

DIN EN ISO 12807



ICS 13.280; 27.120.30

Einsprüche bis 2020-11-18

Entwurf

**Kernbrennstofftechnologie –
Sicherer Transport von radioaktivem Material –
Dichtheitsprüfung der Verpackung (ISO 12807:2018);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 12807:2020**

Safe transport of radioactive materials –
Leakage testing on packages (ISO 12807:2018);
German and English version prEN ISO 12807:2020

Sûreté des transports de matières radioactives –
Contrôle de l'étanchéité des colis (ISO 12807:2018);
Version allemande et anglaise prEN ISO 12807:2020

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-09-18 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

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

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

Gesamtumfang 193 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Der Text von ISO 12807:2020 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 85 „Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und als prEN ISO 12807:2020 durch das Technische Komitee CEN/TC 430 „Kernenergie, Kerntechnik und Strahlenschutz“ übernommen, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 062-07-41 AA „Sicherheit von Transportbehältern für radioaktive Stoffe“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

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

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

<i>Titel de:</i>	Kernbrennstofftechnologie — Sicherer Transport von radioaktivem Material — Dichtheitsprüfung der Verpackung (ISO 12807:2018)
<i>Titel en:</i>	Safe transport of radioactive materials — Leakage testing on packages (ISO 12807:2018)
<i>Titel fr:</i>	Sûreté des transports de matières radioactives — Contrôle de l'étanchéité des colis (ISO 12807:2018)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	6
Vorwort	7
Einleitung	8
1 Anwendungsbereich	9
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe	10
4 Symbole und Einheiten	13
5 Behördliche Anforderungen	16
5.1 Relevante Vorschriften	16
5.2 Behördliche Anforderungen an die Umschließung	16
6 Vorgehensweise zur Erfüllung der Anforderungen dieses Dokuments	16
6.1 Allgemeines	16
6.2 Qualitätsmanagementsystem	17
6.3 Vorgehensweise	17
6.3.1 Allgemeines	17
6.3.2 Bestimmung der zulässigen Aktivitätsfreisetzungsraten	18
6.3.3 Bestimmung der standardisierten Leckageraten	19
6.3.4 Bestimmung der zulässigen Prüfleckageraten für jedes Verifizierungsstadium	19
6.3.5 Auswahl der geeigneten Prüfverfahren	19
6.3.6 Durchführung der Prüfungen und Aufzeichnung der Ergebnisse	19
7 Bestimmung der zulässigen Aktivitätsfreisetzungsraten	19
7.1 Schritt 1: Erstellen einer Liste des radioaktiven Inhalts A_i	19
7.2 Schritt 2: Bestimmung der insgesamt freisetzbaren Aktivität R_I	19
7.3 Schritt 3: Bestimmung der maximal zulässigen Aktivitätsfreisetzungsraten R	20
8 Bestimmung der standardisierten Leckageraten	20
8.1 Allgemeines	20
8.2 Schritt 4: Bestimmen der Aktivitätsfreisetzungsrates durch Permeation RP	21
8.3 Schritt 5: Bestimmen der maximal zulässigen Aktivitätsfreisetzungsrates durch Lecks RG	21
8.4 Schritt 6: Bestimmen der Aktivität pro Volumeneinheit des Mediums im Umschließungssystem C	21
8.5 Schritt 7: Bestimmen der maximal zulässigen volumetrischen Leckagerates des Mediums L	21
8.6 Schritt 8: Bestimmen des maximal zulässigen äquivalenten Kapillarleckdurchmessers D	22
8.7 Schritt 9: Bestimmen der zulässigen standardisierten Leckagerates Q_{SLR}	22
9 Anforderungen an die Verifizierung des Umschließungssystems	23
9.1 Verifizierungsstadien des Umschließungssystems	23
9.1.1 Allgemeines	23
9.1.2 Designverifizierung	23
9.1.3 Verifizierung bei der Fertigung	23
9.1.4 Verifizierung vor Versand	24
9.1.5 Regelmäßige Verifizierung	24
9.1.6 Verifizierung bei Wartung	24
9.2 Anforderungen an die Verifizierung	25

9.2.1	Allgemeines	25
9.2.2	Schritt 10: Bestimmen der zulässigen Prüfleckagerate für jedes Verifizierungsstadium Q_{TDA} , Q_{TDN} , Q_{TF} , Q_{TS} , Q_{TP} und Q_{TM}	25
9.2.3	Schritt 11: Auswahl der geeigneten Prüfverfahren	25
10	Anforderungen an Leckageprüfverfahren	25
10.1	Allgemeines	25
10.2	Schritt 12: Durchführen der Prüfung und Aufzeichnen der Ergebnisse	25
10.3	Prüfempfindlichkeit.....	25
10.4	Anforderungen an Prüfverfahren	26
10.4.1	Allgemeines	26
10.4.2	Prüfung.....	26
Anhang A (informativ) Bevorzugte Leckageprüfverfahren		27
A.1	Allgemeines	27
A.2	Kommentare und Vorsichtsmaßnahmen	27
A.2.1	Explosionsrisiken.....	27
A.2.2	Tracerstoffe	31
A.2.3	Leckageraten.....	31
A.2.4	Prüfling nicht benetzen.....	32
A.2.5	Partialdruck	32
A.2.6	Vakuumbedingungen.....	32
A.2.7	Durchführung der Leckageprüfung.....	32
A.3	Quantitative Verfahren	32
A.3.1	Gasdruckabfall.....	32
A.3.2	Gasdruckanstieg	33
A.3.3	Gasgefüllte Hülle (Gasdetektor).....	34
A.3.4	Evakuierte Hülle (Gasdetektor)	35
A.3.5	Evakuierte Hülle mit Helium-Gegendruck.....	36
A.4	Qualitative Verfahren	37
A.4.1	Gasblasenverfahren.....	37
A.4.2	Blasentest.....	39
A.4.3	Tracergas (Schnüffelmethode).....	39
A.4.4	Tracergas (Sprühverfahren)	40
Anhang B (informativ) Berechnungsverfahren		42
B.1	Allgemeines	42
B.2	Gasleckage.....	42
B.3	Korrelation zwischen Gas-Leckageraten unter verschiedenen Bedingungen.....	43
B.4	Gasgemisch	43
B.5	Korrelation auf Standardbedingungen	43
B.6	Flüssigkeitsleckage.....	44
B.7	Korrelation zwischen Flüssigkeitsleckageraten bei unterschiedlichen Bedingungen	44
B.8	Korrelation zwischen Gas- und Flüssigkeitsleckageraten	44
B.9	Aerosol-Leckage.....	44
B.10	Korrelation zwischen Gas- und Aerosol-Leckageraten	44
B.11	Vorsicht bei der Verwendung von Korrelationen	45
B.12	Oberflächenspannung	45
B.13	Permeation	45
B.14	Leckageprüfung für Druckabfall und Druckanstieg.....	46
B.15	Korrektur für den Partialdruck des Tracergases.....	46
B.16	Empfindlichkeit des Leckageprüfverfahrens.....	46
Anhang C (informativ) Umrechnungstabellen.....		47
Anhang D (informativ) Arbeitsbeispiele.....		49
D.1	Allgemeines	49
D.2	Prüfleckageraten für Transportbehälter mit trockenem abgebranntem Brennstoff.....	50

D.2.1	Allgemeines	50
D.2.2	Schritt 1	50
D.2.3	Schritt 2	50
D.2.4	Schritt 3	50
D.2.5	Schritt 4 und Schritt 5	51
D.2.6	Schritt 6	51
D.2.7	Schritt 7	51
D.3	Prüfleckageraten für Transportbehälter mit nassem abgebranntem Brennstoff.....	52
D.3.1	Allgemeines	52
D.3.2	Schritt 1 und Schritt 6	52
D.3.3	Schritt 2	52
D.3.4	Schritt 3	52
D.3.5	Schritt 6	53
D.3.6	Schritt 7	53
D.3.7	Schritt 8	53
D.3.8	Schritt 9	54
D.3.9	Schritt 10.....	55
D.4	Prüfung des Druckanstiegs an einem Verschluss mit doppelten O-Ring-Dichtungen	55
D.4.1	Allgemeines	55
D.4.2	Schritt 11.....	55
D.5	Prüfung des Druckabfalls an einem Verschluss mit doppelten O-Ring-Dichtungen	57
D.5.1	Allgemeines	57
D.5.2	Prüfdaten	58
D.5.3	Prüfergebnisse.....	58
D.5.4	Bestimmung der Leckagerate	58
D.5.5	Bestimmung der standardisierten Leckagerate	58
D.5.6	Einfluss von Temperaturveränderungen	59
D.6	Vergleich zwischen Prüfungen des Druckanstiegs und des Druckabfalls.....	59
D.7	Bestimmung eines unbekannten Prüfvolumens für die Prüfung des Druckanstiegs oder Druckabfalls	61
D.7.1	Allgemeines	61
D.7.2	Vorgehensweise	61
D.8	Gaspermeation	62
D.8.1	Allgemeines	62
D.8.2	Beispiel 1: Aktivitätsfreisetzung durch Permeation (Krypton)	63
D.8.3	Beispiel 2: Permeation des Prüfgases (Helium).....	65
D.9	Aerosol-Leckage.....	66
D.9.1	Fall 1	66
D.9.2	Fall 2	66
D.10	Korrelation zwischen Gas- und Flüssigkeits-Leckageraten.....	67
D.10.1	Allgemeines	67
D.10.2	Schritt 1	67
D.10.3	Schritt 2	67
D.10.4	Schritt 3	67
D.10.5	Schritt 6	68
D.10.6	Schritt 7	68
D.10.7	Schritt 8	68
D.10.8	Schritt 9	69
D.10.9	Schritt 10.....	69
D.11	Korrelation zwischen Leckageraten verschiedener Gase	70
D.11.1	Allgemeines	70
D.11.2	Schritt 1	70
D.11.3	Schritt 2	70
D.11.4	Schritt 3	70
D.11.5	Schritt 4 und Schritt 5	70

D.11.6 Schritt 6	70
D.11.7 Schritt 7	70
D.11.8 Schritt 8	71
D.11.9 Schritt 9	71
D.11.10 Schritt 10	72
D.12 Empfindlichkeit des Gasblasentests	73
D.13 Umschließung für tritiumhaltiges Wasser	75
D.13.1 Allgemeines	75
D.13.2 Schritt 1	75
D.13.3 Schritt 2	75
D.13.4 Schritt 3	75
D.13.5 Schritt 6	75
D.13.6 Schritt 7	75
D.13.7 Schritt 8	76
D.13.8 Schritt 9	76
D.13.9 Schritt 10	76
D.13.10 Schritt 11	76
D.13.11 Schritt 12	77
D.14 Umschließung von Flüssigkeiten mit doppelter Umschließung und Berücksichtigung der Radiolyse	78
D.14.1 Allgemeines	78
D.14.2 Umschließungssystem	78
D.14.3 Rückhaltevermögen von Flüssigkeitsbehältern	79
D.14.4 Bestimmung der Gasbildungsrate durch Radiolyse	79
D.14.5 Bestimmung des Drucks im inneren Umschließungsbehälter	80
D.14.6 Bestimmung des Leckdurchmessers	81
D.14.7 Bestimmung der Gesamtleckagemenge einer Flüssigkeit in einem Jahr	81
D.14.8 Bestimmung der Menge absorbierenden Materials, die erforderlich ist, um den Austritt von Flüssigkeiten aus dem Innenbehälter zu verhindern	82
D.15 Umschließung eines Transportbehälters mit trockenen abgebrannten Brennstoffen mit dem subatmosphärischen Druckverfahren	82
D.15.1 Allgemeines	82
D.15.2 Berechnungsdaten	83
D.15.3 Bewertung des Partialdrucks des Gasgemischs nach einem Brennstabversagen	83
D.15.4 Bewertung des internen Druckanstiegs im Transportbehälter in einem Jahr auf Grund interner Leckage	84
D.15.5 Bewertung des gesamten Innendruckanstiegs im Transportbehälter in 1 Jahr	84
Anhang E (informativ) Begründung	85
E.1 Allgemeines	85
Literaturhinweise	101

Europäisches Vorwort

Der Text von ISO 12807:2020 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 85 „Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und vom Technischen Komitee CEN/TC 430 „Kernenergie, Kerntechnik und Strahlenschutz“ als EN ISO 12807:2020 übernommen, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 12807:2018 wurde von CEN als prEN ISO 12807:2020 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

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

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

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

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

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 85, *Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection*, Unterkomitee SC 5, *Nuclear installations, processes and technologies* erarbeitet.

Diese zweite Ausgabe ersetzt die erste Ausgabe (ISO 12807:1996), die technisch überarbeitet wurde.

In diesem Dokument drückt das Wort „muss“ eine Anforderung aus, das Wort „sollte“ drückt eine Empfehlung aus, und das Wort „kann“ eine Erlaubnis, also weder eine Anforderung noch eine Empfehlung. Imperative Aussagen drücken ebenfalls Anforderungen aus. Um dieses Dokument zu erfüllen, müssen alle Abläufe in Übereinstimmung mit seinen Anforderungen, aber nicht zwingend mit seinen Empfehlungen ausgeführt werden.

Die Wörter „kann“, „könnte“ und „dürfte“ drücken Möglichkeiten, weniger eine Erlaubnis aus.

Das Wort „wird“ drückt aus, dass ein Ereignis sicher eintreten wird, ist jedoch keine Anforderung.

Einleitung

Das Dokument der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material* legt die zulässige Freisetzung von Radioaktivität unter normalen Transportbedingungen sowie bei Unfällen während des Transports in Aktivität pro Zeiteinheit für Versandstücke des Typs B(U), des Typs B(M) und des Typs C für den Transport radioaktiven Materials fest. Im Allgemeinen ist es nicht praktikabel, die freigesetzte Aktivität direkt zu messen. Das übliche Verfahren besteht darin, die Aktivitätsfreisetzung in Bezug zu nicht radioaktivem Flüssigkeitsaustritt zu setzen, für den mehrere Leckageprüfverfahren zur Verfügung stehen. Das geeignete Verfahren hängt jeweils von seiner Empfindlichkeit und seiner Anwendung für eine bestimmte Verpackung ab.

Die Vorschriften legen die zulässige Aktivitätsfreisetzung unter normalen Transportbedingungen und bei Unfällen während des Transports fest. Die Freisetzungsgrenzen der Aktivität können in maximal zulässigen Aktivitätsfreisetzungsraten für das radioaktive Material, das in einem Umschließungssystem befördert wird, angegeben werden.

Im Allgemeinen ist es nicht machbar, durch direkte Messung der freigesetzten Aktivität nachzuweisen, dass die Aktivitätsfreisetzungsgrenzen nicht überschritten werden. In der Praxis besteht die gängigste Methode für den Nachweis, dass ein Umschließungssystem eine angemessene Umschließung sicherstellt, in der Durchführung einer Prüfung der äquivalenten Gasleckagerate.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt Prüfkriterien und Prüfverfahren für die Messung der Gasleckage fest, um nachzuweisen, dass Versandstücke für den Transport radioaktiven Materials die Anforderungen an sichere Verpackungen im Dokument *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material* der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) erfüllen, für die

- Designverifizierung,
- Verifizierung bei der Fertigung,
- Verifizierung vor Versand,
- regelmäßige Verifizierung, und
- Verifizierung bei Wartung.

Dieses Dokument beschreibt eine Methode, mit der die zulässige Aktivitätsfreisetzung radioaktiven Inhalts in einem Umschließungssystem unter vorgegebenen Prüfbedingungen zu äquivalenten Gasleckageraten in Bezug gesetzt werden kann. Dieser Ansatz wird als die Gasleckage-Prüfmethodik bezeichnet. Jedoch wird in diesem Dokument anerkannt, dass auch andere Methoden zulässig sein könnten, sofern mit ihnen nachgewiesen werden kann, dass eine Freisetzung des radioaktiven Inhalts die behördlichen Anforderungen nicht übersteigt und diese mit der zuständigen Behörde abgestimmt werden.

Dieses Dokument stellt sowohl eine allgemeine als auch eine detaillierte Anleitung zu den komplexen Beziehungen zwischen einer Prüfung der äquivalenten Gasleckage und einer zulässigen Aktivitätsfreisetzungsrates bereit. Während die allgemeine Anleitung allgemein anerkannt ist, muss die Anwendung der detaillierten Anleitung mit der zuständigen Behörde während der Zertifizierung von Versandstücken Typ B(U), Typ B(M) oder Typ C vereinbart werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass der Nachweis der Erfüllung der Anforderung nicht auf eine einzelne Methodik beschränkt ist.

Dieses Dokument verlangt keine bestimmten Prüfverfahren für Gasleckagen, legt jedoch Mindestanforderungen für jede Prüfung fest, die angewandt wird. Der Konstrukteur oder Lieferant des Versandstücks ist für die Schätzung oder Bestimmung der maximal zulässigen Freisetzungsrates von Radioaktivität in die Umgebung und für die Wahl der geeigneten Leckage-Prüfverfahren, die eine angemessene Empfindlichkeit aufweisen, verantwortlich.

Dieses Dokument bezieht sich gezielt auf Versandstücke Typ B(U), Typ B(M) oder Typ C, für die die behördlich festgesetzten Anforderungen an eine dichte Umschließung explizit festgelegt sind.

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).

Internationale Atomenergiebehörde (IAEA), *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach International Atomic Energy Agency (IAEA), *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material* und die folgenden Begriffe.

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

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

3.1
Aktivitätsfreisetzungsrates
Verlust radioaktiven Inhalts pro Zeiteinheit durch Lecks oder durchlässige Wände eines Umschließungssystems

3.2
Sperrmechanismus
Mechanismus, mit dem radioaktives Material in einem Umschließungssystem gesichert werden könnte, indem mögliche Leckagewege durch festes oder flüssiges Material versperrt werden

3.3
zuständige Behörde
jede nationale oder internationale Behörde, die als solche für einen beliebigen Zweck im Zusammenhang den *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material* der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) oder anderen anwendbaren Vorschriften eingesetzt oder anerkannt ist

3.4
Umschließungssystem
Gesamtheit der Komponenten eines Versandstücks mit dem Zweck, das radioaktive Material während des Transports dicht einzuschließen

3.5
Prüfmethodik der Gasleckagerate
Methode für die Festlegung einer Gasleckageprüfung, die die zulässigen Aktivitätsfreisetzungsraten des radioaktiven Inhalts in einem Umschließungssystem zu äquivalenten Gasleckageraten unter bestimmten Prüfbedingungen in Bezug setzt

3.6
Leck
jede ungewollte Öffnung oder Öffnungen in einem Umschließungssystem, durch die Inhalt entweichen könnte

3.7
Leckage
Übertritt eines Materials aus dem Umschließungssystem in die Umwelt durch ein oder mehrere Undichtheiten

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe auch *Permeation* (3.14).

3.8

Leckagerate

Menge fester Partikel, von Flüssigkeiten oder von Gasen, die durch Lecks strömt, pro Zeiteinheit

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Begriffe Leckagerate kann sich auf das radioaktive Material (gasförmig, flüssig, fest oder jedes Gemisch daraus) oder auf das Prüffluid beziehen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Leckagerate fester Stoffe wird in Masse geteilt durch die Zeit angegeben. Die Leckagerate flüssiger Stoffe kann in Masse geteilt durch die Zeit oder in Volumen geteilt durch die Zeit angegeben werden. Die Leckagerate von Gasen wird durch das Produkt aus Druck und Volumen (das ist eine masseähnliche Einheit) geteilt durch die Zeit bei einer bekannten Temperatur angegeben.

3.9

dicht

allgemeiner Begriff, der angibt, dass ein Umschließungssystem den verlangten Dichtheitsgrad für einen bestimmten Inhalt erfüllt

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Anhang E, Abschnitt 8.

3.10

Medium

jedes Fluid, das selbst radioaktiv sein könnte oder nicht, und das radioaktives Material durch ein oder mehrere Lecks mitführen könnte

3.11

molekulare Strömung

Strömung von Gas durch ein Leck unter derartigen Bedingungen, dass die mittlere freie Weglänge größer als die größte Abmessung eines Querschnitts des Lecks ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Die molekulare Strömungsrate hängt vom Partialdruckgradienten ab.

3.12

Versandstück

Verpackung zusammen mit ihrem radioaktiven Inhalt, die zum Transport bereitgestellt wird

3.13

Verpackung

Anordnung von Komponenten, die für die vollständige Umhüllung des radioaktiven Inhalts erforderlich ist

3.14

Permeation

Durchgang eines Fluids durch eine feste durchlässige Barriere (auch wenn dort keine Undichtheiten vorhanden sind) durch einen Adsorptions-Diffusions-Desorptionsmechanismus

Anmerkung 1 zum Begriff: Permeation ist nicht als eine Freisetzung von Aktivität zu betrachten, solange das Fluid selbst nicht radioaktiv ist. In diesem Dokument wird Permeation nur für Gase angewandt.

3.15

Permeationsrate

Menge an Gasen, die durch durchlässige Wände dringt, pro Zeiteinheit

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Permeationsrate hängt vom Partialdruckgradienten ab.

3.16

qualitativ

bezieht sich auf Leckageprüfverfahren, die das Vorhandensein eines Lecks erkennen, jedoch nicht die Leckagerate oder die Gesamtleckagemenge messen

3.17

quantitativ

Leckageprüfverfahren, die die Gesamtleckagerate(n) eines Umschließungssystems oder von Teilen davon messen

3.18 Empfindlichkeit

3.18.1

Empfindlichkeit eines Leckdetektors

kleinste nutzbare Reaktion des Detektors auf das Austreten eines Prüffluids, das heißt, die Leckagerate, die eine wiederholbare Veränderung der Detektoranzeige erzeugt

3.18.2

Empfindlichkeit eines Leckageprüfverfahrens

kleinste nachweisbare Leckagerate, die mit dem Prüfverfahren erkannt werden kann

3.19

standardisierte Leckagerate

SLR

unter bekannten Bedingungen bewertete Leckagerate, normalisiert zur Strömung trockener Luft unter Referenzbedingungen bei einem stromaufseitigen Druck von $1,013 \times 10^5$ Pa, einem stromabseitigen Druck von 0,0 Pa und einer Temperatur von 298 K (25 °C)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheiten für die standardisierte Leckagerate werden angegeben in $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR.

3.20

standardisierte Helium-Leckagerate

SHeLR

unter bekannten Bedingungen bewertete Helium-Leckagerate, normalisiert zur Strömung trockenen Heliums unter Referenzbedingungen bei einem stromaufseitigen Druck von $1,013 \times 10^5$ Pa, einem stromabseitigen Druck von 0,0 Pa und einer Temperatur von 298 K (25 °C)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheiten für die standardisierte Helium-Leckagerate werden angegeben in $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (SHeLR).

3.21

Prüfgas oder Tracergas

Gas, das für die Erkennung von Leckagen oder zur Messung der Leckagerate verwendet wird

3.22

viskose Strömung

kontinuierlicher Gasstrom durch ein Leck unter solchen Bedingungen, dass die mittlere freie Weglänge sehr klein im Vergleich mit den kleinsten Abmessungen eines Querschnitts des Lecks ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Strömung kann laminar oder turbulent sein. Die viskose Strömung hängt vom Gesamtdruckgradienten ab.

4 Symbole und Einheiten

In diesem Dokument werden die folgenden Symbole und Einheiten verwendet.

Symbol	Definition	Einheit
A_i	Aktivität von Radionuklid i	Bq
A_2	Menge (Aktivität) von radioaktivem Material, mit Ausnahme radioaktiver Stoffe in besonderer Form, gemäß Definition in den geltenden Dokumenten, die in den <i>Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material</i> der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) aufgeführt sind	Bq
A_{2i}	A_2 -Wert von Radionuklid i	Bq
a	Kapillarlänge/Lecklänge	m
C	Mittlere Aktivität pro Volumeneinheit; das Symbol dient zur Vereinfachung in Bild 1 und steht für die Verwendung entweder von C_A oder von C_N	$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$
C_A	Mittlere Aktivität pro Volumeneinheit des Mediums, die aus dem Umschließungssystem bei einem Unfall während des Transports austreten könnte	$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$
C_N	Mittlere Aktivität pro Volumeneinheit des Mediums, die aus dem Umschließungssystem unter normalen Transportbedingungen austreten könnte	$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$
D	Kapillardurchmesser/Leckdurchmesser	m
D	Maximal zulässiger Durchmesser; das Symbol dient zur Vereinfachung in Bild 1 und steht für die Verwendung entweder von D_A oder von D_N	m
D_A	Maximal zulässiger äquivalenter Kapillarleckdurchmesser bei einem Unfall während des Transports	m
D_B	Blasendurchmesser	m
D_N	Maximal zulässiger äquivalenter Kapillarleckdurchmesser unter normalen Transportbedingungen	m
FC_{iA}	Freigesetzter Anteil des Radionuklids i aus dem radioaktiven Inhalt in das Umschließungssystem bei einem Unfall während des Transports	—
FC_{iN}	Freigesetzter Anteil des Radionuklids i aus dem radioaktiven Inhalt in das Umschließungssystem unter normalen Transportbedingungen	—
FE_{iA}	Anteil des Radionuklids i , der für die Freisetzung aus dem Umschließungssystem in die Umgebung bei einem Unfall während des Transports verfügbar ist	—
FE_{iN}	Anteil des Radionuklids i , der für die Freisetzung aus dem Umschließungssystem in die Umgebung unter normalen Transportbedingungen verfügbar ist	—
g	Erdbeschleunigung	$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
g_0	Konstante	$g_0 = 1 \text{ kg m N}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
H	Prüfdauer	s
h	Flüssigkeitshöhe	m
L	Volumetrische Leckagerate	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
L	Maximal zulässige volumetrische Leckagerate; das Symbol dient zur Vereinfachung in Bild 1 und steht für die Verwendung entweder von L_A oder von L_N	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Symbol	Definition	Einheit
L_A	Maximal zulässige volumetrische Leckagerate des Mediums bei Druck p_A bei einem Unfall während des Transports	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
L_N	Maximal zulässige volumetrische Leckagerate des Mediums bei Druck p_N , unter normalen Transportbedingungen	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
M	Relative Molekularmasse	$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
M_i	Relative Molekularmasse der Komponente i	$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
M_{mix}	Relative Molekularmasse des Gemischs	$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
p_A	Druck im Umschließungssystem bei einem Unfall während des Transports	Pa
p_N	Druck im Umschließungssystem unter normalen Transportbedingungen	Pa
p_d	Stromabseitiger Druck	Pa
p_i	Partialdruck einer Komponente i des Gasgemischs	Pa
p_{mix}	Gesamtdruck des Gasgemischs	Pa
p_s	Referenzdruck	$p_s = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$
p_t	Partialdruck des Prüfgases	Pa
p_u	Stromaufseitiger Druck	Pa
p_1	Gasdruck bei Beginn der Prüfung	Pa
p_2	Gasdruck am Ende der Prüfung	Pa
Q	Leckagerate	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_{SLR}	Standardisierte Leckagerate; das Symbol dient zur Vereinfachung in Bild 1 und steht für die Verwendung entweder von $Q_{A(\text{SLR})}$ oder von $Q_{N(\text{SLR})}$	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_A	Zulässige Leckagerate des Mediums bei einem Unfall während des Transports, sie wird berechnet aus L_A	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$Q_{A(\text{SLR})}$	Zulässige standardisierte Leckagerate (SLR) bei einem Unfall während des Transports	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_m	Leckagerate bei molekularer Strömung	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_{mix}	Leckagerate bei einem Gasgemisch	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_N	Zulässige Leckagerate des Mediums unter normalen Transportbedingungen, sie wird berechnet aus L_N	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$Q_{N(\text{SLR})}$	Zulässige standardisierte Leckagerate (SLR) unter normalen Transportbedingungen	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_p	Permeationsrate	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_{TDA}	Zulässige Prüfleckagerate des Tracer- oder Prüfgases bezogen auf einen Unfall während des Transports bei der Designverifizierung; sie wird bestimmt aus $Q_{A(\text{SLR})}$	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_{TDN}	Zulässige Prüfleckagerate des Tracer- oder Prüfgases bezogen auf normale Transportbedingungen bei der Designverifizierung; sie wird bestimmt aus $Q_{N(\text{SLR})}$	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_{TF}	Zulässige Prüfleckagerate des Tracergases bei der Verifizierung bei Fertigung	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_{TM}	Zulässige Prüfleckagerate des Tracergases bei der Verifizierung bei Wartung	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_{TP}	Zulässige Prüfleckagerate des Tracergases bei der regelmäßigen Verifizierung	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Symbol	Definition	Einheit
Q_{TS}	Zulässige Prüfleckagerate des Tracergases bei der Verifizierung vor dem Versand	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_v	Leckagerate bei viskoser Strömung	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
R	Allgemeine Gaskonstante	$R = 8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
R	Maximal zulässige Aktivitätsfreisetzungsrates; das Symbol dient zur Vereinfachung in Bild 1 und steht für die Verwendung entweder von R_A oder von R_N	$\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$
R_A	Maximal zulässige Aktivitätsfreisetzungsrates des Inhalts bei einem Unfall während des Transports	$\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$
R_N	Maximal zulässige Aktivitätsfreisetzungsrates des Inhalts unter normalen Transportbedingungen	$\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$
RG	Maximal zulässige Aktivitätsfreisetzungsrates des gasförmigen Inhalts; das Symbol dient zur Vereinfachung in Bild 1 und steht für die Verwendung entweder von RG_A oder von RG_N	$\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$
RG_A	Maximale Aktivitätsfreisetzungsrates des gasförmigen Inhalts bei einem Unfall während des Transports nach einer möglichen Permeation	$\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$
RG_N	Maximale Aktivitätsfreisetzungsrates des gasförmigen Inhalts unter normalen Transportbedingungen nach einer möglichen Permeation	$\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$
RI_A	Freisetzbare Aktivität von Radionuklid i bei einem Unfall während des Transports	Bq
RI_N	Freisetzbare Aktivität von Radionuklid i unter normalen Transportbedingungen	Bq
RI_T	Freisetzbare Gesamtaktivität aller Radionuklide; das Symbol dient zur Vereinfachung in Bild 1 und steht für die Verwendung entweder von RI_{TA} oder von RI_{TN}	Bq
RI_{TA}	Freisetzbare Gesamtaktivität aller Radionuklide bei einem Unfall während des Transports	Bq
RI_{TN}	Freisetzbare Gesamtaktivität aller Radionuklide unter normalen Transportbedingungen	Bq
RP	Aktivitätsfreisetzungsrates durch Permeation; das Symbol dient zur Vereinfachung in Bild 1 und steht für die Verwendung entweder von RP_A oder von RP_N	$\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$
RP_A	Aktivitätsfreisetzungsrates durch Permeation bei einem Unfall während des Transports	$\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$
RP_N	Aktivitätsfreisetzungsrates durch Permeation unter normalen Transportbedingungen	$\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$
S	Empfindlichkeit der Leckagerates	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
SHeLR	Standardisierte Helium-Leckagerates	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SHeLR}$
SLR	Standardisierte Leckagerates	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SLR}$
T	Absolute Fluidtemperatur	K
T_0	Referenztemperatur	$T_0 = 298 \text{ K}$
T_1	Gastemperatur zu Beginn der Prüfung	K
T_2	Gastemperatur am Ende der Prüfung	K
u	Geschwindigkeit	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Symbol	Definition	Einheit
V	Gasvolumen	m^3
V_A	Volumen des Mediums bei einem Unfall während des Transports	m^3
V_N	Volumen des Mediums unter normalen Transportbedingungen	m^3
μ	Dynamische Viskosität des Fluids	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
μ_i	Viskosität der Komponente i	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
μ_{mix}	Viskosität des Gemischs	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
v	Blasenbildungsrate	s^{-1}
ρ	Dichte	kg m^{-3}
ρ_g	Gasdichte	kg m^{-3}
ρ_l	Flüssigkeitsdichte	kg m^{-3}
σ	Oberflächenspannung der Flüssigkeit	N m^{-1}

5 Behördliche Anforderungen

5.1 Relevante Vorschriften

Weitere Angaben zu relevanten Vorschriften enthält Anhang E, 5.1.

5.2 Behördliche Anforderungen an die Umschließung

Weitere Angaben zu den Anforderungen an die Umschließung für Versandstücke Typ B(U), Typ B(M) und Typ C enthält Anhang E, 5.2.

6 Vorgehensweise zur Erfüllung der Anforderungen dieses Dokuments

6.1 Allgemeines

Die Erfüllung der Anforderungen an die Umschließung von Versandstücken kann entweder durch Messung der Freisetzungsrates des radioaktiven Inhalts oder durch andere Verfahren nachgewiesen werden. Dieses Dokument zeigt, wie die Anforderungen an eine Umschließung für Versandstücke durch eine äquivalente Gasleckageprüfung nachgewiesen werden können. Alle gemessenen Prüfleckageraten müssen zur potenziellen Freisetzung des umschlossenen Materials durch Prüfungen an Prototypen oder Modellen, Verweis auf frühere Nachweise, Berechnungen oder begründete Argumentationen in Bezug gesetzt werden.

Dieses Dokument beruht auf den folgenden Annahmen:

- a) Das radioaktive Material, das aus dem Versandstück freigesetzt werden könnte, könnte in jeder der folgenden Formen oder einer Kombination davon vorliegen:
 - flüssig;
 - gasförmig;
 - fest;
 - Flüssigkeiten mit gelösten Feststoffen;
 - Feststoffpartikel in einem Gas (Aerosole).

Die maximal zulässige Aktivitätsfreisetzungsrates kann als ein maximal zulässiger Leckdurchmesser ausgedrückt werden, wenn die physikalische Form und die Eigenschaften des radioaktiven Inhalts berücksichtigt werden.

- b) Die Annahme eines stationären Zustands ist eine angemessene Näherung.
- c) Für die Messung von Gasströmungsrates kann ein Prüfverfahren für Gasleckagen angewandt werden. Diese Rates können mathematisch auf den Durchmesser einer einzelnen geraden Kapillare bezogen werden, was in den meisten Fällen als konservative Darstellung eines oder mehrerer Lecks betrachtet wird.
- d) Prüfverfahren für Gasleckagen können für den Nachweis der Erfüllung der behördlichen Anforderungen an Umschließungen verwendet werden, wenn der Durchmesser der einzelnen geraden Kapillaren, die mit dem Leckagetest in 6.1 c) in Zusammenhang steht, gleich oder kleiner als der maximal zulässige Leckdurchmesser in 6.1 a) ist.

Für Erwägungen der Aktivitätsfreisetzung oder Rückhaltung nach diesem Dokument sollten die Phänomene der viskosen Strömung, der molekularen Strömung, der Permeation und der Sperrung berücksichtigt werden.

6.2 Qualitätsmanagementsystem

Ein Managementsystem nach internationalen, nationalen oder anderen Normen muss entwickelt und angewandt werden. Um die konsistente Qualität der in diesem Dokument beschriebenen Tätigkeiten zu gewährleisten, wird zur Anwendung von ISO 9001:2015 geraten.

Weitere Angaben zu den behördlichen Anforderungen an das Managementsystem enthält Anhang E, 6.2.

6.3 Vorgehensweise

6.3.1 Allgemeines

Mit dem Fließdiagramm in Bild 1 als Anleitung muss die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise angewandt werden. Der Text in jedem Kasten im Fließdiagramm gibt das Ergebnis des jeweiligen Ablaufschritts an.

Schritt 1 bis Schritt 8 in Bild 1 beziehen sich auf die Umschließung des radioaktiven Inhalts, während Schritt 10 bis Schritt 12 sich auf die Leckage eines Prüfgases beziehen. Schritt 9 ist ein Referenzschritt, der die Umschließung des radioaktiven Inhalts mit der Leckage eines Prüfgases verknüpft.

Da das freisetzbare radioaktive Material sowohl gasförmig als auch flüssig oder fest oder eine Kombination daraus sein könnte, muss der für die jeweilige Form des radioaktiven Materials geltende Teil der nachfolgend beschriebenen Vorgehensweise eingehalten werden, um die zulässigen standardisierten Leckageraten zu erhalten.

Bild 1 ist für den allgemeinen Fall erstellt. In manchen Fällen müssen nicht alle Schritte ausgeführt werden, zum Beispiel bei nur einem einzigen Radionuklid in flüssiger Form. In anderen Fällen, wie beispielsweise bei einem Gemisch radioaktiver Materialien in verschiedenen Formen könnte es notwendig sein manche Schritte in einem iterativen Ablauf zu wiederholen. In jedem Fall wird es aber erforderlich sein, die entsprechenden Schritte in Bild 1 für normale Transportbedingungen sowie bei einem Unfall während des Transports auszuführen.

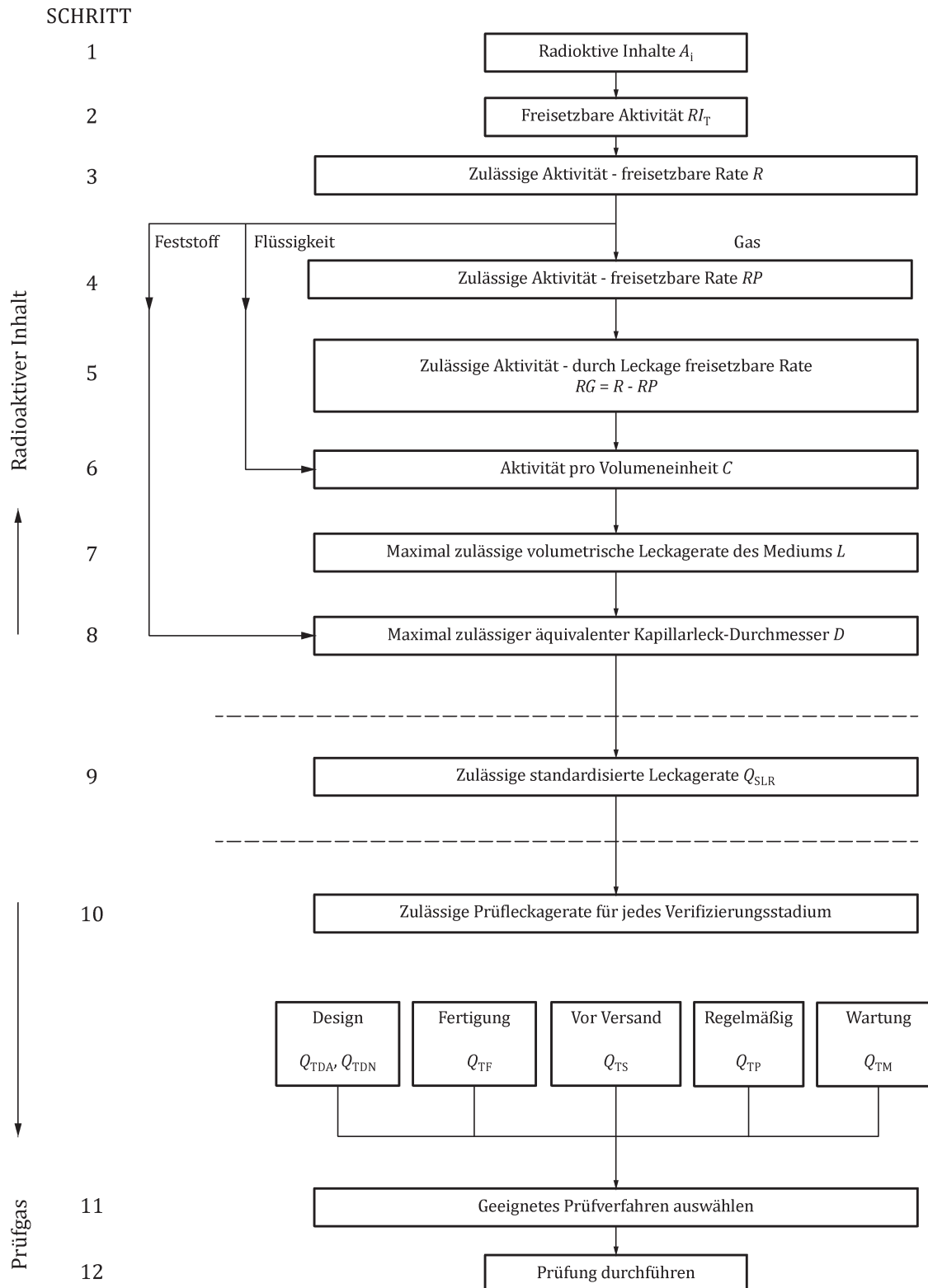


Bild 1 — Fließdiagramm für die Prüfmethdik von Gasleckagen

6.3.2 Bestimmung der zulässigen Aktivitätsfreisetzungsraten

Ein Verzeichnis des freisetzbaren radioaktiven Inhalts muss erstellt und der freisetzbare Inhalt muss mit den behördlichen Anforderungen an eine dichte Umschließung verglichen werden. Siehe Schritt 1 bis Schritt 3 in Bild 1 und Abschnitt 7.

6.3.3 Bestimmung der standardisierten Leckageraten

Die zulässigen Aktivitätsfreisetzungsraten müssen in äquivalente standardisierte Leckageraten umgerechnet werden. Siehe Schritt 4 bis Schritt 9 in Bild 1 und Abschnitt 8.

6.3.4 Bestimmung der zulässigen Prüfleckageraten für jedes Verifizierungsstadium

Die angemessenen Gasleckageraten sind für die Verifizierung des Designs, bei der Fertigung, vor Versand, die regelmäßige Verifizierung und die Verifizierung bei Wartung zu bestimmen. Siehe Schritt 10 in Bild 1 und 9.2.

6.3.5 Auswahl der geeigneten Prüfverfahren

Die angemessenen Gasleckage-Prüfverfahren sind für die Verifizierung des Designs, bei der Fertigung, vor Versand, die regelmäßige Verifizierung und die Verifizierung bei Wartung auszuwählen. Siehe Schritt 11 in Bild 1 und 9.2.

6.3.6 Durchführung der Prüfungen und Aufzeichnung der Ergebnisse

Die erforderlichen Prüfungen sind durchzuführen und die Ergebnisse sind aufzuzeichnen. Siehe Schritt 12 in Bild 1 und Abschnitt 10.

7 Bestimmung der zulässigen Aktivitätsfreisetzungsraten

Die zulässigen Aktivitätsfreisetzungsraten sind anhand Schritt 1 bis Schritt 3 für normale Transportbedingungen und für einen Unfall während des Transports zu bestimmen.

7.1 Schritt 1: Erstellen einer Liste des radioaktiven Inhalts A_i

Diese liefert ein Verzeichnis des radioaktiven Inhalts und umfasst die Aktivität und die physikalischen Merkmale jedes Radionuklids. Möglicherweise kann es erforderlich sein, den Inhalt als separate Phasen zu betrachten, also Flüssigkeiten, Gase und Feststoffe. Aerosole können als Gase betrachtet werden. Gelöste Feinpartikel können als Flüssigkeit betrachtet werden.

Ist es nicht möglich, den tatsächlichen radioaktiven Inhalt zu bestimmen, muss der Benutzer den radioaktiven Inhalt verbindlich schätzen und dieser muss von der zuständigen Behörde akzeptiert werden.

7.2 Schritt 2: Bestimmung der insgesamt freisetzbaren Aktivität RI_T

In manchen Fällen kann der radioaktive Inhalt sich in mehr als einem Behälter im Umschließungssystem befinden. Ein Beispiel für einen solchen Fall ist ein verstrahlter Brennstab in einer Transportverpackung. In diesem Fall könnte bei normalen Transportbedingungen oder bei einem Unfall während des Transports nur ein Bruchteil des radioaktiven Inhalts aus dem innersten Behälter in das Umschließungssystem freigesetzt werden, also FC_{iN} , FC_{iA} und von diesem Bruchteil kann lediglich ein weiterer Bruchteil für die Freisetzung aus dem Umschließungssystem in die Umwelt zur Verfügung stehen, also FE_{iN} , FE_{iA} . Der numerische Wert jedes Freisetzunganteils hängt vom jeweiligen Radionuklid ab und wenn der radioaktive Inhalt aus einem Gemisch von Radionukliden besteht, könnten sich viele anteilige Freisetzungswerte ergeben. Ferner könnten sich die anteiligen Freisetzungswerte für normale Transportbedingungen von jenen bei einem Unfall während des Transports unterscheiden, auch für das gleiche Radionuklid.

Die freisetzbaren Anteile hängen ab von Faktoren wie

- a) der chemischen und physikalischen Form des Materials innerhalb des Umschließungssystems bei normalen Transportbedingungen und bei Unfällen während des Transports,

- b) den möglichen Freisetzungsarten, wie beispielsweise Permeation von Gasen, Mobilität von Aerosolen oder Partikeln, Reaktionen mit Wasser oder anderen Stoffen im System sowie der Löslichkeit, oder
- c) den maximalen Temperaturen, Drücken, Vibrationen, mechanischen Beanspruchungen oder Verformungen und ähnlichen, denen das umschlossene Material unter normalen Transportbedingungen und bei Unfällen während des Transports ausgesetzt werden würde. Diese sind mittels Prüfungen an Prototypen oder Modellen in Bezug auf frühere Nachweise, Berechnungen oder eine begründete Argumentation zu bestimmen.

Kann ein Freisetzungsanteil nicht quantifiziert werden, ist ein Wert von 1,0 anzunehmen. Die Werte der Freisetzungsanteile erfordern normalerweise eine Abstimmung mit der zuständigen Behörde.

Für normale Transportbedingungen ist die freisetzbare Aktivität des Radionuklids i , RI_{iN} in Becquerel:

$$RI_{iN} = FC_{iN} \times FE_{iN} \times A_i$$

und für den gesamten Inhalt

$$RI_{TN} = \sum_i RI_{iN}$$

Bei Unfällen während des Transports ist die freisetzbare Aktivität des Radionuklids i , RI_{iA} in Becquerel:

$$RI_{iA} = FC_{iA} \times FE_{iA} \times A_i$$

und für den gesamten Inhalt

$$RI_{TA} = \sum_i RI_{iA}$$

7.3 Schritt 3: Bestimmung der maximal zulässigen Aktivitätsfreisetzungsraten R

Mit den Daten aus Schritt 1 und Schritt 2 werden die Radionuklide identifiziert, die aus dem Versandstück freigesetzt werden könnten und ihre physikalische Form. Dann ist für jedes Radionuklid der Wert A_2 zu ermitteln bzw. bei Gemischen ist ein äquivalenter Wert für A_2 zu verwenden (siehe Absatz 405 in der Ausgabe 2012 der *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*) der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA). Anschließend sind die behördlichen Anforderungen an die Umschließung gemäß E.5.2 zu berechnen. In diesem Stadium werden die Anforderungen an die Umschließung in Einheiten Aktivität pro Stunde oder Aktivität in einem Zeitraum von einer Woche angegeben. Da Gasleckageprüfraten normalerweise in Strömungseinheiten pro Sekunde angegeben werden, müssen die Zeiteinheiten der behördlichen Anforderungen an die Umschließung zwecks Kompatibilität in Sekunden umgerechnet werden. In diesem Dokument wird angenommen, dass eine Leckage mit einer gleichmäßigen Rate während des behördlichen Zeitraums (1 h bei normalen Transportbedingungen/1 Woche bei einem Unfall während des Transports) erfolgt. Andere Zeitmittelungsverfahren können verwendet werden, sofern sie von der zuständigen Behörde akzeptiert werden. Wenn alle obigen Faktoren berücksichtigt sind, sind die zulässigen Aktivitätsfreisetzungsraten bestimmt.

8 Bestimmung der standardisierten Leckageraten

8.1 Allgemeines

Standardisierte Leckageraten sind mit Schritt 4 bis Schritt 9 sowohl für normale Transportbedingungen als auch für Unfälle während des Transports zu bestimmen.

Wenn die standardisierten Leckageraten relativ niedrig sind, kann die zuständige Behörde in manchen Fällen die Verwendung eines spezifizierten an Stelle eines berechneten Wertes für die standardisierte Leckagerate erlauben. Auch wenn die standardisierten Leckageraten relativ hoch sind, kann die zuständige Behörde zustimmen, dass Leckageprüfungen unangemessen oder unnötig sind oder die Verwendung eines spezifizierten an Stelle eines berechneten Wertes für die standardisierte Leckagerate erlauben. Siehe Anhang E, Abschnitt 8.

In diesem Abschnitt wird die Methode für die Bestimmung der standardisierten Leckagerate (aus der die Prüfleckagerate bestimmt werden kann) für alle Leckagemechanismen beschrieben. Mit der Vorgehensweise in Schritt 4 bis Schritt 9 müssen maximal zulässige standardisierte Leckageraten festgelegt werden, die zahlenmäßig äquivalent mit den entsprechenden behördlichen Anforderungen an die Umschließung sind.

Die Kenntnis des radioaktiven Inhalts, seiner Eigenschaften und des Umschließungssystems der Verpackung ist wesentlich, um die Anforderungen in Schritt 4 bis Schritt 9 zu erfüllen.

8.2 Schritt 4: Bestimmen der Aktivitätsfreisetzungsrates durch Permeation RP

Für radioaktives Gas ist die Aktivitätsfreisetzungsrates durch Permeation zu bestimmen. Siehe B.13.

8.3 Schritt 5: Bestimmen der maximal zulässigen Aktivitätsfreisetzungsrates durch Lecks RG

Wenn der Inhalt ein radioaktives Gas enthält, ist die Freisetzungsrates durch Permeation, wie in Schritt 4 bestimmt, von der behördlichen Anforderung an die Umschließung, die in Schritt 3 bestimmt wurde, abzuziehen.

Ist $RG < 0$, so erfüllt das Versandstück nicht die behördliche Anforderung.

Bleibt der Druck im Umschließungssystem während des gesamten Transports niedriger als der Außendruck, kann Aktivität nur durch Permeation und molekulare Strömung (falls diese gegenüber der laminaren Strömung vorherrscht), die durch die Partialdrücke der radioaktiven Stoffe verursacht wird, freigesetzt werden.

8.4 Schritt 6: Bestimmen der Aktivität pro Volumeneinheit des Mediums im Umschließungssystem C

Die Aktivität pro Volumeneinheit im Medium, die aus dem Umschließungssystem in die Umgebung austreten könnte, ist als C_N bzw. C_A für normale Transportbedingungen bzw. bei einem Unfall während des Transports zu bezeichnen. Die Werte für C_N und C_A hängen von der Aktivität jedes Radionuklids und dem Anteil des Gesamtinhalts, der für die Freisetzung in den Umschließungsraum und dann für die Freisetzung in die Umgebung verfügbar ist, ab.

Für ein Mediumvolumen von V_N wird C_N , in Becquerel pro Kubikmeter ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) wie folgt bestimmt:

$$C_N = \frac{RI_{TN}}{V_N}$$

Für ein Mediumvolumen von V_A wird C_A , in Becquerel pro Kubikmeter ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) wie folgt bestimmt:

$$C_A = \frac{RI_{TA}}{V_A}$$

8.5 Schritt 7: Bestimmen der maximal zulässigen volumetrischen Leckagerates des Mediums L

Wenn die Daten aus Schritt 3 bzw. Schritt 5, wenn Permeation zu berücksichtigen ist, durch die Daten aus Schritt 6 geteilt werden, erhält man die Daten für Schritt 7. Dies ergibt die maximal zulässige volumetrische Strömungsrates des Mediums, die aus dem Versandstück durch ein Leck entweichen könnte. In diesem Schritt ist das Medium auf Betriebsdruck- und -temperaturbedingungen.

Unter normalen Transportbedingungen ist die maximal zulässige volumetrische Leckagerates für das Medium L_N in Kubikmetern pro Sekunde ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) mit der folgenden Gleichung zu bestimmen:

$$L_N = \frac{R_N}{C_N}$$

Bei einem Unfall während des Transports ist die maximal zulässige volumetrische Leckagerate für das Medium L_A in Kubikmetern pro Sekunde ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) mit der folgenden Gleichung zu bestimmen:

$$L_A = \frac{R_A}{C_A}$$

8.6 Schritt 8: Bestimmen des maximal zulässigen äquivalenten Kapillarleckdurchmessers D

Für Flüssigkeiten kann die volumetrische Strömungsrate aus Schritt 7 mit dem Poiseuille-Gesetz in einen Durchmesser eines einzelnen Lecks umgerechnet werden [Gleichung (B.7)].

Für Gase und Aerosole sind die volumetrischen Leckageraten L_N und L_A aus Schritt 7 mit den folgenden Gleichungen in zulässige Leckageraten Q_N und Q_A in Pascal Kubikmeter pro Sekunde ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) umzurechnen:

$$Q_N = L_N \times p_N$$

$$Q_A = L_A \times p_A$$

Für Leckageraten von Gasen und Aerosolen kann ein Durchmesser für ein einzelnes Leck mit dem Knudsen-Gesetz berechnet werden [Gleichung (B.1)].

Für Feststoffe, einschließlich Partikel, und einige Flüssigkeiten könnte es durch Bewertung der Merkmale des radioaktiven Materials wie Partikelgröße oder Fluid-Viskosität unter Umständen möglich sein, einen Grenzdurchmesser festzulegen, durch den das radioaktive Material nicht strömt, sodass durch diesen Sperrmechanismus [siehe Anhang E, 6.1 C b)] keine Freisetzung von Aktivität erfolgt. Die Verwendung eines solchen Sperrmechanismus muss von der zuständigen Behörde akzeptiert werden.

8.7 Schritt 9: Bestimmen der zulässigen standardisierten Leckagerate Q_{SLR}

Wenn der maximal zulässige äquivalente Kapillarleckdurchmesser in Schritt 8 bestimmt wurde, kann der Wert dieses Durchmessers in Gleichung (B.1) für die Bestimmung der zulässigen standardisierten Leckagerate verwendet werden (siehe Beispiele in D.3, D.10, D.11 und D.13).

Wenn der Gesamtdruck im Umschließungssystem niedriger als der Außendruck ist, zum Beispiel, wenn der Anfangsdruck im Umschließungssystem niedriger als der Außendruck und Q_{SLR} so ist, dass der Innendruck während des gesamten Transports niedriger als der Außendruck bleibt (siehe Beispiel in D.15) und eine molekulare Strömung vorherrschend ist, muss nur die durch die Partialdrücke der radioaktiven Stoffe verursachte molekulare Strömung betrachtet werden. Hierfür sollte der erste Summand in Gleichung (B.1) auf Null gesetzt werden. Im zweiten Summanden sind die Eigenschaften der radioaktiven Stoffe (Molekularmasse, Partialdruck) zu verwenden. Diese Bewertung ist für jeden relevanten radioaktiven Stoff vorzunehmen und die Ergebnisse sind miteinander zu verknüpfen.

Standardisierte Leckageraten sind für normale Transportbedingungen sowie für einen Unfall während des Transports zu bestimmen, mit D_A wird $Q_{A(\text{SLR})}$ bestimmt und mit D_N wird $Q_{N(\text{SLR})}$ bestimmt. Liegt das radioaktive Material in mehr als einer Form vor, sind die Werte für D_A , $Q_{A(\text{SLR})}$, D_N und $Q_{N(\text{SLR})}$ für jede Form zu bestimmen.

Es ist der strengste Wert für $Q_{A(\text{SLR})}$ zu ermitteln, um zu bestimmen, ob dieser Wert noch strenger gefasst werden muss, um die Aktivitätsfreisetzungen in den anderen Formen zu berücksichtigen.

Ebenso ist der strengste Wert für $Q_{N(\text{SLR})}$ zu ermitteln, um zu bestimmen, ob dieser Wert noch strenger gefasst werden muss, um die Aktivitätsfreisetzungen in den anderen Formen zu berücksichtigen.

Obige Bestimmungen und Bewertungen ergeben die Werte für $Q_{A(\text{SLR})}$ und $Q_{N(\text{SLR})}$, die in Schritt 10 zu verwenden sind.

9 Anforderungen an die Verifizierung des Umschließungssystems

9.1 Verifizierungsstadien des Umschließungssystems

9.1.1 Allgemeines

Die Einhaltung der Anforderungen an die Umschließung von Versandstücken muss durch Verifizierung des Designs, bei der Fertigung, vor Versand, regelmäßige Verifizierung und Verifizierung bei der Wartung nachgewiesen werden. Für jedes Prüfungsstadium muss ein Satz Prüfanforderungen festgelegt werden.

Die Verifizierungsverfahren müssen nachweisen, dass alle behördlichen Anforderungen an die Umschließung sowohl unter normalen Transportbedingungen als auch bei einem Unfall während des Transports erfüllt werden. Daher sind Leckageprüfungen nur ein Teil der Verifizierungsverfahren. Es muss ein Satz Verfahren für die verschiedenen Verifizierungsstadien festgelegt werden, die für die zuständige Behörde akzeptabel sind.

Der Zusammenbau muss nach einem schriftlichen Qualitätssicherungsverfahren erfolgen, das eine Checkliste für die Überprüfung umfasst, ob alle Teile des Umschließungssystems die geltenden Anforderungen erfüllen, vorhanden und vorschriftsmäßig gesichert sind.

9.1.2 Designverifizierung

Die Designverifizierungsverfahren müssen nachweisen, dass das Design des Versandstücks alle behördlichen Anforderungen an die Umschließung sowohl unter normalen Transportbedingungen als auch bei einem Unfall während des Transports erfüllt

Mit der Prüfung der Verpackung muss nachgewiesen werden, dass ihre Leckagerate kleiner oder gleich der maximal zulässigen Prüfleckagerate Q_{TDN} bzw. Q_{TDA} ist.

Die maximal zulässigen Prüfleckageraten sind Q_{TDN} bzw. Q_{TDA} für Prüfungen unter normalen Transportbedingungen bzw. bei einem Unfall während des Transports. Werden die Prüfungen unter Bedingungen (wie Temperatur und Druck) ausgeführt, die sich von den normalen und unfallspezifischen Bedingungen unterscheiden, muss nachgewiesen werden, dass die gemessenen Leckageraten aussagekräftig und repräsentativ sind.

Weitere Informationen zu den behördlichen Vorgaben enthält Anhang E, 9.1.2.

9.1.3 Verifizierung bei der Fertigung

Die Verifizierungsverfahren bei der Fertigung müssen nachweisen, dass jede Verpackung eines bestimmten Designs so hergestellt wird, dass die behördlichen Anforderungen an die Umschließung bei normalen Transportbedingungen und bei einem Unfall während des Transports erfüllt werden, unter der Annahme, dass das Versandstück vor dem Versand richtig zusammengebaut und die Verpackung ordnungsgemäß instand gehalten wird.

Mit der Prüfung der Verpackung muss nachgewiesen werden, dass ihre Leckagerate kleiner oder gleich der maximal zulässigen Prüfleckagerate Q_{TF} ist. Die gesamte Umschließung mit Grundmaterial, Schweißnähten, Dichtungen, Verschlüssen, Ventilen, Berstscheiben oder anderen Begrenzungselementen muss geprüft werden, mit Ausnahme solcher Teile, deren Leckagerate nachweislich vernachlässigbar ist.

Die maximal zulässige Prüfleckagerate Q_{TF} muss der strengere der Werte Q_{TDN} und Q_{TDA} sein. Wenn die Prüfbedingungen von den Bedingungen des ungünstigsten Falles bei normalen Transportbedingungen bzw. bei einem Unfall während des Transports abweichen, müssen die Prüfleckageraten so ausgewählt werden, dass mit den Prüfungen nachgewiesen werden kann, dass das Versandstück keine höheren als die maximal zulässigen Leckageraten bei normalen Transportbedingungen und bei einem Unfall während des Transports aufweist.

Weitere Informationen zu den behördlichen Vorgaben enthält Anhang E, 9.1.3.

9.1.4 Verifizierung vor Versand

Die Verifizierungsverfahren vor dem Versand müssen nachweisen, dass vor jedem Versand und nach dem Einladen des Inhalts das Versandstück so zusammengebaut und die Verpackung so instand gehalten wird, dass die behördlichen Anforderungen an die Umschließung während des Transports unter allen Bedingungen (normaler Transport und Unfall) erfüllt werden. Die Verfahren müssen zu diesem Zweck belegen, dass das Versandstück ordnungsgemäß zusammengebaut und die Verpackung korrekt instand gehalten wird und dass die Umschließungsfunktion hergestellt ist.

Mit der Verifizierung vor dem Versand muss nachgewiesen werden, dass die Leckagerate der Verpackung kleiner oder gleich der maximal zulässigen Prüfleckagerate Q_{TS} ist.

Die maximal zulässige Prüfleckagerate Q_{TS} muss der jeweils strengere der Werte für Q_{TDN} und Q_{TDA} sein. Wenn die Prüfbedingungen von den Bedingungen des ungünstigsten Falles bei normalen Transportbedingungen bzw. bei einem Unfall während des Transports abweichen, müssen die Prüfleckageraten so ausgewählt werden, dass mit den Prüfungen nachgewiesen werden kann, dass das Versandstück keine höheren als die maximal zulässigen Leckageraten bei normalen Transportbedingungen und bei einem Unfall während des Transports aufweist.

Weitere Informationen zu Ausnahmen enthält Anhang E, Abschnitt 8.

Weitere Informationen zu den behördlichen Vorgaben enthält Anhang E, 9.1.4.

9.1.5 Regelmäßige Verifizierung

Mit regelmäßigen Verifizierungen ist nachzuweisen, dass Versandstücke, die nach einem zugelassenen Design hergestellt wurden, auch nach wiederholter Verwendung weiterhin die behördlichen Anforderungen an die Umschließung erfüllen.

Das Versandstück ist zu prüfen, um nachzuweisen, dass seine Leckagerate kleiner oder gleich der maximal zulässigen Prüfleckagerate Q_{TP} ist. Auf Grund der möglichen Schwierigkeiten durch die Demontage von Komponententeilen, den Umfang der Umschließung und die Anzahl der Dichtungen, die geprüft werden sollen, muss der numerische Wert für Q_{TP} von der zuständigen Behörde akzeptiert werden.

Die Zeit zwischen regelmäßigen Prüfungen muss für die zuständige Behörde annehmbar sein.

Weitere Informationen zu den behördlichen Vorgaben enthält Anhang E, 9.1.5.

9.1.6 Verifizierung bei Wartung

Mit den Verifizierungsverfahren bei der Wartung muss nachgewiesen werden, dass das Umschließungssystem durch Wartung, Reparatur oder Austausch von Komponenten nicht beschädigt wurde.

Die Verifizierung bei Wartung ist durchzuführen, bevor ein Versandstück wieder in Gebrauch geht, um nachzuweisen, dass seine Leckagerate kleiner oder gleich der maximal zulässigen Rate Q_{TM} ist.

Verifizierungsprüfungen bei der Wartung müssen nur für die betroffenen Bereiche oder Dichtungen durchgeführt werden und können mit der Verifizierung vor dem Versand kombiniert werden.

Weitere Informationen zu den behördlichen Vorgaben enthält Anhang E, 9.1.6.

9.2 Anforderungen an die Verifizierung

9.2.1 Allgemeines

Die angemessene zulässige Prüfleckagerate für jedes Verifizierungsstadium wie in 9.1 beschrieben muss bestimmt werden, um nachzuweisen, dass das Umschließungssystem die behördlichen Anforderungen an Umschließungen erfüllt und es müssen geeignete Prüfverfahren ausgewählt werden.

9.2.2 Schritt 10: Bestimmen der zulässigen Prüfleckagerate für jedes Verifizierungsstadium Q_{TDA} , Q_{TDN} , Q_{TF} , Q_{TS} , Q_{TP} und Q_{TM}

Die Ergebnisse aus Schritt 9 sind für die Festlegung der zulässigen Prüfleckageraten zu berücksichtigen.

$Q_{A(SLR)}$ sollte für die Bestimmung von Q_{TDA} und $Q_{N(SLR)}$ für die Bestimmung von Q_{TDN} berücksichtigt werden. Für Q_{TF} , Q_{TS} , Q_{TP} und Q_{TM} sollte jeweils der strengere der Werte für $Q_{A(SLR)}$ bzw. $Q_{N(SLR)}$ berücksichtigt werden.

Ebenso muss der strengere der Werte für die zulässigen standardisierten Leckageraten, die für normale Transportbedingungen und für einen Unfall während des Transports berechnet wurden, für die Bestimmung der angemessenen zulässigen Prüfleckagerate in Schritt 10 ermittelt werden.

Weitere Informationen zur Bestimmung der standardisierten Leckageraten und zur Berücksichtigung verschiedener Prüfbedingungen (d. h. verschiedene Prüfgase, Betriebstemperaturen und -drücke während der Messung) sind B.2 und Anhang E, Abschnitt 8 zu entnehmen.

9.2.3 Schritt 11: Auswahl der geeigneten Prüfverfahren

Für jede zulässige Prüfleckagerate, die in Schritt 10 (Design, Fertigung, vor Versand, regelmäßig oder Wartung) festgelegt wurde, ist ein geeignetes Prüfverfahren zu wählen und geeignete Prüfanweisungen sind festzulegen.

Tabelle A.1 führt einige geeignete Prüfverfahren auf.

10 Anforderungen an Leckageprüfverfahren

10.1 Allgemeines

Alle Leckageprüfungen müssen nach einem schriftlichen Qualitätssicherungsprogramm ausgeführt werden. Mit Prüfungen muss sichergestellt werden, dass die Anforderungen an Leckageprüfungen erfüllt werden. Wenn sich bei einer Prüfung bei der Fertigung, vor dem Versand oder einer Verifizierung zeigt, dass die tatsächliche Leckagerate höher als der maximal zulässige Wert ist, sind Maßnahmen zu ergreifen, um die Leckagerate auf den zulässigen Wert zu senken.

10.2 Schritt 12: Durchführen der Prüfung und Aufzeichnen der Ergebnisse

Die erfolgreiche Durchführung dieses Schritts weist nach, dass die behördlichen Anforderungen an die Umschließung erfüllt werden. Die Minimalanforderungen an Gasleckage-Prüfverfahren, die anzuwenden sind, sind in 10.3 und 10.4 beschrieben.

10.3 Prüfempfindlichkeit

Die Empfindlichkeit jedes Leckageprüfverfahrens, die durch Verweis auf geltende Literatur oder durch Tests bestimmt wird, muss als angemessen gelten, wenn sie kleiner oder gleich der halben zulässigen Prüfleckagerate für das Tracergas laut Bestimmung in Schritt 10 in 9.2.2 ist.

Die Leckageprüfverfahren, die für den Prüfling angewandt werden, müssen sorgfältig betrachtet werden. Beispielsweise sind die Prüfung des Gasdruckabfalls (A.3.1, Tabelle A.2) und die Prüfung des Gasdruckanstiegs (A.3.2, Tabelle A.2) abhängig vom geprüften Gasvolumen und daher muss die Empfindlichkeit dieser Prüfungen angepasst werden (sowohl für das Volumen als auch für die Zeit). In vielen Fällen kann die Empfindlichkeit eines Leckage-Prüfverfahrens deutlich verändert werden, indem Volumen, Druck, Temperatur, Gemischzusammensetzung oder Zeit verändert werden. Leckage-Prüfverfahren, die unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt werden, sind normalerweise empfindlicher als die gleichen Verfahren unter Feldbedingungen.

10.4 Anforderungen an Prüfverfahren

10.4.1 Allgemeines

Leckageprüfverfahren müssen mit dem Prüfling kompatibel sein und, wenn sie für das Umschließungssystem angewandt werden, müssen sie eine ausreichende Empfindlichkeit aufweisen, um die Einhaltung der Prüfanforderungen für die Verifizierung von Umschließungssystemen nachzuweisen.

Zulässige Prüfleckageraten und Prüfempfindlichkeiten müssen anhand der Aktivitätsfreisetzungsraten bestimmt werden, um die Anforderungen an die Verifizierung von Umschließungssystemen zu erfüllen.

Die Prüfungen müssen so ausgeführt werden, dass falsch-positive Ergebnisse ausgeschlossen sind. Dies könnte beinhalten, dass das Vorhandensein eines Tracergases und einer Treibkraft (Druckdifferenz) gewährleistet werden muss.

Alle erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen müssen getroffen werden.

Es müssen Leckageprüfverfahren erstellt und von Personal, das nach ISO 9712 oder einer gleichwertigen Norm qualifiziert ist, überprüft werden. Alle Leckageprüfungen müssen von qualifizierten Bedienern durchgeführt werden. Bediener sollten nach ISO 9712 oder einer gleichwertigen Norm qualifiziert sein.

10.4.2 Prüfung

Der Benutzer muss sicherstellen, dass das ausgewählte Verfahren für die jeweilige Situation relevant ist und die Prüfung richtig ausgeführt wird.

Die Prüfungen sind nach 10.4.1 durchzuführen und müssen dokumentiert werden.

Anhang A (informativ)

Bevorzugte Leckageprüfverfahren

A.1 Allgemeines

Zum komplexen Thema der Leckageprüfverfahren existieren zahlreiche Bücher und eingereichte Dokumente. Einige davon sind in den Literaturhinweisen aufgelistet. Zweck dieses Anhangs ist es, dem Benutzer bei der Auswahl der geeigneten Prüfverfahren zu helfen. Daher enthält dieser Anhang eine Kurzbeschreibung geeigneter Leckageprüfverfahren, ihren Empfindlichkeitsbereich, ihre Vorteile und Einschränkungen sowie Informationen zu sicherheitsrelevanten Erwägungen.

Der Benutzer ist für die Festlegung eines detaillierten Prüfverfahrens verantwortlich, das für die jeweilige Situation geeignet ist. Dieser Anhang ist in vielen Fällen nicht detailliert genug und der Benutzer sollte sich daher weitere Informationen aus anderen Quellen beschaffen. Der Benutzer ist ferner dafür verantwortlich, dass das Prüfverfahren richtig angewandt wird.

Leckageprüfverfahren, die nicht in diesem Dokument aufgeführt werden, können verwendet werden, wenn sie die Minimalanforderungen dieses Dokuments erfüllen und von der zuständigen Behörde akzeptiert werden.

Praktische Leckageprüftechniken für die Messung der Dichtheit von Verpackungen wurden überarbeitet und geeignete Prüfungen für Verpackungen radioaktiver Stoffe identifiziert und für den Gebrauch empfohlen.

Es wurden detaillierte Abläufe für die empfohlenen Verfahren entwickelt, bei denen die relevanten Faktoren für die jeweiligen Behältertypen besonders betrachtet wurden.

Diese Verfahren und ihre Nennempfindlichkeit sind in Tabelle A.1 aufgeführt. Für die meisten Verfahren muss die tatsächliche Empfindlichkeit für jede Anwendung berechnet werden, da sie von Druck, Zeit, Volumen, Temperatur und den Gaseigenschaften abhängt. Die Verfahren sind in Tabelle A.1 und im Text nach quantitativen und qualitativen Verfahren eingestuft. Quantitative Verfahren liefern Messungen der Gesamtleckage. Qualitative Verfahren ermöglichen die Lokalisierung einzelner Lecks. Falls möglich sollten die qualitativen Verfahren anhand von Prüflecks überprüft werden.

Die empfohlenen Verfahren für die Leckageprüfung werden mit schematischen Darstellungen in Tabelle A.2 aufgeführt. Die Tabelle enthält eine Kurzfassung des Prüfverfahrens, die Nennempfindlichkeit und Anwendbarkeit jedes Verfahrens und soll als Anleitung für die Auswahl eines Prüfverfahrens für einen bestimmten Behälter dienen.

A.2 Kommentare und Vorsichtsmaßnahmen

A.2.1 Explosionsrisiken

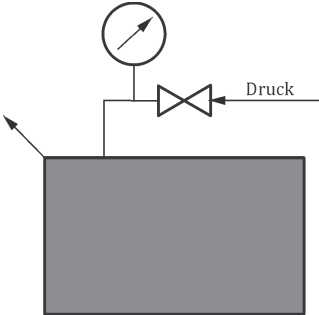
Für Prüflinge mit hohem Auslegungsdruck oder großem Gasvolumen oder beiden sind Vorkehrungen gegen Explosionsgefahren zu treffen. Bei einem großen Gasvolumen können auch mäßige Gasdrücke gefährlich sein. Verringern Sie den Druck auf einen bekanntermaßen sicheren Wert oder füllen Sie den Prüfling mit einer Flüssigkeit oder einem Feststoff, sodass nur ein kleines Gasvolumen für die Prüfung verbleibt. Aus Sicherheitserwägungen könnte es besser sein, den Prüfling einer hydrostatischen Druckprüfung auszusetzen. Wird eine Flüssigkeit verwendet, ist sicherzustellen, dass sie die Leckageprüfung nicht beeinträchtigen kann.

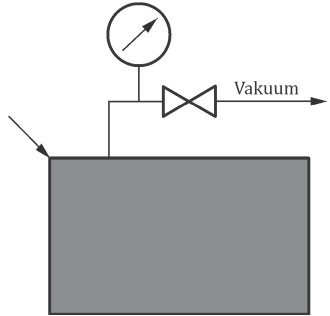
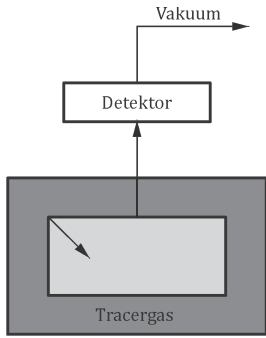
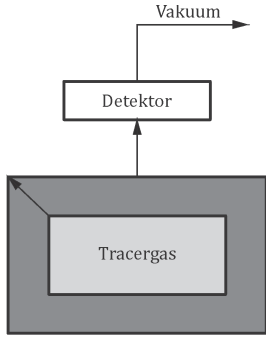
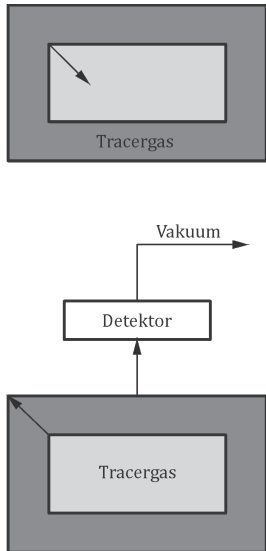
Die Prüfungen können bei anderen Drücken und Temperaturen als den im Betrieb verwendeten durchgeführt werden, wenn der Einfluss der Differenzen auf die Geometrie und Leistung des Umschließungssystems vernachlässigbar ist oder wenn die Betriebsbedingungen keine ausreichende Druckdifferenz für aussagekräftige Ergebnisse liefern. Die Strömungsrichtung aus dem Leck während der Prüfung sollte die gleiche wie im Betrieb sein; eine Strömung in Gegenrichtung muss begründet werden.

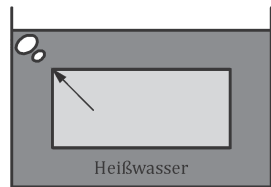
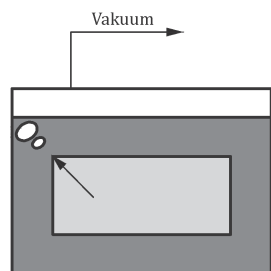
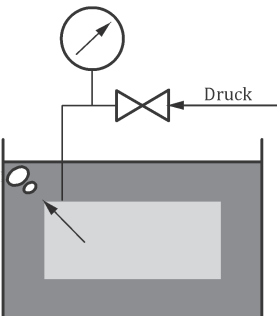
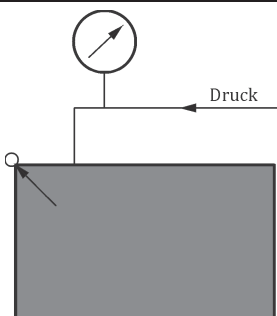
Tabelle A.1 — Prüfeempfindlichkeiten für Leckageprüfungen

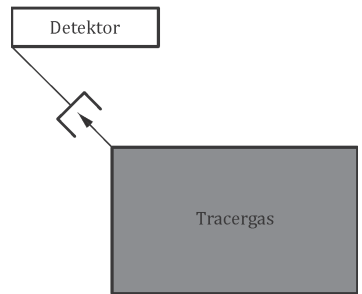
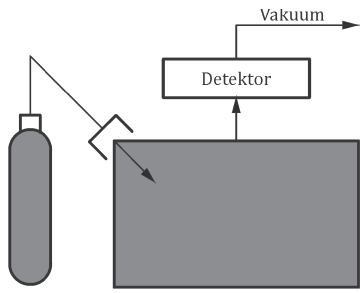
Unterabschnitt	Prüfverfahren	Nennempfindlichkeit des Prüfverfahrens $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR
	Quantitative Verfahren	
A.3.1	Gasdruckabfall	10^{-2} bis 10^{-6} ^a
A.3.2	Gasdruckanstieg	10^{-2} bis 10^{-6} ^a
A.3.3	Gasgefüllte Hülle (Gasdetektor)	10^{-4} bis 10^{-10}
A.3.4	Evakuierte Hülle (Gasdetektor)	10^{-4} bis 10^{-9}
A.3.5	Evakuierte Hülle (mit Gegendruck)	10^{-4} bis 10^{-9}
	Qualitative Verfahren	
A.4.1	Gasblasenverfahren	10^{-4} ^{b,c}
A.4.2	Blasentest	10^{-4} ^b
A.4.3	Tracergas (Schnüffelmethode)	10^{-4} bis 10^{-7}
A.4.4	Tracergas (Sprühverfahren)	10^{-4} bis 10^{-7}
^a Die Empfindlichkeit hängt von Volumen, Druck, Zeit, Gaseigenschaften und Temperaturstabilität ab. ^b Eine höhere zuverlässige Empfindlichkeit kann durch Verwendung von Prüflecks zur Überprüfung der verwendeten Prüfausrüstung und -technik erzielt werden. ^c Gasblasenverfahren umfassen Heißwasserblasen-, Vakuumblasen- und Überdruckblasenverfahren.		

Tabelle A.2 — Übersicht Leckageprüfungen

Entsprechender Unterabschnitt	Abbildung
A.3 Quantitative Verfahren	
A.3.1 Gasdruckabfall Bei diesem Verfahren wird der Prüfling oder der Zwischenraum unter Druck gesetzt und der Druckabfall gemessen. Die Empfindlichkeit des Verfahrens ist umgekehrt proportional zum Prüfvolumen. Dieses Verfahren ist besonders hilfreich für Prüfungen von doppelten O-Ring-Dichtungen, bei denen durch das kleine Zwischenraumvolumen das Verfahren sehr empfindlich ist und die primäre Dichtung nicht brechen darf. Nennempfindlichkeit des Prüfverfahrens: 10^{-2} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis 10^{-6} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR.	

Entsprechender Unterabschnitt	Abbildung
<p>A.3.2 Gasdruckanstieg</p> <p>Bei diesem Verfahren wird der Druck im Prüfraum auf 10^3 Pa oder weniger gesenkt und der Druckanstieg während eines festgelegten Prüfzeitraums gemessen.</p> <p>Das Verfahren ist für Prüflinge mit Druckanschlüssen geeignet, kann aber auch für die Prüfung von doppelten O-Ring-Dichtungen eingesetzt werden. Die Prüfempfindlichkeit ist umgekehrt proportional zum Prüfvolumen.</p> <p>Nennempfindlichkeit des Prüfverfahrens: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR.</p>	
<p>A.3.3 Gasgefüllte Hülle (Gasdetektor)</p> <p>Bei diesem Verfahren wird der an einen Gasdetektor angeschlossene Prüfling evakuiert und der Prüfling in eine mit einem Prüfgas (meist Helium oder ein Halogen-Gemisch) gefüllte Hülle gelegt.</p> <p>Das Verfahren ist für große Prüflinge mit einer wiederherstellbaren Dichtung geeignet. Werden mehrere Dichtungen verwendet (z. B. eine doppelte O-Ring-Dichtung), kann das Verfahren für jede Dichtung angewandt werden.</p> <p>Nennempfindlichkeit des Prüfverfahrens: $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR.</p>	
<p>A.3.4 Evakuierte Hülle (Gasdetektor)</p> <p>Bei diesem Verfahren wird der Prüfling mit Prüfgas (meist Helium oder Halogen) beaufschlagt, während er sich in einer an einen Gasdetektor angeschlossenen Vakuumkammer befindet.</p> <p>Das Verfahren ist für große Prüflinge mit einer wiederherstellbaren Dichtung geeignet. Werden mehrere Dichtungen verwendet (z. B. eine doppelte O-Ring-Dichtung), kann das Verfahren für jede Dichtung angewandt werden.</p> <p>Nennempfindlichkeit des Prüfverfahrens: $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR.</p>	
<p>A.3.5 Evakuierte Hülle (mit Gegendruckbeaufschlagung)</p> <p>Bei diesem Verfahren wird der Prüfling von außen über eine bestimmte Zeit in einer Hülle mit dem Prüfgas (meist Helium) beaufschlagt und anschließend in eine an einen Gasdetektor angeschlossene evakuierte Hülle verlegt.</p> <p>Das Verfahren ist ideal für geschweißte Kapselungen von sehr kleiner Größe bis zur Grenze der Druckkammer.</p> <p>Das interne Hohlraumvolumen des Prüflings sollte mindestens 10 mm^3 betragen.</p> <p>Dieses Verfahren kann im Labor ebenso wie in der Fertigung angewandt werden. Das Verfahren sollte sorgfältig validiert und durchgeführt werden.</p> <p>Nennempfindlichkeit des Prüfverfahrens: $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR.</p>	

Entsprechender Unterabschnitt	Abbildung
A.4 Qualitative Verfahren	
<p>A.4.1.4.1 Heißwasserblase</p> <p>Bei diesem Verfahren wird der Prüfling in Heißwasser eingetaucht, wodurch der Innendruck steigt. Ein Leck wird durch einen Blasenstrom angezeigt.</p> <p>Dieses Verfahren ist für geschweißte Kapselungen und kleine Prüflinge geeignet, die in der Regel nicht über Druckanschlüsse verfügen. Es kann ohne aufwändige Ausrüstung im Feld verwendet werden.</p> <p>Maximale Nennempfindlichkeit des Prüfverfahrens: $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR.</p> <p>ANMERKUNG Dieses Verfahren ist auch ein quantitatives Verfahren, sollte aber nicht als solches verwendet werden.</p>	
<p>A.4.1.4.2 Vakuumblase</p> <p>Bei diesem Verfahren wird ein Vakuum über der Flüssigkeit, in die der Prüfling eingetaucht ist, erzeugt. Ein Leck wird durch einen Blasenstrom angezeigt.</p> <p>Das Verfahren ist für geschweißte Kapselungen und kleine wieder abdichtbare Prüflinge geeignet. Es kann für Quellen oder Behälter mit einem Volumen von mehr als 10 mm^3 eingesetzt werden. Die Größe des Prüflings ist nur durch die Größe des Vakuumbehälters beschränkt.</p> <p>Nennempfindlichkeit des Prüfverfahrens: $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR.</p>	
<p>A.4.1.4.3 Blasentest bei druckbeaufschlagtem Prüfkörper</p> <p>Bei diesem Verfahren wird der Prüfling mit Druck beaufschlagt und in Wasser, Glykol oder Isopropylalkohol eingetaucht. Ein Leck wird durch einen Blasenstrom angezeigt.</p> <p>Dieses Verfahren wird angewandt für geschweißte Kapselungen Behälter mit Druckanschlüssen oder wenn der erforderliche Druck im Hohlraum durch Verdampfung von festem Kohlendioxid hergestellt werden kann.</p> <p>Nennempfindlichkeit des Prüfverfahrens: $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR.</p> <p>ANMERKUNG Dieses Verfahren ist auch ein quantitatives Verfahren, sollte aber nicht als solches verwendet werden.</p>	
<p>A.4.2 Blasentest</p> <p>Bei diesem Verfahren wird der Prüfling mit Druck beaufschlagt und die Oberfläche mit einem flüssigen Leckerkennungsfilm beschichtet. Ein Leck wird durch eine Blase an der Oberfläche angezeigt.</p> <p>Dieses Verfahren wird für Behälter mit Druckanschlüssen angewandt. Die erforderliche Druck im Hohlraum kann durch Verdampfung von festem Kohlendioxid hergestellt werden.</p> <p>Nennempfindlichkeit des Prüfverfahrens: $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR.</p>	

Entsprechender Unterabschnitt	Abbildung
<p>A.4.3 Tracergas (Schnüffelmethode)</p> <p>Bei diesem Verfahren wird der Prüfling mit dem Prüfgas (meist Helium oder Halogen-Gemisch) beaufschlagt. Ein Leck wird erkannt, indem eine (mit einem Gasdetektor verbundene) Sonde über Bereiche geführt wird, in denen mit einem Leck zu rechnen ist.</p> <p>Dieses Verfahren ist vor allem bei großen Prüflingen geeignet, wo der Bereich eines möglichen Lecks (z.B. eine Schweißnaht oder eine Dichtung) deutlich sichtbar ist. Es muss eine Vorrichtung vorhanden sein, um die Innenseite der Schweißnaht oder der Dichtung (mit Gas) zu beaufschlagen.</p> <p>Nennempfindlichkeit des Prüfverfahrens: $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR.</p>	
<p>A.4.4 Tracergas (Sprühverfahren)</p> <p>Bei diesem Verfahren wird ein mit einem Gasdetektor verbundener Prüfling evakuiert und das Prüfgas (meist Helium oder ein Halogen-Gemisch) auf die Oberfläche gesprüht.</p> <p>Das Verfahren kann für die Prüfung teilweise fertiger Behälter eingesetzt werden, wenn eine Seite eines potenziellen Lecks evakuiert werden kann und die andere Seite für die Prüfgaszuleitung gut erreichbar ist.</p> <p>Nennempfindlichkeit des Prüfverfahrens: $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR.</p>	

A.2.2 Tracerstoffe

Tracerstoffe müssen sauber und frei von Verunreinigungen sein, die die Prüfergebnisse beeinträchtigen könnten. Es muss sorgfältig darauf geachtet werden, dass ein bekanntes repräsentatives Tracer-Gemisch die Grenzbedingung erreicht, die geprüft wird. Es muss sichergestellt werden, dass keine gegenteiligen Reaktionen erfolgen, die entweder den Inhalt des Umschließungssystems oder die Eigenschaften des Tracers für die Leckageprüfung beeinträchtigen.

A.2.3 Leckageraten

Bei einigen Blasentests können unter günstigen Laborbedingungen einzelne Leckageraten bis hinunter auf $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR bei einer Druckdifferenz von 10^5 Pa nachgewiesen werden. Die Prüfmöglichkeiten werden jedoch durch Probleme wie schlechte Sicht, aufgrund unzureichender Beleuchtung, die Anordnung des Prüfobjekts, Badverwirbelungen, Gaslöslichkeit, Unachtsamkeit des Bedieners, Zusetzen von Lecks durch Flüssigkeiten, begrenzte Anwendungszeit und die Möglichkeit, dass es eine Vielzahl von Lecks geben könnte, die zu klein sind, um erkannt zu werden, und die zusammengenommen die maximal zulässige Leckrate überschreiten, eingeschränkt. Der Druck des Tracergases muss die hydrostatische Höhe des Flüssigkeitsbads und Effekte der Oberflächenspannung überwinden.

Beim Blasentest gibt es zusätzliche Probleme, zum Beispiel muss sichergestellt werden, dass die gesamte Prüffläche bedeckt wird und Effekte der relativen Feuchtigkeit und der Temperatur erkannt werden müssen. Blasentests sollten nicht für quantitative Messungen verwendet werden.

Aus diesen Gründen wird die Gesamtleckagerate mit $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR angenommen, wenn keine Blasen beobachtet werden, solange nicht verifiziert werden kann, dass in der jeweiligen Situation eine höhere Empfindlichkeit vorliegt.

A.2.4 Prüfling nicht benetzen

Bei Lecks, die voraussichtlich kleiner als $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR sind, sollte eine Benetzung des Prüflings vor der Leckageprüfung vermieden werden, falls dies möglich ist. Kann eine Benetzung nicht vermieden werden, muss der Prüfling vor der Prüfung sorgfältig getrocknet werden.

A.2.5 Partialdruck

Der Partialdruck des Tracergases im Prüfgemisch sollte mindestens 10 % des Gesamtdrucks betragen und muss bekannt sein. Ein Korrekturfaktor für den prozentualen Partialdruck muss angewandt werden. Siehe Gleichung (B.13).

A.2.6 Vakuumbedingungen

Liegt im normalen Betrieb ein positiver Druck an, muss das Verhalten der Begrenzung, des Verschlusses und der Dichtung der Umschließung bei der Prüfung unter Vakuumbedingungen beachtet werden.

A.2.7 Durchführung der Leckageprüfung

Alle Leckageprüfungen sind von qualifizierten Bedienern durchzuführen.

A.3 Quantitative Verfahren

A.3.1 Gasdruckabfall

A.3.1.1 Anwendbarkeit des Verfahrens

Dieses Verfahren wird für Prüflinge mit Druckanschlüssen verwendet. Das Prüfvolumen kann das Volumen des Behälters oder das kleine Zwischenraumvolumen bei einer doppelten O-Ring-Dichtung sein.

A.3.1.2 Anzeige der Leckagerate

Die Gesamtleckagerate wird durch einen Druckabfall von einem bekannten Anfangsdruck aus über einen bestimmten Zeitraum angezeigt. Ist die Prüfdauer zu lang, können Korrekturen erforderlich sein, um Veränderungen von Umgebungstemperatur und -druck zu berücksichtigen.

A.3.1.3 Prüfempfindlichkeit

Die Empfindlichkeit hängt hauptsächlich vom Prüfvolumen, der Prüfdauer und der Genauigkeit, mit der Druck und Temperatur gemessen werden können, ab. Bei einem großen Volumen ist das Verfahren relativ unempfindlich, während bei einem kleinen Zwischenraumvolumen und genauen Messgeräten Empfindlichkeiten von $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR erreicht werden können. Zu beachten ist, dass das Gesamtvolumen das Volumen des Behälters plus das Volumen im Zusammenhang mit dem Messaufbau umfasst.

Die tatsächliche Empfindlichkeit des Prüfverfahrens sollte unter Berücksichtigung von Gleichung (B.12) berechnet werden.

A.3.1.4 Prüfverfahren

Das Prüfvolumen mit dem festgelegten Prüfdruck beaufschlagen und die Veränderung von Druck und Temperatur im Prüfvolumen über einen festgelegten Zeitraum messen. Um die Gesamtleckagerate zu berechnen, muss das maximale Prüfvolumen genau festgelegt werden, einschließlich des Volumens der Prüfausrüstung und der extremen Positionen der Dichtungen in ihrer Nut.

Druckmessungen sollten bis auf maximal 1 % des Messbereichs der Messgeräte genau sein. Diese Geräte müssen einen Messbereich zwischen dem 1,5- und dem 4-fachen des festgelegten Prüfdrucks haben. Die Prüfobjekte sollten am oder nahe am thermischen Gleichgewicht sein, bevor die Messung erfolgt, sonst könnten Leckageeffekte durch Fehler bei der Bestimmung der Durchschnittstemperaturen verdeckt werden.

A.3.1.5 Vor- und Nachteile

Die Ausrüstung für die Durchführung der Prüfung könnte auch ausbaubare Dichtungen aufweisen, daher bilden die Ergebnisse der Prüfung die Leckagerate unter Berücksichtigung aller Dichtungen (Prüfausrüstung plus Behälter) ab. Das Verfahren könnte daher die Leckage des Behälters zu hoch angeben. Wird eine Prüfempfindlichkeit in der Größenordnung von $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR verlangt, könnte die Dichtheit der Dichtungen und Anschlüsse der Prüfausrüstung einen Einfluss auf die Empfindlichkeit der Prüfung haben.

Wird das Verfahren bei Prüfungen (z. B. Prüfung vor und nach Fallversuchen) angewandt, muss mindestens ein Anschluss der Prüfausrüstung geöffnet und später wieder abgedichtet werden.

Ein hoher Druck erhöht die Prüfempfindlichkeit, jedoch gibt es auch Nachteile. Die O-Ringe könnten sich während der Prüfung bewegen und zu unzuverlässigen Ergebnissen führen. Ein hoher Druck könnte die Dichtungen überwinden, wodurch eine Gefährdung entsteht.

Die Prüfungen sollten, falls möglich, unter isothermen Bedingungen stattfinden, da Temperaturveränderungen entsprechende Druckveränderungen bewirken.

A.3.1.6 Gefahren

Bei der Druckbeaufschlagung des Prüfvolumens muss sorgfältig darauf geachtet werden, dass der Behälter keiner gefährlichen Belastung ausgesetzt wird, da ein Versagen durch Gasdruck „explosiv“ und extrem gefährlich werden kann.

A.3.2 Gasdruckanstieg

A.3.2.1 Anwendbarkeit des Verfahrens

Das Verfahren ist ähnlich wie das Gasdruckabfallverfahren und wird bei Prüflingen mit Druckanschlüssen eingesetzt. Es hat den Vorteil, dass es durch Temperaturveränderungen weniger stark beeinflusst wird als das Druckabfallverfahren.

A.3.2.2 Anzeige der Leckagerate

Die Gesamtleckagerate wird durch einen Druckanstieg von einem bekannten Anfangsdruck aus über einen bestimmten Zeitraum angezeigt. Ist die Prüfdauer zu lang, können Korrekturen erforderlich sein, um Veränderungen von Umgebungstemperatur und -druck zu berücksichtigen.

A.3.2.3 Prüfempfindlichkeit

Die Empfindlichkeit hängt hauptsächlich vom Prüfvolumen, der Prüfdauer und der Genauigkeit, mit der Druck und Temperatur gemessen werden können, ab. Das Verfahren kann für die Messung von Leckageraten bis herunter auf $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR verwendet werden.

Die tatsächliche Empfindlichkeit des Prüfverfahrens kann unter Berücksichtigung von Gleichung (B.12) berechnet werden. Zu beachten ist jedoch, dass die tiefgestellten Zeichen 1 und 2 vertauscht werden müssen.

A.3.2.4 Prüfverfahren

Den Prüfling bis auf einen geeigneten Druck von 10^3 Pa oder weniger (typischerweise 10^2 Pa) evakuieren und die Veränderung von Druck und Temperatur im Prüfvolumen während eines festgelegten Zeitraums messen. Besonders zu beachten ist, dass die Gefahr einer Eisbildung bei niedrigem Druck vermieden wird, da diese zu einer Verstopfung des Druckgeräts führt. Um die Gesamtleckagerate zu berechnen, muss das maximale Prüfvolumen genau festgelegt werden, einschließlich des Volumens der Prüfausrüstung und der extremen Positionen der Dichtungen in ihrer Nut.

Druckmessungen sollten bis auf maximal 1 % des Messbereichs der Messgeräte genau sein. Diese Geräte müssen einen Messbereich zwischen dem 1,5- und dem 4-fachen des festgelegten Prüfdrucks haben. Die Prüfungen sollten möglichst unter isothermen Bedingungen erfolgen. Geringe Temperaturschwankungen können zu großen Druckschwankungen führen.

A.3.2.5 Vor- und Nachteile

Ein Problem dieses Verfahrens ist das Ausgasen (Freisetzung von Gasen an den Oberflächen des Prüflings, wenn der Prüfling evakuiert wird). Das Ausgasen, das die Messungen der Leckagerate verfälscht, kann minimiert werden, indem der Prüfling sauber und trocken gehalten wird.

Die verwendete Prüfausrüstung erfordert normalerweise weitere Dichtungen neben den Dichtungen, die geprüft werden. Die Ergebnisse der Prüfung bilden die Leckagerate unter Berücksichtigung aller Dichtungen ab. Bei dem Verfahren könnte daher die Leckagerate der Behälterdichtungen zu hoch eingeschätzt werden. Bei höherer Empfindlichkeit könnte die Dichtheit der Dichtungen der Prüfausrüstung die Empfindlichkeit der Prüfung beeinflussen.

A.3.2.6 Gefahren

Die Gefahren sind die üblichen Gefahren von Vakuumeinrichtungen.

A.3.3 Gasgefüllte Hülle (Gasdetektor)

A.3.3.1 Anwendbarkeit des Verfahrens

Das Verfahren wird in Behältern angewandt, die von einer mit Tracergas gefüllten Hülle umgeben werden können. Wird nur eine Flanschdichtung geprüft, könnte die Größe der Hülle möglicherweise so verringert werden, dass sie nur den Flanschbereich umschließt. Übliche Tracergase sind Helium und Halogen-Gasgemische.

A.3.3.2 Anzeige der Leckagerate

Die Gesamtleckagerate wird mit einem Gasdetektor gemessen, der die Gaskonzentration im Behälter misst.

A.3.3.3 Prüfempfindlichkeit

Die Empfindlichkeit hängt vom verwendeten Gas, von der Druckdifferenz und von der Nachweismethode ab. Bei Halogengassystemen können bei Einsatz von Gasen wie Schwefelhexafluorid (SF_6) Empfindlichkeiten von $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR erreicht werden. Bei Helium könnte ein Massenspektrometer typischerweise Lecks mit einer Leckagerate von $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR erkennen.

A.3.3.4 Prüfverfahren

Ein Vakuumsystem mit einem Gasdetektorkopf am Behälter- oder am Zwischenraumanschluss anbringen. Die Ansprechzeit mit einem Prüffleck oder indem eine kleine Menge des Tracers in den/das gelöste(n) Anschluss oder Ventil eingeführt wird bestimmen.

Die Hülle mit dem Tracergas füllen und die Reaktion des Detektors beobachten.

A.3.3.5 Vor- und Nachteile

Der Partialdruck des Tracergases in der Hülle sollte mindestens 10 % des Gesamtgasdrucks entsprechen und sollte bekannt sein.

Ein Halogen-Gasgemisch sollte bei Edelstahlsystemen nur verwendet werden, wenn festgestellt wurde, dass das ausgewählte Halogen keine schädliche Korrosion des Edelstahls durch intergranularen Angriff verursacht.

Die Halogen-Leckageprüfung erfordert einen Arbeitsraum, der frei von Rauch (zum Beispiel Tabakrauch) und anderen möglichen Quellen von Halogendampf (zum Beispiel ein Leck in einem Gebäudekühlsystem) ist.

A.3.3.6 Gefahren

Es sind keine positiven Ionen in Halogenleckdetektoren in einer brennbaren oder explosiven Atmosphäre zu verwenden.

Halogen-Gasgemische könnten in der Nähe hoher Temperaturen in hochtoxische Gemische zerfallen. Einige Halogen-Gasgemische könnten selbst toxisch sein, sodass die Prüfbereiche gut belüftet sein müssen.

Besonders bei der Arbeit mit Hochdruck-Gasflaschen ist mit größter Vorsicht vorzugehen.

A.3.4 Evakuierte Hülle (Gasdetektor)

A.3.4.1 Anwendbarkeit des Verfahrens

Bei diesem Verfahren wird der Behälter mit Tracergas beaufschlagt und anschließend in eine evakuierte Hülle gebracht, die an einen Tracergas-Detektor angeschlossen ist. Wird nur eine Flanschdichtung geprüft, könnte die Größe der Hülle möglicherweise so verringert werden, dass sie nur den Flanschbereich umschließt. Wird eine doppelte O-Ring-Dichtung verwendet, kann der Tracergas-Detektor in ein Vakuumsystem integriert sein, das an den Raum zwischen den beiden O-Ringen angeschlossen ist.

Übliche Tracergase sind Helium und Halogen-Gasgemische.

A.3.4.2 Anzeige der Leckagerate

Die Leckagerate wird mit einem Gasdetektor gemessen, der die Gaskonzentration in der evakuierten Hülle oder im Zwischenraum misst.

A.3.4.3 Prüfeempfindlichkeit

Die Empfindlichkeit hängt vom verwendeten Gas, von der Druckdifferenz und von der Nachweismethode ab. Bei Halogengassystemen können bei Einsatz von Gasen wie Schwefelhexafluorid (SF_6) Empfindlichkeiten von $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR erreicht werden. Bei Helium könnte ein Massenspektrometer typischerweise Lecks mit einer Leckagerate von $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR erkennen.

A.3.4.4 Prüfverfahren

Den Behälter mit dem Tracergas bis zum Prüfdruck beaufschlagen. Die den Behälter umgebende Hülle oder, bei der Prüfung eines Flanschs mit doppelten O-Ringen, den Zwischenraum evakuieren und die Reaktion des Überwachungssystems im Vakuumsystem überwachen.

Kann der Behälter nicht mit Tracergas gefüllt werden, kann der Prüfling in eine geeignete Prüfkammer gelegt und über eine bestimmte Zeit von außen mit dem Tracergas beaufschlagt werden. Der Außendruck sollte dann verringert und der Prüfling vor Beginn der Evakuierung in die Hülle verlagert werden.

ANMERKUNG 1 Dieses Verfahren wird nur für Prüflinge angewandt, die dem hohen Außendruck widerstehen können.

A.3.4.5 Vor- und Nachteile

Der Partialdruck des Tracergases im Behälter sollte mindestens 10 % des Gesamtdrucks betragen.

Ein Halogen-Gasgemisch sollte bei Edelstahlsystemen nur verwendet werden, wenn festgestellt wurde, dass das ausgewählte Halogen keine schädliche Korrosion des Edelstahls durch intergranularen Angriff verursacht.

Die Halogen-Leckageprüfung erfordert einen Arbeitsraum, der frei von Rauch (zum Beispiel Tabakrauch) und anderen möglichen Quellen von Halogendampf (zum Beispiel ein Leck in einem Gebäudekühlsystem) ist.

Permeation kann die Ergebnisse beeinflussen und sollte in der nachfolgenden Analyse berücksichtigt werden.

A.3.4.6 Gefahren

Es sind keine positiven Ionen in Halogenleckdetektoren in einer brennbaren oder explosiven Atmosphäre zu verwenden.

Halogen-Gasgemische könnten in der Nähe hoher Temperaturen in hochtoxische Gemische zerfallen. Einige Halogen-Gasgemische könnten selbst toxisch sein, sodass die Prüfbereiche gut belüftet sein müssen.

Besonders bei der Arbeit mit Hochdruck-Gasflaschen ist mit größter Vorsicht vorzugehen.

A.3.5 Evakuierte Hülle mit Helium-Gegendruck

A.3.5.1 Anwendbarkeit des Verfahrens

Dieses Verfahren gilt für Prüflinge ohne Druckanschlüsse und umschlossene radioaktive Quellen, die beim endgültigen Verschließen nicht mit Helium gefüllt werden können. Die Prüflinge müssen in der Lage sein, dem gewählten Außendruck ohne Schaden standzuhalten. Werden aufwändige Massenspektrometer verwendet, können andere Gase als Helium verwendet werden.

A.3.5.2 Anzeige der Leckagerate

Ein Massenspektrometerleckdetektor (MSLD) misst Leckageraten.

A.3.5.3 Prüfempfindlichkeit

Die Empfindlichkeit ($10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR) hängt von der Maschine ab. Ferner hängt sie ab von der Ausgasungsrate des Heliums aus der äußeren Oberfläche des Prüflings.

A.3.5.4 Prüfverfahren

Der Prüfling wird in eine geeignete Prüfkammer gelegt und für eine bestimmte Zeit von außen mit Helium beaufschlagt. Ein typischer Wert ist $3 \times 10^6 \text{ Pa}$ über 1 h. Dann den Druck lösen und den Prüfling sofort in eine mit einem MSLD verbundene Vakuumkammer bringen und dann auf den Betriebsdruck bringen. Das MSLD entsprechend den Herstelleranweisungen bedienen. Bei diesem Verfahren tritt das Helium durch ein vorhandenes Leck in den Prüfling ein und wird anschließend nachgewiesen, wenn der Prüfling in ein Vakuum gelegt wird und das Helium aus dem Leck ausströmt.

A.3.5.5 Vor- und Nachteile

Dieses Verfahren ist sehr gut geeignet für die Prüfung mehrerer kleiner Proben gleichzeitig, sofern diese alle schnell in der Vakuumkammer auf Undichtheit geprüft werden können.

Bei empfindlichen Proben kann ein niedrigerer Gasdruck über eine längere Zeit angewandt werden.

Permeation kann die Ergebnisse beeinflussen und sollte in der nachfolgenden Analyse berücksichtigt werden.

A.3.5.6 Gefahren

Da die Gegendruckkammer unter sehr hohem Druck steht, muss eine speziell entwickelte Ausrüstung verwendet werden. Die Bediener müssen ausführlich geschult sein und die mit dem Verfahren verbundenen Gefahren kennen.

A.4 Qualitative Verfahren

A.4.1 Gasblasenverfahren

A.4.1.1 Anwendbarkeit des Verfahrens

Dieses Verfahren wird bei kleinen Prüflingen, meist ohne Druckanschlüsse, angewandt, die durch ihre Größe problemlos in einen Behälter gehoben und herausgehoben werden können, in dem die Flüssigkeit genau beobachtet werden kann.

Das Verfahren kann für Prüflinge mit Druckanschlüssen verwendet werden oder wenn die erforderliche Druckdifferenz hergestellt werden kann durch

- a) Verdampfung von CO₂-Feststoffkristallen, flüssiger N₂ oder Kältemittelflüssigkeit,
- b) Verwendung eines Vakuums über der Flüssigkeit im Behälter, oder
- c) Verwendung heißer Flüssigkeit im Behälter.

A.4.1.2 Anzeige von Lecks

Einzelne Lecks werden durch Gasblasen, die durch die Prüfflüssigkeit strömen, angezeigt.

A.4.1.3 Prüfempfindlichkeit

Die Prüfung liefert ein qualitatives Ergebnis, wenn keine Blasen in der Prüfflüssigkeit auf eine Leckagerate im Bereich von $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR hinweisen.

Verschiedene Flüssigkeiten wie Wasser, verschiedene Alkohole, Mineralöl, Silikonöl, Glykol können in Verbindung mit verschiedenen Tracergasen verwendet werden, um eine erhöhte Empfindlichkeit zu erhalten.

A.4.1.4 Prüfverfahren

A.4.1.4.1 Heißwasserblasen

Den Prüfling bei Raumtemperatur in Wasser mit 90 °C eintauchen. Den Prüfling oder das zu prüfende Teil in einen geeigneten Behälter eintauchen, sodass er mit mindestens 50 mm Wasser bedeckt ist und nach Blasen suchen.

Die Dauer der Prüfung muss ausreichend lang sein, damit der Prüfling und sein Gasvolumen durch das Wasser erhitzt werden können. Wie lange der Prüfling im Wasser bleiben sollte, ist durch Berechnung oder Prüfung zu bestimmen.

Luftblasen könnten wenige Sekunden lang strömen und dann aufhören. Solche Blasenströme könnten durch Gas, das auf der Außenseite des Prüflings eingeschlossen ist, verursacht werden, und zeigen nicht notwendigerweise ein Leck an.

A.4.1.4.2 Vakuumblasen

Der Prüfling wird in ein Flüssigkeitsbad getaucht. Den Raum über der Flüssigkeit bis auf einen geeigneten Druck, typischerweise 10^4 Pa evakuieren und nach Blasen suchen. Die Eintauchflüssigkeit sollte eine niedrige Oberflächenspannung und einen niedrigen Dampfdruck aufweisen und nach der Prüfung auf einfache Weise vom Prüfling entfernt werden können.

An der Oberfläche des Prüflings haftet Umgebungsluft, die bei der Evakuierung Luftblasen bilden könnte, die einige Sekunde lang strömen und dann aufhören. Solche Blasenströme zeigen nicht notwendigerweise ein Leck an.

A.4.1.4.3 Blasenverfahren bei druckbeaufschlagtem Prüfkörper

Der Prüfling wird für mindestens 15 Minuten mit Tracergas bis zum angegebenen Prüfdruck beaufschlagt. Dieser Druck kann über einen Druckanschluss oder durch Verwendung fester CO_2 -Kristalle hergestellt werden. Muss ein Innendruck erzeugt werden, führt die Verdampfung von beispielsweise 2 kg fester CO_2 -Kristalle pro Kubikmeter Hohlraumvolumen zu einem Druckanstieg von 10^5 Pa.

Den potenziellen Leckbereich am nach wie vor druckbeaufschlagten Prüfling in ein Flüssigkeitsbad eintauchen und auf Blasenströme achten. Luftblasen könnten wenige Sekunden lang strömen und dann aufhören. Solche Blasenströme könnten durch Gas, das auf der Außenseite des Prüflings eingeschlossen ist, verursacht werden, und zeigen nicht notwendigerweise ein Leck an.

A.4.1.5 Vor- und Nachteile

Dieses Verfahren wird allgemein für kleine Behälter und geschweißte Kapselungen angewandt, die problemlos in einen geeigneten Behälter gehoben und herausgehoben werden können.

In Dichtungen und an Oberflächen könnte Luft eingeschlossen werden, die Blasen bilden könnte, die mit echten Lecks verwechselt werden könnten.

Beim Vakuumblasenverfahren könnte Luft in der Prüfflüssigkeit mitgeführt werden und es könnte notwendig werden, die Flüssigkeit eine bestimmte Zeit vor der Leckageprüfung zu entlüften. Die Dauer der Entlüftung hängt vom Flüssigkeitsvolumen ab.

Wird die Prüfung wiederholt, könnte es möglich sein, dass die Lecköffnungen mit Flüssigkeit verschlossen worden sind.

A.4.1.6 Gefahren

Es ist auf die Gefahr eines Überdrucks zu achten, der zum Bruch des Prüflings führen kann.

Wenn Druck durch CO_2 -Kristalle erzeugt wird, muss darauf geachtet werden, dass die richtige CO_2 -Menge für die Erzeugung des benötigten Innendrucks nicht überschritten wird.

Beim Umgang mit CO_2 -Kristallen ist Vorsicht geboten, da diese zu Erfrierungen führen könnten.

Bei Verwendung von Alkohol besteht Brandgefahr.

Der Bediener und andere Personen sind durch Schutzbrillen oder einen Schutzschild vor Gefahren beim Bruch des Flüssigkeitsbehälters zu schützen.

A.4.2 Blasentest

A.4.2.1 Anwendbarkeit des Verfahrens

Dieses Verfahren wird bei Behältern mit Druckanschlüssen oder bei denen der erforderliche Druck im Hohlraum durch Verdampfung fester CO₂-Kristalle erreicht werden könnte angewandt.

A.4.2.2 Anzeige von Lecks

Einzelne Lecks werden durch Gasblasen in einer Lecknachweisflüssigkeit angezeigt, die auf die Außenfläche des Prüflings gebürstet wird.

A.4.2.3 Prüfempfindlichkeit

Die Prüfung liefert ein qualitatives Ergebnis, wenn keine Blasen durch den Lecknachweisfilm austreten, wodurch eine Leckagerate von weniger als $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR angezeigt wird. Die Empfindlichkeit könnte durch einen höheren Prüfdruck erhöht werden. Das Verfahren sollte möglichst durch Verwendung eines Prüflecks, das der erforderlichen Empfindlichkeit für die Umschließung entspricht, überprüft werden.

A.4.2.4 Prüfverfahren

Den Prüfling mindestens 15 min mit dem angegebenen Prüfdruck beaufschlagen. Dann sind alle möglichen Leckagebereiche am immer noch druckbeaufschlagten Prüfling mit einer flüssigen Lecknachweislösung zu beschichten oder zu bürsten und auf Blasen zu achten.

Um effektiv zu sein, muss die Lösung alle möglichen Leckagebereiche oder Dichtungen bedecken. Es sind kommerzielle Lecknachweislösungen mit niedrigen Oberflächenspannungen erhältlich. Die betroffenen Bereiche sollten nach der Prüfung gereinigt werden.

Wenn ein Innendruck erzeugt werden muss, erzeugt die Verdampfung von beispielsweise 2 kg fester CO₂-Kristalle pro Kubikmeter Hohlraumvolumen einen Druckanstieg von 10^5 Pa .

A.4.2.5 Vor- und Nachteile

Dieses Verfahren ähnelt dem Blasentest am druckbeaufschlagten Prüfkörper, ist jedoch nicht durch die Größe oder Masse des Behälters beschränkt.

Sind Dichtungen nicht gut erreichbar oder Fugen dergestalt, dass sie nicht überbrückt oder geflutet werden können, ist dieses Verfahren unzuverlässig.

A.4.2.6 Gefahren

Es ist auf die Gefahr eines Überdrucks zu achten, der zum Bruch des Prüflings führen kann.

Wenn Druck durch CO₂-Kristalle erzeugt wird, muss darauf geachtet werden, dass die richtige Menge an CO₂-Kristallen für die Erzeugung des benötigten Innendrucks nicht überschritten wird.

Beim Umgang mit CO₂-Kristallen ist Vorsicht geboten, da diese zu Erfrierungen führen könnten.

A.4.3 Tracergas (Schnüffelmethode)

A.4.3.1 Anwendbarkeit des Verfahrens

Dieses Verfahren ist am besten geeignet für große Behälter oder Quellen, bei denen der potenzielle Bereich eines Lecks, zum Beispiel eine Schweißnaht oder eine Dichtung, deutlich sichtbar ist. Es muss eine Vorrichtung für die Zufuhr des Tracergases zu den offenen Seiten der Dichtung vorhanden sein und ein Detektor ist auf der anderen Seite anzubringen.

Typische Tracergase sind Helium und Halogengase.

A.4.3.2 Anzeige von Lecks

Ein Leck wird durch einen Detektor angezeigt, der die Konzentration eines freigesetzten Tracergases misst.

A.4.3.3 Prüfeempfindlichkeit

Die Empfindlichkeit hängt vom verwendeten Tracergas, der Druckdifferenz und dem Detektor ab. Bei Halogengasgemischen können bei Einsatz von Gasen wie Schwefelhexafluorid (SF_6) Empfindlichkeiten von $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR erreicht werden. Bei Helium könnte ein Massenspektrometer typischerweise Lecks mit einer Leckagerate von $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR erkennen.

A.4.3.4 Prüfverfahren

Den Detektor entsprechend den Herstelleranweisungen bedienen. Den Prüfling bzw. den Flansch mit Tracergas bis zum Prüfdruck füllen und die möglichen Leckbereiche „erschnüffeln“. Der „Sniffer“ sollte möglichst dicht an der Oberfläche ($<1 \text{ mm}$ entfernt) gehalten und nicht schneller als $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ bewegt werden.

Vor Beginn der Prüfung sollte der „Sniffer“ anhand eines Prüflecks überprüft werden.

A.4.3.5 Vor- und Nachteile

Da der „Sniffer“ einzelne Lecks erkennt, kann er nicht für die Quantifizierung der Gesamtleckagerate eines Behälters eingesetzt werden.

Ein Halogen-Gasgemisch sollte bei Edelstahlsystemen nur verwendet werden, wenn festgestellt wurde, dass das ausgewählte Halogen keine schädliche Korrosion des Edelstahls durch intergranularen Angriff verursacht.

Die Halogen-Leckageprüfung erfordert einen Arbeitsraum, der frei von Rauch (zum Beispiel Tabakrauch) und anderen möglichen Quellen von Halogendampf (zum Beispiel ein Leck in einem Gebäudekühlsystem) ist.

Der Partialdruck des Tracergases im Prüfgemisch sollte mindestens 10 % des Gesamtdrucks betragen und muss bekannt sein.

A.4.3.6 Gefahren

Es sind keine positiven Ionen in Halidfackel-Lecksuchern in einer brennbaren oder explosiven Atmosphäre zu verwenden.

Halogen-Gasgemische könnten in der Nähe hoher Temperaturen in hochtoxische Gemische zerfallen. Einige Halogen-Gasgemische könnten selbst toxisch sein, sodass die Prüfbereiche gut belüftet sein müssen.

Besonders bei der Arbeit mit Hochdruck-Gasflaschen ist mit größter Vorsicht vorzugehen.

A.4.4 Tracergas (Sprühverfahren)

A.4.4.1 Anwendbarkeit des Verfahrens

Dieses Verfahren ist am besten geeignet für große Behälter, bei denen der Bereich eines möglichen Lecks, zum Beispiel eine Schweißnaht oder eine Dichtung, gut sichtbar ist. Es müssen Vorrichtungen für die Zufuhr des Tracergases zum Bereich vorhanden sein, sowie ein Detektor an der entfernten Seite der Schweißnaht oder des Flanschs.

Typische Tracergase sind Helium und Halogengase.

A.4.4.2 Anzeige der Leckagerate

Die Leckagerate wird mit einem Gasdetektor gemessen, der die Konzentration des Tracergases misst.

A.4.4.3 Prüfeempfindlichkeit

Die Empfindlichkeit hängt vom verwendeten Tracergas, der Druckdifferenz und dem Detektor ab. Bei Halogen-Gasgemischen wie Schwefelhexafluorid (SF_6) können Empfindlichkeiten von $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR gemessen werden. Bei Helium könnte ein Massenspektrometer typischerweise Lecks mit einer Leckagerate von $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR erkennen.

A.4.4.4 Prüfverfahren

Den Prüfling oder den Dichtungszwischenraum mit einer Vakuumpumpe evakuieren und den Gasdetektor nach Herstelleranweisungen bedienen. Die Ansprechzeit bestimmen, indem eine kleine Menge Tracergas in ein bekanntes Leck wie z. B. ein teilweise geöffnetes Ventil oder eine lose Befestigung gesprüht wird, und die Zeit notieren, bis der Detektor anspricht.

Das bekannte Leck isolieren und die möglichen Leckagebereiche mit Tracergas besprühen. Jeden Bereich für eine Dauer, die länger als die Ansprechzeit ist, besprühen und die Reaktion des Gasdetektors überwachen.

A.4.4.5 Vor- und Nachteile

Da das Sprühverfahren einzelne Lecks erkennt, kann es nicht für die Quantifizierung der Gesamtleckagerate eines Behälters eingesetzt werden.

Ein Halogen-Gasgemisch sollte bei Edelstahlsystemen nur verwendet werden, wenn festgestellt wurde, dass das ausgewählte Halogen keine schädliche Korrosion des Edelstahls durch intergranularen Angriff verursacht.

Die Halogen-Leckageprüfung erfordert einen Arbeitsraum, der frei von Rauch (zum Beispiel Tabakrauch) und anderen möglichen Quellen von Halogendampf (zum Beispiel ein Leck in einem Gebäudekühlsystem) ist.

A.4.4.6 Gefahren

Besonders bei der Arbeit mit Hochdruck-Gasflaschen ist mit größter Vorsicht vorzugehen.

Anhang B (informativ)

Berechnungsverfahren

B.1 Allgemeines

Dieser Anhang gibt eine kurze Übersicht über die Grunddaten und Gleichungen für die Berechnungsverfahren.

Die Arbeitsbeispiele in Anhang D veranschaulichen, wie die Berechnungsverfahren auf dieses Dokument anwendbar sind.

B.2 Gasleckage

Gasleckagen können durch Gasströmung, die in diesem Abschnitt beschrieben wird, oder durch Permeation auftreten, die in B.13 beschrieben wird.

Die Gasströmungsrate durch kleine Lecks hängt vom Fluid und den thermodynamischen Eigenschaften des Gases, den Merkmalen des Leckagewegs und dem Strömungsverhalten ab. Druck ist eine Fluid-Eigenschaft; die Druckdifferenz ist die treibende Kraft für Leckagen. Für diesen Anhang wird ein einzelnes gerades Rundrohr (Kapillare) für die Modellierung des Leckagewegs bzw. der Leckagewege verwendet. Für den in diesem Dokument betrachteten Leckagebereich (d. h. $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bis $1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) wird die Strömungsrate Q , in Pascal Kubikmetern pro Sekunde ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) mit der modifizierten Knudsen-Gleichung für eine Transitionsströmung [Gleichung (B.1)] angemessen berechnet.

$$Q = \frac{\pi}{128} \frac{D^4}{\mu \cdot a} \frac{(p_u^2 - p_d^2)}{2} + \frac{\sqrt{2\pi}}{6} \sqrt{\frac{RT}{M}} \frac{D^3}{a} (p_u - p_d) \quad (\text{B.1})$$

Gleichung (B.1) gilt für ein einzelnes Gas. Bei einem Gasgemisch werden äquivalente Eigenschaften benötigt, siehe B.4.

Der erste Teil dieser Gleichung stellt die viskose laminare Strömungskomponente Q_v dar, die aus dem Poiseuille-Gesetz für laminare Strömung abgeleitet wird, der zweite Teil stellt die molekulare Strömungskomponente Q_m dar, die aus dem Knudsen-Gesetz für die freie molekulare Strömung abgeleitet wird.

Gleichung (B.1) kann nur für ein viskoses laminares Strömungsverhalten, ein molekulares Strömungsverhalten oder ein Transitionsströmungsverhalten angewandt werden. Bei einer vorherrschenden laminaren Strömung wird der berechnete Anteil der molekularen Strömung vernachlässigbar und umgekehrt wird bei einer vorherrschenden molekularen Strömung der berechnete Anteil der laminaren Strömung vernachlässigbar.

E.Anhang B zeigt die Ableitung aus der Gleichung (B.1), die Begründung ihrer Anwendung und die Grenzen ihrer Anwendung.

B.3 Korrelation zwischen Gas-Leckageraten unter verschiedenen Bedingungen

Die Korrelationen zwischen unterschiedlichen Bedingungen können mit Gleichung (B.1) hergestellt werden. Der Kapillardurchmesser kann aus den bekannten Bedingungen berechnet werden. Die Leckagerate für andere Bedingungen erhält man anhand des berechneten Durchmessers.

Für den besonderen Fall, dass die verschiedenen Bedingungen beide ein rein laminares Strömungsverhalten aufweisen, ist die Beziehung zwischen den Leckageraten Q_x und Q_y in Pascal Kubikmeter pro Sekunde ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) für Gase x bzw. y wie folgt:

$$Q_x = Q_y \frac{\mu_y}{\mu_x} \times \frac{(p_u^2 - p_d^2)_x}{(p_u^2 - p_d^2)_y} \quad (\text{B.2})$$

Ebenso gilt bei einem rein molekularen Strömungsverhalten:

$$Q_x = Q_y \frac{\sqrt{T_x M_y}}{\sqrt{T_y M_x}} \times \frac{(p_u - p_d)_x}{(p_u - p_d)_y} \quad (\text{B.3})$$

B.4 Gasgemisch

Für ein perfektes Gasgemisch aus n Komponenten können die Gemischeigenschaften für den Gesamtdruck p in Pascal (Pa) und die Viskosität μ in Pascal-Sekunden ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) [im ersten Teil der Gleichung (B.1)] wie folgt abgeleitet werden:

$$p_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n p_i \quad (\text{B.4})$$

$$\mu_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i \mu_i}{p_{\text{mix}}} \quad (\text{B.5})$$

Der Ausdruck $\frac{p}{\sqrt{M}}$ [im zweiten Teil der Gleichung (B.1)], in Pascal Kilogramm hoch $-0,5$ Mol hoch $0,5$ ($\text{Pa} \cdot \text{kg}^{-0,5} \cdot \text{mol}^{0,5}$) kann wie folgt aussehen:

$$\left(\frac{p}{\sqrt{M}} \right)_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{\sqrt{M_i}} \quad (\text{B.6})$$

B.5 Korrelation auf Standardbedingungen

Damit Leckageraten, die unter verschiedenen Bedingungen gemessen wurden, verglichen werden können, ist es hilfreich, sich auf die Leckageraten unter Standardbedingungen zu beziehen.

Die üblichen Standardbedingungen sind trockene Luft mit 298 K (25 °C) bei einem stromaufseitigen Druck von $1,013 \times 10^5$ Pa und einen stromabseitigen Druck von 0,0 Pa. Die Standardeinheit der Leckagerate ist $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR. Jede Leckagerate kann in Bezug auf die Standardbedingungen mit Gleichung (B.2) oder (B.3) angegeben werden. Die Leckagerate bei diesen Standardbedingungen wird in diesem Dokument als standardisierte Leckagerate (SLR) bezeichnet.

B.6 Flüssigkeitsleckage

Flüssigkeitsleckagen sind laminar bei niedrigen Strömungsraten und turbulent bei hohen Strömungsraten. Aufgrund der betroffenen Öffnungsgrößen wird nur eine laminare Strömung berücksichtigt. Die Flüssigkeitsleckage L , in Kubikmetern pro Sekunde ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) wird aus dem Poiseuille-Gesetz abgeleitet und mit der folgenden Gleichung bestimmt:

$$L = \frac{\pi}{128} \times \frac{D^4}{\mu \cdot a} (p_u - p_d) \quad (\text{B.7})$$

B.7 Korrelation zwischen Flüssigkeitsleckageraten bei unterschiedlichen Bedingungen

Die Korrelation zwischen einer gemessenen Leckagerate L_y und einer äquivalenten Leckagerate L_x , in Kubikmetern pro Sekunde ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) zeigt die folgende Gleichung:

$$L_x = L_y \left(\frac{\mu_y}{\mu_x} \right) \frac{(p_u - p_d)_x}{(p_u - p_d)_y} \quad (\text{B.8})$$

B.8 Korrelation zwischen Gas- und Flüssigkeitsleckageraten

Für ein System, das radioaktive Flüssigkeiten umschließt, wird der maximal zulässige äquivalente Kapillarleckdurchmesser D in Metern (m) mit Gleichung (B.7) bestimmt. Dieser Wert für D wird dann in Gleichung (B.1) ersetzt, um die äquivalente Gasleckagerate zu bestimmen.

B.9 Aerosol-Leckage

Ein Aerosol ist eine Suspension von Partikeln wie z. B. ein festes Pulver in einem gasförmigen Medium. Die Art eines Aerosols, das sich in einem Versandstück bildet, ist wahrscheinlich in Raum und Zeit nicht gleichmäßig. Die Partikelsuspension ist ein Ergebnis von Kräften, die in zufälliger Verteilung auf das System einwirken; das Absetzen ist ein kontinuierlicher Prozess, durch den Partikel aus dem Aerosol entfernt und die für die Freisetzung verfügbare Menge verringert wird. Die Freisetzung (Entfernung) der Partikel in der Suspension erfolgt durch das Mitführen von Partikeln im austretenden Fluid. Eine analytische Vorhersage der Aerosol-Freisetzung ist schwierig auf Grund der Unsicherheiten in Bezug auf Aerosol-Merkmale, Mitführen und Absetzen, sowohl im System als auch beim Austritt durch einen Leckageweg. Daher kann keine Gleichung für die Beschreibung einer Aerosol-Leckagerate bereitgestellt werden.

B.10 Korrelation zwischen Gas- und Aerosol-Leckageraten

Die Verwendung der folgenden Beziehung setzt voraus, dass die partielle Verteilung als Massenanteil zum geometrischen Partikeldurchmesser bekannt ist.

Die Korrelation setzt einen maximal zulässigen äquivalenten Kapillardurchmesser D in Metern (m) zu einem geometrischen Grenzdurchmesser für die Partikel in Bezug. Ein geometrischer Grenzdurchmesser muss bestimmt werden, sodass die Gesamtaktivität aller Partikel, die freigesetzt werden können, auf zulässige Werte begrenzt wird.

Der Wert des geometrischen Grenzdurchmessers wird dann in Gleichung (B.1) ersetzt, um die äquivalente Gas-Leckagerate zu bestimmen.

B.11 Vorsicht bei der Verwendung von Korrelationen

Die Korrelationen in B.3, B.5, B.7, B.8 und B.10 sind mit Vorsicht zu verwenden. Die Korrelationen gelten erstens nur, wenn der Einfluss des Strömungsverhaltens angemessen berücksichtigt wird. Außerdem berücksichtigen sie den Einfluss von Temperatur und Druck auf die austretenden Fluids, jedoch nicht auf die Geometrie des Leckagewegs. Beispiel: Wenn ein System üblicherweise mit einem Druck p betrieben wird, wäre das Ergebnis einer Luftleckageprüfung bei $0,1p$ zweifelhaft, da das System unter Prüfungsbedingungen einer geringeren Belastung ausgesetzt wäre.

B.12 Oberflächenspannung

Bei Blasentests werden nur Blasen freigesetzt, wenn der Innendruck der Blase die Summe des Atmosphärendrucks über der Flüssigkeit, den Schwerkraftdruck der Flüssigkeit und den Druck durch die Oberflächenspannung übersteigt. Der Innendruck der Blase p_u , in Pascal (Pa), der erforderlich ist, um die Oberflächenspannung zu überwinden, kann mit der folgenden Gleichung (B.9) geschätzt werden:

$$p_u > p_d + \frac{2\sigma}{D} \quad (\text{B.9})$$

Bei Blasentests sind zwei weitere Parameter zu berücksichtigen: der Blasendurchmesser D_B in Metern (m) und die Blasenbildungsrate v in Sekunden hoch minus eins (s^{-1}). Diese Parameter können wie folgt geschätzt werden:

$$D_B = \left[\frac{6D\sigma g_0}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/3} \quad (\text{B.10})$$

$$v = \frac{6L}{\pi D_B^3} \quad (\text{B.11})$$

B.13 Permeation

Permeation ist das Durchdringen eines Fluids durch eine feste Barriere (ohne Undichtheiten) durch Adsorptions-Diffusions-Desorptions-Prozesse. Sie sollte nicht als Leckage oder Freisetzung betrachtet werden, sofern das Fluid selbst nicht radioaktiv ist. Ist dies der Fall, muss die Behälterbegrenzung die Permeation auf ein zulässiges Maß reduzieren. In diesem Dokument wird Permeation nur für Gase angewandt.

Enthält eine dichte Umschließung organisches Material wie O-Ringe aus Elastomer, kann Permeation ein Problem sein, wenn ein Leckageprüfverfahren als Nachweis für die Dichtheit des Systems verwendet wird. Helium hat normalerweise einen Nennpermeationskoeffizienten von $5 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro cm des betroffenen O-Rings für jeden $1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$ der Druckdifferenz. Einige Methoden zur Verringerung der Permeabilitätseffekte als ein Faktor in Leckageraten sind

- Durchführung der Leckageprüfung, bevor die Permeation ein signifikantes Niveau erreicht,
- Verwendung einer Tracer-/Dichtungsmaterialkombination, die die Permeation verringert oder verzögert, und
- wenn die stabile Nennpermeationsrate (vom Hersteller erhältlich) für die Tracer-/Material-Kombination, Temperatur und Druckdifferenz 50 % oder weniger der maximal zulässigen Leckagerate beträgt, kann der Nennwert von der gemessenen Leckagerate abgezogen werden, wenn eine ausreichende Zeit vorhanden war, damit der Wert einen stabilen Zustand erreichen konnte, bevor die Messungen erfolgten.

Die Beispiele in D.8 liefern weitere Anleitungen für die Berechnung der Gaspermeation.

B.14 Leckageprüfung für Druckabfall und Druckerhöhung

Die Leckagerate Q in Pascal Kubikmeter pro Sekunde ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) für die Prüfung des Druckabfalls wird aus den Beziehungen des idealen Gasgesetzes abgeleitet.

Wenn sich die Temperatur des Gasvolumens V während einer Leckageprüfung von T_1 auf T_2 ändert, ist die Leckagerate Q , normalisiert zur Gasreferenztemperatur T_0 wie folgt:

$$Q = \frac{VT_0}{H} \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right) \quad (\text{B.12})$$

Gleichung (B.12) gilt, wenn die laminare Strömung als vorherrschend angenommen wird.

Gleichung (B.12) gilt für die Prüfung des Druckerhöhungs, wenn die tiefgestellten Zeichen 1 und 2 vertauscht werden.

B.15 Korrektur für den Partialdruck des Tracergases

Ist in einem Gemisch ein Tracergas enthalten, muss die gemessene Leckagerate Q in Pascal Kubikmeter pro Sekunde ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), die das Ergebnis eines Verfahrens ist, das nur den Tracer misst (zum Beispiel ein Massenspektrometerleckdetektor), korrigiert werden:

$$Q = Q_{\text{mix}} \left(\frac{P_{\text{mix}}}{P_t} \right) \quad (\text{B.13})$$

B.16 Empfindlichkeit des Leckageprüfverfahrens

In Übereinstimmung mit 10.3 muss die Empfindlichkeit des angewandten Leckageprüfverfahrens gleich oder niedriger als die halbe maximal zulässige Leckagerate für das Tracer-Fluid sein.

Anhang C (informativ)

Umrechnungstabellen

Die Umrechnungskoeffizienten für die verschiedenen Einheiten sind in Tabelle C.1 bis Tabelle C.3 angegeben.

Tabelle C.1 — Druckeinheiten

		bar ^a	Pa N·m ⁻²	atm (standard)	torr ^b	inH ₂ O	lbf·in ⁻²	kgf·cm ⁻²
1 bar	=	1	1,00 × 10 ⁵	9,87 × 10 ⁻¹	7,50 × 10 ²	4,01 × 10 ²	1,45 × 10 ¹	1,02
1 Pa	=	1,00 × 10 ⁻⁵	1	9,87 × 10 ⁻⁶	7,50 × 10 ⁻⁶	4,01 × 10 ⁻³	1,45 × 10 ⁻⁵	1,02 × 10 ⁻⁵
1 atm	=	1,01	1,01 × 10 ⁵	1	7,60 × 10 ²	4,07 × 10 ²	1,47 × 10 ¹	1,03
1 torr	=	1,33 × 10 ⁻³	1,33 × 10 ²	1,32 × 10 ⁻³	1	5,35 × 10 ⁻¹	1,93 × 10 ⁻²	1,36 × 10 ⁻³
1 inH ₂ O	=	2,49 × 10 ⁻³	2,49 × 10 ²	2,46 × 10 ⁻³	1,87	1	3,61 × 10 ⁻²	2,54 × 10 ⁻³
1 lbf·in ⁻²	=	6,89 × 10 ⁻²	6,89 × 10 ³	6,80 × 10 ⁻²	5,17 × 10 ¹	2,77 × 10 ¹	1	7,03 × 10 ⁻²
1 kgf·cm ⁻²	=	9,81 × 10 ⁻¹	9,81 × 10 ⁴	9,68 × 10 ⁻¹	7,36 × 10 ²	3,94 × 10 ²	1,42 × 10 ¹	1
^a 1 dyne·cm ⁻² = 10 ⁻⁶ bar. ^b 1 mmHg = 1 torr.								

Tabelle C.2 — Volumenstromeinheiten

		cm ³ ·s ⁻¹	m ³ ·s ⁻¹	m ³ ·min ⁻¹	m ³ ·h ⁻¹	litre·s ⁻¹	ft ³ ·min ⁻¹
1 cm ³ ·s ⁻¹	=	1	1,00 × 10 ⁻⁶	6,00 × 10 ⁻⁵	3,60 × 10 ⁻³	1,00 × 10 ⁻³	2,12 × 10 ⁻³
1 m ³ ·s ⁻¹	=	1,00 × 10 ⁶	1	6,00 × 10 ¹	3,60 × 10 ³	1,00 × 10 ³	2,12 × 10 ³
1 m ³ ·min ⁻¹	=	1,67 × 10 ⁴	1,67 × 10 ⁻²	1	6,00 × 10 ¹	1,67 × 10 ¹	3,53 × 10 ¹
1 m ³ ·h ⁻¹	=	2,78 × 10 ²	2,78 × 10 ⁻⁴	1,67 × 10 ⁻²	1	2,78 × 10 ⁻¹	5,89 × 10 ⁻¹
1 l·s ⁻¹	=	1,00 × 10 ³	1,00 × 10 ³	6,00 × 10 ⁻²	3,60	1	2,12
1 ft ³ ·min ⁻¹	=	4,72 × 10 ²	4,72 × 10 ⁻⁴	2,83 × 10 ⁻²	1,60	4,72 × 10 ⁻¹	1

Tabelle C.3 — Einheiten der Strömungsrate

		$\text{bar} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{torr} \cdot \text{litre} \cdot \text{s}^{-1}$	Lusec	$\text{atm} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{atm} \cdot \text{ft}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
$\text{bar} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	=	1	$1,00 \times 10^{-1}$	$7,50 \times 10^{-1}$	$7,50 \times 10^2$	$9,87 \times 10^{-1}$	$1,25 \times 10^{-1}$
$1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (watt)	=	$1,00 \times 10^1$	1	7,50	$7,50 \times 10^3$	9,87	1,25
$1 \text{ torr} \cdot \text{litre} \cdot \text{s}^{-1}$	=	1,33	$1,33 \times 10^{-1}$	1	$1,00 \times 10^3$	1,32	$1,67 \times 10^{-1}$
1 Lusec	=	$1,33 \times 10^{-3}$	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-3}$	1	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,67 \times 10^{-4}$
$1 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	=	1,01	$1,01 \times 10^{-1}$	$7,60 \times 10^{-1}$	$7,60 \times 10^2$	1	$1,27 \times 10^{-1}$
$\text{atm} \cdot \text{ft}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	=	7,97	$7,97 \times 10^{-1}$	5,98	$5,98 \times 10^3$	7,87	1