Mit Bezug auf Gleichung (1) ist die Massenstromdichte $\dot{m}_{\text{th}}$ durch eine PRD durch die Strömungsbedingungen im Hals begrenzt. Für eindimensionale, stationäre und adiabate Strömungen, bei denen die hydrostatische potentielle Energie und die kinetische Energie stromaufwärts der PRD vernachlässigt werden, wird die Massenstromdichte $\dot{m}_{\text{th}}$ allgemein definiert als

$$\dot{m}_{\text{th}} = \frac{\sqrt{2 \times (h_{0,x} - h_{\text{th}})}}{v_{\text{th}}} \quad (31)$$

ANMERKUNG 1 Falls kein Einfluss der Rohrleitung stromaufwärts vorliegt, $h_{0,x} = h_0 = f(p_0, T_0)$.

Die angepasste spezifische Enthalpie ist definiert als

$$h_{0,x} = f(p_{0,x}, s_{0,x}) \quad (32)$$

Dabei ist

- $p_{0,x}$ der angepasste Abblasedruck nach 8.5.2; und
- $s_{0,x}$ die angepasste spezifische Entropie in J/kg/K .

Die angepasste spezifische Enthalpie wird berechnet als

$$s_{0,x} = f(p_{0,x}, v_{0,x}) \quad (33)$$

Dabei ist

$v_{0,x}$ das angepasste spezifisches Volumen, definiert als

$$v_{0,x} = f(p_{0,x}, T_{0,x}) \quad (34)$$

Dabei ist

$T_{0,x}$ die angepasste Abblasetemperatur nach 8.5.2.

Die spezifische Enthalpie h_{th} und das spezifische Volumen v_{th} im Hals werden angegeben als:

$$v_{th} = f(p_{th}, s_{0,x}) \quad (35)$$

$$h_{th} = f(p_{th}, s_{0,x}) \quad (36)$$

Dabei ist

p_{th} der Druck im Hals in $\left\{ \begin{array}{l} v = f(p, s_{0,x}) \\ h = f(p, s_{0,x}) \end{array} \right\}$, wenn die Massenstromdichte

$$\dot{m} = \frac{\sqrt{2 \times (h_{0,x} - h(p, s_{0,x}))}}{v(p, s_{0,x})} \quad (37)$$

ihren Maximalwert innerhalb des Intervalls p von $[p_b; p_0]$ erreicht.

Dabei ist

p_b der Gegendruck stromabwärts der PRD nach Gleichung (40).

ANMERKUNG 1 Siehe Beispiel in D.5.

ANMERKUNG 2 Die Ausdehnung ab stromaufwärts der PRD zum Hals wird als ein isentroper Prozess betrachtet [27], [28], der die Enthalpie h_{th} und das spezifische Volumen v_{th} im Hals definiert. Das HEM-Verfahren besteht darin, den Druck p in dem Intervall $[p_b; p_0]$ zu suchen, für das die Massenstromdichte, $\dot{m}$, maximal ist. Der Druck im Hals p_{th} entspricht dem Druck beim maximalen $\dot{m}$, der folglich $\dot{m}_{th}$ entspricht.

Die Strömung im Hals der PRD ist

a) begrenzt im Falle von $(p_{th} > p_b)$, oder

b) Unterschall im Fall von $p_{th} = p_b$.

ANMERKUNG Einige Experimente mit Wasser oder Kohlenwasserstoffen haben gezeigt, dass die gemessene Massenstromdichte höher ist als die mit diesem Modell berechnete Massenstromdichte $\dot{m}_{th}$; demzufolge ergibt die HEM konservative Ergebnisse. [10] [20] [25]

8.5.2 Einfluss der Rohrleitung stromaufwärts

Druckverlust und Temperaturanstieg in der Rohrleitung stromaufwärts der PRD beeinflussen das spezifische Volumen des Heliums im Hals und müssen daher bei der Berechnung ihrer Abblaseleistung berücksichtigt werden.

Die Rohrleitung stromaufwärts sollte so kurz wie möglich sein, um negative Auswirkungen auf Druckverlust, Temperaturanstieg und Leistung der PRD zu vermeiden.

Die Nennweite der Rohrleitung stromaufwärts muss gleich oder größer sein als die Nennweite des Halses der PRD.

Bei (wieder verschließbaren) PRV kann der Druckverlust in der Rohrleitung stromaufwärts zu instabilem Betrieb wie Pumpen oder Flattern führen, was das Risiko von Drucküberschreitung aufgrund einer verringerten Abblaseleistung beinhaltet. Daher sollte der Druckverlust in der Rohrleitung stromaufwärts nicht mehr als 3 % der Differenz zwischen Abblasedruck und Fremdgedruck ($p_0 - p_{bs}$) betragen. Wenn dieser Grenzwert nicht eingehalten werden kann, sollte das PRV z. B. mit Dämpfern oder anderen Arten von Verriegelungen ausgestattet sein, um ein unbeabsichtigtes Schließen und damit einen instabilen Betrieb zu verhindern.

Der Druckverlust Δp in der Rohrleitung stromaufwärts muss mit den üblichen technischen Gleichungen berechnet werden, wobei der maximale Ausflussmassenstrom mit der Ausflussziffer K_d nach 8.6 und nicht die zuerkannte Ausflussziffer K_{dr} nach Gleichung (41) verwendet werden muss. Der durch den Druckverlust angepasste Abblasedruck für die Berechnung der Massenstromdichte nach 8.5.1 ist definiert als

$$p_0 = p_0 - \Delta p \quad (38)$$

Der Wärmeübergang in die Rohrleitung stromaufwärts ergibt eine angepasste Abblasetemperatur $T_{0,x}$, die zur Berechnung der Massenstromdichte nach 8.5.1 verwendet werden muss.

Der Temperaturanstieg sollte abschnittsweise für den konvektiven Wärmeübergang der inneren Strömung durch ein Rohr mit festgelegter Oberflächentemperatur berechnet werden. Bei einphasiger Strömung in der Rohrleitung stromaufwärts wird die Austrittstemperatur eines Rohrabschnitts i angegeben als

$$T_{0,x,i} = T_{w,i} - \left(\frac{T_{w,i} - T_{0,in,i}}{\exp \left[\frac{\bar{k}_i \times P_i \times l_i}{\dot{M} \times c_{p,i}} \right]} \right) \quad (39)$$

Dabei ist

$T_{w,i}$ die Oberflächentemperatur des Rohrabschnitts i ;

$T_{0,in,i}$ die Eintrittstemperatur des Heliums in den Rohrabschnitt i ;

$\bar{k}_i$ die durchschnittliche Wärmeübergangszahl zum Heliumstrom im Rohrabschnitt i in $W/(m^2K)$, berechnet durch allgemeine technische Korrelationen;

P_i der Umfang des Rohrabschnitts i in m;

l_i die Länge des Rohrabschnitts i in m;

$\dot{M}$ der Abblase-Massenstrom nach 8.4;

$c_{p,i}$ die spezifische Wärmekapazität in $J/(kg K)$ bei konstantem Abblasedruck p_0 und bei durchschnittlicher Heliumtemperatur im Rohrabschnitt i .

Abschnitte der Rohrleitung stromaufwärts, die innerhalb des Kryostaten installiert sind, können dem Verlust von Isoliervakuum ausgesetzt sein. Wenn ein solcher Abschnitt eine Temperatur unterhalb der Kondensationstemperatur der Luft hat, z. B. aufgrund des Abgasstroms im Normalbetrieb, muss die Oberfläche des Rohrabschnitts der betroffenen kryogenen Oberfläche A_c in Gleichung (12) hinzugefügt werden, und die Abblasetemperatur $T_{o,x}$ muss auf der Grundlage der in 8.4.2 angegebenen Wärmestromdichten berechnet werden.

8.5.3 Einfluss der Rohrleitung stromabwärts

Ein zusätzlicher Druckaufbau kann durch Rohrleitungen stromabwärts verursacht werden, die den PRD-Auslass mit einer Entlastungsleitung oder mit einem Heliumrückführsystem verbinden. Der Gegendruck p_b der PRD ergibt sich aus der Summe des Eigengegendrucks und dem Fremdgedruck.

$$p_b = \Delta p_{bb} + p_{bs} \quad (40)$$

ANMERKUNG 1 p_{bs} , z. B. der Druck eines Rückführsystems oder der Umgebungsdruck.

ANMERKUNG 2 Wenn es keinen Einfluss der Rohrleitungen stromabwärts gibt, ist $\Delta p_{bb} = 0$.

Da die Rohrleitungen stromabwärts üblicherweise Raumtemperatur haben, sollte bei der Berechnung von Δp_{bb} der Temperaturanstieg aufgrund des Wärmeübergangs in den Rohrleitungen stromabwärts unter Verwendung üblicher technischer Korrelationen berücksichtigt werden.

Im Allgemeinen sollte der Druckverlust in den Rohrleitungen stromabwärts so weit wie möglich minimiert werden. Wenn große Rohrleitungslängen oder ein komplizierter Strömungsweg nicht vermieden werden können, sollte die Auslegung der PRD angepasst werden, indem z. B. ein PRV mit entlastenden Faltenbälgen verwendet wird.

Wenn der Einfluss des Gegendrucks auf die Größe der PRD signifikant ist, muss der Eigengegendruck iterativ berechnet werden.

8.6 Berechnung der Ausflussziffer

8.6.1 Allgemeines

In Bezug auf Gleichung (1) ist die Ausflussziffer K_{dr} definiert als

$$K_{dr} = \alpha \times K_d \quad (41)$$

Dabei ist

$\alpha = 1$ im Falle einer Berstscheibe;

$\alpha = 0,9$ im Falle eines Druckentlastungsventils nach EN ISO 4126;

K_d eine Ausflussziffer abhängig vom thermodynamischen Zustand des Heliums, bereitgestellt vom Hersteller der PRD.

Für die vorläufige Dimensionierung von PRD sollten die folgenden Werte verwendet werden:

- $K_d = 0,95$ für Druckentlastungsventile mit einphasiger Dampfströmung sowohl stromaufwärts als auch im Hals
- $K_d = 0,85$ für Druckentlastungsventile mit Zweiphasenströmung sowohl stromaufwärts als auch im Hals

- $K_d = 0,65$ für Druckentlastungsventile mit einphasiger Flüssigkeitsströmung sowohl stromaufwärts als auch im Hals
- $K_d = 0,65$ für Berstscheiben mit einphasiger Dampfströmung sowohl stromaufwärts als auch im Hals

Nach der Auswahl einer bestimmten PRD muss die Berechnung des Mindest-Abblasequerschnitts mit dem vom Hersteller bereitgestellten tatsächlichen K_d -Wert aktualisiert werden.

8.6.2 Anpassung der Ausflussziffer von PRV

PRVs sind in einem Raster von Nennweiten erhältlich (z. B. DN20, DN25, usw.) Nach der Dimensionierung des PRV muss eine bestimmte Einrichtung mit der nächstgrößeren Nennweite ausgewählt werden, die das Risiko einer Überdimensionierung mit sich bringt. In Systemen, die für einen instabilen Betrieb anfällig sind, darf der Mindest-Abblasequerschnitt an die erforderlichen Bedingungen angepasst werden, indem der Durchflusskoeffizient durch eine Hubbegrenzung eingestellt wird. Nach EN ISO 4126-1:2013 darf der Hub auf nicht mehr als 30 % des Nennhubes oder 1 mm begrenzt werden, wobei der größere Wert gilt.

Alternativ kann der Abblasedruck des PRV eingestellt werden, um den Mindest-Abblasequerschnitt A_{th} an die verfügbaren Nennweiten anzupassen.

8.7 Transferleitungssysteme

In kryogenen Transferleitungssystemen wird ein plötzlicher Verlust des Isoliervakuums (LIV) oft als größter anzunehmender Störfall angesehen. Die in B.1 (Tabelle B.1) angegebene Wärmestromdichte ist häufig durch die Größe des Luftlecks, die z. B. einem Vakuumpumpenanschluss entspricht, im Verhältnis zur gesamten kryogenen Oberfläche begrenzt. In diesem Fall sollte das in B.2 angegebene Verfahren zur Berechnung der resultierenden Wärmestromdichte angewendet werden. Ein thermischer Schild kann den Wert der Wärmestromdichte weiter begrenzen.

Lokale Öffnungsdruckdifferenzen müssen besonders beachtet werden. Die Berechnung solcher Öffnungsdruckdifferenzen darf nicht nur die mechanische Leistung der PRD umfassen, wie z. B. in EN ISO 4126-1:2013 angegeben, sondern auch den Druckverlust entlang des Transfersystems aufgrund der Wärmestromdichte aus der PRD.

Der Abblasedruck p_0 von PRD in Transferleitungen muss kleiner oder gleich dem maximal zulässigen Druck p_s abzüglich des Druckverlustes entlang der Transferleitung Δp_{line} sein

$$p_0 \leq p_s - \Delta p_{line} \quad (42)$$

Der Durchmesser der PRD muss kleiner oder gleich dem Durchmesser der inneren Rohrleitungen der Transferleitung sein.

Aufgrund der dynamischen Entwicklung der thermodynamischen Eigenschaften während eines LIV sollte ein transientes Modell der Druckentwicklung verwendet werden, bei dem der Mindest-Abblasequerschnitt A_{th} der PRD zu einem bestimmten Zeitpunkt so gewählt wird, dass die Gleichung (42) eingehalten wird.

Wenn keine transiente Modellierung angewendet wird, müssen die Annahmen in der Berechnung ausreichend konservativ sein, um eine sichere Auslegung der PRD sicherzustellen.

8.8 Dimensionierung der PRD des Vakuumbehälters

Die Dimensionierung der PRD des Vakuumbehälters ist weder in Bild 2 noch in 8.1 bis 8.6 berücksichtigt. Dieser Abschnitt beschreibt das Verfahren zur Dimensionierung der PRD des Vakuumbehälters im Falle einer Leckage kryogenen Fluids in den Isoliervakuumraum.

Der Massenstrom $\dot{M}_{\text{icf}}$ im Falle einer Leckage kryogenen Fluids muss nach Gleichung (25) berechnet werden:

Der Querschnitt des Lecks A_{leak} wird für bestimmte Szenarien in 8.4.5 oder 8.4.6 festgelegt.

Als Anfangsdruck im Isoliervakuumbehälter wird die Verwendung von $p_v = 10^{-6}$ bar(a) empfohlen.

Der Abblase-Massenstrom $\dot{M}$, der für die Dimensionierung von A_{th} der PRD des Vakuumbehälters verwendet wird, wird als gleich dem Massenstrom der Leckage von kryogenem Fluid angesehen:

$$\dot{M} = \dot{M}_{\text{icf}} \quad (43)$$

Der Mindest-Abblasequerschnitt A_{th} für die PRD des Vakuumbehälters beträgt

$$A_{\text{th}} = \frac{\dot{M}}{K_{\text{dr}} \times \sqrt{2 \times 10^5 \frac{p_0}{v_0}} \times \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{k-1} \times \left(\left(\frac{p_b}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_b}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)}, & \frac{p_b}{p_0} < \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \sqrt{\frac{k}{k+1} \times \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}}, & \frac{p_b}{p_0} \geq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases}} \quad (44)$$

Dabei ist

k der isentrope Ausdehnungskoeffizient des kryogenen Fluids bei T_0 und p_0

p_0 der Abblasedruck der PRD des Vakuumbehälters in bar(a); und

v_0 das spezifische Volumen in m^3/kg bei p_0 und T_0 .

ANMERKUNG Der Faktor 10^5 in Gleichung (44) entspricht der Umrechnung von bar in Pa.

Die Abblasetemperatur T_0 liegt zwischen T_c und T_{amb} und muss in Übereinstimmung mit der Risikobeurteilung in Abschnitt 6 bestimmt werden.

9 Druckentlastungseinrichtungen

9.1 Allgemeines

Druckentlastungseinrichtungen (PRD) wie Druckentlastungsventile (PRV) und Berstscheiben (BD) werden zur unmittelbaren direkten Druckbegrenzung eingesetzt. PRD, die der entsprechenden Produktnormenreihe EN ISO 4126 entsprechen, werden als zuverlässige Einrichtungen eingestuft, d. h. es werden vom Anwender keine Daten bezüglich ihrer Zuverlässigkeit erwartet.

In diesem Abschnitt werden spezifische Eigenschaften von PRD für die Anwendung in Helium-Kryostaten behandelt.

9.2 Druckentlastungsventile

Für allgemeine Anforderungen an Druckentlastungsventile muss sich der Anwender auf EN ISO 4126-1:2013 beziehen.

In Helium-Kryostaten werden häufig direkt wirkende federbelastete PRV eingesetzt, die sich automatisch schließen, wenn der Systemdruck unter ihren Schließdruck fällt. Dadurch wird das Risiko vermieden, dass Luft in das kryogene System zurückfließt.

Aufgrund ihrer festgelegten Schließfunktion sind Vollhub-PRV anstelle von Proportional-PRV zu verwenden. Proportionale PRV bringen hingegen das Risiko von schwimmenden Ventiltellern hervor, die im Normalbetrieb Heliumlecks verursachen. Überdimensionierte Vollhub-PRV dürfen im Proportionalbereich arbeiten, was zu einem kontinuierlichen Heliumaustritt mit dem Risiko von Kondensation oder Eisbildung im Ventilkörper führt.

Kondensate dürfen sich nicht in den Rohrleitungen stromabwärts ansammeln und in das PRV zurückfließen; siehe ISO 4126-9.

9.3 Berstscheiben

Für allgemeine Anforderungen an Berstscheiben (BD) muss sich der Anwender auf EN ISO 4126-6 beziehen.

Berstscheiben werden häufig in Helium-Kryostaten verwendet, z. B. zum Schutz gegen den größten anzunehmenden Störfall. Der Abblasequerschnitt einer BD bleibt nach dem Ansprechen offen, was folgende Risiken hervorruft:

- Kontamination des Systems mit atmosphärischer Luft und Luftfeuchte, einschließlich des Risikos, den Ausblasströmungsweg mit gefrorener Luft oder Wasser zu blockieren;
- Notwendigkeit, die Betriebsfähigkeit mittels Entfeuchtung, Spülung und erneuter Abkühlung des Systems wiederherzustellen; und
- vollständiger Verlust des Heliums.

Das Risiko, kalte kryogene Systeme der Atmosphäre auszusetzen, darf durch den parallelen Einbau von Berstscheiben zusammen mit einem Wechselventil verringert werden. Diese Anordnung wird auch im Hinblick auf die Instandhaltung empfohlen, 11.2.

9.4 Kombinationen von Druckentlastungsventilen und Berstscheiben

Für allgemeine Anforderungen an Kombinationen von PRV und BD muss sich der Anwender auf EN ISO 4126-3 beziehen.

Zusätzlich sind Kombinationen von Druckentlastungsventilen und Berstscheiben nach 7.3 zulässig.

9.5 Magnetische Druckentlastungseinrichtungen

Magnetische Druckentlastungseinrichtungen können als wieder verschließbare Berstscheiben betrachtet werden.

Wenn ein magnetisches Druckbegrenzungsventil als primäre PRD verwendet wird muss sichergestellt werden, dass es mit EN ISO 4126 (alle Teile) übereinstimmt, d. h. der Produktnorm der PRD.

9.6 Druckentlastungseinrichtungen für Isoliervakuumbehälter

Der Isoliervakuumbehälter von Helium-Kryostaten, der typischerweise für einen maximal zulässigen Druck von $p_s \leq 0,5$ bar(g) ausgelegt ist, ist als Teil des Druckgeräts festgelegt, da die Strukturelemente des Vakuumbehälters an drucktragenden Teilen befestigt sind. Daher müssen die Auswirkungen einer (positiven) Drucküberschreitung im Vakuumbehälter berücksichtigt werden. Der Vakuumbehälter muss mit einer PRD ausgestattet sein, die als sicherheitsrelevantes Gerät gilt. Abhängig von p_s muss die PRD üblicherweise auf einen Abblasedruck von $p_s \leq 0,5$ bar(g) eingestellt werden, der einen Zusammenbruch sowohl des Innen- als auch des Vakuumbehälters verhindert. Ihr Mindest-Abblasequerschnitt muss auf Grundlage der Risikobeurteilung nach Abschnitt 6 bemessen werden.

Der PRD des Vakuumbehälters muss den Vakuumbedingungen und allen anderen Anforderungen des Kryostatbetriebs standhalten. Eine mögliche Blockierung des Abblasequerschnitt durch abgerissene Bruchstücke der MLI (oder andere Arten von Fremdkörpern) sollte durch geeignete Maßnahmen verhindert werden.

Typische Bauarten von PRD für Isoliervakuumbehälter bei $p_s \leq 0,5$ bar(g) sind Flansche und Vakuumklappen. Diese PRD müssen so ausgelegt und eingebaut werden, dass das Personal im Falle eines Ansprechens nicht geschädigt werden kann. Vakuumflansche und Vakuumklappen dürfen keine Prüfungen erfordern, die über eine Baumusterprüfung durch den Hersteller des Helium-Kryostaten zur Überprüfung des Ansprechdruckes hinausgehen. Ein Verfahren für die Baumusterprüfung kann EN 13458-2:2002, Anhang I, entnommen werden.

9.7 Mechanische Befestigung Druckentlastungseinrichtungen

In Übereinstimmung mit den entsprechenden Normen, wie z.B. EN 13445-3, müssen mechanische Befestigungen der PRD so zu bemessen und ausgelegt werden, dass keine mechanische Belastung auf die PRD wirkt. Eine Berechnung der Reaktionskräfte kann unter Berücksichtigung des thermischen Stresses des Abkühlvorgangs erforderlich sein.

9.8 Werkstoffe für Druckentlastungseinrichtungen

Während des Abführens kann die PRD in Helium-Kryostaten Temperaturen bis auf 10 K mit Abkühlraten in der Größenordnung von 50 K/s annehmen.

Für das Gehäuse sowie für die Verbindungs-, Befestigungs- und Dichtungselemente müssen geeignete Werkstoffe nach EN 13445-2 ausgewählt werden. Besondere Beachtung erfordert dabei die thermische Ausdehnung und das Sprödbruchverhalten.

ANMERKUNG Weitere qualifizierte Werkstoffe für $T_m < -196$ °C können AD 2000 Code W10 Tabelle 1 entnommen werden oder durch ein Einzelgutachten (PMA, en: Particular Material Appraisal) qualifiziert werden.

10 Stofffreisetzung

10.1 Allgemeines

Die Bestimmung und die Bewertung der Gefährdung durch Stofffreisetzung sowie die erforderlichen Maßnahmen zur Sicherstellung der Schutzziele unterliegen den geltenden örtlichen Vorschriften.

10.2 Abblaseleitungen und Abblasesysteme

Druckentlastungseinrichtungen von Helium-Kryostaten werden oft an lange Abblaseleitungen und Heliumrückführsysteme angeschlossen, bei denen sich der Heliumstrom von der Abblasetemperatur T_0 bis fast auf die Umgebungstemperatur erwärmen kann. Die Dimensionierung der Abblaseleitung muss daher auf einer Berechnung der kompressiblen Strömung beruhen, die folgende Aspekte berücksichtigt:

- die starke Dichteänderung aufgrund des Wärmeübergangs auf das Helium muss entweder durch eine abschnittsweise Berechnung oder durch Anwendung geeigneter Finite-Element- oder Differentialgleichungsmodelle berücksichtigt werden;
- Filmkondensation der Luft an der Außenfläche muss für Abschnitte berücksichtigt werden, die unter die Kondensationstemperatur der Luft abkühlen;
- freie Konvektion muss an der Außenfläche für Teile oberhalb der Kondensationstemperatur der Luft berücksichtigt werden;

- erzwungene Konvektion mit lokalen Fluidzuständen muss für die innere Strömung berücksichtigt werden.

Zusätzlich müssen bei der Auslegung des Abblasesystems die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

- Die kondensierte flüssige Luft kann Sauerstoffkonzentrationen von mehr als 50 % erreichen, was als extrem brandfördernd berücksichtigt werden muss. Daher dürfen keine brennbaren Stoffe wie Schaumisolierungen, Bitumen-Bodenbeläge oder Ähnliches in Bereichen vorhanden sein, wo Luftkondensat sich abscheiden oder ansammeln kann.
- Luftkondensat kann darunter liegende Bauteile stark abkühlen, möglicherweise verspröden oder durch thermische Kontraktion Schäden verursachen.

Der Eigengegendruck Δp_{bb} und der Fremdgedruck p_{bs} von einem Heliumrückführsystem müssen für die Dimensionierung der PRD nach (40) berücksichtigt werden.

10.3 Freisetzung unmittelbar in die Umgebung

Zum Schutz vor dem größten anzunehmenden Störfall muss in einigen Fällen der Abblase-Massenstrom direkt in die umliegenden Räumlichkeiten abgeblasen werden. Dies impliziert ein Erstickungsrisiko durch Luftverdrängung und demnach die Reduzierung der Sauerstoffkonzentration in der Luft auf physiologisch kritische Werte.

Geeignete Schutzmaßnahmen müssen in Übereinstimmung mit der standortspezifischen Risikobeurteilung getroffen werden, wie z. B. Zugangsbeschränkungen, Sauerstoff-Messgeräte, Alarmvorrichtungen, Atemschutzgeräte und Sicherheitsklappen zur Belüftung der betroffenen Räumlichkeiten.

11 Betrieb von Helium-Kryostaten

11.1 Prüfung vor der Inbetriebnahme

11.1.1 Allgemeines

Der sichere Betrieb von Helium-Kryostaten und ihrer Sicherheitseinrichtung basiert auf den Maßnahmen, die in der vom Endbenutzer durchgeführten Risikobeurteilung festgelegt sind.

Einige Anforderungen in diesem Abschnitt können durch nationale Vorschriften abgedeckt sein.

Wenn ein Konflikt zwischen einer Anforderung dieses Dokuments und einer geltenden nationalen Vorschrift besteht, hat die nationale Vorschrift Vorrang.

11.1.2 Bestimmung der Fristen für wiederkehrende Prüfungen

Vor Inbetriebnahme eines Helium-Kryostaten muss vom Endbenutzer eine Risikobeurteilung durchgeführt werden, die auch eine Bestimmung der Fristen für wiederkehrende Prüfungen in Übereinstimmung mit den nationalen Vorschriften umfasst.

Die Bestimmung und Bewertung der Gefährdungen erfolgt in der Regel anhand einer Risikobeurteilung unter Berücksichtigung der standortspezifischen Bedingungen, einschließlich der Umgebungs- und Kryostat-bezogenen Gefährdungen sowie deren Wechselwirkung.

Die notwendigen Maßnahmen zur sicheren Bereitstellung und Benutzung der Anlagen müssen bestimmt werden. Dies sollte Sicherheitsmaßnahmen in der Arbeitsumgebung, die Erstellung von Betriebsanleitungen anhand der Herstellerangaben, eine angemessene Qualifizierung des Betriebspersonals und die von

qualifiziertem Personal und/oder der zuständigen nationalen dritten Partei durchzuführenden Prüfungen und Inspektionen umfassen.

Das Ergebnis der Risikobeurteilung, einschließlich der Bestimmung der Fristen für wiederkehrende Prüfungen, muss dokumentiert werden.

11.1.3 Druckentlastungseinrichtungen

Druckentlastungseinrichtungen müssen vor Inbetriebnahme überprüft werden. Entsprechend nationaler Vorschriften muss die Inspektion von einer qualifizierten Person oder der zuständigen nationalen dritten Partei durchgeführt oder bezeugt werden.

11.1.4 Betriebsanleitung

Betriebsanleitungen sind üblicherweise erforderlich. CEN/TR 764-6 kann als Leitfaden für den Aufbau und den Inhalt von Betriebsanleitungen verwendet werden.

Die Betriebsanleitung muss alle sicherheitsrelevanten Informationen enthalten, die der Hersteller dem Endbenutzer bereitstellt. Technische Dokumente, die zum Verständnis der Bedienungsanleitung erforderlich sind sowie Verweise auf besondere Risiken und Auslegungsmerkmale sollten ebenfalls Teil der Bedienungsanleitungen sein.

11.2 Wiederkehrende Prüfungen von Druckentlastungseinrichtungen

11.2.1 Allgemeines

Wiederkehrende Prüfungen von PRD werden im Allgemeinen anlässlich der wiederkehrenden Prüfungen des Druckgeräts durchgeführt, wobei Vorhandensein, Zustand und Funktion der PRD überprüft werden.

11.2.2 Sicherheitsventile

Der Ansprechdruck und die Funktion beweglicher Teile müssen in regelmäßigen Zeitabständen überprüft werden. Die Prüfintervalle müssen vom Endbenutzer und/oder der zuständigen nationalen dritten Partei entsprechend den nationalen Vorschriften unter Berücksichtigung der Betriebsbedingungen und der Empfehlungen des Herstellers festgelegt werden.

Prüfungen der Druckentlastungsventile dürfen nicht später als die wiederkehrenden Prüfungen der Druckgeräte durchgeführt werden. Je nach der Risikobeurteilung können kürzere Prüfintervalle erforderlich sein.

11.2.3 Berstscheiben

Das Wartungsintervall von Berstscheiben hängt von der Auslegung, dem Werkstoff und den Betriebsbedingungen ab. Druck- und Temperaturschwankungen sowie Korrosion können das Wartungsintervall wesentlich verkürzen.

Es wird empfohlen, dass Berstscheiben in regelmäßigen Zeitabständen unter Berücksichtigung der nationalen Vorschriften, der Betriebsbedingungen und der Empfehlungen der Hersteller der Berstscheiben ersetzt werden.

11.2.4 Instandhaltung

Die Betriebsanweisungen der PRD müssen Inspektions- und Instandhaltungsanweisungen enthalten.

PRD, bei denen das Risiko besteht, dass sie unwirksam werden und die nicht vor Ort geprüft werden können, müssen ausgebaut und in angemessenen Zeitabständen einzeln geprüft werden. Die betreffenden PRD und

ihre Instandhaltungsintervalle müssen vom Endbenutzer und/oder der zuständigen nationalen dritten Partei in Übereinstimmung mit den nationalen Vorschriften festgelegt werden.

Die Termine und Ergebnisse der Inspektion und Instandhaltung der PRD müssen vom Endbenutzer dokumentiert werden.

Die Instandsetzung von PRD darf nur vom Hersteller der PRD oder einer vom Hersteller der PRD zertifizierten Firma erfolgen.

Anhang A (informativ)

Thermodynamische Eigenschaften von Helium

A.1 Grundlagen

Auf der Erde ist Helium vergleichsweise selten. Es sind nur Spuren (Volumenanteil 5×10^{-6}) in der Atmosphäre vorhanden; die Löslichkeit in Wasser ist sehr gering. Die größte Konzentration findet sich in Erdgasvorkommen, aus denen es als Nebenprodukt der Erdgasförderung gewonnen, vor Ort verflüssigt und zu zentralen Abfüllstellen transportiert wird. Aufgrund des großen Aufwands bei der Heliumproduktion wird im Allgemeinen eine Rückgewinnung des freiwerdenden Heliumgases empfohlen. Helium liegt in Form von zwei stabilen Isotopen vor, ^3He und ^4He , mit einem ^3He -Vorkommen von 10^{-6} im Vergleich zu ^4He . Daher wird ^3He nur in sehr geringen Mengen für kernphysikalische Anwendungen oder für Kühlprozesse im Millikelvin-Bereich eingesetzt. Sofern in diesem Dokument nicht anders angegeben, beziehen sich der Begriff „Helium“ und alle thermodynamischen Eigenschaften auf ^4He .

Helium hat den niedrigsten Siedepunkt aller Fluide und ist daher das Standardkältemittel bei Tieftemperaturanwendungen mit Supraleitung. Eine Übersicht über seine technischen Anwendungen ist z. B. in [30] enthalten. Helium kann unterhalb des kritischen Punkts bei 5,20 K und 2 275 bar(a) verflüssigt werden. Die Siedetemperatur bei Umgebungsdruck beträgt 4,2 K bei einer Flüssigkeitsdichte von 125 kg/m³. Helium bildet unter seinem eigenen Dampfdruck auch bei tiefsten Temperaturen keine feste Phase. Eine weitere charakteristische Eigenschaft ist das Auftreten von zwei flüssigen Phasen, Helium-I (normales Helium) und Helium-II (Mischung aus normalem und suprafluidem Helium). Die flüssigen Phasen werden durch die sogenannte λ -Linie getrennt, die von der Dampfdruckkurve bei 2 177 K/50,36 mbar(a) bis zur Schmelzkurve bei 1,76 K/30,1 bar(a) verläuft. Helium-I ist eine klare Flüssigkeit mit niedriger Viskosität und niedriger Wärmeleitfähigkeit. Die Quantenflüssigkeit Helium-II weist dagegen die höchste Wärmeleitfähigkeit aller Stoffe und eine verschwindende Viskosität auf. Es bedeckt die Wände von kalten Behältern, fließt sogar entgegen der Schwerkraft und kann durch feinste Poren entweichen. Helium-II wird durch weiteres Abkühlen von Helium-I, etwa durch Abpumpen eines Flüssigheliumbads, erzeugt. Die Rückumwandlung erfolgt automatisch, wenn die λ -Linie in Richtung höherer Temperaturen überquert wird.

Die Dichte von Helium beträgt bei Umgebungsbedingungen nur 14 % der Luftdichte. Helium ist chemisch inert, geruch- und geschmacklos, ungiftig und physiologisch unbedenklich. Dennoch bestehen Gefahren durch das Einatmen von Heliumgas aufgrund der damit verbundenen Verdrängung von Sauerstoff. Helium ist radiologisch inert und besitzt ein sehr hohes Ionisierungspotential.

Helium wird in Heliumverflüssigungsanlagen abgekühlt und verflüssigt. Aufgrund der niedrigen Temperatur benötigt das Verfahren viel Energie. Während große industrielle Anlagen eine Verflüssigungsleistung von 100 kg/h bis 1 000 kg/h aufweisen, haben lokale Heliumverflüssiger eine Kapazität von typischerweise 1 kg/h bis 10 kg/h. Für kleine Einzelverbraucher wird flüssiges Helium in der Regel in transportablen Lagerbehältern (Dewars) geliefert. Große Magnetsysteme und supraleitende Teilchenbeschleuniger sind dagegen häufig direkt mit Helium-Kühlsystemen verbunden, in denen das Helium in geschlossenen Kreisläufen geführt wird.

Je nach Anwendungsanforderungen werden unterschiedliche Arten der Heliumkühlung eingesetzt:

- a) Zwei-Phasen-Kühlung (gasförmig/flüssig) mit Helium-I, wird üblicherweise bei einer bestimmten Öffnungsdruckdifferenz gegenüber dem Umgebungsdruck oder bei großen Anlagen betrieben.
- b) Kühlung mit Helium-II, entweder druckführend (einphasige Flüssigkeit) oder unter Dampfdruck (zweiphasig) bei Temperaturen unter 2,17 K.

c) Einphasige überkritische Kühlung bei Temperaturen und Drücken oberhalb des kritischen Punktes.

Bei atmosphärischem Druck beträgt die Verdampfungswärme nur 2,6 kJ je Liter, was im Vergleich zu Stickstoff um den Faktor 62 und im Vergleich zu Wasser um den Faktor 835 niedriger ist. Daher führt bereits ein geringer Wärmeeintrag zu hohen Verdampfungsraten. Um Verdampfungsverluste zu reduzieren, werden Helium-Kryostaten durch Isoliervakuum, thermische Schilde und Superisolation thermisch isoliert. Bei Störfällen können die Druckerhöhungsgeschwindigkeiten den in EN ISO 4126 angegebenen Grenzwert von $\Delta p/\Delta \tau = 0,2$ bar/s für die Auslegung von PRD um eine oder sogar zwei Größenordnungen überschreiten.

Das Flüssigkeits-/Dampf-Dichteverhältnis von gesättigtem Helium ist im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten gering (Tabelle A.1). Daher kann die in Helium-Kryostaten als kaltes Gas enthaltene Masse nicht vernachlässigt werden. Die Ausdehnung von kaltem Heliumgas während des Aufwärmens muss sorgfältig berücksichtigt werden (Tabelle A.2).

Tabelle A.1 — Dichteverhältnis Flüssigphase zu Gasphase am Normalsiedepunkt

Fluid	Dichteverhältnis $\rho_{\text{Liq}}/\rho_{\text{Gas}}$
^4He	etwa 7,4
p- H_2	etwa 53
Ne	etwa 126
N_2	etwa 175

Tabelle A.2 — Volumenänderung während der Verdampfung und Aufwärmung von 1 Liter (125 g) ^4He

Volumen (L)	Aggregatzustand	Temperatur (K)	Druck (mbar(a))	Kommentar
1	flüssig	4,2	1 013,25	
7,4	gasförmig	4,2	1 013,25	
702	gasförmig	273,15	1 013,25	„Normalzustand“
751	gasförmig	298,15	1 000	„Bezugszustand“

A.2 Prozesspfad beim Abblasen

Bei einem Störfall wird zusätzliche Wärme auf das Helium im Kryostat übertragen, wodurch sich sein thermodynamischer Zustand ändert und das Ansprechen der eingebauten PRD ausgelöst wird. Die resultierenden Zustandsänderungen während der Druckentlastung sind im p, v -Diagramm in Bild A.1 für zwei anfängliche Flüssigkeitsstände α_i abgebildet.

Durch das geschlossene System mit konstanter Heliummasse steigt der Druck im Kryostaten bei konstantem mittlerem spezifischem Volum v_{He} , d. h. in einem isochoren Prozess vom Nenn-Betriebsdruck p_{operate} auf den Abblasedruck p_0 . Je nach dem Anfangsfüllstand α_i zum Zeitpunkt des Störfalls kann sich der Flüssigkeitsstand während des Störfalls auf zwei verschiedene Arten ändern:

- a) Hoher Anfangsfüllstand, z. B. $\alpha_i = 80$ %: Der isochore Wärmeeintrag bewirkt eine Flüssigkeitsausdehnung mit steigendem Füllstand, bis der gesamte Behälter bei der gesättigten Flüssigkeitskurve (2A) und darüber mit flüssigem Helium gefüllt ist. Bei p_0 unter 2A müssen aufgrund