

DIN EN 17527

ICS 13.240; 23.020.40

Ersatz für
DIN SPEC 4683:2015-04**Helium-Kryostate –
Schutz gegen Drucküberschreitung;
Deutsche Fassung EN 17527:2021**

Helium cryostats –
Protection against excessive pressure;
German version EN 17527:2021

Cryostats pour hélium –
Protection contre les surpressions;
Version allemande EN 17527:2021

Gesamtumfang 126 Seiten

DIN-Normenausschuss Druckgasanlagen (NDG)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 17527:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 268 „Kryo-Behälter und spezielle Einsatzgebiete der Wasserstofftechnologie“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche 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).

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
ISO 4126-10	siehe	DIN ISO 4126-10

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

Änderungen

Gegenüber DIN SPEC 4683:2015-04 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Der Anwendungsbereich wurde überarbeitet und erweitert;
- b) Abschnitt 3 „Begriffe“ wurde überarbeitet und erweitert;
- c) alle Abschnitte mit normativen und informativen Inhalten wurden überarbeitet und neu strukturiert;
- d) im neuen Anhang D.5 wurden Beispiele für Berechnungen des engsten Strömungsquerschnitts aufgenommen.

Frühere Ausgaben

DIN SPEC 4683: 2015-04

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*

DIN ISO 4126-10, *Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck — Teil 10: Auslegung von Sicherheitsventilen mit Zweiphasenströmung (flüssig/gas)*

— Leerseite —

Deutsche Fassung

Helium-Kryostate — Schutz gegen Drucküberschreitung

Helium cryostats —
Protection against excessive pressure

Cryostats pour hélium —
Protection contre les surpressions

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 15. November 2021 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC-Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, der Republik Nordmazedonien, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort.....	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich.....	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Symbole	14
5 Prozessablaufdiagramme.....	17
5.1 Prozessablaufdiagramm zu Gefährdungsbeurteilung und Schutzkonzepten	17
5.2 Prozessablaufdiagramm zur Szenario-spezifischen Dimensionierung von Heliumkreislauf-PRD	19
6 Gefährdungsbeurteilung.....	20
6.1 Allgemeine Informationen zur Gefährdungsbeurteilung	20
6.2 Für die Dimensionierung relevante Ursachen für unzulässigen Druckanstieg	20
6.2.1 Verlust des Isoliervakuums	20
6.2.2 Verlust des Strahlrohrvakuums	20
6.2.3 Quench einer supraleitenden Vorrichtung.....	21
6.2.4 Leckage von kryogenem Fluid	21
6.2.5 Dielektrischer Durchschlag	21
6.2.6 Einschluss von kryogenem Fluid.....	21
6.3 Ursachen für unzulässigen Druckanstieg, die einzuschränken sind.....	22
6.3.1 Thermoakustische Schwingung.....	22
6.3.2 Kryogenes Pumpen.....	22
6.3.3 Ausfall der Stromversorgung	22
6.3.4 Druckstoß	22
6.3.5 Gefrieren	23
6.3.6 Rückströmen	23
6.3.7 Andere Ursachen für Drucküberschreitung.....	23
6.3.8 Erdbeben.....	23
6.3.9 Brand.....	23
6.4 Kombinierte Szenarien	24
6.5 Gefährdungsbeurteilung vor der Bestellung.....	24
6.6 Gefährdungsbeurteilung in der Auslegungsphase	24
7 Schutzkonzepte.....	25
7.1 Allgemeines.....	25
7.2 Einstufiges Schutzkonzept.....	25
7.3 Mehrstufige Schutzkonzepte	26
7.3.1 Allgemeines.....	26
7.3.2 Druckabsicherung von Hochdruck-Helium-Kryostaten.....	27
7.3.3 Druckabsicherung von Niederdruck-Helium-Kryostaten.....	27
7.3.4 Druckabsicherung von subatmosphärischen Helium-Kryostaten	28
7.3.5 Druckabsicherung von He-II-Kryostaten	28
7.3.6 Druckabsicherung von Ultra-Tieftemperatursystemen.....	28
8 Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen.....	28
8.1 Verfahren zur Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen	28

8.2	Berechnung des Mindest-Abblasequerschnitts	29
8.3	Berechnung der Fluidzustandseigenschaften unter Abblasebedingungen	29
8.3.1	Berechnung des Abblasedrucks	29
8.3.2	Berechnung des spezifischen Volumens	30
8.4	Berechnung des Abblase-Massenstroms	32
8.4.1	Allgemeines	32
8.4.2	Verlust des Isoliervakuums	32
8.4.3	Verlust des Strahlrohrvakuums	33
8.4.4	Quench einer supraleitenden Vorrichtung	34
8.4.5	Leckage von kryogenem Fluid	37
8.4.6	Dielektrischer Durchschlag	37
8.4.7	Berechnung der spezifischen Enthalpieänderung	38
8.5	Berechnung der Massenstromdichte	39
8.5.1	Allgemeines	39
8.5.2	Einfluss der stromaufwärtigen Rohrleitung	40
8.5.3	Einfluss der stromabwärtigen Rohrleitung	42
8.6	Berechnung der Ausflussziffer	42
8.6.1	Allgemeines	42
8.6.2	Anpassung der Ausflussziffer von PRV	43
8.7	Transferleitungssysteme	43
8.8	Dimensionierung der PRD des Vakuumbehälters	44
9	Druckentlastungseinrichtungen	44
9.1	Allgemeines	44
9.2	Druckentlastungsventile	45
9.3	Berstscheiben	45
9.4	Kombinationen von Druckentlastungsventilen und Berstscheiben	45
9.5	Magnetische Druckentlastungseinrichtungen	45
9.6	Druckentlastungseinrichtungen für Isoliervakuumbehälter	46
9.7	Mechanische Befestigung von Druckentlastungseinrichtungen	46
9.8	Werkstoffe für Druckentlastungseinrichtungen	46
10	Stofffreisetzung	46
10.1	Allgemeines	46
10.2	Abblaseleitungen und Abblasesysteme	46
11	Betriebs-, Instandhaltungs- und Inspektionsanweisungen	47
11.1	Allgemeines	47
11.2	In die Betriebs-, Instandhaltungs- und Inspektionsanweisungen aufzunehmende spezifische Anweisungen	47
11.2.1	Betriebsanweisungen für Druckentlastungseinrichtungen	47
11.2.2	Wiederkehrende Prüfungen von Druckentlastungseinrichtungen	48
11.2.3	Druckentlastungsventile	48
11.2.4	Berstscheiben	48
11.2.5	Instandhaltung	48
Anhang A (informativ)	Thermodynamische Eigenschaften von Helium	49
A.1	Grundlagen	49
A.2	Prozesspfad beim Abblasen	50
Anhang B (informativ)	Zusätzliche Informationen zur Gefährdungsbeurteilung	53
B.1	Verlust des Isoliervakuums	53
B.2	Verlust von Strahlrohrvakuums	54
B.3	Quench einer supraleitenden Vorrichtung	55
B.3.1	Allgemeines	55
B.3.2	Wichtigste Kühlszenarien	56
B.4	Leckage von kryogenem Fluid	58
B.4.1	Allgemeines	58

B.4.2	Leck-vor-Bruch-Verhalten	58
B.4.3	Werkstoffeigenschaften	58
B.4.4	Thermomechanische Spannungen	58
B.5	Dielektrischer Durchschlag	58
B.6	Thermoakustische Schwingung	60
B.7	Kryogenes Pumpen	61
B.8	Qualitative Gefährdungsbeurteilung	62
B.8.1	Allgemeines	62
B.8.2	Wahrscheinlichkeitsniveau	64
B.8.3	Schweregrad	64
B.8.4	Kritikalitätsmatrix	65
B.8.5	HAZOP-Tabelle	67
Anhang C (informativ) Schutzkonzepte		68
C.1	Einstufiges Schutzkonzept	68
C.2	Mehrstufige Schutzkonzepte	69
C.2.1	Allgemeines	69
C.2.2	Druckabsicherung von supraleitenden Magnetsystemen	69
C.2.3	Druckabsicherung von supraleitenden Hochfrequenz-Kavitäten	71
C.2.4	Druckabsicherung von subatmosphärischen Heliumsystemen	72
C.2.5	Druckabsicherung von He-II-Systemen	73
C.2.6	Druckabsicherung von Ultra-Tieftemperatursystemen	74
Anhang D (informativ) Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen		76
D.1	Übereinstimmung zwischen EN ISO 4126-7:2013/A1:2016/EN ISO 21013-3:2016 und Abschnitt D.2	76
D.2	Fallspezifisches Modell zur Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen	79
D.2.1	Allgemeines	79
D.2.2	Berechnung des Mindest-Abblasequerschnitts	80
D.2.3	Bestimmung der Fluidgeschwindigkeit	80
D.2.4	Berechnung der Ausflussfunktion	81
D.3	Einfluss der stromaufwärtigen Rohrleitung	83
D.4	Ausflussziffer	85
D.5	Beispiele für Berechnungen des engsten Strömungsquerschnitts	85
D.5.1	Beispiel 1 — Vertikaler He-I-Magnetkryostat	85
D.5.2	Beispiel 1 unter Berücksichtigung einer stromabwärtigen Rohrleitung	91
D.5.3	Beispiel 2 — Kryostat mit suprafluidem He-II, geschützt durch zwei in Reihe geschaltete PRD — Unterkritische Entlastung	92
D.5.4	Beispiel 3 — Kryostat mit suprafluidem He-II, geschützt durch zwei in Reihe geschaltete PRD — Überkritische Entlastung	99
Anhang E (informativ) Bauarten von Druckentlastungseinrichtungen		107
E.1	Anwendungsnormen	107
E.2	Produktnormen	108
E.2.1	Zweck, Voraussetzungen	108
E.2.2	Vollhub-Druckentlastungsventile	110
E.2.3	Normal-Druckentlastungsventile	111
E.2.4	Proportional-Druckentlastungsventile	111
E.2.5	Pilotgesteuerte Druckentlastungsventile	111
E.2.6	Gesteuerte Druckentlastungsventile mit pneumatischer Zusatzbelastung	112
E.2.7	PRV mit magnetischer Betätigung	112
E.2.8	Spezifische kryogene PRV-Merkmale	113
E.3	Berstscheiben	114
E.3.1	Funktionscharakteristiken	114
E.3.2	Metallberstscheiben	114
E.3.3	Graphitberstscheiben	115
E.3.4	Langzeitverhalten	115

E.3.5 Leckageraten 116

E.4 Druckentlastungsventil/Berstscheiben-Kombinationen..... 116

E.5 Druckentlastungseinrichtungen für Vakuumbehälter 117

Literaturhinweise 118

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 17527:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 268 „Kryo-Behälter und spezielle Einsatzgebiete der Wasserstofftechnologie“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Juni 2022, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Juni 2022 zurückgezogen werden.

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

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Liste dieser Institute ist auf den Internetseiten von CEN abrufbar.

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die Republik Nordmazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Einleitung

Helium-Kryostate, im Gegensatz zu 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 für einen plötzlichen unzulässigen Druckanstieg verbunden, der die Auslegung von Druckentlastungssystemen stark beeinflusst und von bestehenden Normen nicht abgedeckt ist. Helium-Kryostate zeichnen sich durch eine Vielzahl von komplexen und individuellen Ausführungen aus, wobei oft kleine Auslegungsreserven für Spitzenleistungen ausgenutzt werden. Daher kann eine allgemeine und spezifische technische Lösung für den Schutz gegen unzulässigen Druckanstieg 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 Ursachen, die zu einem unzulässigen Druckanstieg in Helium-Kryostaten führen können, sowie die Bedingungen, die für den Schutz gegen unzulässigen Druckanstieg bei Systemversagen relevant sind, um Gefährdungsbeurteilungen und bewährte Praktiken zu harmonisieren. Das Dokument verwendet allgemeine SI-basierte Einheiten.

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

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die Mindestanforderungen für den Schutz von Helium-Kryostaten gegen unzulässigen Druckanstieg 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 Informationen zur Gefährdungsbeurteilung, zu Schutzkonzepten, zur Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen, zu Bauarten von Druckentlastungseinrichtungen, zur Stofffreisetzung und zum 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 4126-3:2020, *Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck — Teil 3: Sicherheitsventile und Berstscheibeneinrichtungen in Kombination (ISO 4126-3:2020)*

EN ISO 4126-6:2014, *Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck — Teil 6: Berstscheibeneinrichtungen; Anwendung, Auswahl und Einbau (ISO 4126-6:2014)*

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

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:

— IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

— ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>

3.1

zuständige nationale dritte Stelle

nach nationalen Vorschriften zugelassene Inspektionsstelle

3.2

Gegendruck

p_b

Überdruck auf der Austrittsseite einer Druckentlastungseinrichtung während des Abführens, der durch den Druck im System stromabwärts entsteht

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Gegendruck ist die Summe aus Eigengegendruck und Fremdegendruck.

[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, 3.12, modifiziert]

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 hochfrequentes Öffnen und Schließen

3.8

zugehörige Temperatur

einem Berstdruck zugeordnete Temperatur der Berstscheibe

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

3.9

Coldbox

Kryostat eines Helium-Kühlgerätes oder -Verflüssigers, in dem die Kühlleistung und die niedrigen Temperaturen erzeugt werden

3.10

kryogenes Fluid

Fluid mit einer Normalsiedetemperatur unterhalb 120 K bzw. -153 °C

3.11

Kryotechnik

Gegenstand von Technologien, Verfahren und Apparaturen für Temperaturen unterhalb 120 K

3.12

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.

3.13

Stromzuführung

elektrische Verbindung zwischen einem Netzgerät bei Umgebungstemperatur und einem supraleitenden Magneten bei Tieftemperatur zum Laden, Betreiben und 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.

3.14

Dewar

vakuumisolierter Lager- und Transportcontainer für kryogene Fluide

3.15

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

3.16

Vollhub-Druckentlastungsventil

PRV, en: pressure relief valve

Druckentlastungsventil, das sich innerhalb von 5 % der Druckerhöhung bis zum konstruktiv begrenzten Hub sofort öffnet

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Anteil des Hubs bis zur momentanen Öffnung (Proportionalbereich) darf 20 % des Gesamthubs nicht überschreiten

3.17

Helium-Schutzgas

Sperrgasvolumen zur Vermeidung von Leckagen atmosphärischen Gases in unter dem Atmosphärendruck liegende Helium-Systeme

3.18

Leckagerate

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

Anmerkung 1 zum Begriff: In der Vakuumtechnik und der Kryotechnik wird die Leckagerate üblicherweise in der Einheit mbar l/s angegeben.

[QUELLE: EN ISO 20484:2017, 4.3.5]

3.19

maximal zulässiger Druck

p_s

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

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

3.20

größte anzunehmende Störung

MCI, en: maximum credible incident

schlimmste Störung im Bereich des Möglichen, die 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).

3.21

Superisolation

MLI, en: multi-layer insulation

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

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

3.22

Nenn-Betriebsdruck

p_{operate}

während des Nennbetriebs erwarteter Druck

3.23

Öffnungsdruckdifferenz

Δp_{over}

Druckanstieg oberhalb des Ansprechdrucks

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

3.24

Ansprechtoleranz

Δp_{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]

3.25

Dauerstrombetrieb

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

3.26

pV-Durchfluss

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Der pV-Durchfluss wird in mbar l/s angegeben.

[QUELLE: EN ISO 20484:2017, 4.2.3, modifiziert]

3.27

Quench

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

3.28

Abblasedruck

p_0

für die Größenbestimmung von Druckentlastungseinrichtungen zugrunde gelegter Druck

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei einem Druckentlastungsventil ist der Abblasedruck größer oder gleich dem Ansprechdruck zuzüglich Öffnungsdruckdifferenz.

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

3.29

Schließdruck

p_{reseat}

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]

3.30

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]

3.31

festgelegter Berstdruck

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

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

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

3.32

maximaler festgelegter Berstdruck

$p_{burst,max}$

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

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

3.33

minimaler festgelegter Berstdruck

$p_{burst,min}$

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

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

3.34

supraleitender Magnet

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

3.35

Fremdgedruck

p_{bs}

Anfangsdruck, der auf der Austrittsseite einer Druckentlastungseinrichtung bei fehlender Strömung zum Zeitpunkt unmittelbar vor dem Öffnen herrscht

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

3.36

Prüfdruck

p_{test}

Druck, dem das Druckgerät zu Prüfzwecken ausgesetzt wird

[QUELLE: EN 764-1:2015+A1:2016]

3.37

thermoakustische Schwingung

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

3.38

Vakuumbehälter

evakuierbarer Außenbehälter eines Kryostaten, der die tiefkalten Bauteile umgibt und die Wärmeleitung durch Restgas unterbindet

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Vakuumbehälter verbleibt normalerweise bei Umgebungstemperatur.

3.39

Ventilbox

Baugruppe zur Verteilung von kryogenem Fluid 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	m^2
a_i	Anfangsfüllstand	—
A_{leak}	Querschnitt der Leckage	m^2
A_{scd}	betroffene Oberfläche der supraleitenden Vorrichtung	m^2
A_{th}	Mindest-Abblasequerschnitt der Druckentlastungseinrichtung (PRD)	m^2
C	Ausflussfunktion	—
c	spezifische Wärmekapazität von Behälter-/Rohleitungswerkstoff	$J/(kg\ K)$
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$J/(kg\ K)$
c_{th}	Geschwindigkeit im Abblasequerschnitt der Druckentlastungseinrichtung (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 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	spezifische Enthalpieänderung	J/kg
$h_{0,x}$	angepasste spezifische Enthalpie	J/kg
Δh_{air}	Enthalpie-Differenz der Luft	J/kg
Δh_{fusion}	Schmelzwärme des Behälter-/Rohrleitungswerkstoffs	J/kg
h_{th}	spezifische Enthalpie im Abblasequerschnitt	J/kg
I	Strom	A
$\bar{k}$	mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2K)$
K_d	Ausflussziffer	—
K_{dr}	zuerkannte Ausflussziffer	—
l	Länge	m
L	Induktivität	H
L_c	charakteristische Länge der Wärmeübertragung	m

$\dot{M}$	Abblase-Massenstrom	kg/s
M_c	Gesamtmasse des kryogenen Fluids im System	kg
M_{He}	Gesamtmasse des Heliums im System	kg
$\dot{M}_{lvb}$	Massenstrom in den Vakuumraum im Falle von Verlust des Strahlrohrvakuums (LBV, en: loss of beamline vacuum)	kg/s
$\dot{M}_{lcf}$	Massenstrom in den Vakuumraum im Falle einer Leckage von kryogenem Fluid	kg/s
$\dot{m}_{th}$	Massenstromdichte im Abblasequerschnitt der PRD	kg/(m ² s)
P	Umfang des Rohrleitungsabschnitts	m
P_{proj}	Umfang der Rohrleitung für den Wärmeübergang in Strömungsrichtung	m
p_0	Abblasedruck	bar(a)
p_0^*	Abblasedruck, ab dem eine kritische Strömung im Abblasequerschnitt A_{th} auftritt	bar(a)
$p_{0,x}$	angepasster Abblasedruck unter Berücksichtigung der stromaufwärtigen Rohrleitung	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 der Berstscheibe	bar(g)
$p_{burst,min}$	minimaler Berstdruck der Berstscheibe	bar(g)
p_c	Druck im kryogenen Kreislauf	bar(a)
p_{crit}	thermodynamischer kritischer Druck	bar(a)
Δp	Druckverlust	bar
$p_{operate}$	Druck auf Betriebsebene	
Δp_{over}	Öffnungsdruckdifferenz	bar
p_s	maximal zulässiger Druck	bar(g)
p_{set}	Ansprechdruck des Druckentlastungsventils (PRV)	bar(g)
p_{test}	Prüfdruck	bar(g)
p_{th}	Druck im Abblasequerschnitt der Druckentlastungseinrichtung (PRD)	bar(a)
p_v	Anfangsdruck in der Vakuumkammer oder im Strahlrohr vor der Störung	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 den Verlust des Isoliervakuums (LIV en: loss of insulating vacuum)	W
$\dot{q}_{liv}$	Wärmestromdichte, verursacht durch den Verlust des Isoliervakuums (LIV)	W/m ²
$\dot{Q}_{quench}$	Wärmelast, verursacht durch einen Quench	W
$\dot{q}_{quench}$	Wärmestromdichte, verursacht durch einen Quench	W/m ²
$\dot{Q}_{lbv}$	Wärmelast, verursacht durch den Verlust des Strahlrohrvakuums (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}	Umgebungstemperatur	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 Rohrleitungsabschnitt i	K
$T_{0,x}$	angepasste Abblasetemperatur unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs in der stromaufwärtigen Rohrleitung	K
$T_{0,x,i}$	angepasste Abblasetemperatur von Rohrleitungsabschnitt i	K
T_c	Temperatur im kryogenen Kreislauf	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 Rohrleitungsabschnitt i	K
t	Zeit	s
$U_{breakdown}$	Durchschlagsspannung der Paschenkurve	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 der Umgebungsluft	m^3/kg
v_c	spezifisches Volumen im kryogenen Kreislauf	m^3/kg
V_{He}	Heliumvolumen des Kryostaten	m^3
v_i	spezifisches Anfangsvolumen	m^3/kg
v_0	spezifisches Volumen unter Abblasebedingungen	m^3/kg
v_{th}	spezifisches Volumen im Abblasequerschnitt der PRD	m^3/kg
V_v	Volumen des Vakuumraums	m^3
x	dimensionsloser Dampfmassenanteil (Qualität)	—
z	Wandstärke des Behälters/der Rohrleitung	m
α	Temperaturverhältnis	—
ε	dimensionsloser volumetrischer Gasgehalt	—
γ	zweiter Townsend-Koeffizient der Entladung	—
η_c	kritisches Druckverhältnis für Zweiphasenströmung	—
κ	isentropischer Ausdehnungskoeffizient	—
ξ	Längenverhältnis	—
ρ	Dichte	kg/m^3
φ	relative Luftfeuchte	%
ω	Omega-Parameter	—
ψ	Ausflussfunktion	—

5 Prozessablaufdiagramme

5.1 Prozessablaufdiagramm zu Gefährdungsbeurteilung und Schutzkonzepten

Der Prozessablauf zur Gefährdungsbeurteilung und zu den Schutzkonzepten ist in Bild 1 dargestellt.

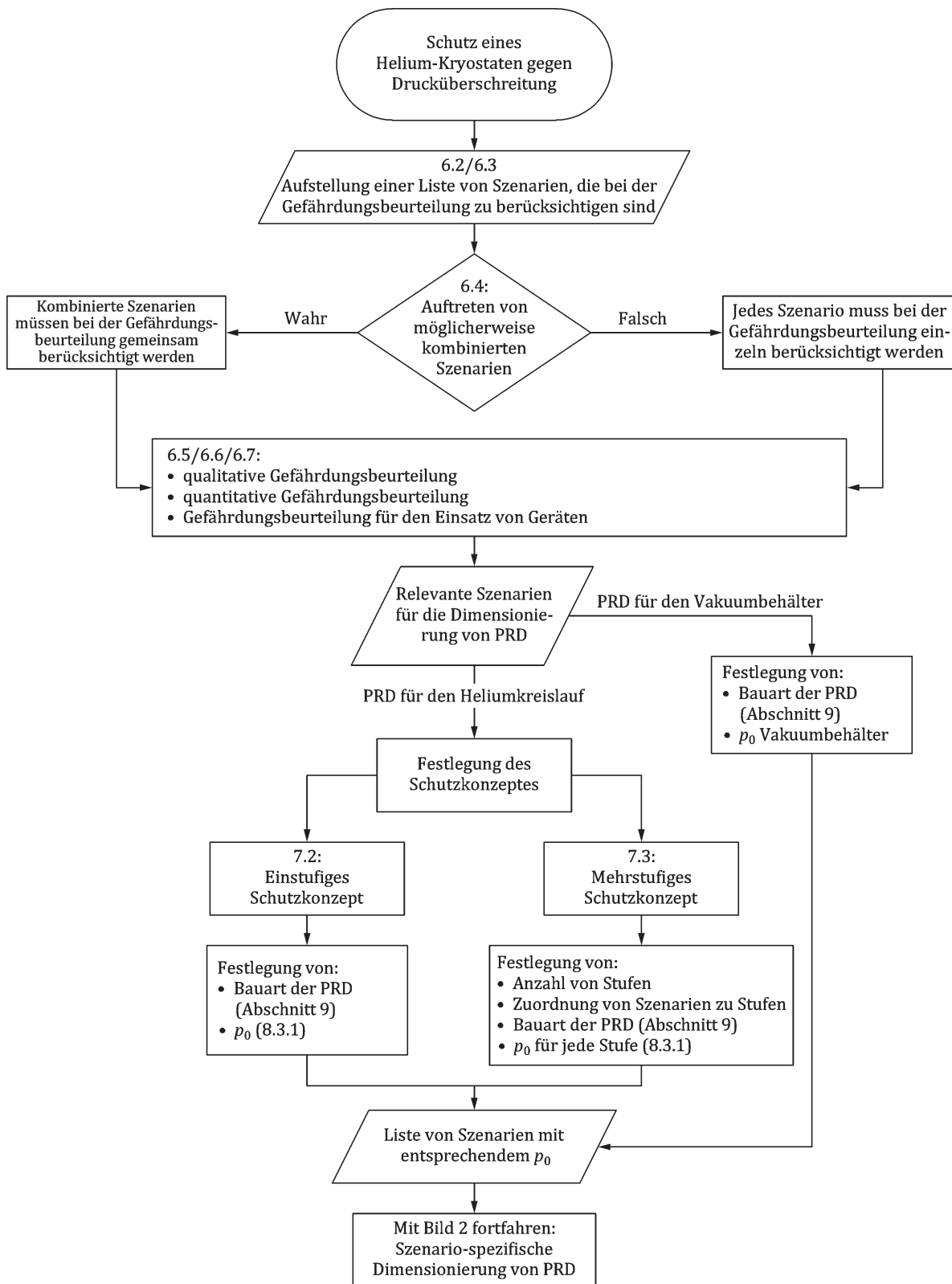


Bild 1 — Prozessablaufdiagramm zu Gefährdungsbeurteilung und Schutzkonzepten

5.2 Prozessablaufdiagramm zur Szenario-spezifischen Dimensionierung von Heliumkreislauf-PRD

Der Prozessablauf zur Szenario-spezifischen Dimensionierung von Heliumkreislauf-PRD ist in Bild 2 dargestellt.

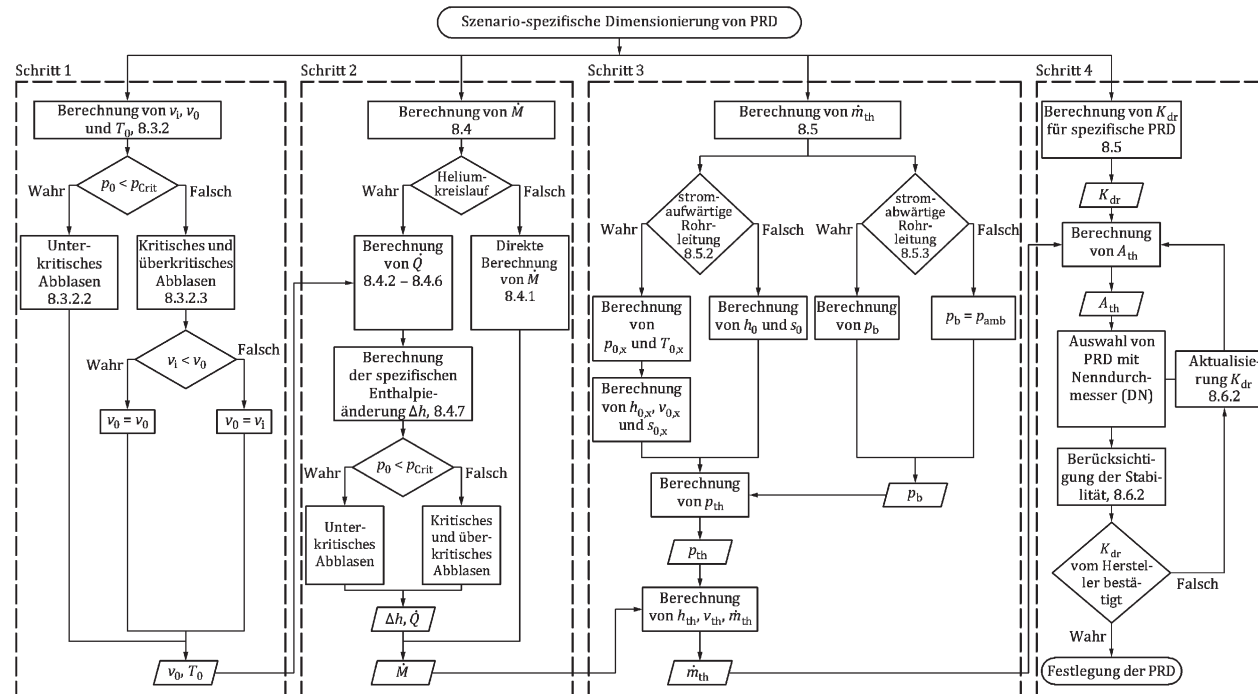


Bild 2 — Prozessablaufdiagramm zur Szenario-spezifischen Dimensionierung von Heliumkreislauf-PRD

6 Gefährdungsbeurteilung

6.1 Allgemeine Informationen zur Gefährdungsbeurteilung

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

Die in 6.2 und 6.3 angegebenen Ursachen für unzulässigen Druckanstieg müssen bei der Gefährdungsbeurteilung eines Helium-Kryostaten berücksichtigt werden.

Die Ursachen für unzulässigen Druckanstieg nach 6.2 sind für die Dimensionierung von PRD relevant. Die Ursachen für unzulässigen Druckanstieg nach 6.3 müssen als Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung gemindert werden.

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

ANMERKUNG Die Risiko- und Gefährdungsanalyse nach der Druckgeräterichtlinie (DGRL, en: Pressure Equipment Directive, 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).

6.2 Für die Dimensionierung relevante Ursachen für unzulässigen Druckanstieg

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 Wärmelast hängt vom optionalen Einbau einer Superisolation (MLI) auf der kryogenen Oberfläche ab. Der Verlust des Isoliervakuums legt in Helium-Kryostaten oft die größte anzunehmende Störung (MCI, en: maximum credible incident) fest, die die Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen beeinflusst.

Der LIV muss bei der Gefährdungsbeurteilung 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 Abschnitt B.1 angegeben.

6.2.2 Verlust des Strahlrohrvakuums

Der Verlust des Strahlrohrvakuums (LBV) durch Belüften mit atmosphärischer Luft ähnelt dem LIV-Szenario. Dies ist insbesondere für supraleitende Beschleunigeranlagen relevant, bei denen die innere Oberfläche des Strahlrohrs grundsätzlich nicht mit MLI abgedeckt werden kann. Das führt zu maximalen Werten der Wärmestromdichte aufgrund von Desublimation und Kondensation der belüftenden Luft auf der kryogenen Oberfläche. Solche Störungen können durch die Beschädigung von Verbindungsfaltenbälgen zwischen zwei supraleitenden Vorrichtungen in einem Strahlrohr 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 Abschnitt 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 (resistiven) Zustand. Der normalleitende Zustand bedeutet Widerstandsverluste, die nach dem Stromwärmegesetz elektromagnetische Energie in Form von Wärme an das Helium ableiten. Die Wärmelast, die durch das Quenchen einer supraleitenden Magnetspule entsteht, induziert einen signifikanten Druckanstieg des Heliums. Quenche können 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 und in der Gefährdungsbeurteilung 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 Abschnitt B.3 angegeben.

6.2.4 Leakage von kryogenem Fluid

Bei Leakage von kryogenem Fluid tritt entweder Helium aus dem Heliumsystem, Stickstoff aus einem Flüssigstickstoff-Isolationssystem (Stickstoff-Schutteinrichtung) oder ein anderes Systemfluid in den Isoliervakuumraum aus. Dies verursacht einen Druckanstieg sowohl im Vakuum- als auch im kryogenen Fluidsystem, der für die Leakage verantwortlich ist.

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 Leakage von kryogenem Fluid ist in 8.4.5 festgelegt. Weitere Informationen zur Leakage von kryogenem Fluid sind in Abschnitt 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 Vakuumsystemen führen.

Das Risiko größerer Lichtbögen muss bei der Gefährdungsbeurteilung 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 Abschnitt 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 unvermeidbarer Wärmeeinträge (natürliche Verluste) und insbesondere bei LIV. 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 Gefährdungsbeurteilung 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 Ursachen für unzulässigen Druckanstieg, 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 äußeren Komponenten bei Umgebungstemperatur, wie z. B. Druckmessgeräten und Druckentlastungseinrichtungen, aufbaut. TAO erhöhen den Wärmetransport entlang der entsprechenden Leitung stark und verursachen typischerweise auch Eisbildung an den äußeren Komponenten. 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, TAO einzuschränken, sind in Abschnitt 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 Frostsicht auf der kryogenen Oberfläche an. Beim Aufwärmen verdampfen die desublimierten 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 Abschnitt B.7 erläutert.

6.3.3 Ausfall der Stromversorgung

Ein Ausfall der Stromversorgung kann zu einem Mangel an Kühlleistung führen, 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

Das gefährdende Gefrieren von Fluiden 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-Schutzgase für Systeme unterhalb des Atmosphärendrucks.

6.3.6 Rückströmen

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

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

6.3.7 Andere Ursachen für Drucküberschreitung

Andere Ursachen 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 Ursachen für einen unzulässigen Druckanstieg vorhanden sind, müssen diese bei der Gefährdungsbeurteilung 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 aus [festgelegt z. B. in EN 13445 (alle Teile)], als auf die Auslegung von Druckentlastungseinrichtungen. Dennoch können Erdbeben einen Bruch des Isoliervakuums und des Strahlrohrvakuums durch eine mögliche Verschiebung des Kryostaten und eine Beschädigung der Verbindungsfaltenbälge auslösen.

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

6.3.9 Brand

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

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

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- und Brandbekämpfungsmaßnahmen auszuschließen.

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

6.4 Kombinierte Szenarien

Im Allgemeinen werden die Ursachen für unzulässigen Druckanstieg 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 Störungen in Helium-Kryostaten beinhaltet die Gefährdungsbeurteilung häufig die Berücksichtigung von Zeitkonstanten von Ereignissen nach einer Störung. Ein Quench eines supraleitenden Magneten, der durch den Verlust des Isoliervakuums ausgelöst wird, oder ein Ausfall der Stromversorgung, der durch den Verlust des Strahlrohrvakuum in Teilchendetektor- und -beschleunigersystemen hervorgerufen wird, sind Beispiele für ein Doppelereignis.

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

6.5 Gefährdungsbeurteilung vor der Bestellung

Bei der Bestellung eines Helium-Kryostaten muss vom Endbenutzer vor der Beschaffung eine qualitative Gefährdungsbeurteilung erstellt werden. Dies muss durch die Durchführung einer Gefährdungs- und Betriebbarkeitsstudie (HAZOP, en: Hazard and Operability Study, siehe IEC 61882:2016) oder eines gleichwertigen anerkannten Verfahrens erreicht werden. Die Gefährdungsbeurteilung muss enthalten:

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

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

- die vorläufige Festlegung eines ein- oder mehrstufigen Schutzkonzepts;
- die stromabwärtigen Bedingungen und Heliumrückhaltesysteme.

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

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

6.6 Gefährdungsbeurteilung in der Auslegungsphase

In der Auslegungsphase muss eine Gefährdungsbeurteilung erstellt werden, die mindestens die Bewertung und Überprüfung der in 6.2 angegebenen Ursachen für unzulässigen Druckanstieg umfasst. Dies wird durch die Durchführung einer Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA, en: Failure Mode and Effect Analysis [32] [34]) oder eines gleichwertigen anerkannten Verfahrens erreicht. Die Gefährdungsbeurteilung in der Auslegungsphase muss eine genaue Beschreibung der Betriebssicherheit des Kryostaten enthalten. Gefährdungen müssen identifiziert und Maßnahmen festgelegt werden, um die Gefährdungen auf ein annehmbares Niveau zu reduzieren oder zu mindern.

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

7 Schutzkonzepte

7.1 Allgemeines

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

Bei Helium-Kryostaten sind hydrostatische Prüfungen unpraktisch und nachteilig, so dass im Allgemeinen nur pneumatische Prüfungen zulässig sind.

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 einer Störung verhindert die Schutzebene mit Hilfe einer Druckentlastungseinrichtung (PRD), dass der Druck die zulässige Grenze überschreitet. Der Schutz gegen unzulässigen Druckanstieg muss entweder durch nicht wieder verschließbare PRD, z. B. Berstscheiben (BD) mit einem Berstdruck p_{burst} kleiner oder gleich dem maximal zulässigen Druck 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 nicht wieder verschließbaren PRD und die Öffnungscharakteristiken der wieder verschließbaren PRD müssen die vorübergehende Drucküberschreitung auf maximal 10 % von p_s begrenzen.

Die Schadenbegrenzungsebene umfasst neben der Druckabsicherungsebene zusätzliche Anforderungen gegen äußere Gefährdungen, z. B. Schutzeinrichtungen, Brandschutz, Sauerstoffüberwachung, Absperrungen, Zugangsbeschränkungen und Heliumrückhaltesysteme.

Weitere Informationen sind in Abschnitt C.1 angegeben.

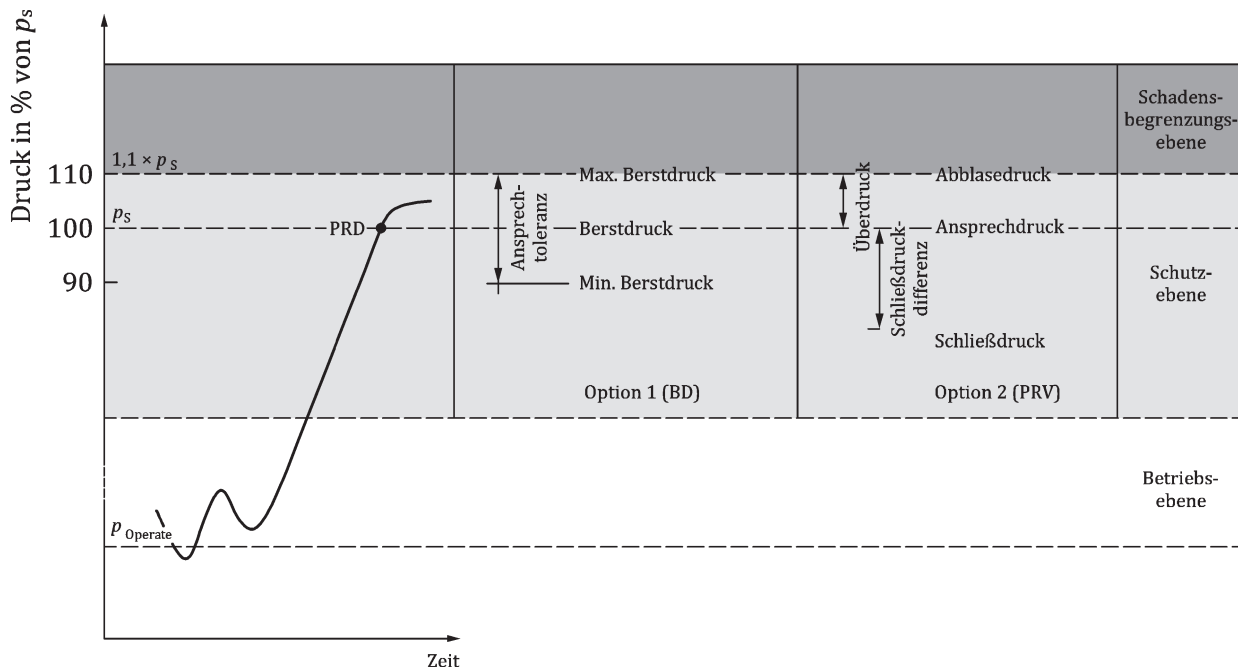


Bild 3 — Beispiel für ein einstufiges Abblasesystem mit entweder einer Berstscheibe (BD) als nicht wieder verschließbare Druckentlastungseinrichtung (Option 1, $p_{\text{burst}} = p_s$) oder einem Druckentlastungsventil (PRV) als wieder verschließbare Druckentlastungseinrichtung (Option 2, $p_{\text{set}} = p_s$)

7.3 Mehrstufige Schutzkonzepte

7.3.1 Allgemeines

Nach EN ISO 4126-3:2020 sind Kombinationen von in Reihe geschalteten wieder verschließbaren und nicht wieder verschließbaren PRD, insbesondere die Kombination aus Druckentlastungsventilen (PRV) und Berstscheiben (BD), aus den folgenden Gründen zulässig:

- a) Schutz des PRV gegen Korrosion, Belagbildung oder Betriebsbedingungen, die die Funktionsfähigkeit beeinträchtigen können;
- b) Verhinderung von Leckage;
- c) Verhinderung des Verlusts der Inhalte des zu schützenden Systems nach dem Bersten der Berstscheibe (BD).

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 der größten anzunehmenden Störung (MCI) entsprechend der Gefährdungsbeurteilung 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 können sekundäre PRD die Festlegung des maximal zulässigen Drucks p_s in mehrstufigen Schutzkonzepten von Helium-Kryostaten beeinflussen. Die Werte von p_0 der primären 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 nicht wieder verschließbare primäre Druckentlastungseinrichtung und einem Druckentlastungsventil (PRV) als wieder verschließbare sekundäre Druckentlastungseinrichtung.

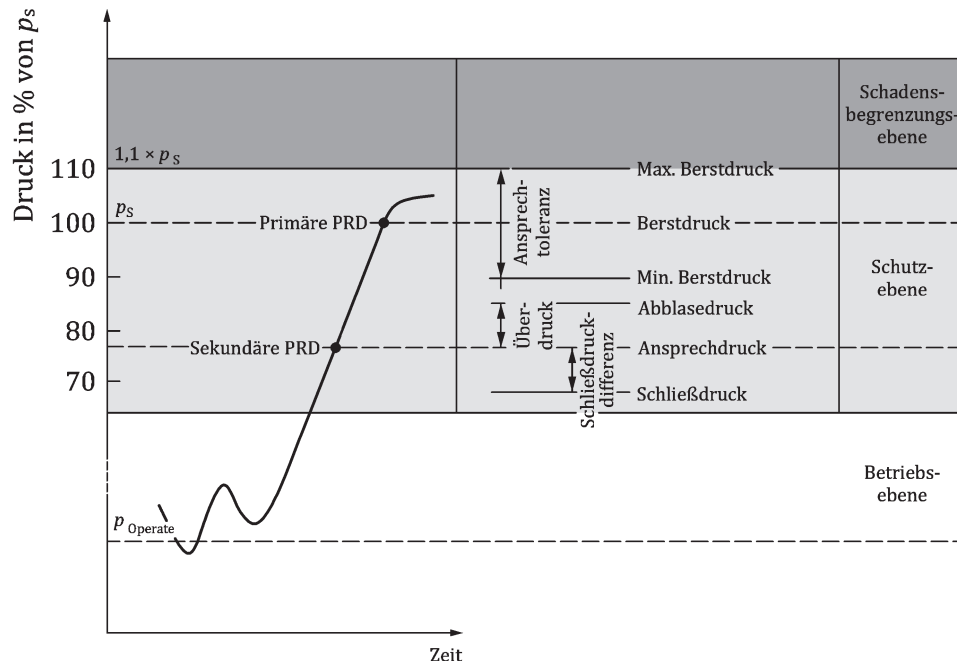


Bild 4 — Beispiel für ein mehrstufiges Abblasesystem mit einer Berstscheibe (BD, $p_{burst} = p_s$) als nicht wieder verschließbare primäre Druckentlastungseinrichtung und einem Druckentlastungsventil (PRV) als wieder verschließbare sekundäre Druckentlastungseinrichtung

7.3.2 Druckabsicherung von Hochdruck-Helium-Kryostaten

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

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 zur MCI hervorrufen, darf eine sekundäre PRD als Quenchentlastungsventil (QRV, en: quench relief valve) mit einem Abblasedruck $p_0 < p_s + p_{amb}$ 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. $p_s < p_{crit} = 2,3 \text{ bar(a)} - p_{amb}$. In solchen Systemen ist es kaum möglich, eine sekundäre PRD bei $p_0 < p_s + p_{amb}$ 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 $p_0 \geq p_s + p_{\text{amb}}$ ausgelöst wurde, muss das Druckgerät einer neuen Abnahmeprüfung unterzogen werden, die eine Druckprüfung umfassen kann.

Weitere Informationen sind in C.2.3 angegeben.

7.3.4 Druckabsicherung von subatmosphärischen Helium-Kryostaten

Die primäre PRD von subatmosphärischen Helium-Kryostaten darf durch Helium-Schutzgase geschützt werden, wodurch eine serielle Kombination von PRD gebildet wird, um Leckagen in das Heliumsystem zu verhindern.

Es wird empfohlen, dass entweder die primäre oder die sekundäre PRD nicht wieder verschließbar 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 können zusätzliche Begrenzungen für den Abblase-Massenstrom enthalten, insbesondere 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-Tieftemperatursystemen

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

Ultra-Tieftemperatursysteme können auf verschiedene Weise arbeiten. Konfigurationen mit einem blockierten Joule-Thomson-Ventil an der Eintrittsseite beschreiben häufig die größte anzunehmende Störung. 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-Tieftemperatursysteme sollten mindestens mit einer wieder verschließbaren primären PRD ausgestattet sein. Eine sekundäre PRD sollte es dem ^3He oder der $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischung ermöglichen, verlustfrei und sicher zu ihrem Speicherplatz zurückzukehren.

Weitere Informationen sind in C.2.6 angegeben.

8 Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen

8.1 Verfahren zur Dimensionierung 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 sollte jedoch das Homogene Gleichgewichtsmodell (HEM [en: Homogeneous Equilibrium Model] oder G-Modell) [26] nach Abschnitt 8 verwendet werden, da es für den gesamten relevanten Druck- und Temperaturbereich in Helium-Kryostaten 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 Abschnitt D.1 erläutert.

Als Alternative zum HEM nach Abschnitt 8 darf für die Dimensionierung von PRD das fallspezifische Modell in Abschnitt D.2 angewendet werden.

8.2 Berechnung des Mindest-Abblasequerschnitts

Die allgemeine Gleichung für die Berechnung des Mindest-Abblasequerschnitts A_{th} einer PRD lautet

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

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 im Kryostaten in m^3/kg , wie in 8.3 festgelegt;
- $\dot{M}$ der Abblase-Massenstrom in kg/s, wie in 8.4 festgelegt;
- $p_{0,x}, s_{0,x}$ der Abblasedruck ($p_{0,x}$) in bar(a) 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;
- $\dot{m}_{th}$ die Massendichte im Abblasequerschnitt in $kg/(m^2s)$, 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 stromaufwärtigen Rohrleitungen, und „th“ bezieht sich auf die Zustände im Abblasequerschnitt. 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 wie folgt sein:

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

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 gleich dem Ansprechdruck plus Öffnungsdruckdifferenz.

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

Bei Verwendung von Berstscheiben als nicht wieder verschließbare PRD ist der Abblasedruck gleich dem maximalen Berstdruck.

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

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 in Anhang A 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 von A_{th} angenommen werden.

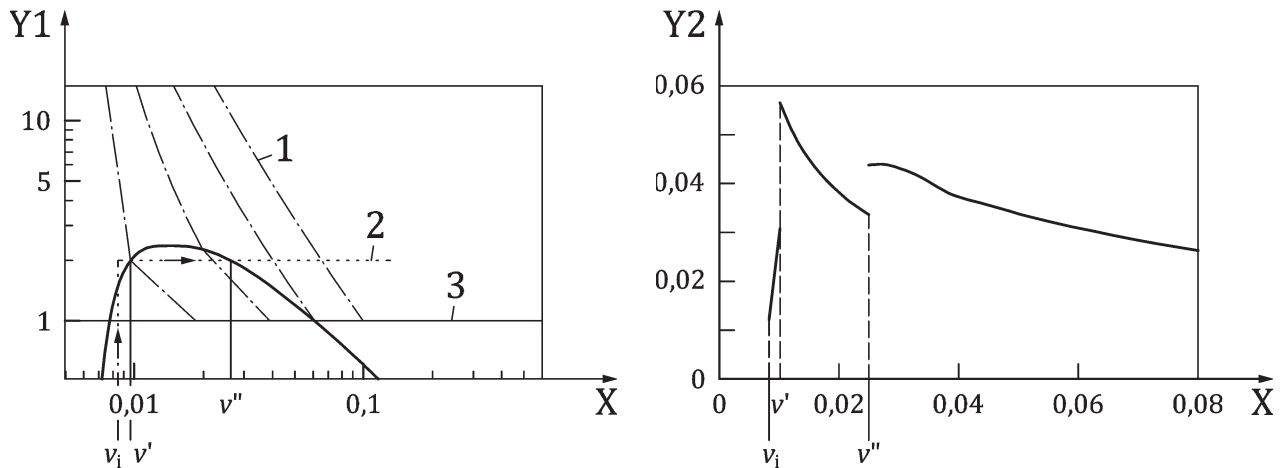
$$v_0 = v \Big|_{\substack{\max \\ v \geq v_i}} [A_{\text{th}}(v)] \quad (7)$$

mit

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

Wenn das spezifische Volumen v_0 aufgrund fehlender Angaben zu v_i 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.



a) Beispielhafter Prozesspfad eines unterkritischen Abführens bei einem Abblasedruck von $p_0 = 2$ bar(a), beginnend bei einem spezifischen Anfangsvolumen v_i

b) Entsprechende Entwicklung des Mindest-Abblasequerschnitts A_{th} je Watt Wärmelast; das Maximum von A_{th} wird bei $v_0 = v'$ im Zweiphasengebiet erreicht

Legende

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

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

Bild 5 — Typische Entwicklung des Mindest-Abblasequerschnitts bei unterkritischem Abblasedruck

8.3.2.3 Spezifisches Volumen bei kritischem und überkritischem Abblasedruck

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

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

Dabei ist

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

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

sein Maximum erreicht [46].

ANMERKUNG 1 Siehe Beispiel in Abschnitt D.5.

Abhängig vom spezifischen Anfangsvolumen v_i müssen zwei Fälle unterschieden werden:

- a) $v_i < v$: v_0 wird nach Gleichung (9) mit dem Maximum von Ausdruck (10) berechnet
- b) $v_i \geq v$: $v_0 = v_i$

ANMERKUNG 2 Während des Abblasens 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 von PRD muss der Abblase-Massenstrom $\dot{M}$ aus der Energiebilanz berechnet werden, die auf ein offenes System bei konstantem Abblasedruck p_0 angewendet wird. Wenn die Riskobeurteilung zu dem Schluss führt, dass andere Ursachen für einen unzulässigen Druckanstieg nicht gemindert werden können (siehe 6.3), müssen die daraus resultierenden Massenströme $\dot{M}_{\text{other}}$ berücksichtigt werden.

$$\dot{M} = \frac{\dot{Q}}{\Delta h} + \dot{M}_{\text{other}} \quad (11)$$

Dabei ist

- $\dot{M}$ der Abblase-Massenstrom in kg/s;
- $\dot{M}_{\text{other}}$ der Abblase-Massenstrom in kg/s bei anderen Szenarien (siehe 6.3);
- $\dot{Q}$ die Wärmelast in W für die relevanten Szenarien nach 8.4.2 bis 8.4.6; und
- Δh die spezifische Enthalpieänderung des Heliums 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 Vielfalt komplexer und individueller Ausführungen von Helium-Kryostaten kann ein Gesamtalgorithmus zur Berechnung der Wärmelast $\dot{Q}$ nicht festgelegt werden. Die Bestimmung der Wärmelast für ein bestimmtes Störungsszenario darf daher beruhen auf:

- 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 Störungsszenarios, 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 verursachte Wärmelast $\dot{Q}_{\text{liv}}$ ist definiert als

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

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

— Unterkritischer Abblasedruck $p_0 < p_{\text{crit}}$

$$\dot{q}_{\text{liv}} = 3,8 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \quad (13)$$

wie angegeben in [19].

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

$$\dot{q}_{\text{liv}} = 2,0 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \quad (14)$$

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 $\dot{q}_{\text{liv}}$ 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 des Strahlrohrvakuums

Der Verlust des Strahlrohrvakuums kann für die Dimensionierung der PRD des Helium-Kryostaten, z. B. der Beschleunigerbauteile, relevant sein.

Bei Verlust des Strahlrohrvakuums durch Belüftung mit atmosphärischer Luft erreicht die an das 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 Strahlrohrvakuum, bei denen das Verhältnis zwischen der Leckagefläche und der betroffenen kryogenen Oberfläche

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

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

- 1) Es wird die Größe der Leckagefläche im Störfall als Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung 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:

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

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

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

ANMERKUNG 1 Tabelle B.2 in Abschnitt 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 des Strahlrohrs abgeführte Wärmelast wird berechnet, indem die spezifische Enthalpie-Differenz mit dem Massenstrom multipliziert wird.

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

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

ANMERKUNG 3 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 eines durch einen Quench verursachten unzulässigen Druckanstiegs zu verringern, sollte das Flüssigkeits-Gas-Verhältnis von Helium im Kryostaten 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 einer SCD verursachte Wärmelast auf das Heliumsystem ist definiert als

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

Die an das Helium übertragene Wärmestromdichte beträgt

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

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, festgelegt als

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

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