

Flüssighelium-Kryostate – Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung

Cryostats for liquefied helium –
Safety devices for protection against excessive pressure

Cryostats pour hélium liquéfiés –
Dispositifs de sécurité pour protection contre les pressions excessives

Dieser Entwurf mit Erscheinungsdatum 2014-06-27 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de 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/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den Normenausschuss Druckgasanlagen (NDG) im DIN, 10772 Berlin (Hausanschrift: Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin).

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

Zur Erstellung einer DIN SPEC können verschiedene Verfahrensweisen herangezogen werden:
Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln eines Fachberichts erstellt.

Gesamtumfang 74 Seiten

Inhalt

	Seite
Vorwort	5
Einleitung.....	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Begriffe	7
3 Systematik	11
4 Gefahrenanalyse – Gefährdungsbeurteilung.....	11
4.1 Gefahrenanalyse	11
4.2 Gefährdungsbeurteilung	12
4.3 Methodik	12
4.4 Absicherungskonzept	12
5 Druckentstehung	12
5.1 Allgemeines	12
5.2 Druckentstehung durch Stoffströme	13
5.3 Druckentstehung durch Wärmeströme	13
5.4 Sonstige Ursachen	13
5.5 Berücksichtigung von Brandlasten	13
5.6 Füllgrad, Zeitkonstanten, Gleichzeitigkeitsfaktor	14
6 Bestimmung des Abblasequerschnitts von Sicherheitsarmaturen	14
6.1 Allgemeines	14
6.2 Bestimmung des gewichteten abzuführenden Massenstromes.....	14
6.3 Berechnung des erforderlichen Abblasequerschnitts	15
6.3.1 Allgemeines	15
6.3.2 Berücksichtigung des Isentropenexponenten	15
7 Ausführung von Sicherheitseinrichtungen.....	15
7.1 Allgemeines	15
7.2 Sicherheitsventil	15
7.3 Berstscheiben	16
7.4 Sicherheitsventil-Berstscheiben-Kombination.....	16
7.5 Sicherheitseinrichtungen für Vakuumbehälter.....	16
7.6 Halterungen, Haltekräfte	16
8 Stofffreisetzung.....	17
8.1 Allgemeines	17
8.2 Ableitungen und Abblasesysteme	17
8.3 Freisetzung unmittelbar in die Umgebung.....	17
9 Betrieb von Helium-Druckbehältern	17
9.1 Prüfung vor Inbetriebnahme.....	17
9.1.1 Gefährdungsbeurteilung und sicherheitstechnische Bewertung	17
9.1.2 Klassifizierung von Druckgeräten gemäß BetrSichV und Ermittlung der Prüffristen	18
9.1.3 Sicherheitseinrichtungen.....	19
9.1.4 Betriebsanleitung.....	19
9.2 Wiederkehrende Prüfungen der den Druckbehältern zugeordneten Sicherheitseinrichtungen.....	19
9.2.1 Allgemeines	19
9.2.2 Sicherheitsventile	19
9.2.3 Berstscheiben	19

9.2.4	Instandhaltung	20
10	Werkstoffe für Sicherheitseinrichtungen	20
Anhang A (informativ) Eigenschaften und thermodynamische Besonderheiten von Helium		21
A.1	Allgemeines/Grundlagen	21
A.2	Symbole/Bezeichnungen	23
A.3	p, v -Diagramm für Helium	25
A.4	Dimensionierung von Sicherheitseinrichtungen	27
A.4.1	Allgemeines	27
A.4.2	Berechnung des gewichteten abzuführenden Massenstroms	27
A.4.3	Isentropenexponent/Ausflussfunktion	30
A.4.4	Ausflussziffer	31
A.4.5	Beispielrechnung	32
Anhang B (informativ) Absicherungskonzept		34
B.1	Absicherungssystem	34
B.2	Besonderheiten kryotechnischer Druckbehälter	34
B.3	Unterscheidung: Betriebsbedingtes Abblasen – sicherheitsrelevanter Störfall	34
B.4	Sicherheitskonzept und Elemente der Eingriffsebenen	35
Anhang C (informativ) Kenngrößen zur Druckentstehung		37
C.1	Speicherbehälter und Leitungen	37
C.2	Druckentstehung durch Einbauten und sonstige Ursachen	37
C.2.1	Allgemeines	37
C.2.2	Druckentstehung durch Überfüllung	37
C.2.3	Druckentstehung durch Absperrung	37
C.3	Leckagen in das Isoliervakuum	38
C.4	Thermoakustische Schwingungen	41
C.4.1	Grundphänomen	41
C.4.2	Physikalisch-technische Details	42
C.4.3	Vermeidungsstrategien	43
C.5	Betrieb supraleitender Magnet	44
C.5.1	Allgemeines	44
C.5.2	Badbetrieb	44
C.5.3	Überkritischer Betrieb	45
C.5.4	Elektrischer Überschlag	47
C.6	Kryogene Helium-Transferleitungen	48
C.6.1	Druckabsicherung der heliumführenden Leitung im Normalbetrieb	48
C.6.2	Verlust des Isoliervakuums	48
C.6.3	Druckabsicherung des Vakuummantels	48
Anhang D (informativ) Sicherheitsarmaturen von Flüssighelium-Druckbehältern		49
D.1	Anwendungsnorm	49
D.2	Produktnormen	49
D.3	Systematik	50
D.4	Sicherheitsventile	50
D.4.1	Aufgaben, Voraussetzungen	50
D.4.2	Voraussetzungen für einwandfreien Betrieb – herstellerseitig	50
D.4.3	Voraussetzungen für einwandfreien Betrieb – anwenderseitig	50
D.4.4	Auswahl der Funktionscharakteristik von Sicherheitsventilen	51
D.4.5	Definition und Vorgehensweise für Ansprech- und Einstelldruck	53
D.4.6	Spezifische Ausrüstungen	55
D.5	Berstscheiben	57
D.5.1	Aufgaben, Voraussetzungen	57
D.5.2	Metallberstscheiben	57
D.5.3	Graphitberstscheiben	58
D.5.4	Ausflussziffer	59
D.5.5	Einflüsse auf Ansprechdruck	59
D.5.6	Langzeitverhalten	60
D.5.7	Einspannvorrichtungen	60

D.5.8	Leckraten	61
D.6	Sicherheitsventil-Berstscheiben-Kombination.....	61
D.6.1	Allgemeines	61
D.6.2	Wechselventil.....	62
D.7	Sicherheitseinrichtungen für Vakuumbehälter.....	62
D.7.1	Allgemeines	62
D.7.2	Vakuumklappe.....	62
D.7.3	Berstscheiben	62
Anhang E (informativ) Einbau, Leitungen, Querschnitte.....		63
E.1	Allgemeines	63
E.2	Druckverlust im Einlauf.....	63
E.2.1	Allgemeines	63
E.2.2	Maßnahmen bei erhöhtem Einlaufdruckverlust	64
E.2.3	Konsequenzen aus dem Überschreiten	64
E.3	Druckverlust im Auslauf – Gegendruck	64
Anhang F (informativ) Montage von Sicherheitseinrichtungen.....		66
F.1	Halterungen von Sicherheitseinrichtungen	66
F.2	Kompensation der Strömungskräfte und thermischer Stress	66
F.3	Dichtheit der Flanschverbindungen	66
F.4	Dichtscheibe in der Verschraubung	66
F.5	Lecksuche nach Montage	66
Anhang G (informativ) Dielektrische Festigkeit		67
Anhang H (informativ) Werkstoffeigenschaften		68
H.1	Längenausdehnung.....	68
H.2	Vermeidung von Sprödbbruch bei tiefen Temperaturen	68
H.3	Leck-vor-Bruch-Verhalten.....	68
Anhang I (informativ) Gefahrenanalyse.....		69
Literaturhinweise		72

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 016-00-07 AA „Flüssighelium-Druckbehälter — Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitungen“ im Normenausschuss Druckgasanlagen (NDG) bei DIN erarbeitet.

Einleitung

Es werden die spezifischen Bedingungen und Verhältnisse für die Druckabsicherung von Speicherbehältern, Experimentiereinrichtungen, Verteilerleitungen sowie Ventilboxen für tiefkalt verflüssigtes Helium, wie sie in Technik und Wissenschaft eingesetzt werden, betrachtet. Diskutiert werden die Auswahl der Sicherheitseinrichtungen, die Berechnung der erforderlichen Abblasequerschnitte, die Festlegung von Einstell- bzw. Berstdrücken sowie die spezifische Eignung von Sicherheitsarmaturen zur unmittelbaren Druckbegrenzung, soweit dies in den vorhandenen Regelwerken nicht oder nicht ausreichend festgelegt ist.

In diesem Dokument wird das gesamte Druckentlastungssystem behandelt mit der Absicht, eine sehr zuverlässige Funktion des Systems zu erreichen.

Druckgeräteichtlinie

Die Auslegung jeder Sicherheitseinrichtung gegen Drucküberschreitung erfolgt unter Berücksichtigung aller relevanten Bedingungen bei Vorliegen eines inneren Überdruckes. Die jeweils anzuwendenden Bedingungen sind in der Produktnorm für jeden Kryo-Behälter-Typ festgelegt.

Die Druckgeräteichtlinie 97/23/EG [1] (DGRL) gilt für die Auslegung, Fertigung und Konformitätsbewertung von Druckgeräten und Baugruppen mit einem maximal zulässigen Überdruck von mehr als 0,5 bar. Darin wird für die Einrichtungen zur Druckbegrenzung gefordert, dass die Auslegung eine kurzzeitige Drucküberschreitung auf 10 % des maximal zulässigen Druckes *PS* begrenzt. Sicherheitsventile und Berstscheiben gelten nach der DGRL als Ausrüstungsteile mit Sicherheitsfunktion und sind der höchsten Kategorie IV zugeordnet. Für die Ausrüstungsteile mit Sicherheitsfunktion gilt Folgendes:

- Sie müssen unter Berücksichtigung etwaiger Wartungs- und Prüfanforderungen für die Vorrichtungen so ausgelegt und gebaut sein, dass sie zuverlässig und für die vorgesehenen Betriebsbedingungen geeignet sind.
- Sie dürfen keine anderen Aufgaben erfüllen, es sei denn, ihre sicherheitsrelevanten Funktionen können dadurch nicht beeinträchtigt werden.
- Sie müssen den geeigneten Auslegungsgrundsätzen im Hinblick auf einen angemessenen und zuverlässigen Schutz entsprechen. Zu diesen Grundsätzen gehören insbesondere ausfallsicheres Verhalten, Redundanz, Verschiedenartigkeit und Selbstüberwachung.

In der Leitlinie 7/17 zur DGRL [2] wird ausgeführt: Etablierte Regelwerke können als Grundlage für die Einhaltung der grundlegenden Sicherheitsanforderungen verwendet werden; allerdings ist es notwendig die Anforderungen zu vergleichen und eventuelle Abweichungen zu ermitteln und zu berücksichtigen. Dies erfordert von denjenigen, die das Regelwerk anwenden, ein gutes Verständnis der in Frage kommenden Grundsätze und nicht die mechanische Anwendung von Regeln.

Die in der Kryotechnik auftretenden Bedingungen sind in *etablierten Regelwerken* nicht ausreichend berücksichtigt. Das bedeutet, dass die Druckgeräte für jeden Einzelfall unter Berücksichtigung aller relevanten Faktoren, die ihre Sicherheit beeinflussen, entworfen und abgesichert werden müssen.

Alle in diesem Dokument genannten Drücke verstehen sich als Differenzdruck zum Umgebungsdruck, es sei denn, es ist ausdrücklich anders beschrieben. Absolutdruck wird als „bar (absolut)“ angegeben. In einigen Formeln wird der Druck auch in Pascal ($1 \text{ Pa} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ bar}$) angegeben.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument liefert Hinweise zur Gefahrenanalyse (Aufgabe des Herstellers) und Gefährdungsbeurteilung (Aufgabe des Betreibers), zur Druckentstehung, zum Absicherungskonzept und zur Schadensbegrenzung von ortsfesten Druckgeräten für tiefkaltes Helium in allen thermodynamischen Zuständen für zulässige Betriebsdrücke von mehr als 0,5 bar. Für Druckgeräte mit zulässigem Betriebsdruck von bis zu 0,5 bar kann dieses Dokument ebenfalls als Hilfestellung dienen.

BEISPIELE Ortsfeste Flüssighelium-Kryostate, Kryostate für heliumgekühlte supraleitende Magnete, Einrichtungen zur Heliumversorgung wie Ventilboxen und Transferleitungen.

Dieses Dokument dient als Leitfaden für die Ermittlung der individuellen Gefährdungslage einzelner Helium-Kryostate und zur Erarbeitung individueller Absicherungskonzepte. Darüber hinaus werden Hinweise zum Betrieb der Anlagen gegeben.

2 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

2.1

Kryotechnik

Verfahrensweisen, Technologien und Apparaturen für Betriebstemperaturen unterhalb 120 K bzw. -153 °C

2.2

kryogenes Fluid

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

2.3

Kryostat

Baugruppe, in der Komponenten bei sehr niedrigen Temperaturen, meist mit Hilfe von verflüssigten Gasen (insbesondere Stickstoff, Wasserstoff und Helium), betrieben werden können

2.4

Dewar

doppelwandiges, vakuumisoliertes Lager- und Transportgefäß für tiefkalte Flüssiggase

2.5

Helium

Edelgas zur Kühlung nahe dem absoluten Nullpunkt, insbesondere auch bei den meisten technischen Anwendungen der Supraleitung

Anmerkung 1 zum Begriff: Zu weiteren Details und zu thermodynamischen Eigenschaften siehe Anhang A.

2.6

supraleitender Magnet

Einrichtung zur Erzeugung eines äußeren magnetischen Feldes, in der ein supraleitender Draht oder ein supraleitendes Kabel verwendet wird

[QUELLE: IEC 60050-815:2000-11]

Anmerkung 1 zum Begriff: Supraleitende Materialien zeigen bei entsprechend tiefen Temperaturen und innerhalb bestimmter Betriebsparameter keinen Ohm'schen Widerstand; deshalb können ein elektrischer Stromfluss bzw. ein hierdurch erzeugtes Magnetfeld praktisch verlustlos aufrechterhalten werden.

2.7**Netzbetrieb**

(en: driven mode)

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

2.8**Dauerstrombetrieb**

(en: persistent mode)

<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

2.9**Quench**

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

2.10**Stromzuführung**

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Aufgrund der guten Wärmeleitung und des großen Temperaturgradienten muss die Stromzuführung bei größeren Systemen aktiv gekühlt werden. Die Stromzuführung besteht dann aus einem Kupferteil als elektrischem Leiter und einem Wärmeübertrager zur Kühlung.

2.11**Badkühlung**

Kühlverfahren, bei dem das zu kühlende Objekt in einem mit Kühlmedium gefüllten Behälter platziert ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Zur Kühlung wird im Wesentlichen nur mit der Verdampfungsenthalpie gearbeitet. Durch die Phasenänderung bedingt ist die Kühltemperatur weitgehend konstant, aufgrund des zumeist voluminösen Flüssigreservoirs ist die Kühlkapazität sehr groß.

2.12**Zwangskühlung**

Kühlverfahren, bei dem das Kühlmedium durch Kühlkanäle des Leiters gefördert wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Insbesondere bei supraleitenden Spulen kommt hier zumeist Helium im überkritisch-tiefkalten Zustand zum Einsatz. Die Förderung erfolgt durch Umwälzpumpen oder durch Direktanschluss an Vor- und Rücklauf der Heliumkältemaschine. Aufgrund des fehlenden Phasenübergangs steigt die Temperatur des Kühlmediums im Verlauf des Kühlkanals kontinuierlich an.

2.13**Superisolation**

sehr wirksame thermische Isolation in der Tieftemperaturtechnik, bei welcher der im Hochvakuum verbleibende Energietransport durch Wärmestrahlung zwischen warmem Außenbereich und tiefkaltem inneren Bereich stark verringert werden kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Superisolation (en: MLI, multilayer insulation) besteht im Allg. aus 20 bis 80 Lagen strahlungsreflektierender Folie, welche zumeist die tiefkalten Baugruppen umgibt. Gearbeitet wird zumeist mit sehr dünnen, aluminiumbedampften Kunststofffolien, alternativ auch mit dünnen Aluminiumfolien mit zwischenliegendem Abstandshalter (Glasfaser- oder Kunststoffnetzgewebe).

Anmerkung 2 zum Begriff: Superisulationsfolien kommen ausschließlich in Verbindung mit Hochvakuum-Isolation zum Einsatz. Die begrenzte Gasdurchlässigkeit zwischen den einzelnen Folien (exakter: der geringe Leitwert im Sinne der Vakuumtechnik) stellt eine gewisse Barriere bzw. zeitliche Verzögerung sowohl bei der anfänglichen Evakuierung als auch bei beabsichtigter oder unbeabsichtigter Flutung des Isolationsvakuums dar.

2.14

Transferleitung

Rohrleitungssystem zum Transport tiefkalter Gase

Anmerkung 1 zum Begriff: Zur Isolation befinden sich die kalten Leitungen in einem evakuierten Hüllrohr und sind meistens mehrlagig mit Superisolationsfolie und/oder einem aktiv gekühlten Schild umgeben.

2.15

thermoakustische Schwingung

thermoakustische Oszillation

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Die thermoakustische Schwingung führt zu einem erhöhten Wärmetransport zu dem betroffenen kalten Reservoir. Details hierzu siehe C.4.

2.16

Ventilbox

Baugruppe zur Verteilung des Kühlmittels auf mehrere Kryostate oder zur Durchflussregelung mehrerer vorhandener Vor- und Rücklaufleitungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Ventilbox besteht im Allgemeinen aus einem Vakuumbehälter mit einer Anordnung von Kryovalven und deren Verrohrung.

2.17

Vakuumbehälter

evakuierbarer Außenbehälter, welcher z. B. die im Betrieb tiefkalten Einbauten und Innenbehälter umgibt und das Herstellen der zum Betrieb notwendigen Hochvakuumbedingungen ermöglicht

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

2.18

benannte Stelle

en: notified body

unabhängige sachkundige Organisation, welche die Herstellung von überwachungsbedürftigen Anlagen nach DGRL und ggf. weiteren relevanten Richtlinien überwacht

2.19

zugelassene Überwachungsstelle

ZÜS

zugelassene Überwachungsstelle zur Überwachung von Druckgeräten im Betrieb gemäß geltendem Recht

Anmerkung 1 zum Begriff: Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments ist die ZÜS nach § 37 ProdSG definiert.

2.20

Leckagerate

Leckrate

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

[QUELLE: DIN EN 1330-8:1998-07]

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Leckrate wird in der Vakuum- bzw. Kryostattechnik oftmals in der Einheit mbar l/s angegeben, da praktikabler als etwa die Angabe des Massenstroms in g/s. Die Umrechnung ist fluidabhängig.

2.21

pV-Durchfluss

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

[QUELLE: DIN EN 1330-8:1998-07]

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

2.22**zugehörige Temperatur**

einem Berstdruck zugeordnete Temperatur der Berstscheibe, die der voraussichtlichen Temperatur der Berstscheibe zum erforderlichen Zeitpunkt des Ansprechens entspricht

2.23**Flattern**

(en: chattering)

instabiles Abblasen eines Sicherheitsventiles, gekennzeichnet durch periodische Öffnungs- und Schließvorgänge

2.24**PS**

maximal zulässiger Druck, für den ein Druckgerät gemäß DGRL ausgelegt ist

2.25**Einstelldruck**

<Sicherheitsventil> Druck, bei dem das Sicherheitsventil auf dem Prüfstand zu öffnen beginnt

2.26**Ansprechdruck**

<Sicherheitsventil> Druck, bei dem das Sicherheitsventil in der Anlage tatsächlich zu öffnen beginnt

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Ansprechdruck hängt von den Betriebs/Umgebungsbedingungen ab (z. B. in der Halle oder im Freien, im Sommer oder im Winter), siehe D.4.5.

2.27**Abblasedruck**

p_0

<Sicherheitsventil> Ansprechdruck plus Öffnungsdruckdifferenz

2.28**Öffnungsdruckdifferenz**

<Sicherheitsventil> Differenz zwischen Einstelldruck und dem Druck bei vollständiger Öffnung, abhängig vom Ventiltyp

2.29**Berstdruck**

<Berstscheibe> tatsächlicher Differenzdruck zwischen Eintritts- und Austrittsseite, bei dem die Berstscheibe öffnet

[QUELLE: EN ISO 4126-2]

2.30**festgelegter Berstdruck:**

<Berstscheibe> bei zugehöriger Temperatur berechneter Berstdruck, welcher vom Hersteller ermittelt wird

[QUELLE: EN ISO 4126-2]

2.31**Ansprechtoleranz**

<Berstscheibe> Druckbereich zwischen maximal und minimal festgelegtem Berstdruck

[QUELLE: EN ISO 4126-2]

3 Systematik

Für ortsfeste Kryo-Behälter werden üblicherweise Sicherheitseinrichtungen nach DIN EN 13648-1 und -2 bzw. nach DIN EN ISO 4126 verwendet. Die abzuführenden Massenströme werden nach DIN EN 13648-3 ausgelegt; als Auslegungskriterium für den zugeführten Wärmestrom wird in diesen Fällen ein Verlust des Isolationsvakuums sowie ggf. der externe Brand berücksichtigt (siehe DIN EN 13648-3).

Für Helium-Kryostate sind diese Auslegungskriterien nicht ausreichend, da im bestimmungsgemäßen Betrieb weitere Mechanismen zum Wärmeeintrag aktiv werden können, wie z. B. durch Quench eingebauter supraleitender Magnete. Zudem treten beim Betrieb mit Helium Phänomene auf, die für Kryo-Sicherheitseinrichtungen in den bestehenden Normen unzureichend beschrieben sind, und die zu einer erheblichen Leistungsminderung für Sicherheitseinrichtungen führen können.

Die thermodynamischen Grundlagen für die Betrachtung von Systemen mit tiefkaltem Helium sind in Anhang A angegeben.

4 Gefahrenanalyse – Gefährdungsbeurteilung

4.1 Gefahrenanalyse

Entsprechend DGRL, Anhang I, Vorbemerkung Nr. 3, ist der Hersteller verpflichtet, eine Gefahrenanalyse durchzuführen, um die mit dem Druckgerät oder der Baugruppe verbundenen druckbedingten Gefahren zu ermitteln. Er muss das Druckgerät oder die Baugruppe dann unter Berücksichtigung dieser Gefahrenanalyse auslegen und bauen. Basis für die Gefahrenanalyse ist die bestimmungsgemäße Betriebsweise eines Druckgerätes oder einer Baugruppe. Zur Festlegung der bestimmungsgemäßen Betriebsweise muss die Kenntnis des Prozesses vorhanden sein, in welchen ein Druckgerät bzw. die Baugruppe integriert wird. Daraus leiten sich dann die Auslegungsbedingungen (z. B. Betriebsweise, Druck, Temperatur, Medium), die Anforderungen an die Werkstoffe sowie gegebenenfalls weitere betriebspezifische Anforderungen (z. B. Aufstellung, Instandhaltungsmaßnahmen) ab. In der Praxis haben sich hauptsächlich zwei Beschaffungswege etabliert, mit unterschiedlichen Verantwortlichkeiten und Vorgehensweisen zur Durchführung der Gefahrenanalyse [8]:

- a) Beschaffung eines einzelnen Druckgerätes zur Einbindung in eine Prozessanlage. Hierbei liegt die Kenntnis über die Verwendung des Druckgerätes beim Betreiber (Beschafter). Dieser ist verantwortlich dafür, dem Hersteller in der Bestellspezifikation alle Daten anzugeben, die für die Auslegung auf die erforderliche Belastbarkeit benötigt werden. Die Gefahrenanalyse hinsichtlich Auslegung, Konstruktion und Fertigung liegt in der Verantwortung des Herstellers (Lieferanten).
- b) Beschaffung einer Baugruppe (als funktional abgrenzbare Einheit). Hierbei liegt auch die Prozesskenntnis und damit die Kenntnis über die Verwendung der Baugruppe beim Hersteller (Lieferanten). Alle Elemente der Gefahrenanalyse sind dann in seiner alleinigen Verantwortung umzusetzen.

Die DGRL enthält keine verbindlichen Aussagen über Art, Umfang oder Form der Dokumentation der Gefahrenanalyse. Gemäß der Leitlinie 8-4 sind die Ergebnisse der Gefahrenanalyse (die anzuwendenden grundlegenden Sicherheitsanforderungen unter Zugrundelegung der vorhersehbaren Betriebsbedingungen) in die technischen Unterlagen aufzunehmen [2]; es werden jedoch keine umfassenden Einzelheiten gefordert.

Unter dem Aspekt der Produkthaftung kann eine geeignete Dokumentation der Gefahrenanalyse zweckdienlich sein.

Im Anhang I dieses Dokumentes ist beispielhaft eine Prüfliste zur Gefahrenanalyse dargestellt. Sie gibt eine nicht abschließende anwendbare Zusammenstellung von Gefahrenfaktoren, die durch inneren Überdruck bedingt sind, sowie Maßnahmen zu deren Beseitigung bzw. Verminderung. Diese Zusammenstellung soll dem Anwender als Orientierungshilfe bei der Durchführung und Dokumentation der Gefahrenanalyse dienen.

4.2 Gefährdungsbeurteilung

Das Arbeitsschutzgesetz [3] (ArbSchG) und andere Rechtsvorschriften (z. B. die Betriebssicherheitsverordnung [4] BetrSichV) verpflichten jeden Arbeitgeber, in seinem Betrieb eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Auf dieser Grundlage hat er dann Maßnahmen zu ergreifen, um die Beschäftigten gegen die bei ihren Tätigkeiten auftretenden Gesundheitsgefahren zu schützen.

Der Zweck der Gefährdungsbeurteilung besteht darin, aus der Analyse der Tätigkeiten und aus der Bewertung der mit ihnen verbundenen Gefährdungen die notwendigen Maßnahmen des Arbeitsschutzes abzuleiten. Das sind in erster Linie Maßnahmen der sicheren Arbeitsgestaltung. Es können aber auch Maßnahmen erforderlich werden, die auf den persönlichen Schutz oder das Verhalten der Beschäftigten abzielen.

Bei Druckbehältern und Rohrleitungen, d. h. bei überwachungsbedürftigen Anlagen, umfasst die Gefährdungsbeurteilung auch die sicherheitstechnische Bewertung. Diese dient der Ermittlung der Prüffristen für wiederkehrende Prüfungen (siehe Abschnitt 9).

4.3 Methodik

Die Gefahrenanalyse von Systemen basiert meist auf systematischen Methoden. Das PAAG-Verfahren ist ein Verfahren aus der Sicherheitstechnik. Es dient zur Untersuchung der Sicherheit von technischen Anlagen. Es basiert auf den Bausteinen **P**rognose, **A**uffinden der Ursache, **A**bschätzen der Auswirkungen, **G**egenmaßnahmen.

Eine weitere angewandte Methode ist die „HAZOP“ (**H**azard and **O**perability). Sie betrachtet sowohl die Gefahren als auch die Funktionsfähigkeit des Systems. Das System ist unterteilt in sogenannte Knoten, welche bezüglich aller denkbaren Fehlfunktionen untersucht werden. Die möglichen Fehlfunktionen werden systematisch anhand von entsprechenden Attributen und Schlüsselwörtern untersucht. Dieser Prozess berücksichtigt daher alle möglichen Szenarien, ohne eine Vorbeurteilung bestimmter Szenarien oder deren Eintritts-Wahrscheinlichkeit.

Im Anhang I dieses Dokuments wird ein System eines Flüssighelium-Behälters auf mögliche Gefahrenquellen analysiert und sowohl Häufigkeit wie auch die Konsequenz eines Versagens eingestuft. Anhand dieser Einstufung wird mittels der Risikomatrix das Risiko klassifiziert.

4.4 Absicherungskonzept

Die Grundlage eines Absicherungskonzepts sind die Gefahrenanalyse gemäß DGRL [1] und die Gefährdungsbeurteilung gemäß BetrSichV [4]. Zur realistischen Betrachtung sind der Ablauf einer Störung und die dazugehörigen Zeitkonstanten zu berücksichtigen, denn andernfalls wird das Konzept unrealistisch (Anhang B). Im Allgemeinen kommt die Einzelausfall-Theorie zur Anwendung. Bei dieser werden nur einzelne Störfälle anstelle einer Kopplung von Anlagenfehlern ohne ursächlichen Zusammenhang betrachtet, da dies sonst zu einer unrealistischen Überlagerung von Störfällen führen würde. Sinnvoll ist oft eine geeignete Auswahl sowie eine Abstufung der Entlastungsquerschnitte, um die Sicherheitsarmaturen an den gewichteten abzuführenden Massenstrom anzupassen.

5 Druckentstehung

5.1 Allgemeines

Die Druckentstehung kann vielfältige Ursachen haben. Während der Gefahrenanalyse und der Gefährdungsbeurteilung werden die Störfälle und damit die Auslegung der Sicherheitsarmaturen definiert. Die häufigsten Ursachen für Druckentstehung sind in 5.2 bis 5.6 dargestellt.

5.2 Druckentstehung durch Stoffströme

Bei Beschädigung des Isoliervakuumbehälters erfolgt eine Belüftung mit atmosphärischer Luft, bei Bruch eines Flüssigstickstoffschildes mit Stickstoff oder bei Bruch einer Heliumleitung durch Helium.

Ursachen der Flutung des Isoliervakuumbehälters können Bruch oder Beschädigung einer Rohrleitung oder eines Balges sein. Bei der Kühlung eines supraleitenden Magneten können außerdem Beschädigungen durch Durchbrand auftreten. Ursache dafür ist ein Versagen der elektrischen Isolation am Magneten oder an den Stromzuführungen, was zu einem Spannungsüberschlag führen kann. Der dabei entstehende Lichtbogen kann zur Perforation von Bauteilen und ebenfalls zur Flutung des Isoliervakuumbehälters führen, siehe C.5.

Die Festlegung der Größe der Beschädigung ist dabei für die Sicherheitsbetrachtungen und deren Ablauf wichtig. Eine Voraussetzung für die Definition einer Leckgröße ist oftmals das Leck-vor-Bruch-Verhalten. Die Annahme eines vollständigen spontanen Bruches z. B. einer Leitung führt oftmals zu unrealistisch großen Abblasequerschnitten der Sicherheitseinrichtungen. Durch geeignete Annahmen und Berechnungen kann ein Leck-vor-Bruch-Verhalten des Bauteiles angenommen werden. Eine vollständige Durchschweißung und 100 % Prüfung der Schweißnähte können geeignete Maßnahmen sein. Weitere Hinweise sind in C.3 angegeben.

5.3 Druckentstehung durch Wärmeströme

Eine mögliche Ursache erhöhten Wärmeeintrags sind thermoakustische Schwingungen. Zur Entstehung bzw. Reduzierung thermoakustischer Schwingungen siehe C.4.

Ebenfalls führt das Ausfrieren von Luft im Vakuumraum auf der Oberfläche des inneren Heliumbehälters zu Wärmeströmen, welche an das Helium übertragen werden. Bei der Kühlung von supraleitenden Magneten kann eine Umsetzung der im Magnetfeld gespeicherten Energie in thermische Energie infolge eines Quenches die Ursache für sehr drastische Druckerhöhungen im Kühlsystem sein.

5.4 Sonstige Ursachen

Weitere mögliche Ursachen von Druckentstehung sind Überfüllung des Behälters, nicht eindeutig definierte Anfahrbedingungen z. B. bei Starten einer Pumpe und Fehlbedienung. Ebenso kann der Druck im Heliumbehälter durch das Blockieren der Abgasleitung bzw. Rücklaufleitung ansteigen. Erläuterungen zu sonstigen Ursachen sind in C.2 angegeben.

5.5 Berücksichtigung von Brandlasten

Gemäß BetrSichV [4], TRBS 3146 [7], AD 2000-A403 [9] und auch DGRL bzw. EN 13458-2 ist es nicht erforderlich, bei der Auslegung von Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung (vorsorglich) den Brandfall zu berücksichtigen, wenn keine Brandlast im Sinne der Regelwerke vorliegt.

Dadurch überdimensionierte Sicherheitsventile neigen eher zu instabilem Verhalten (Flattern). Dies hat zur Folge, dass die Sicherheitsventile eher undicht werden und schneller verschleifen. Eine weitere Folge einer großen Überdimensionierung ist das Abblasen von Vollhubsicherheitsventilen im Proportionalbereich (siehe 7.2)

Die Anforderung in der DGRL Anhang I Abschnitt 2.12 für externe Brände bezieht sich auf die Schadensbegrenzung und dient nicht der Druckbegrenzung im Normalbetrieb (DGRL Leitlinie 5-2 [2]).

Externe Brände fallen in den Bereich der Schadensbegrenzungsebene, siehe Anhang B bzw. Bild B.2.

Als Brandlast gilt ein brennbarer Stoff in der Umgebung des Flüssighelium-Druckbehälters, der im Brandfall eine potentielle Gefährdung des Druckbehälters darstellt. Im Brandfall können infolge der Wärmeübertragung von der Brandlast Gefahren durch Flammenberührung oder Wärmestrahlung ausgehen (TRBS 3146, 2.10 [7]).

Besteht eine Brandlast, die im Brandfall ein Versagen drucktragender Wandungsteile, sicherheitstechnisch relevanter Ausrüstungsteile oder tragender Bauteile (Stahlstützen, Standzargen, Tragpratzen) von Druckbehältern durch unzulässige Erwärmung bewirken kann, sind entsprechende Schutzmaßnahmen, z. B. Brandverhütungs-, Brandschutz-, Brandbekämpfungsmaßnahmen vorzusehen, (TRBS 3146 [7], 4.1.1.20).

Das Auslegungsverfahren der Sicherheitsventile gemäß TRBS 3146 [7] beim Vorhandensein einer Brandlast mit ausreichendem Schutzabstand zum Druckbehälter ist für vakuumisolierte Behälter nicht anwendbar. Beim Vorhandensein einer Brandlast kann für die Auslegungen der Sicherheitsventile die DIN EN 13648-3 angewendet werden.

5.6 Füllgrad, Zeitkonstanten, Gleichzeitigkeitsfaktor

Ebenso wie die Leckgröße hat der Füllgrad des Speichervolumens Auswirkungen auf die Zeitkonstante des Druckanstiegs. Bei supraleitenden Magneten ist außerdem eine Berücksichtigung der Kühlbedingung des Magneten durch unterschiedliche Kühlkonzepte erforderlich.

Ebenfalls hat die Art der Isolation einen großen Einfluss auf die Zeitkonstante des Druckanstiegs. Im Gegensatz zum schnellen Druckanstieg in einem rein vakuumisolierten Kryostaten, verlangsamen sich die Vorgänge bei einem Störfall in einem superisolierten Behälter durch eine Reduktion des Wärmeeinfalls deutlich (siehe C.3)

Die Festlegung eines Gleichzeitigkeitsfaktors kann eine geeignete Maßnahme zur sinnvollen Reduzierung des notwendigen Abblasequerschnitts sein. Dies ist relevant für Kryostate mit mehreren supraleitenden Magneten (siehe C.5). Abhängig von den Entladezeitkonstanten der installierten Magnete ist ein zeitgleiches Quenchen unrealistisch.

6 Bestimmung des Abblasequerschnitts von Sicherheitsarmaturen

6.1 Allgemeines

Da im Allgemeinen nur der Betreiber die vielfältigen Verfahrensparameter und die besonderen Prozessbedingungen kennt, ist die Bestimmung des Massenstromes originäre Aufgabe des Betreibers. Die Ausführungen sollen dem Anwender Hilfestellung bei der Erfüllung des Prüfauftrages geben.

Die wesentliche Forderung aus der DGRL [1] lautet: Sicherheitseinrichtungen müssen so bemessen und eingestellt sein, dass eine Überschreitung des maximal zulässigen Druckes PS um mehr als 10 % verhindert wird

6.2 Bestimmung des gewichteten abzuführenden Massenstromes

Für die Dimensionierung von Sicherheitseinrichtungen ist nicht nur der abzuführende Massenstrom $\dot{Q}_m$, sondern auch das spezifische Volumen des Heliums v_{He} entscheidend. Die wichtigste Grundlage ist die Festlegung des gewichteten abzuführenden Massenstromes $\dot{Q}_m \sqrt{v_{He}}$. Die Ursachen sind in Anhang C dargestellt. Die Berechnung kann analog zu folgenden Methoden erfolgen:

- Methode beschrieben in EN 13648-3
- Differenzielle Methode

Die beiden Methoden sind A.4 detailliert dargestellt.

6.3 Berechnung des erforderlichen Abblasequerschnitts

6.3.1 Allgemeines

Die Größenbestimmung von Sicherheitsarmaturen erfolgt nach DIN EN ISO 4126-1 oder AD 2000-Merkblatt. Bei einem zulässigem Betriebsdruck PS unterhalb des kritischen Druckes ist die Ausbildung von Zweiphasenströmung zu berücksichtigen (DIN EN ISO 4126-10). Problematisch ist dabei die für die Berechnung erforderliche Ausflussziffer, denn von den Herstellern der Sicherheitsventile wird im Bauteilprüfzeichen die zuerkannte Ausflussziffer (K_{dr}) nur für einphasige Strömung angegeben. Dies gilt auch für Berstscheiben (siehe D.5).

6.3.2 Berücksichtigung des Isentropenexponenten

Bei konservativer Betrachtung wird für die Berechnung der Isentropenexponent des idealen Gases ($\kappa = 5/3$ für einatomige Gase) verwendet (siehe A.4).

7 Ausführung von Sicherheitseinrichtungen

7.1 Allgemeines

Sicherheitsventile und Berstscheiben sind Sicherheitseinrichtungen zur unmittelbaren Druckbegrenzung. Entsprechen sie dem Stand der Technik, werden sie als zuverlässige Einrichtungen eingestuft. Bei bauteilgeprüften Sicherheitsventilen werden keine Daten bezüglich der Zuverlässigkeit gefordert. In diesem Abschnitt werden spezifische Eigenschaften dieser Sicherheitsarmaturen für den kryogenen Anwendungsbereich diskutiert. Begrenzungseinrichtungen mit den Mitteln der Prozessleittechnik (PLT) wie z. B. Druck- oder Temperaturschalter werden nicht im Detail betrachtet.

7.2 Sicherheitsventil

Für den Einsatz in kryogenen Anlagen kommen direkt wirkende Sicherheitsventile mit Federbelastung zum Einsatz. Der Vorteil von Sicherheitsventilen ist, dass nach einer Unterschreitung des Schließdruckes das Sicherheitsventil selbstständig schließt. Es erfolgt nur der unumgängliche Massen- bzw. Energieaustrag. Es werden unterschiedliche Ventilvarianten eingesetzt. Der wesentliche Unterschied liegt in der Öffnungscharakteristik (siehe D.4). Der Grund für den Einsatz von Vollhubsicherheitsventilen gegenüber Proportionalicherheitsventilen ist die eindeutige Schließfunktion. Bei Proportionalicherheitsventilen kann es, zu einem auf dem Druck schwimmenden Ventilteller kommen, z. B. bei einer kleinen Arbeitsdruckdifferenz. Dadurch stellt sich kein eindeutiges Schließen ein. Außerdem stellt der mit einer Feder gehaltene Ventilteller ein ungedämpftes Schwingungssystem dar, das oftmals kein stabiles Abblasen ermöglicht.

Das Sicherheitsventil arbeitet streng genommen nur im Auslegungsfall. Es ist Teil eines Abblasesystems mit Zuleitung und Ableitung (Anhang E) und deshalb ist eine Betrachtung des gesamten Systems erforderlich. Berücksichtigt werden muss die Möglichkeit von auftretenden Schwingungen des Sicherheitsventils durch zu große Druckverluste in der Zuleitung und der Ableitung. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass sich kein Kondensat in der Leitung ansammeln kann und möglicherweise in das Sicherheitsventil zurückfließt. Ein zu groß dimensioniertes Sicherheitsventil erhöht keinesfalls die Sicherheit, sondern kann die Zuverlässigkeit wesentlich reduzieren. Überdimensionierte Vollhubsicherheitsventile können periodisch öffnen oder im Proportionalbereich arbeiten und damit zu einem stetigen Abblasen führen, mit der Gefahr von Kondensat- oder Eisbildung im Ventilgehäuse. Des Weiteren erhöhen sie die Gefahr des Flatterns. Zudem entstehen höhere Kosten für Ventil und Zu- bzw. Ableitung.

Der unterkritische Betrieb (siehe Bild A.1) von Sicherheitsventilen und die damit verbundene Zweiphasenströmung bringt erhöhte Risiken bezüglich Ausflussziffer und stabilen Abblasen mit sich.

Die Druckabfälle in der Zu- und Ableitung sind bei der Festlegung des Einstelldruckes zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere bei einem Abblasen in ein Auffangsystem.

7.3 Berstscheiben

Berstscheiben dienen als Druckabsicherung für den maximalen Störfall, wenn sonst keine technische Möglichkeit besteht. Druckverluste in der Zuleitung haben bei Berstscheiben keine Auswirkungen auf das Öffnungsverhalten, da die Armaturen keine schwingungsfähigen Komponenten enthalten (vgl. Flattern bei Sicherheitsventilen). Dennoch sollte der Druckverlust in der Zuleitung möglichst gering gehalten werden, da der Behälterdruck sonst über den Berstdruck ansteigen könnte. Bei Verwendung von Berstscheiben bleibt der Entlastungsquerschnitt nach dem Ansprechen offen. Ohne weitergehende Maßnahmen wird die Anlage vollständig druckentlastet.

Dies führt im Allgemeinen zu:

- vollständigem Verlust des Kühlmediums;
- Einfall von atmosphärischer Luft und Feuchtigkeit in die Anlage; und
- Notwendigkeit, die Betriebsfähigkeit mittels Entfeuchtung/Spülung/erneuter Abkühlung der Anlage wieder herzustellen.

Dies erfordert in der Regel einen enormen zeitlichen und finanziellen Aufwand. Beim Einsatz von Berstscheiben wird deshalb eine Kombination mit sorgfältiger Vorabsicherung mittels eines Sicherheitsventils, oder mittels sonstiger geeigneter Maßnahmen wie Überwachungseinrichtungen der MSR-Technik empfohlen.

7.4 Sicherheitsventil-Berstscheiben-Kombination

Die Ausrüstung größerer kryotechnischer Anlagen (insbesondere im F&E-Bereich) mit Sicherheitsventil-Berstscheiben-Kombinationen ist gängige Praxis. Dabei werden Sicherheitsventil und Berstscheibe parallel geschaltet. Die Bemessung der Berstscheibe erfolgt für den maximalen Störfall unter der Berücksichtigung aller Toleranzen. Das Sicherheitsventil wird zur Vorabsicherung der Berstscheibe und für betriebsbedingtes Abblasen (siehe B.3) ausgelegt. Mit zunehmender Anlagengröße, größerem Helium-Inventar und höherer gespeicherte Energie wird das Schadenspotential größer und die Bedeutung von Schadensbegrenzungsmaßnahmen nimmt damit zu. Der Einsatz einer Kombination trägt auch der Forderung aus der DGRL bezüglich der Diversität von Sicherheitseinrichtungen Rechnung.

7.5 Sicherheitseinrichtungen für Vakuumbehälter

Die Vakuumschalen, deren maximal zulässigen Druck 0,5 bar nicht überschreitet, sind keine unabhängigen Druckräume im Sinne der DGRL. Als Bauteile, die an druckhaltende Teile angebracht sind, sind sie jedoch Teile des Druckgerätes. Deshalb müssen negative Auswirkungen der Vakuumbehälter und der Isolierung auf die drucktragenden Wandungen berücksichtigt und vermieden werden. Entsprechend dieser Argumentation kann die Sicherheitsarmatur für den Vakuumbehälter demnach als Ausrüstungsteil mit Sicherheitsfunktion angesehen werden. Die Vakuumschale dagegen fällt als nicht druckhaltendes Bauteil im Allgemeinen nicht in den Geltungsbereich der DGRL, sofern die zuständige benannte Stelle nicht von dieser Maßgabe abweicht.

7.6 Halterungen, Haltekräfte

Die Halterungen der Sicherheitseinrichtungen werden so dimensioniert und ausgeführt, dass keine mechanische Belastung des Sicherheitsventils erfolgt. Eine Berechnung der auftretenden Reaktionskräfte mit Berücksichtigung der thermischen Spannungen während des Abkühlvorganges wird gegebenenfalls erforderlich (siehe Anhang F).

8 Stofffreisetzung

8.1 Allgemeines

Die Ermittlung und Bewertung der Gefährdungen und die erforderlichen Maßnahmen zur Erreichung der Schutzziele bei Stofffreisetzungen werden unter Berücksichtigung der spezifischen kryogenen Randbedingungen gemäß TRBS 2141 Teil 3 [6] durchgeführt.

8.2 Ableitungen und Abblasesysteme

Bei langen Ableitungen und bedingt durch die Expansion und Erwärmung des Fluids kann es bei einer Unterdimensionierung des Durchmessers der Ableitung zu Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Schallgeschwindigkeit kommen. Dies wiederum führt zu einer Begrenzung des Massenstromes. Im Zweifelsfall ist die Strömung zur Berechnung des Druckverlustes als kompressibel anzunehmen.

Bei der Ausführung eines Abblasesystems wird zudem auf folgende Aspekte hingewiesen:

- An der tiefkalten Leitung kann es zur Kondensation der Umgebungsluft, verbunden mit einer Sauerstoffanreicherung im Kondensat kommen. Dieses mit einem Sauerstoff-Anteil von über 50 % anfallende Kondensat ist als extrem brandfördernd anzusehen. Daher sollten keine brennbaren Stoffe wie Schaumisierungen, Bitumen-Bodenbeläge o. ä. in Bereichen, wo Kondensat abtropfen oder sich sammeln kann, vorhanden sein.
- Von der Leitung abtropfendes Kondensat kann darunter liegende Bauteile lokal stark abkühlen, ggf. verspröden oder durch thermische Kontraktion beschädigen.
- Der Eigengegendruck bei einem Ausblasen in die Atmosphäre oder der ansteigende Gegendruck beim Abblasen in ein Auffangsystem hat einen starken Einfluss auf das Abblaseverhalten des Systems.

8.3 Freisetzung unmittelbar in die Umgebung

Zur Vermeidung langer Leitungslängen mit großem Durchmesser wird oftmals für den maximalen Störfall keine Abblaseleitung bis ins Freie montiert, sondern unmittelbar in das Gebäude abgeblasen. Es besteht die Gefahr unzulässig hoher Luftverdrängung und damit der Verringerung des Sauerstoffgehalts in der Atemluft auf physiologisch kritische Werte. Geeignete Maßnahmen können eine Sauerstoffmangel-Überwachung mit entsprechender Alarmierung sowie ein Öffnen von Sicherheitsklappen zur Durchlüftung des Gebäudeabschnitts sein.

9 Betrieb von Helium-Druckbehältern

9.1 Prüfung vor Inbetriebnahme

9.1.1 Gefährdungsbeurteilung und sicherheitstechnische Bewertung

Vor Inbetriebnahme ist vom Betreiber gemäß § 3 BetrSichV [4] eine Gefährdungsbeurteilung und gemäß § 15 BetrSichV eine sicherheitstechnische Bewertung (Prüffristermittlung) zu erstellen. Bei Druckbehältern der Klasse IV ist die ermittelte Prüffrist von der ZÜS zu bestätigen.

Druckbehälter gehören gemäß der Betriebssicherheitsverordnung zu den überwachungsbedürftigen Anlagen. Gemäß § 12 BetrSichV [4] hat der Betreiber notwendige Maßnahmen für einen sicheren Betrieb zu treffen. Entsprechend § 12 BetrSichV ist die Gefährdungsbeurteilung Aufgabe des Betreibers.

Die Ermittlung und Bewertung der Gefährdungen erfolgt in der Regel im Rahmen einer systematischen ganzheitlichen Sicherheitsbetrachtung gemäß den Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS), und unter Berücksichtigung der spezifischen kryogenen Randbedingungen. Dabei sind die stofflichen und auch anlagentechnischen Gefährdungen sowie die Wechselwirkung untereinander zu berücksichtigen. Es sind die notwendigen Maßnahmen zur sicheren Bereitstellung und Benutzung der Anlagen zu ermitteln. Die

Arbeitsumgebung ist dazu einzubeziehen, das heißt eine Betriebsanleitung ist zu erstellen, und die Qualifizierung des Betriebspersonals ist erforderlich. In die Betrachtung sind unter anderem auch die Herstellerangaben, die Betriebsbedingungen, die Art und der Umfang der Prüfungen durch die befähigte Person/ZÜS und die gesetzlich vorgeschriebenen bzw. ermittelten Fristen mit einzubeziehen.

Das Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung und der sicherheitstechnischen Bewertung sind gemäß der TRBS zu dokumentieren.

9.1.2 Klassifizierung von Druckgeräten gemäß BetrSichV und Ermittlung der Prüffristen

In der BetrSichV §15 [4] wird die Klassifizierung der Druckgeräte in Anlehnung an die DGRL vorgenommen, in Abhängigkeit der Fluidgruppe und dem Druckinhaltsprodukt, sowie die sich daraus ergebenden möglichen, maximalen Prüffristen. BetrSichV §17 mit Verweis auf deren Anhang 5 regelt die Prüffristen von besonderen Druckbehältern.

Die Prüffristen gemäß den alten Regelungen, für die Erfahrungen vorliegen (TRB, AD-Merkblätter), sind nur dann wählbar, wenn das sicherheitstechnische Niveau des Druckgerätes diesen alten Regelungen, insbesondere hinsichtlich Auslegung, Fertigung und Betrieb, entspricht. Der Betreiber schlägt die Prüffrist auf Basis einer Sicherheitstechnischen Bewertung gemäß §15 BetrSichV vor, welche die ZÜS dann bestätigt (oder verkürzt).

Mögliche Klassifizierungen der Flüssig-Heliumbehälter gemäß BetrSichV:

- a) Klassifizierung als normaler Druckbehälter für inerte Gase, z. B. mit einem Druckinhaltsprodukt $p \times V > 1\,000 \text{ bar} \times \text{L}$ und $p \geq 1 \text{ bar}$:
 - wiederkehrende Prüfungen (innere/Festigkeit) alle 5 (10) Jahre (Kategorie IV)
 - Druckbehälter muss begehbar oder mindestens (innen) einsehbar sein (z. B. Flüssighelium-Kryostate)
- b) Klassifizierung als besonderer Druckbehälter gemäß BetrSichV §17, Anhang 5, Nr. 12 (Druckbehälter für Gase mit Betriebstemperaturen unter $-10\,^{\circ}\text{C}$):
 - keine wiederkehrenden inneren und Festigkeitsprüfungen erforderlich
 - Prüffristen der Sicherheitseinrichtungen nach Erfahrung des Betreibers
- c) Klassifizierung als besondere Druckbehälter gemäß BetrSichV §17, Anhang 5, Nr. 11 (Druckbehälter für nicht korrodierend wirkende Gase)
 - Taupunkt kleiner $-10\,^{\circ}\text{C}$
 - Druckbehälter muss begehbar oder mindestens einsehbar sein (innen) (z. B. Flüssighelium-Kryostate)
 - wiederkehrende innere Prüfungen z. B. alle 10 Jahre

Die Festlegung der Prüffristen ist geregelt in TRBS 1201, Teil 2, Abschnitt 3.5 [13]. Der Verband der ZÜS hat dazu einen „Leitfaden zur Ermittlung von Prüffristen für Druckgeräte gemäß §15 der BetrSichV“ erstellt [15].

9.1.3 Sicherheitseinrichtungen

Gemäß BetrSichV [4] ist vor Inbetriebnahme eine Überprüfung der Sicherheitseinrichtungen erforderlich.

Bei Druckbehältern der Kategorie III und IV erfolgt dies durch den Sachverständigen der ZÜS.

Bei Baugruppen umfasst die Abnahme bei der Herstellung nach DGRL auch eine Prüfung der Ausrüstungsteile mit Sicherheitsfunktion, bei der überprüft wird, dass die Anforderungen gemäß DGRL Anhang 1, Abschnitt 2.10 und 2.11 vollständig erfüllt sind. Hierauf kann die ZÜS bei der Prüfung vor Inbetriebnahme gemäß §13 BetrSichV zurückgreifen, hinsichtlich der Beurteilung der Eignung der Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung, der ausreichenden Bemessung, Einstellung und Anordnung.

9.1.4 Betriebsanleitung

Nach der DGRL, Anhang I, Abschnitt 3.4 [1], hat der Hersteller beim Inverkehrbringen „sofern erforderlich“ dem Druckgerät oder der Baugruppe eine Betriebsanleitung beizufügen. Nach der 14. ProdSV [5] ist die Betriebsanleitung beim Inverkehrbringen von Druckgeräten und Baugruppen, die dem Anhang I der DGRL unterliegen, in jedem Fall erforderlich. Sie muss in deutscher Sprache abgefasst sein. Die Betriebsanleitung enthält die vom Hersteller an den Betreiber/Benutzer gerichteten, der Sicherheit dienenden Informationen betreffend insbesondere Montage und Installation, einschließlich Zusammenbau verschiedener Druckgeräte, Inbetriebnahme, Betrieb, Wartung einschließlich Inspektionen durch den Betreiber/Benutzer. Für das Verständnis der Betriebsanleitung erforderliche technische Dokumente (Zeichnungen, Diagramme) sowie gegebenenfalls Hinweise auf besondere Gefahren bei unsachgemäßer Verwendung und Hinweise auf besondere Entwurfsmerkmale können auch Bestandteil der Betriebsanleitung sein [8].

9.2 Wiederkehrende Prüfungen der den Druckbehältern zugeordneten Sicherheitseinrichtungen

9.2.1 Allgemeines

Wiederkehrende Prüfungen von Druckbehältern und den ihnen zugeordneten Sicherheitseinrichtungen sind geregelt in TRBS 1201 Teil 2 [13] (Prüfungen bei Gefährdungen durch Dampf und Druck). Die wiederkehrenden Prüfungen erfolgen anlässlich von äußeren oder inneren wiederkehrenden Prüfungen:

Prüfung der sicherheitsrelevanten Ausrüstungen auf Vorhandensein, Zustand und Funktion.

9.2.2 Sicherheitsventile

Die Prüfung des Einstelldruckes und die Kontrolle der Gängigkeit in Führungen beweglicher Teile sind in regelmäßigen Zeitabständen durchzuführen [13]. Die Intervalle für regelmäßige Prüfungen sind entsprechend den Betriebsbedingungen vom Betreiber festzulegen, wobei die Empfehlungen des Herstellers und der ZÜS als Grundlage dienen. Diese Prüfungen und Kontrollen sind spätestens anlässlich der äußeren und/oder inneren Prüfungen des zugehörigen Druckbehälters durchzuführen.

ANMERKUNG Das deutsche Regelwerk unterscheidet nicht zwischen Behältersicherheitsventilen und Leitungssicherheitsventilen (en: thermal relief valves), die bei kryogenen Leitungen z. B. zwischen Absperrventilen installiert sind. Auch diese Sicherheitsventile sind wiederkehrend zu prüfen. Der deutsche Industriegaseverband (IGV) hat dazu ein Merkblatt herausgegeben [14], welches bei kontinuierlichem Betrieb z. B. einen Absperrkugelhahn („offen blockiert und plombiert“) empfiehlt, um die Prüfbarkeit des Sicherheitsventils zu ermöglichen.

9.2.3 Berstscheiben

Die Einsatzdauer des Berstelementes der Berstscheibe ist abhängig von dessen Bauart, Zeitstandsverhalten und von den Betriebsbedingungen. Wechselnde Belastung, Temperatureinflüsse und Korrosion können zu einer wesentlich verkürzten Einsatzdauer führen. Da die Einsatzdauer nur angenähert vorauszubestimmen ist, kann es zweckmäßig sein, die Berstelemente entsprechend den Betriebsbedingungen in angemessenen Zeitabständen zu erneuern.

9.2.4 Instandhaltung

Sicherheitseinrichtungen, bei denen die Gefahr besteht, dass sie unwirksam werden können und die im Betriebszustand nicht geprüft werden können, werden in angemessenen Zeitabständen, die entsprechend den Betriebsverhältnissen des Druckbehälters vom Betreiber festzulegen sind, ausgebaut und auf ihre Wirksamkeit überprüft. Diese Funktionsprüfungen werden auf Basis der Gefährdungsbeurteilung (§ 3 Abs. 3 BetrSichV) unter Berücksichtigung der Herstellerangaben ermittelt und in das Instandhaltungsprogramm – Instandhaltung siehe DIN 31051 - des Druckbehälters einbezogen. Termin und Ergebnis der Funktionsprüfungen werden formlos dokumentiert (TRBS 3146, 4.3.3.5).

Nach DIN EN 764-7:2002-09, Abschnitt 10, müssen in den Betriebsanleitungen für die Sicherheitseinrichtungen Anleitungen für die Inspektion und Wartung enthalten sein, um den geforderten Umfang der Absicherung sicherzustellen. Inspektion und Wartung von Sicherheitseinrichtungen sind erforderlich, um sicherzustellen, dass das geforderte Sicherheitsniveau erhalten bleibt. Über die Verfahren und Ergebnisse sollte ein Bericht erstellt werden. Die Instandsetzung (Reparatur) von Sicherheitseinrichtungen sollte vom Hersteller oder einer vom Hersteller zertifizierten Fachfirma erfolgen.

In Deutschland umfasst der Begriff der Instandhaltung neben den Begriffen Inspektion, Wartung, und Instandsetzung, insbesondere auch die Verbesserung, die dazu dient, die Funktionssicherheit zu erhöhen, durch die Beseitigung von Schwachstellen (siehe DIN 31051).

10 Werkstoffe für Sicherheitseinrichtungen

Die Werkstoffauswahl der Sicherheitseinrichtungen hat entsprechend den Regelwerken, z. B. AD 2000-Merkblatt A1, A2 und A4 mit Verweis auf AD 2000-W10 [9] oder DIN EN 13445-2 zu erfolgen. Zu beachten ist, dass beim Abblasen Temperaturabsenkungen bis unter 10 K auftreten. Die maximale Abkühlrate kann dabei 50 K/s betragen. Dies ist bei der Werkstoffauswahl für das Gehäuse sowie der Verbindungs- und Befestigungselementen und der Dichtungselemente zu berücksichtigen. Besondere Beachtung erfordert dabei die Längenausdehnung und das Spröbruchverhalten (siehe Anhang H).

Dies gilt für den Armaturenwerkstoff, die Verbindungselemente (z. B. Schrauben) und die Dichtungswerkstoffe.

Ein Spröbruchverhalten des Werkstoffes z. B. für den Vakuumbehälter, der nur im Störfall lokal abgekühlt wird, sollte berücksichtigt werden. Bei einer Flutung des Vakuums durch Stickstoff aus dem Kälteschild oder durch das Kühlmedium wird der Vakuummantel abgekühlt und die Gefahr eines Spröbruches entsteht.

Die Anwendung der DIN EN 13445-2, Anhang B, Anforderungen zur Vermeidung von Spröbruch bei tiefen Temperaturen, erlaubt die Anwendung bruchmechanischer Nachweismethoden und somit eine weitergehende Ausnutzung der Werkstoffe als nach dem AD 2000- Merkblatt.

Sind zugelassene Werkstoffe in den entsprechenden Normen und Regelwerken nicht aufgeführt, hat der (Druckgeräte-)Hersteller für den aus seiner Sicht geeigneten Werkstoff ein Einzelgutachten (Particular Material Appraisal, PMA) gemäß Druckgeräte richtlinie Anhang I, Abschnitt 4.2 [1] zu erstellen.

Bei Druckgeräten der Kategorien III und IV, somit also auch bei Sicherheitseinrichtungen, wird das Einzelgutachten von der für die Konformitätsbewertung des Druckgerätes zuständigen benannten Stelle durchgeführt, die Verantwortung liegt jedoch beim Druckgerätehersteller.

Diese Werkstoff-Bewertung nach der DGRL fällt somit nicht in den Zuständigkeitsbereich des Werkstoffherstellers, wie das bisher nach deutschem Regelwerk beim Einzelgutachten regelmäßig der Fall war. Das aus den AD-Merkblättern noch bekannte „Einzelgutachten“ hat nichts mit dem Einzelgutachten nach der DGRL zu tun. Es ist ggf. nicht hinreichend bekannt, dass in den deutschen Regelwerken der Begriff „Einzelgutachten“ nicht mehr verwendet wird und bereits seit längerer Zeit durch den Begriff „Eignungsfeststellung“ ersetzt wurde (siehe auch [33]).

Anhang A (informativ)

Eigenschaften und thermodynamische Besonderheiten von Helium

A.1 Allgemeines/Grundlagen

Helium zeichnet sich aus durch den niedrigsten Siedepunkt aller bekannten Fluide. Es ist daher das Standard-Kältemittel zur Kühlung nahe dem absoluten Nullpunkt, insbesondere auch bei den meisten technischen Anwendungen der Supraleitung. Ein Überblick über die technische Anwendung kann [16] entnommen werden. Sicherheitsrelevante Aspekte sind in [17] zu finden.

Die Abkühlung und die anschließende Verflüssigung des bei Umgebungsbedingungen gasförmigen Heliums erfolgt mittels speziell entwickelter Heliumverflüssigungsanlagen. Die benötigte Technologie ist sehr aufwändig, der zur Verflüssigung notwendige Energieeinsatz ist aufgrund der extrem tiefen Endtemperatur sehr hoch (Carnot-Wirkungsgrad als theoretisches Limit). Zu unterscheiden sind große industrielle Anlagen mit einer Verflüssigungsleistung von 100 kg/h bis 1000 kg/h und – typischerweise im Institutsbereich betriebene – lokale Verflüssiger mit einer Kapazität von typisch 1 kg/h bis 10 kg/h. Das erzeugte Flüssighelium wird in Dewarbehälter abgefüllt und zu den einzelnen Verbrauchsstellen gebracht. Große Einzelverbraucher (große Magnetanlagen, supraleitende Beschleuniger) werden direkt an eine Heliumkälteanlage angeschlossen und das Helium in einem geschlossenen Kreislauf geführt (sog. Refrigeratorbetrieb).

Auf der Erde ist Helium vergleichsweise selten. Die größten Konzentrationen sind in fossilen Erdgaslagerstätten zu finden. Von dort wird Helium derzeit als Nebenprodukt bei der Erdgasförderung gewonnen, vor Ort verflüssigt und zu zentralen Abfüllstellen transportiert. Aufgrund des hohen Preises ist bei kryogenen Anwendungen im Allgemeinen eine Rückgewinnung des bei der Kühlung freiwerdenden Heliumgases sinnvoll.

Helium existiert in der Natur in Form der beiden stabilen Isotope ^3He und ^4He . Der Anteil von ^3He liegt dabei im ppm-Bereich. Reines ^3He kommt nur in sehr kleinen Mengen für kernphysikalische Anwendungen oder für Kühlprozesse im mK-Bereich zum Einsatz. Die Bezeichnung „Helium“ und sämtliche aufgeführten thermodynamischen Parameter beziehen sich im vorliegenden Zusammenhang auf das im kryogenen Bereich ansonsten ausschließlich benutzte ^4He (präziser: ^4He mit Spuren von ^3He).

Helium ist chemisch inert, geruch- und geschmacklos, ungiftig und physiologisch unbedenklich. Es kann problemlos – auch über längere Zeit und in hohen Konzentrationen – eingeatmet werden (lediglich die damit verbundene Sauerstoffverdrängung ist zu beachten). Helium ist überdies radiologisch inert und besitzt ein sehr hohes Ionisierungspotential. In der erdnahen Atmosphäre sind nur in Spuren von Helium enthalten (Volumenanteil $5,2 \times 10^{-6}$), auch die Löslichkeit in Wasser ist sehr gering. Die Dichte von Heliumgas bei Umgebungsbedingungen (15 °C, 1 bar (absolut)) beträgt mit $0,167 \text{ kg/m}^3$ nur etwa 14 % der Luftdichte. Bei den verschiedenen Anwendungen von Helium in gasförmigem Zustand werden diese Eigenschaften gezielt genutzt (Schweißgaszusatz, Inertgas, Traggas, Tauchergas, Lecksuche, kerntechnische Anwendungen etc.).

Unterhalb des kritischen Punkts (5,20 K, 2,275 bar (absolut)) kann Helium verflüssigt werden. Flüssighelium bei Umgebungsdruck hat eine Siedetemperatur von 4,2 K und eine Dichte von nur 125 kg/m^3 . Eine Besonderheit von Helium ist, dass es im Bereich moderater Drücke auch bei tiefsten Temperaturen keine feste Phase bildet. Ein fester Aggregatzustand findet sich lediglich bei Drücken oberhalb von 25 bar (absolut) und Temperaturen von wenigen Kelvin. Er hat keinerlei technische Bedeutung.

Eine weitere Besonderheit von Helium ist die Existenz von zwei unterschiedlichen flüssigen Phasen, welche mit Helium-I (normalfluides Helium) und Helium-II (suprafluides Helium) bezeichnet werden. Beide Bereiche werden getrennt durch die sogenannte λ -Linie, welche zwischen der Schmelzdruckkurve und der Dampfdruckkurve verläuft (von 1,76 K, 30,1 bar (absolut) bis 2,177 K, 50,36 mbar (absolut)). Beim Überqueren der λ -Linie ändern sich schlagartig einige kalorischen Eigenschaften und Transportgrößen (insbesondere spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Viskosität). Normalfluides Helium ist eine leichtbewegliche, wasserklare Flüssigkeit mit vergleichsweise geringer Wärmeleitfähigkeit ($0,027 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Beim Übergang in den suprafluiden Zustand steigt die Wärmeleitfähigkeit schlagartig um ca. sechs Größenordnungen. Helium-II hat damit die höchste Wärmeleitfähigkeit aller bekannten Stoffe und übertrifft die von Kupfer bei Raumtemperatur um zwei bis drei Größenordnungen. Helium-II zeigt überdies in bestimmten Konstellationen eine verschwindende Viskosität und kann u. a. auch durch feinste Poren oder Spalten ($1 \mu\text{m}$ bis $0,1 \mu\text{m}$) entweichen. Angrenzende Festkörperoberflächen oder kalte Behälterwände werden mit einem extrem leichtbeweglichen Helium-II-Film benetzt, welcher z. T. sogar entgegen der Schwerkraft fließen kann.

Die Erzeugung von Helium-II geschieht durch weiteres Abkühlen von Helium-I, etwa durch Abpumpen eines Flüssigheliumbads. Die Rückumwandlung erfolgt automatisch beim Überqueren der λ -Linie in Richtung höherer Temperaturen.

Je nach Anwendungsfall und Anforderungen kommen unterschiedliche Arten der Kühlung mit Helium zum Einsatz:

- a) Kühlung mit normalfluidem Helium, d. h. im Allgemeinen mit Helium zweiphasig gasförmig/flüssig; zur Vermeidung eventueller Einkondensation von Luft wird zumeist bei einem gewissen Überdruck gearbeitet (typischerweise 20 mbar bis 500 mbar bzw. einer Siedetemperatur von 4,2 K bis 4,6 K entsprechend der Dampfdruckkurve).
- b) Kühlung mit suprafluidem Helium (typischerweise bei 1,6 K bis 1,9 K), erforderlich bei besonders niedrigen Arbeitstemperaturen, bei Anforderungen an eine besonders störungsfreie Kühlung (kein störendes Blasensieden) oder bei besonderen Anforderungen an den Wärmeabtransport innerhalb des Badvolumens.
- c) Kühlung mit Helium überkritisch (typischerweise 5 bar (absolut), 5 K); Helium liegt in diesem Zustand einphasig vor, vorteilhaft insbesondere bei der Kühlung langgestreckter supraleitender Kabel.

Die Verdampfungsenthalpie von Helium ist mit 2,6 kJ/l bzw. 20,8 kJ/kg sehr gering (zum Vergleich: Flüssigstickstoff 162 kJ/l; Wasser 2,3 MJ/l; alle Werte bezogen auf atmosphärischen Druck). Durch die Verdampfung von Flüssighelium wird also nur eine sehr geringe Kälteleistung bereitgestellt. Umgekehrt führen bereits geringe Wärmeeinträge zu hohen Abdampfraten. Um die Verdampfungsverluste in Dewarbehältern, Kryostaten und Transferleitungen annehmbar gering zu halten, müssen diese über eine extrem gute thermische Isolation verfügen. Für einen ökonomischen Kühlbetrieb mit Flüssighelium sind überdies auch alle sonstigen Wärmelasten in diesem Temperaturbereich möglichst gering zu halten, etwa durch Vorkühlen mit Flüssigstickstoff oder durch die Verwendung von mit Flüssigstickstoff gekühlten thermischen Schilden.

Heliumkaltgas hat im Vergleich mit der Flüssigphase eine außergewöhnlich hohe Dichte. Dies wird deutlich bei der Gegenüberstellung mit anderen kryogenen Medien (Zahlenwerte für die Verdampfung bei 1013,25 mbar bei der jeweiligen Siedetemperatur), siehe Tabelle A.1.

Tabelle A.1 — Dichteverhältnis Flüssigphase zu Gasphase am Normalsiedepunkt

kryogenes Medium	Dichteverhältnis $\rho_{\text{flüssig}}/\rho_{\text{gasförmig}}$
^4He	$\approx 7,4$
p- H_2	≈ 53
Ne	≈ 126
N_2	≈ 175

Während bei allen anderen kryogenen Fluiden die in Form von Kaltgas enthaltene Masse etwa innerhalb eines Dewars oder innerhalb eines Kryostaten meist vernachlässigt werden kann, ist die nach der Verdampfung verbliebene Kaltgasmasse im Falle von Helium nicht unerheblich. Bei einer nachfolgenden Erwärmung kann dieses anfangs sehr dichte Heliumkaltgas vergleichsweise starke Druckanstiege bewirken. Dies muss u.a. bei der Aufwärmung von Transferleitungen oder Kryostaten beachtet werden.

In Tabelle A.2 sind Umrechnungswerte zur Volumenänderung von Helium gegeben.

Tabelle A.2 — Volumenänderung bei der Verdampfung und Aufwärmung von Helium (hier: 125 g ^4He)

Volumen in l	Aggregatzustand	Temperatur in K	Druck in mbar (absolut)	Kommentar
1	flüssig	4,2	1 013,25	
7,4	gasförmig	4,2	1 013,25	
702	gasförmig	273,15 (0 °C)	1 013,25	„Normalzustand“
751	gasförmig	298,15 (15 °C)	1 000	„Bezugszustand“

A.2 Symbole/Bezeichnungen

Für Berechnungen an Flüssighelium-Kryostaten werden die Symbole nach Tabelle A.3 verwendet.

Tabelle A.3 — Symbole/Bezeichnungen

Symbol	Einheit	Beschreibung
A_B	m ²	Belüftungsquerschnitt
A_{He}	m ²	Oberfläche des Heliumbehälters
A_0	m ²	engster Querschnitt der Sicherheitseinrichtung
a_0	–	Anfangsfüllstand im Heliumbehälter (bezogen auf das Gesamtvolumen)
E_{kin}	m ² /s ²	Anteil der kinetischen Energie des ausströmenden Heliums
h_{He}	kJ/kg	spezifische Enthalpie des Heliums im Heliumbehälter
h_V	kJ/kg	spezifische Enthalpie der Luft im Vakuumraum
h_W	kJ/kg	spezifische Enthalpie der Luft auf der Wand des Heliumbehälters