

	Kryo-Behälter Ortsfeste, vakuum-isolierte Behälter Teil 2: Bemessung, Herstellung und Prüfung Deutsche Fassung EN 13458-2:2002	DIN EN 13458-2
--	--	---

ICS 23.020.40

Cryogenic vessels — Static vacuum insulated vessels —
Part 2: Design, fabrication, inspection and testing;
German version EN 13458-2:2002

Réipients cryogéniques — Réipients fixes, isolés sous vide —
Partie 2: Conception, fabrication, inspection et essais;
Version allemande EN 13458-2:2002

Die Europäische Norm EN 13458-2:2002 hat den Status einer Deutschen Norm.

Beginn der Gültigkeit

EN 13458-2:2002 wurde am 12. August 2002 angenommen.

Nationales Vorwort

Die vorliegende Europäische Norm EN 13458-2:2002 wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 268 „Kryo-Behälter“ erarbeitet.

Fortsetzung 108 Seiten EN

Normenausschuss Druckgasanlagen (NDG) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

— Leerseite —

Deutsche Fassung

Kryo-Behälter
Ortsfeste vakuum-isolierte Behälter
Teil 2: Bemessung, Herstellung und Prüfung

Cryogenic vessels —
Static vacuum insulated vessels —
Part 2: Design, fabrication, inspection and testing

Réceptacles cryogéniques —
Réceptacles fixes isolés sous vide —
Partie 2: Conception, fabrication, inspection et essais

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 12. August 2002 angenommen.

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

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

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, der Tschechischen Republik und dem Vereinigten Königreich.



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

Management-Zentrum: rue de Stassart, 36 B-1050 Brüssel

Inhalt

Seite

Vorwort	3
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe und Symbole	6
4 Bemessung	8
5 Herstellung	53
6 Prüfung	61
Anhang A (normativ) Elastische Spannungsanalyse	68
Anhang B (normativ) Zusätzliche Anforderungen für 9 %-Nickel-Stähle	78
Anhang C (informativ) Druckverstärkung an Behältern aus austenitischen nichtrostenden Stählen	80
Anhang D (normativ) Druckbegrenzungs-systeme	91
Anhang E (normativ) Weiterer Gebrauch der Kalteigenschaften von Werkstoffen, um Druckbelastungen entgegenzuwirken	92
Anhang F (informativ) Empfohlene Angaben zum Schweißen	95
Anhang G (normativ) Zusätzliche Anforderungen für brennbare Gase	99
Anhang H (informativ) Anforderungen für brennbare Gase an Teile, die nicht zur Bemessung gehören	100
Anhang I (normativ) Schutzeinrichtungen für den Außenmantel	101
Anhang J (informativ) Erhöhte Werkstoffeigenschaften für austenitische nichtrostende Stähle	102
Anhang K (normativ) Grundwerkstoffe	103
Anhang L (informativ) Andere Werkstoffe	105
Anhang ZA (informativ) Abschnitte in dieser Europäischen Norm, die grundlegende Anforderungen oder andere Vorgaben von EU-Richtlinien betreffen	107
Literaturhinweise	108

Vorwort

Dieses Dokument EN 13458-2:2002 wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 268 „Kryo-Behälter“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Mai 2003 und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Mai 2003 zurückgezogen werden.

Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone dem CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinien.

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

Die Anhänge A, B, D, E, G, I und K sind normativ, die Anhänge C, F, H, J und L sind informativ.

EN 13458 besteht aus den folgenden Teilen mit dem Titel *Kryo-Behälter – Große ortsbewegliche, vakuum-isolierte Behälter*

— Teil 1: *Grundanforderungen*,

— Teil 2: *Bemessung, Herstellung, Überwachung und Prüfung*,

— Teil 3: *Betriebsanforderungen*

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, die Tschechische Republik und das Vereinigte Königreich.

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm gilt für die Bemessung, Herstellung und Prüfung von ortsfesten, vakuum-isolierten Kryo-Behältern, die für einen höchstzulässigen Betriebsdruck von über 0,5 bar bemessen sind.

Diese Norm gilt für ortsfeste, vakuum-isolierte Kryo-Behälter für Fluide, die in EN 13458-1 festgelegt sind, und sie gilt nicht für giftige Fluide.

Für ortsfeste vakuum-isolierte Kryo-Behälter mit einem höchstzulässigen Betriebsdruck von weniger als 0,5 bar kann diese Norm als eine Richtlinie angewendet werden.

2 Normative Verweisungen

Diese Europäische Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen nur zu dieser Europäischen Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschließlich Änderungen).

EN 287-1, *Prüfen von Schweißern — Schmelzschweißen — Teil 1: Stähle.*

EN 287-2, *Prüfen von Schweißern — Schmelzschweißen — Teil 2: Aluminium und Aluminiumlegierungen.*

EN 288-3:1992, *Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe — Teil 3: Schweißverfahrensprüfungen für das Lichtbogenschweißen von Stählen.*

EN 288-4:1992, *Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe — Teil 4: Schweißverfahrensprüfungen für das Lichtbogenschweißen von Aluminium und seinen Legierungen.*

EN 288-8, *Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe — Teil 8: Anerkennung durch eine Schweißprüfung vor Fertigungsbeginn.*

EN 473, *Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung.*

EN 875:1995, *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen — Kerbschlagbiegeversuch — Probenlage, Kerbrichtung und Beurteilung.*

EN 895:1995, *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen — Querkzugversuch.*

EN 910:1996, *Zerstörende Prüfungen von Schweißnähten an metallischen Werkstoffen — Biegeprüfungen.*

EN 1252-1:1998, *Kryo-Behälter — Werkstoffe — Teil 1: Anforderungen an die Zähigkeit bei Temperaturen unter $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$.*

EN 1252-2, *Cryogenic vessels — Materials — Toughness requirements for temperature between $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.*

EN 1418, *Schweißpersonal — Prüfung von Bedienern von Schweißeinrichtungen zum Schmelzschweißen und von Einrichtern für das Widerstandsschweißen für vollmechanisches und automatisches Schweißen von metallischen Werkstoffen.*

EN 1435, *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen — Durchstrahlungsprüfung von Schmelzschweißverbindungen.*

EN 1626, *Tiefkalte Behälter — Ventile für tiefkalten Betrieb.*

EN 1797, *Kryo-Behälter — Verträglichkeit von Gas/Werkstoffen.*

EN 10028-4, *Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen — Teil 4: Nickellegierte kaltzähe Stähle.*

EN 10028-7:2000, *Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen — Teil 7: Nicht rostende Stähle.*

prEN 10216-5, *Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen — Technische Lieferbedingungen — Teil 5: Rohre aus nichtrostenden Stählen.*

prEN 10217-7, *Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen — Technische Lieferbedingungen — Teil 7: Rohre aus nichtrostenden Stählen.*

EN 12300, *Kryo-Behälter — Reinheit für den tiefkalten Betrieb.*

EN 13068-3, *Zerstörungsfreie Prüfung — Radioskopische Prüfung — Teil 3: Allgemeine Grundlagen für die radioskopische Prüfung von metallischen Werkstoffen mit Röntgen- und Gammastrahlen.*

EN 13133, *Hartlöten — Hartlöterprüfung.*

EN 13134, *Hartlöten — Hartlötverfahrensprüfung.*

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

EN 13445-4, *Unbefeuerte Druckbehälter — Teil 4: Herstellung.*

EN 13458-1:2002, *Kryo-Behälter — Ortsfeste, vakuum-isolierte Behälter — Teil 1: Grundanforderungen.*

prEN 13458-3, *Kryo-Behälter — Ortsfeste, vakuum-isolierte Behälter — Teil 3: Betriebsanforderungen.*

prEN 13648-1, *Kryo-Behälter — Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung — Teil 1: Sicherheitsventile für den Kryo-Betrieb.*

prEN 13648-3, *Kryo-Behälter — Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung — Teil 3: Ermittlung des erforderlichen Ausflusses; Ausflussmassenstrom und Größenbemessung.*

prEN ISO 4126-2, *Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung — Teil 2: Berstscheibeneinrichtungen (ISO/DIS 4126-2:1996).*

EN ISO 6520-1:1998, *Schweißen und verwandte Prozesse — Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an Metallen — Teil 1: Schmelzschweißen (ISO 6520- 1:1998).*

ISO 1106-1, *Empfohlene Praxis für die radiographische Untersuchung schmelzgeschweißter Verbindungen in Stahlplatten bis zu 50 mm Dicke.*

SA-353/A353M, *Specification for pressure vessels plates, alloy steel, 6 percent nickel, double-normalized and tempered.*

SA-479/SA-479M, *Specification for stainless steel bars and shapes for use in boiler and other pressure vessels.*

SA-522/SA-522M, *Specification for forged or rolled 8 and 9 % nickel alloy steel flanges, fittings, valves and parts for low-temperature service.*

SA-553/SA-553M, *Specification for pressure vessels plates, alloy steel, quenched and tempered 8 and 9 percent nickel.*

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die folgenden Begriffe.

3.1.1

ortsfester Behälter

Behälter an einem festen Standort zum Füllen, Lagern (unter Druck) und Verteilen tiefkalter Fluide. Der ortsfeste Behälter ist nicht für den Transport flüssiger Produkte vorgesehen

3.1.2

Innenbehälter

Behälter, der für die Aufnahme des tiefkalten Fluids vorgesehen ist

3.1.3

Außenmantel

gasdichte Umhüllung, die den Innenbehälter umfasst und sicherstellt, so dass das Vakuum aufrechterhalten bleibt

3.1.4

automatisches Schweißen

Schweißen, bei dem die Parameter automatisch überwacht sind. Einige dieser Parameter können für einen Grenzbereich fest eingestellt sein — bei Hand oder automatisch —, damit während des Schweißens die festgelegten Schweißbedingungen beibehalten werden.

3.1.5

höchstzulässiger Druck, p_s

maximaler vom Hersteller festgelegte Druck, für den die Ausrüstung bemessen ist, vom Hersteller für einem bestimmten Ort definiert, normalerweise die Lage der Schutz- und Sicherheitseinrichtungen am oberen Teil der Ausrüstung

ANMERKUNG p_s ist äquivalent PS , das im Artikel 1, 2.3 der PED angewendet wird.

3.1.6

Entlastungsplatte/-stopfen

Atmosphärendruck tragende(r) Platte/Stopfen, die/der nur die Entlastung infolge des inneren Überdruckes zulässt

3.1.7

Berstscheibeneinrichtung

in sich schließende Einrichtung gegen Drucküberschreitung, die auf Differenzdruck anspricht und die so konstruiert ist, dass sie durch das Bersten der Berstscheiben ihre Funktion erfüllt. Sie umfasst die Gesamtheit der eingebauten Teile, gegebenenfalls einschließlich Berstscheibenhalter

3.2 Symbole

ANMERKUNG Innerhalb dieser Norm ist p_s äquivalent PS , das im Artikel 1, 2.3 der PED, und p_T ist äquivalent PT , das im Anhang I der PED angewendet wird.

In den folgenden Formeln werden nachstehende Symbole und Einheiten benutzt:

c	Zuschlag für Korrosion	mm
d_i	Innendurchmesser der Öffnung	mm
d_a	Außendurchmesser des Rohres oder Stutzens	mm

f	schmale Seite einer rechteckigen oder elliptischen Platte	mm
l_b	Beullänge	mm
n	Anzahl	–
p	Berechnungsdruck wie in 4.2.3.2 j) und 4.3.3.2 definiert	bar
p_e	zulässiger Außendruck, begrenzt durch elastisches Einbeulen	bar
p_k	Verstärkender Druck	bar
p_p	zulässiger Außendruck, begrenzt durch plastische Verformung	bar
p_T	Druckprüfung (siehe 4.2.3.2 g))	bar
r	Radius, z. B. innerer Krempenradius eines gewölbten Bodens und von Kegeln	mm
s	erforderliche Wanddicke einschließlich Zuschläge	mm
s_e	ausgeführte Wanddicke	mm
ν	Faktor zur Berücksichtigung der Ausnutzung der zulässigen Bemessungsspannung in Fügeverbindungen oder Faktor zur Berücksichtigung von Verschwächungen	–
x	(Abklinglängenbereich) Entfernung, über die die vorherrschende Spannung entsprechend der Annahme wirkt	mm
A	Fläche	mm ²
A_S	Bruchdehnung	
C	Berechnungsbeiwerte	–
D	Durchmesser des Grundkörpers	mm
D_a	Außendurchmesser, z. B. einer Zylinderschale	mm
D_i	Innendurchmesser, z. B. einer Zylinderschale	mm
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
I	Flächenträgheitsmoment	mm ⁴
K	Festigkeitskennwert (siehe 4.3.2.3.1)	N/mm ²
K_{20}	Siehe 4.3.2.3.2	
K_t	Siehe 4.3.2.3.3	
$K_{Beess-ung}$	ein vom Hersteller für einen bestimmten Anwendungsfall festgelegter Wert	
R	Krümmungsradius, z. B. innerer Scheitelradius einer Wölbung	mm
S	Sicherheitsbeiwert beim Bemessungsdruck	–
S_k	Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen beim Bemessungsdruck	–
S_p	Sicherheitsfaktor gegen plastische Verformung beim Bemessungsdruck	–
S_T	Sicherheitsfaktor gegen plastische Verformung beim Dehnungsdruck	–
Z	Hilfswert	–
ν	Querkontraktionszahl	–
u	Unrundheit	
σ_k	Wert für die Bemessungsspannung	N/mm ²

4 Bemessung

4.1 Möglichkeiten für den Nachweis der Bemessung

4.1.1 Allgemein

Der Nachweis der Bemessung muss nach einer der Möglichkeiten der Abschnitte 4.1.2, 4.1.3 oder 4.1.4 durchgeführt werden. Bei 9 % Nickelstahl müssen die zusätzlichen Anforderungen von Anhang B erfüllt werden.

Für Kohlenstoff- und niedrig legierte Stähle müssen die Anforderungen von EN 1252-2 erfüllt werden.

Bei einer weiteren vorgesehenen Anwendung tiefkalter Eigenschaften muss Anhang E berücksichtigt werden.

4.1.2 Rechnerischer Nachweis

Diese Option erfordert die Berechnung aller druckführenden und lasttragenden Bauteile, außer wenn ausreichende Erfahrungen aus ähnlichen Bemessungen vorliegen. Die Dicken der druckführenden Teile des Innenbehälters und des Außenmantels dürfen nicht kleiner sein, als in 4.3 gefordert. Unter Umständen können zusätzliche Berechnungen erforderlich werden, um die Bemessung für die Betriebsbedingungen einschließlich einer Toleranz für externe Belastungen nachzuweisen (z. B. seismisch).

4.1.3 Rechnerischer Nachweis und Druckverstärkung

Die Druckhaltefähigkeit der Innenbehälter, die aus austenitischem nichtrostendem Stahl hergestellt wurden mit Druckverstärkung, muss nach Anhang C bemessen werden.

4.1.4 Rechnerischer und experimenteller Nachweis

Wenn ein rechnerischer Nachweis für die Bemessung nicht möglich ist, dürfen planmäßige und kontrollierte experimentelle Mittel angewendet werden unter der Voraussetzung, dass die Ergebnisse die in 4.3 geforderten Bemessungsnormen bestätigen. Ein Beispiel wäre die Anwendung von Dehnungsmessstreifen zur Bewertung der Höhe der mechanischen Beanspruchung.

4.2 Allgemeines Anforderungen für die Bemessung

4.2.1 Allgemein

Die Anforderungen in 4.2.2 bis 4.2.8 gelten für alle Behälter unabhängig von der für den Nachweis der Bemessung verwendeten Option.

Im Falle der Erhöhung von mindestens einer der folgenden Parameter muss das ursprüngliche Programm für den Nachweis der Bemessung unter Berücksichtigung dieser Modifikation wiederholt werden:

- der max. zulässiger Arbeitsdruck;
- das spezifische Gewicht des Gases, für das der Behälter ausgelegt wurde;
- das max. TARA-Gewicht des Innenbehälters;
- die Nennlänge und/oder Durchmesser des Innenbehälters;

oder im Falle jeder Veränderung im Hinblick auf

- den Werkstoff-Typ oder die Sorte (z. B. von nichtrostendem Stahl zu Aluminium oder Änderung der Sorte des nichtrostenden Stahls);
- die grundlegende Form;
- eine Verringerung der Werkstoffeigenschaften des verwendeten Werkstoffes;
- eine Modifizierung der Auslegung eines Bemessungsverfahrens für alle unter Spannung stehenden Teile, insbesondere soweit das Unterstützungssystem zwischen dem Innenbehälter und dem Außenmantel oder dem Innenbehälter selbst oder dem Schutzrahmen, falls vorhanden, betroffen ist.

Das ursprüngliche Bemessungsprogramm muss wiederholt werden, um diese Modifizierungen zu berücksichtigen.

4.2.2 Bemessungsspezifikation

Damit die Bemessung erstellt werden kann, müssen folgende Angaben, die einen bestimmten Behälter definieren, verfügbar sein:

- zulässiger Arbeitsdruck;
- vorgesehene zu verwendende Fluide;
- Flüssigkeitsinhalt;
- Fassungsraum des Innenbehälters;
- Konfiguration;
- Handhabungs- und Sicherungsverfahren;
- örtliche Bedingungen, z. B. Umgebungstemperaturen, Erdbebensicherheit, usw.
- Befüll- und Entnahmeraten.

Es ist eine Bemessungsunterlage in Form von Zeichnungen mit Text zu erstellen, die die obigen Angaben sowie gegebenenfalls Folgendes enthält:

- die Angabe, welche Bauteile durch Berechnung und welche durch Experiment nachgewiesen sind;
- Zeichnungen mit den Maßen und Dicken der lasttragenden Bauteile;
- die Spezifikation aller lasttragenden Werkstoffe einschließlich Sorte, Klasse, Vergütung, Prüfungen usw., soweit zutreffend;
- die Art der Werkstoffprüfbescheinigungen;
- Ort und genauere Angaben zu den Schweißnähten und anderen Verbindungen, Schweiß- und andere Verbindungsverfahren, Zusatzwerkstoffe, Verbindungsmaterialien usw., soweit zutreffend;
- Berechnungen für den Nachweis, dass diese Norm erfüllt ist;
- Prüfprogramm für den Nachweis der Bemessung;
- Anforderungen für die zerstörungsfreien Prüfungen;

- Anforderungen für die Druckprüfungen;
- Anordnung der Rohrleitungen einschließlich Bauform, Größe und Ort aller Absperrarmaturen und Druckentlastungseinrichtungen;
- genauere Angaben zu den Anhebepunkten und zum Anhebverfahren;
- Wind- und Erdbebenlasten.

4.2.3 Bemessungslasten

4.2.3.1 Allgemein

Ortsfeste Kryo-Behälter sind üblicherweise nicht für wechselnde Betriebsarten vorgesehen, daher sind Analysen über Dauerbelastungen nicht notwendig.

Der ortsfeste Kryo-Behälter muss sicher den mechanischen und thermischen und chemischen Belastungen, denen er während der Druckprüfung und des bestimmungsgemäßen Gebrauchs ausgesetzt ist, standhalten, wie in 4.2.3.2 bis 4.2.3.7 angegeben.

4.2.3.2 Innenbehälter

Es muss davon ausgegangen werden, dass die folgenden Lasten, wie in 4.2.3.2.j) festgelegt, in Kombination wirken:

- a) Druck während des Betriebes, wenn der Behälter ein tiefkaltes verflüssigtes Produkt enthält:

$$p_{c_L} = p_s + p_L + 1 \text{ bar}$$

Dabei ist

p_s höchstzulässiger Druck, in bar

p_L der Druck, in bar, den der Flüssigkeitsinhalt ausübt, wenn der Behälter bis zu seinem Fassungsvermögen gefüllt wird, entweder

- 1) durch eine Siedeflüssigkeit bei Atmosphärendruck oder
- 2) durch eine tiefkalte Flüssigkeit bei deren ausgeglichenem Tripelpunkt oder Fließpunkttemperatur bei Atmosphärendruck.

p_L darf vernachlässigt werden, wenn er weniger als 5 % von $(p_s + 1)$ beträgt, andernfalls muss der Druck benutzt werden, der 5 % von $(p_s + 1)$ überschreitet.

- b) Druck während des Betriebes, bei dem der Behälter nur gasförmige Produkte bei 20 °C enthält:

$$p_{c_G} = p_s + 1 \text{ bar}$$

- c) Reaktionen an den Abstützungspunkten des Innenbehälters während des Betriebes, bei dem der Behälter nur tiefkalte verflüssigte Produkte enthält. Die Reaktionen müssen durch die Masse des Innenbehälters, der Masse des maximalen Inhalts der tiefkalten Flüssigkeit und des Dampfes und der Erdbebenlasten – wenn erforderlich – bestimmt werden. Die Erdbebenlasten müssen alle Kräfte berücksichtigen, die auf den Behälter von der Isolation ausgeübt werden.

- d) Reaktionen an den Abstützpunkten des Innenbehälters während des Betriebes, bei dem der Behälter nur gasförmige Produkte bei 20 °C enthält. Die Reaktionen müssen durch die Masse des Innenbehälters, seines Inhaltes und der Erdbebenlasten – wenn erforderlich – bestimmt werden. Die Erdbebenlasten müssen alle Kräfte berücksichtigen, die auf den Behälter von der Isolation ausgeübt werden.
- e) Die Belastung, die die Rohrleitungen infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnungen von Innenbehälter, Rohrleitungen und Außenmantel aufbringen.

Es sind folgende Fälle zu untersuchen:

- Abkühlung (Innenbehälter warm – Rohrleitung kalt),
- Befüllen und Entnahme (Innenbehälter kalt – Rohrleitung kalt) und
- Lagerung (Innenbehälter kalt – Rohrleitung warm).

- f) Die Belastung des Innenbehälters an seinen Abstützungspunkten, wenn er sich von der Umgebungs- auf die Betriebstemperatur abkühlt.
- g) Druckprüfung: Der Wert für den Nachweis muss der Größere sein von:

$$p_T = 1,43 \cdot (p_s + 1) \text{ bar oder siehe 6.5.1}$$

oder

$$p_T = 1,25 \cdot (p_s + p_L + 1) \frac{K_{20}}{K_{\text{Bemessung}}} \text{ bar}$$

untersucht an jedem Behälterelement, wie z. B. Körper usw.

Das 1 bar ist addiert worden, um das äußere Vakuum zu berücksichtigen.

- h) Belastungen infolge Transport und der örtlichen Erstellung;
- i) Belastung durch Druck in ringförmigen Abschnitten, der gleich dem festgelegten Druck der Druckentlastungseinrichtung des Außenmantels und dem Atmosphärendruck im Innenbehälter ist;
- j) Der Behälter muss in der Lage sein, die folgenden Belastungskombinationen auszuhalten. Der Berechnungsdruck p ist gleich dem hier in jeder Kombination 1, 2 und 3 festgelegten Druck:
 - 1) Betrieb beim zulässigen Betriebsdruck, wenn der Behälter mit tiefkaltem Medium gefüllt ist:
 - a) + c) + e) + f);
 - 2) Betrieb beim zulässigen Betriebsdruck, wenn der Behälter mit gewärmten Gas gefüllt ist:
 - b) + d);
 - 3) Druckprüfung:
 - g)
 - 4) Transport und Lagerung:
 - h)
 - 5) Behälter, die einem externen Druck unterworfen wurden, der im Außenmantel entstanden ist:
 - i)

Der Innenbehälter muss in der Lage sein, zusätzlich zu den genannten Bedingungen dem Prüfmedium ohne eine gesamte plastische Verformung zu widerstehen.

4.2.3.3 Außenmantel

Es muss in Betracht gezogen werden, dass die folgenden Lasten gegebenenfalls in Kombination wirken:

- a) Ein Außendruck von 1 bar.
- b) Ein Innendruck gleich dem eingestellten Druck der Druckentlastungseinrichtung für den Außenmantel.
- c) Die Belastung durch Abstützungssystem im Außenmantel, unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten, wie z. B. Wind- und Erdbebenlasten usw.
- d) Die Belastung durch die Rohrleitung entsprechend 4.2.3.2 e).
- e) Die Belastung an den Abstützungspunkten des Innenbehälters im Außenmantel, wenn sich der Innenbehälter von der Umgebungs- auf die Betriebstemperatur abkühlt und wenn er in Betrieb ist.
- f) Belastungen infolge Transport und örtlicher Erstellung;
- g) äußere Belastungen von z. B. Wind, Erdbeben oder anderen örtlichen Bedingungen;
- h) Gesamtgewicht.

4.2.3.4 Abstützungen des Innenbehälters

Die Abstützungen des Innenbehälters müssen für die in 4.2.3.2 c) angegebene Belastung plus die Belastungen durch die differentiellen Wärmebewegungen geeignet sein.

4.2.3.5 Abstützungen des Außenmantels

Die Abstützungen des Außenmantels müssen für die in 4.2.3.3 angegebene Belastung berücksichtigt werden.

4.2.3.6 Anschlagpunkte

Die Anschlagpunkte müssen zum Anheben des ortsfesten Kryo-Behälters geeignet sein und nach dem festgelegten Verfahren angehoben werden.

4.2.3.7 Rohrleitungen und Ausrüstungsteile

Rohrleitungen einschließlich Ventilen, Armaturen und Abstützungen müssen für die folgenden Belastungen bemessen sein, wobei mit Ausnahme von Punkt a) in Betracht gezogen werden muss, dass die Lasten in Kombination wirken:

- a) Druckprüfung: nach 6.5.4;
- b) Druck im Betrieb: Mindestens gleich dem an der Druckentlastungseinrichtung des Systems eingestellten Druck; z. B. Der Einstelldruck für die thermische Entlastungseinrichtung;
- c) Die thermischen Belastungen nach 4.2.3.2 e):
- d) Die Belastungen, die durch das Ausströmen bei der Druckentlastung entstehen;
- e) Ein Bemessungsdruck, nicht weniger als der maximal zulässige Druck, p_s des Innenbehälters plus dem Flüssigkeitsdruck. Für Rohrleitungen innerhalb des Vakuumbehälters muss ein weiteres Mal 1 bar zugefügt werden.

4.2.4 Korrosionzuschlag

Korrosionszuschlag an Oberflächen, die mit dem Betriebsfluid in Berührung kommen, wird nicht gefordert. An anderen Oberflächen wird kein Korrosionszuschlag gefordert, wenn sie geeignet korrosionsgeschützt sind.

4.2.5 Besichtigungsöffnungen

Besichtigungsöffnungen im Innenbehälter oder Außenmantel werden nicht gefordert unter der Voraussetzung, dass den Anforderungen in prEN 13458-3 gefolgt wurde..

ANMERKUNG 1 Eine Korrosion an der Innenoberfläche durch die Kombination von Konstruktionswerkstoffen und Betriebsfluiden kann nicht eintreten.

ANMERKUNG 2 Der Innenbehälter befindet sich innerhalb des evakuierten Außenmantels; somit kann eine Korrosion an der Außenoberfläche des Innenbehälters nicht eintreten.

ANMERKUNG 3 Der Verzicht auf Besichtigungsöffnungen unterstützt auch die sichere Aufrechterhaltung des Vakuums im Isolationsraum.

4.2.6 Druckentlastung

4.2.6.1 Allgemein

Die Druckentlastungsarmaturen für den Innenbehälter müssen prEN 13648-1 entsprechen.

Die Druckentlastungsarmaturen am Außenmantel müssen Anhang I entsprechen.

4.2.6.2 Innenbehälter

Der Innenbehälter muss mit mindestens einer Druckentlastungsarmatur ausgerüstet sein, um den Behälter gegen Überdruck zu schützen. Praktische Beispiele enthält Anhang D.

Das System muss:

- so bemessen sein, dass es gebrauchstauglich ist;
- von anderen Funktionen unabhängig sein, es sei denn, dass die Sicherheitsfunktion nicht davon beeinflusst ist;
- den Behälterdruck auf 110 % des zulässigen Arbeitsdruckes – bei einer kurzzeitigen Druckspitze – begrenzen;
- ein fehlersicheres Verhalten haben;
- redundante Eigenschaften beinhalten;
- nicht-gleichartig wirkende Fehlermechanismen haben (verschiedenartige Mechanismen).

Das Fassungsvermögen der Schutzeinrichtung muss unter Berücksichtigung aller Eventualitäten eines inneren Überdruckes festgelegt werden.

Beispielweise:

- a) Wärmeverlust des Behälters;
- b) Wärmeverlust mit Vakuumverlust;
- c) Fehler in der Offen-Stellung des so gekennzeichneten Drucküberwachungsventils;
- d) alle anderen in Reihe liegenden Ventile ergeben eine Hochdruckquelle für den Innenbehälter;
- e) Wiederverwendung aller möglichen Kombinationen von Pumpen;
- f) zurückschlagendes Gas und Flüssigkeit aus dem maximalen Fassungsvermögen der Anlage haben Rückwirkung auf einen Behälter, der auf Betriebstemperatur ist.

Der Überdruck aus den Kombinationen der Bedingungen a) bis f) muss auf höchstens 110 % des höchstzulässigen Arbeitsdruckes durch eine selbstschließende Sicherheitseinrichtung begrenzt sein. Das erforderliche Fassungsvermögen dieser selbstschließenden Sicherheitseinrichtung darf in Übereinstimmung mit prEN 13648-3 berechnet werden.

ANMERKUNG Wenn zusätzlich eine selbstschließende fehlersichere Sicherheitseinrichtungen eingebaut ist, sollte deren Betriebsdruck so gewählt werden, dass ihre Fähigkeit — den Druck abzusperren — beim Betrieb der selbstschließenden Sicherheitseinrichtung bei 100 % des höchstzulässigen Arbeitsdruckes nicht beeinflusst ist und auf keinen Fall darf der Betriebsdruck über dem Festigkeitsprüfdruck minus 1 bar des Behälterdeckels liegen. Das erforderliche Fassungsvermögen jeder Redundanzeinrichtung sollte gleich dem erforderlichen Fassungsvermögen der Primäreinrichtung sein.

Die Bedingungen für einen von außen einwirkenden Brand sind nur dann zu beachten, wenn sie durch die Lage des Behälters bedingt sind.

Absperrarmaturen oder gleichwertige Einrichtungen dürfen vor Druckentlastungseinrichtungen eingebaut werden, sofern Verriegelungen vorhanden sind, damit sichergestellt ist, dass der Behälter zu jeder Zeit ausreichenden Ausflussmassenstrom hat.

Das Druckentlastungssystem muss so dimensioniert sein, dass der Druckabfall während des Ausströmens voll eintritt und der Druck nicht übermäßig ist und nicht bewirkt, dass das Ventil sofort wieder schließt.

Der Druckabfall in der Leitung der Druckentlastungseinrichtungen sollte den in prEN 13648-3 festgelegten Wert nicht überschreiten.

4.2.6.3 Außenmantel

Am Außenmantel muss eine Druckentlastungseinrichtung eingebaut sein. Die Entlastungseinrichtung muss so eingestellt sein, dass sie bei einem Druck von nicht mehr als 0,5 bar anspricht. Der Entlastungsquerschnitt der Druckentlastungseinrichtung darf nicht kleiner als $0,34 \text{ mm}^2$ je Liter Fassungsvermögen des Innenbehälters sein, muss aber einen Durchmesser von mindestens 10 mm haben.

4.2.6.4 Rohrleitungen

Jeder Abschnitt einer Rohrleitung, der tiefkaltes Fluid enthält und abgetrennt werden kann, muss durch ein Entlastungsarmatur oder eine andere geeignete Entlastungseinrichtung geschützt sein.

4.2.7 Absperrarmaturen

4.2.7.1 Allgemein

Die Absperrarmaturen müssen EN 1626 entsprechen.

4.2.7.2 Absperrarmaturen

Um ein größeres Auslaufen von Flüssigkeit zu vermeiden, müssen sekundäre Maßnahmen zur Absperrung in Betracht gezogen werden für solche Leitungen, die im tiefsten Punkt des Behälterbodens den Flüssigkeitsstand ausströmen:

- mit einem Bohrungsdurchmesser von über 9 mm und einem Auslass zur Atmosphäre, oder
- mit einem Bohrungsdurchmesser von über 50 mm, wenn sie Bestandteil eines geschlossenen Systems sind.

Die Sekundärmaßnahmen zur Absperrung können innerhalb der Betreiberinstallation sein und müssen ein äquivalentes Schutzniveau haben.

Die Sekundärmaßnahmen zur Absperrung können z. B. durch eine zweite Armatur erreicht werden, die so eingebaut ist, dass sie im Notfall sicher funktioniert, eine automatische, im Fehlerfalle schließende Armatur oder eine Einweg-Armatur oder eine bewegliche Abdeckung am offenen Ende der Leitung.

4.2.8 Füllfaktor

Es müssen Maßnahmen vorgesehen werden, die ein Befüllen mit Flüssigkeit auf nicht mehr als 98 % des Gesamtvolumens bei Füllbedingungen sicherstellen.

4.3 Rechnerischer Nachweis

4.3.1 Allgemein

Wenn die Bemessung durch rechnerischen Nachweis nach 4.1.2 erfolgt, müssen die Wanddicken des Innenbehälters und des Außenmantels mindestens gleich denen in diesem Abschnitt sein.

4.3.2 Innenbehälter

4.3.2.1 Allgemein

Bei der Ermittlung der Wanddicken der druckführenden Teile mit den Berechnungsformeln in 4.3.6 müssen die Informationen von 4.3.2.2 bis 4.3.2.6 beachtet werden.

4.3.2.2 Werkstoffeigenschaften und Bemessungslasten

a) in Übereinstimmung mit 4.2.3.2 j) 1)

Werkstoffeigenschaften, die entweder nach 4.3.2.3.2 oder nach 4.3.2.3.3 bestimmt wurden, müssen auf Veranlassung des Behälter-Herstellers übernommen werden.

b) in Übereinstimmung mit 4.2.3.2 j) 2), 3), 4), 5)

Werkstoffeigenschaften, die nach 4.3.2.3.2 bestimmt wurden, müssen übernommen werden.

4.3.2.3 Festigkeitskennwert K

4.3.2.3.1 Allgemein

Der bei den Berechnungen zu verwendende Festigkeitskennwert K muss

- für austenitischen nicht rostenden Stahl und Aluminium: die 1-%-Dehngrenze
 - für alle anderen Werkstoffe die Streckgrenze, wenn nicht vorhanden die 0,2-%-Dehngrenze
- sein.

ANMERKUNG Der obere Wert der Streckgrenze sollte angewendet werden.

4.3.2.3.2 K_{20}

K muss der der Werkstoffnorm entnommene Mindestwert bei 20 °C sein (siehe Anhang J).

4.3.2.3.3 K_t

Der zulässige Wert von K muss für den Werkstoff bei Betriebstemperatur bestimmt werden, die der Sättigungstemperatur — bei dem höchstzulässigen Behälterdruck — des eingefüllten tiefkalten Mediums entspricht. Der Wert für K und E muss durch die Werkstoff-Norm (siehe EN 10028-7:2000, Anhang F für austenitische nichtrostende Stähle) bestimmt oder muss vom Werkstoffhersteller garantiert werden.

4.3.2.4 Sicherheitsbeiwerte S , S_T , S_p und S_k

Die Sicherheitsbeiwerte sind das Verhältnis vom Festigkeitskennwert K zu maximal zulässigen Belastung.

a) Innerer Überdruck (Druck auf die konkav gewölbte Oberfläche)

- bei höchstzulässigem Behälterdruck
 $S = 1,5$
- beim Prüfdruck des Behälters
 $S_T = 1,05$

b) Äußerer Überdruck (Druck auf die konvex gewölbte Oberfläche)

- Zylindermantel $S_p = 1,6$
 $S_k = 3,0$
- Kugelbereich $S_p = 2,4$
 $S_k = 3,0 + 0,002 R/s$
- Krempenbereich $S_p = 1,8$

4.3.2.5 Schweißnahtfaktoren ν

Innerer Überdruck (Druck auf die konkav gewölbte Oberfläche) $\nu = 0,85$ oder $1,0$ (siehe Abschnitt 6, Tabelle 6)

Äußerer Überdruck (Druck auf die konvex gewölbte Oberfläche) $\nu = 1,0$

4.3.2.6 Zuschläge c

$$c = 0$$

4.3.3 Außenmantel

4.3.3.1 Allgemein

Zur Ermittlung der Wanddicken der druckführenden Teile aus den Berechnungsformeln in 4.3.6 ist Nachstehendes zu beachten.

4.3.3.2 Berechnungsdruck p

Der Berechnungsdruck p gegen Innendruck muss gleich dem an der Druckentlastungseinrichtung des Außenmantels eingestellten Druck sein.

Der Berechnungsdruck p gegen Außendruck muss gleich 1 bar sein.

4.3.3.3 Festigkeitskennwert K

Der bei den Berechnungen zu verwendende Festigkeitskennwert K muss derjenige bei 20 °C sein, wie in 4.3.2.3 festgelegt.

4.3.3.4 Sicherheitsbeiwerte S , S_p und S_k

Innerer Überdruck (Druck auf die konkav gewölbte Oberfläche)

$$S = 1,1$$

Äußerer Überdruck (Druck auf die konvex gewölbte Oberfläche)

— Zylindermantel $S_p = 1,1$

$$S_k = 2,0^{1)}$$

— Kugelbereich $S_p = 1,6$

$$S_k = 2,0 + 0,0014 R/s$$

— Krepfenbereich $S_p = 1,2$

4.3.3.5 Schweißnahtfaktoren ν

Innerer Überdruck (Druck auf die konkav gewölbte Oberfläche) $\nu = 0,7$

Äußerer Überdruck (Druck auf die konvex gewölbte Oberfläche) $\nu = 1,0$

4.3.3.6 Zuschläge c

Es sind keine Zuschläge erforderlich.

$$c = 0$$

ANMERKUNG Äußere Oberflächen sind in geeigneter Weise korrosionsgeschützt.

4.3.4 Abstützungen, Anschlagpunkte und Gestell

Die Abstützungen und das Gestell müssen für die Belastungen nach 4.2 bemessen sein, wobei bewährte Bemessungsverfahren und Sicherheitsbeiwerte anzuwenden sind.

Bei der Bemessung des Abstützsystems für den Innenbehälter dürfen für die jeweiligen Bauteile die mechanischen Werkstoffeigenschaften bei der Temperatur verwendet werden, die sich ergibt, wenn der Innenbehälter bis zum Fassungsvermögen mit tiefkaltem Fluid gefüllt ist.

4.3.5 Rohrleitungen

Die Rohrleitungen müssen für die in 4.2.3.7 definierten Belastungen bemessen werden, wobei bewährte Bemessungsverfahren und Sicherheitsfaktoren zu benutzen sind.

1) Für gut bewährte Bemessungen ist ein Sicherheitsbeiwert von $S_k = 1,5$ akzeptabel, vorausgesetzt dass

— D nicht mehr als 2 300 mm

— I_b nicht mehr als 10 200 mm ist

und der ringförmige Spalt ist perestisch isoliert.

4.3.6 Berechnungsformeln

4.3.6.1 Zylinder- und Kugelschalen unter innerem Überdruck (Druck auf die konkav gewölbte Oberfläche)

4.3.6.1.1 Anwendungsbereich

Zylindrische und kugelförmige Schalen mit

$$\frac{D_a}{D_i} \leq 1,2$$

4.3.6.1.2 Öffnungen

Zur Verschwächungen von Öffnungen siehe 4.3.6.7.

4.3.6.1.3 Berechnung

Die geforderte Mindestwanddicke s beträgt

— für Zylinderschalen

$$s = \frac{D_a p}{20 (K/S) v + p} + c \quad (1)$$

— für Kugelschalen

$$s = \frac{D_a p}{40 (K/S) v + p} + c \quad (2)$$

4.3.6.2 Zylinderschalen unter äußerem Überdruck (Druck auf die konvexgewölbte Oberfläche)

4.3.6.2.1 Anwendungsbereich

Zylindrische Schalen mit

$$\frac{D_a}{D_i} \leq 1,2$$

4.3.6.2.2 Ausschnitte

Ausschnitte müssen nach 4.3.6.7 berechnet werden, wobei in der Formel der Außendruck als Innendruck zu behandeln ist.

4.3.6.2.3 Berechnung

Die Berechnungen müssen für elastisches Einbeulen und für plastische Verformung durchgeführt werden. Der niedrigste berechnete Druck p_e oder p_p muss mindestens gleich dem Bemessungsaußendruck sein.

ANMERKUNG 1 Die Beullänge l_b ist die Länge der nicht verstärkten Zylinderschale (siehe Bilder 1 und 2). Es dürfen andere Formen des Versteifungsquerschnitts benutzt werden.

ANMERKUNG 2 Für Behälter mit gewölbten Böden beginnt die Beullänge am Übergang des Zylinders in den Bereich des gewölbten Bodens (siehe Bild 3).

4.3.6.2.4 Elastisches Einbeulen

Die Berechnungen werden mit Hilfe der nachstehenden Formel durchgeführt:

$$p_e = E/S_k \left\{ \frac{20}{(n^2-1)[1+(n/Z)^2]^2} \times \frac{s-c}{D_a} + \frac{80}{12(1-\nu^2)} \times \left[n^2-1 + \frac{2n^2-1-\nu}{1+(n/Z)^2} \right] \times \left[\frac{s-c}{D_a} \right]^3 \right\} \quad (3)$$

dabei sind $Z = 0,5 \pi D_a/l_b$ und n eine so bestimmte ganze Zahl gleich oder größer als 2 und größer als Z , dass für sie der Wert von p_e ein Minimum annimmt. n bezeichnet die Anzahl der Einbeulwellen, die beim Versagen auf dem Umfang auftreten können.

Die Anzahl der Einbeulwellen kann mit Hilfe der folgenden Näherungsgleichung berechnet werden:

$$n = 1,63 \sqrt[4]{D_a^3 / [l_b^2 (s-c)]} \quad (4)$$

Für Rohre und Rohrleitungen darf für die Berechnungen folgende vereinfachte Formel benutzt werden:

$$p_e = \frac{E}{S_k} \times \frac{20}{1-\nu^2} \times \left(\frac{s-c}{D_a} \right)^3 \quad (5)$$

Bei einem festgelegten Prüfdruck von größer als $1,25 p$ muss eine zusätzliche Bemerkung gemacht werden um sicherzustellen, dass die übernommene Werkstoffdicke nicht weniger beträgt als diejenige bei Prüfdruck mit einem Sicherheitsbeiwert von $0,74 S_K$.

4.3.6.2.5 Plastische Beulen

Für $D_a/l_b \geq 5$ gilt

$$p_p = \frac{20K}{S_p} \times \frac{s-c}{D_a} \times \frac{1}{1 + \frac{1,5u(1-0,2 D_a/l_b) D_a}{100(s-c)}} \quad (6)$$

Für $D_a/l_b > 5$ muss der höhere der sich aus den Gleichungen (7) und (8) ergebenden Drücke mindestens gleich dem äußeren Berechnungsdruck sein.

$$p_p = \frac{20K}{S_p} \times \frac{(s-c)}{D_a} \quad (7)$$

$$p_p = \frac{30K}{S_p} \times \left(\frac{s-c}{l_b} \right)^2 \quad (8)$$

Bei einem festgelegten Prüfdruck von größer als $1,25 p$ muss eine zusätzliche Bemerkung gemacht werden um sicherzustellen, dass die übernommene Werkstoffdicke nicht weniger beträgt als diejenige bei Prüfdruck p_T mit einem Sicherheitsbeiwert von $0,74 S_K$.

4.3.6.2.6 Versteifungsringe

Außer den Böden dürfen die in den Bildern 1 und 2 dargestellten Profile als effektive Verstärkungselemente angesehen werden. Die an der Schale angeschweißten Versteifungsringe müssen den folgenden Bedingungen genügen:

$$I \geq \frac{0,124 p D_a^3}{10 E} \sqrt{D_a (s - c)} \quad (9)$$

$$A \geq \frac{0,75 p D_a}{10 K} \sqrt{D_a (s - c)} \quad (10)$$

Das Trägheitsmoment I ist auf die neutrale Achse des Querschnitts der Versteifungsringe parallel zur Mantelachse bezogen (siehe Achse $x-x$ in Bildern 1 und 2). Schmale und hohe Versteifungsringe der in Bild 1 dargestellten Art können einbeulen. Ist die Höhe des Elements größer als seine achtfache Breite, so muss eine genauere Berechnung durchgeführt werden.

Wenn Versteifungsringe durch unterbrochene Schweißnähte an den Mantel angeschweißt sind, müssen die Kehlnähte auf jeder Seite mindestens ein Drittel des Mantelumfangs überdecken und muss die Anzahl der Schweißnahtunterbrechungen mindestens $2n$ betragen. Die Anzahl n der Einbeulungen ergibt sich nach 4.3.6.2.4.

Bei einem festgelegten Prüfdruck p_T von größer als $1,25 p$ muss eine zusätzliche Bewertung gemacht werden um sicherzustellen, dass die übernommene Werte von I und A nicht weniger betragen als diejenigen nach Gleichung (9) und (10) bei einem Prüfdruck von $0,74 p_T$.

4.3.6.3 Kugelschalen unter äußerem Überdruck (Druck auf die konvex gewölbte Oberfläche)

Kugelschalen, die einem äußeren Überdruck unterworfen sind, müssen nach 4.3.6.4.4 bewertet werden.

4.3.6.4 Gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck

4.3.6.4.1 Anwendungsbereich

Halbkugelböden mit $D_a/D_i \leq 1,2$

10%ige Klöpperböden mit $R = D_a$ und $r = 0,1 D_a$

und

Korbbogenböden mit 2 : 1 $R = 0,8 D_a$ und $r = 0,154 D_a$

Im Falle torisphärischer Böden gilt $0,001 \leq (s - c)/D_a \leq 0,1$

ANMERKUNG Andere torisphärische Bodenformen dürfen verwendet werden, wenn entsprechende Berechnungen durchgeführt werden.

4.3.6.4.2 Zylindrischer Bord

Die Höhe des zylindrischen Bordes h_1 (Bild 4 a)) muss

- für 10%ige Klöpperböden $3,5 s$;
- für Korbbogenböden mit 2 : 1, $3,0 s$

betragen. Die Bordhöhe darf kürzer sein, wenn im Falle von Innenbehältern die Rundnahtverbindung zwischen gewölbten Böden und Zylinder wie für einen Schweißnahtfaktor von 1,0 gefordert zerstörungsfrei geprüft wird.

ANMERKUNG Andere geflanschte/geschweißte Konfigurationen können verwendet werden, wenn geeignete Berechnungen durchgeführt wurden.

4.3.6.4.3 Zwischendeckel

Deckel ohne Dickenbegrenzung dürfen entsprechend den Anforderungen von Bild F.2 eingebaut werden. Der Außendurchmesser des Deckelrandes muss gegenüber den anstoßenden Abschnitten des Behälters eng toleriert sein.

Die Stumpf- und Kehlnaht muss adäquat bemessen sein, damit sie allen relevanten Drücken, mechanischen und thermischen Belastungen standhält. Dies kann durch eine genaue detaillierte Spannungsanalyse erreicht werden und bei Übernahme der Kriterien von Anhang A.

Wenn nur Druckspannungen vorhanden sind, kann eine vereinfachte Annahme wie folgt übernommen werden, dass die Stumpf- und Kehlnaht so bemessen sind, dass sie eine Scher-Belastung aushalten, die gleich $1,5 \times$ dem maximalen Differenzdruck quer über dem Deckel ist, multipliziert mit der Querschnittsfläche des Körpers.

Die zulässige Scherbeanspruchung in diesem Fall sollte nicht $K/3$ übersteigen, wo die Fläche der Stumpfnah bei der Scherung die Breite der Schweißwurzelnaht mal der Umfangslänge der Schweißnaht und die Fläche der Kehlnaht bei Nahtdicke mal der Umfangslänge der Schweißnaht ist.

Wenn die Spannungen in den Anschweißteilen vollständig analysiert und bewertet sind in Übereinstimmung mit Anhang A, kann die Kehlnaht vernachlässigt werden. In anderen Fällen muss die Kehlnaht voll berücksichtigt werden.

4.3.6.4.4 Berechnung bei innerem Überdruck (Druck auf die konkav gewölbte Oberfläche)

4.3.6.4.4.1 Dicke der Kalotte und der Halbkugel

Die Wanddicke des Kalottenteils gewölbter Böden und Halbkugelböden muss entsprechend 4.3.6.1.3 $D_a = 2(R + s)$ ermittelt werden.

Ausschnitte im Scheitelpunkt von $0,6 D_a$ torisphärischer Böden, siehe Bild 4 b), und in Halbkugelböden müssen entsprechend 4.3.6.7 verstärkt werden. Bei Verwendung scheibenförmiger Verstärkungen darf der Scheibenrand den Bereich von $0,8 D_a$ für 10%ige Klöpperböden und $0,7 D_a$ für Korbbogenböden mit 2 : 1 nicht überschreiten.

4.3.6.4.4.2 Wanddicke von torisphärischen Böden und Dicke des Halbkugelanschlusses

Die geforderte Wanddicke von Krempen und Halbkugelanschlüssen muss sein:

$$s = \frac{D_a p \beta}{40(K/S)v} + c \quad (11)$$

Bei Vollböden in Halbkugelform muss ein β -Wert von 1,1 innerhalb des Abstands x der Tangente des Bodens an den Zylinder benutzt werden, hier gilt:

$$x = 0,5\sqrt{R(s-c)}$$

β wird in Abhängigkeit von $(s-c)/D_a$ für 10 %-Klöpperböden Bild 5 und für 2 : 1-Korbbogenböden Bild 6 entnommen. Dabei ist Iteration erforderlich.

Befinden sich Ausschnitte außerhalb des Bereichs von $0,6 D_a$, so ergibt sich die geforderte Dicke mit β aus Bild 5 und 6 unter Verwendung der entsprechenden Kurve für den betreffenden Wert von d_i/D_a .

Faktor β kommt aus den unteren Kurven in den Bildern 5 und 6, wenn der Bereich außerhalb von $0,6 D_a$ nicht durch Ausschnitte verschwächt ist.

D_a ist der Durchmesser des zylindrischen Bords, wie in Bild 4 a) und Bild 4 b) dargestellt.

4.3.6.4.4.3 Wird ein gewölbter Boden aus Kalotten- und Halbkugelkomponenten zusammengeschweißt, muss die Naht in einem ausreichenden Abstand vom Krepfenrand liegen. Der genannte Abstand gilt nachfolgend als ausreichend, er muss jedoch mindestens 100 mm betragen (siehe Bild 4 c)).

— Kalotte und Halbkugel haben unterschiedliche Wanddicken:

$$x = 0,5 \sqrt{R(s - c)}$$

hierin ist s die geforderte Wanddicke der Halbkugel

— Kalotte und Halbkugel haben gleiche Wanddicken:

- für 10 %-Klöpferböden: $x = 3,5 s$
- für 2 : 1-Korbbogenböden: $x = 3,0 s$

$V = 1,0$ kann angewendet werden oder bei einteiligen Böden – wenn die Anwendung der Prüfung dem festgelegten Bemessungsniveau entspricht, welches gleich dem zulässigen Bemessungsniveau ist.

$V = 1,0$ kann auch bei einem geschweißten gewölbten Boden angewendet werden – mit Ausnahme bei Halbkugelböden – unabhängig vom Anwendungsbereich der Prüfung, vorausgesetzt, dass die Ausschnitte im Scheitelbereich von $0,6 D_a$ liegen, siehe Bilder 4 e) und 4 f) (linke Seite).

4.3.6.4.4.4 Befindet sich der Steg auf der Verbindungslinie zwischen benachbarten Ausschnitten nicht vollständig im Bereich von $0,6 D_a$, so muss die Mindeststegbreite mindestens gleich der Summe der halben Ausschnittsdurchmesser sein.

4.3.6.4.5 Berechnungen bei äußerem Überdruck (Druck auf die konvex gewölbte Oberfläche)

Elastisches Einbeulen

Der Widerstand gegen elastisches Beulen ist ausreichend, wenn:

$$p \leq 3,66 \frac{E}{S_k} \left(\frac{s - c}{R} \right)^2 \quad (12)$$

Wenn ein höherer Prüfdruck als $1,25 p$ festgelegt ist, darf die angenommene Wanddicke nicht weniger betragen als

$$s = R \times \sqrt{\frac{0,2 P_T \cdot S_k}{E}} + c \quad (13)$$

Dabei ist:

S_k Sicherheitsbeiwert aus 4.3.2.4 oder 4.3.3.4

Plastisches Beulen

Der Widerstand gegen plastisches Beulen wird nach 4.3.6.4.4 mit dem entsprechenden Sicherheitsbeiwert S_p nach 4.3.2.4 und 4.3.3.4 ermittelt.

Wird ein höherer Prüfdruck als $1,25 p$ festgelegt, wird die angenommene Wanddicke bei einem Druck und einem Sicherheitsbeiwert von mindestens $0,74 S_p$ bestimmt.

4.3.6.5 Kegelförmige Mäntel unter innerem und äußerem Überdruck

4.3.6.5.1 Symbole und Einheiten

Für die Anwendung von 4.3.5.5 gelten die folgenden Symbole und Einheiten zusätzlich zu denen in 3.2.

A	Fläche des Versteifungsrings	mm^2
D_{a1}	Außendurchmesser des angeschlossenen Zylinders (Bild 7)	mm
D_{a2}	Außendurchmesser an der wirksamen Versteifung (Bild 9)	mm
D_k	Bemessungsdurchmesser (Bild 7)	mm
D_s	Manteldurchmesser am Stutzen (Bild 8)	mm
I	Trägheitsmoment, bezogen auf die Achse parallel zum Mantel	mm^4
l	Kegellänge zwischen wirksamen Versteifungen (Bild 9)	mm
s_g	geforderte Wanddicke außerhalb des Abklingbereichs	mm
s_l	geforderte Wanddicke innerhalb des Abklingbereichs	mm
x_i	Abklinglängen ($i = 1, 2, 3$) für die Definition des Eckbereichs (Bilder 7 a) und 7 b) und 4.3.5.5.5)	mm
φ	Kegelöffnungswinkel	—
r	Krempenradius	mm

4.3.6.5.2 Anwendungsbereich

Kegel nach Bild 7 mit

$$0,001 \leq s_g / D_{a1} \leq 0,1$$

und

$$0,001 \leq s_l / D_{a1} \leq 0,1$$

Für den äußerem Überdruck gilt $|\varphi| \leq 70^\circ$. Kleine Böden mit Krempe, die durch Eckstoß verbunden sind, können hiernach beurteilt werden.

Mehrere kegelförmige Mäntel dürfen angewendet werden unter der Voraussetzung, dass geeignete Berechnungen durchgeführt wurden.

4.3.6.5.3 Ausschnitte

Abschnitte außerhalb des Abklingbereichs (Bild 8) müssen wie folgt berechnet werden:

Bei $|\varphi| < 70^\circ$ ist nach 4.3.6.7 zu berechnen unter Verwendung eines äquivalenten Zylinderdurchmessers

$$D_i = \frac{D_s + d_i |\sin \varphi|}{\cos \varphi} \quad (14)$$

Bei $|\varphi| \geq 70^\circ$ ist nach 4.3.5.6 zu berechnen.

4.3.6.5.4 Zerstörungsfreie Prüfungen

Alle Eckstoßverbindungen müssen der Untersuchung unterzogen werden, die für einen Schweißnahtfaktor 1,0 gefordert wird, siehe Tabelle 6 in Abschnitt 6.

4.3.6.5.5 Abklingbereich

Der Abklingbereich ist der Teil des Kegels, in dem die vorherrschenden Spannungen Biegespannungen in Längsrichtung sind.

Der Abklingbereich ist in den Bildern 7a) und 7b) durch x_1 , x_2 und x_3 definiert, die aus folgenden Gleichungen berechnet werden können:

$$x_1 = \sqrt{D_{a1} (s_1 - c)} \quad (15)$$

$$x_2 = 0,7 \sqrt{D_{a1} (s_1 - c) / \cos \varphi} \quad (16)$$

$$x_3 = 0,5 x_1 \quad (17)$$

4.3.6.5.6 Berechnung bei innerem Überdruck bei $|\varphi| \leq 70^\circ$ (Druck auf die konkav gewölbte Oberfläche)

a) Innerhalb des Abklingbereichs

Die unter Verwendung der Variablen

$$|\varphi|, \frac{pS}{15 K_V} \text{ und } \frac{r}{D_{a1}}$$

aus den Bildern 10 a) bis 10 g) für den großen Kegelmantel/-Boden und Bild 10 h) für den kleinen Kegelmantel/-Boden berechnete geforderte Wanddicke (s_1) innerhalb des Abklingbereichs muss mindestens gleich der nach Formel berechneten geforderten Wanddicke s_g außerhalb des Abklingbereichs sein.

Für eine Eckstoßverbindung ist die Kurve für $r/D_{a1} = 0$ zu benutzen.

Die Zwischenwerte der Kegelwinkel sind linear zu interpolieren.

Die Wanddicke s_1 im Abklingbereich muss mindestens gleich der geforderten Dicke s_g wie in Formel (18) angegeben sein.

b) Außerhalb des Abklingbereichs

Die geforderte Wanddicke s_g außerhalb des Abklingbereichs wird berechnet nach

$$s_g = \frac{D_k p}{20 \frac{K}{S} v - p} \times \frac{1}{\cos \varphi} + c \quad (18)$$

Dabei ist:

für den großen Mantel $D_k = D_{a1} - 2 [s_1 + r (1 - \cos \varphi) + x_2 \sin \varphi]$,

Für den kleinen Mantel ist D_k der größte Durchmesser des Kegels, bei dem die Wanddicke gleich s_g ist.

4.3.6.5.7 Berechnung bei innerem Überdruck und bei $\varphi > 70^\circ$ (Druck auf die konkav gewölbte Oberfläche)

Bei $r \geq 0,01 D_{a1}$ ist die geforderte Wanddicke

$$s_1 = s_g = 0,3 (D_{a1} l - r) \times \frac{|\varphi|}{90} \times \sqrt{\frac{p}{10 (K/S)_v}} + c \quad (19)$$

4.3.6.5.8 Berechnung bei äußerem Überdruck (Druck auf die konvex gewölbte Oberfläche)

Die Stabilität gegen elastisches und plastisches Beulen muss nach 4.3.6.2 unter Verwendung eines äquivalenten Zylinders nachgewiesen werden.

Für das Beispiel in Bild 9 ist der Durchmesser des äquivalenten Zylinders zwischen der Krempe und der Versteifung

$$D_a = \frac{D_{a1} + D_{a2}}{2 \cos \varphi} \quad (20)$$

und für die Länge des äquivalenten Zylinders gilt

$$l = \frac{D_{a1} + D_{a2}}{2 |\sin \varphi|} \quad (21)$$

Die äquivalente Länge zwischen zwei wirksamen Versteifungen muss in Abhängigkeit von den jeweiligen Randbedingungen in der Bedeutung von 4.3.6.2 zuverlässig abgeschätzt werden.

Bei $\varphi \geq 10^\circ$ kann der Winkel zum Zylindermantel als effektive Absteifung angesehen werden.

Für kleine Flächen muss die Dicke im Abklingbereich mindestens gleich dem 2,5-fachen der geforderten Dicke des Kegelmantels bei demselben Winkel $|\varphi|$ sein, oder es muss ein Eckring mit folgenden Eigenschaften eingebaut werden:

$$l \geq \frac{p (D_{a1})^4}{960 (E/S_k)} \lg |\varphi| \quad (22)$$

Wenn ein höherer Druck als $1,25 p$ festgelegt wurde, muss eine zusätzliche Bewertung erfolgen um sicherzustellen, dass der angenommene Wert l nicht unter dem liegt, der bei Prüfdruck mit einem Sicherheitsbeiwert von $0,74 S_k$ festgelegt wurde.

$$A \geq \frac{p (D_{a1})^2}{80 (K/S_p)} \lg |\varphi| \quad (23)$$

Wenn ein höherer Druck als $1,25 p$ festgelegt wurde, muss eine zusätzliche Bewertung erfolgen um sicherzustellen, dass der angenommene Wert l nicht unter dem liegt, der bei Prüfdruck mit einem Sicherheitsbeiwert von $0,74 S_k$ festgelegt wurde.

S_k (Behälter) ist der Sicherheitsbeiwert für die Verhinderung des elastischen Beulens nach 4.3.2.4 oder 4.3.3.4.

S_p (Behälter) ist der Sicherheitsbeiwert für die Verhinderung des plastischen Beulens nach 4.3.2.4 oder 4.3.3.4.

D_{a1} ist der Durchmesser nach Bild 7b).

Die Fläche der Schale selbst kann in einer Breite von $0,5 \sqrt{D_{a1} s_1}$ als mittragend berücksichtigt werden.

Zudem sollte die Eckverbindung nicht als klassische Randbedingung idealisiert, d. h. die Gesamtlänge sollte aus den meridionalen Einzellängen von Kegel und Zylinder gebildet werden.

Der Kegel muss zusätzlich nach 4.3.6.5.6 unter Verwendung des Sicherheitsbeiwertes S_p aus 4.3.2.4 oder 4.3.3.4 nachgewiesen werden.

Wenn ein höherer Druck als $1,25 p$ festgelegt wurde, muss eine zusätzliche Bewertung erfolgen um sicherzustellen, dass der angenommene Wert für die Werkstoffdicke nicht unter dem liegt, der bei Prüfdruck mit einem Sicherheitsbeiwert von $0,74 S_K$ festgelegt wurde. Für Dicken im Abklingbereich muss ν der für den Innendruck geltende Wert sein.

4.3.6.6 Ebene Böden/Platten

4.3.6.6.1 Symbole

Für die Anwendung von 4.3.6.6 gelten die folgenden Symbole zusätzlich zu den in 3.2:

d_1, d_2 , usw. Durchmesser von Ausschnitten in mm;

D_1, D_2 , usw. Durchmesser von ebenen Böden in mm.

4.3.6.6.2 Anwendungsbereich

Geschweißte oder massive ebene Böden mit

$$(s - c) / D \geq \sqrt[4]{0,0087 p / E}$$

und

$$(s - c) / D \leq 1/3$$

4.3.6.6.3 Ausschnitte

Ausschnitte werden nach 4.3.6.6.4 berechnet, wobei jedoch der Faktor C mit C_A zu multiplizieren ist. C_A ist in Bild 11 angegeben.

4.3.6.6.4 Berechnung

Die geforderte Mindestwanddicke eines kreisförmigen ebenen Bodens beträgt

$$s = CD_1 \sqrt{0,1 p S / K} + c \quad (24)$$

C und D_1 sind Bild 12 zu entnehmen.

Die geforderte Mindestwanddicke einer rechteckigen oder elliptischen Platte beträgt

$$s = CC_E f \sqrt{0,1 p S / K} + c \quad (25)$$

C_E ist Bild 13 zu entnehmen.

4.3.6.7 Ausschnitte in Zylindern, Kugeln und Kegeln

4.3.6.7.1 Symbole und Einheiten

Für die Anwendung von 4.3.6.7 gelten die folgenden Symbole zusätzlich zu den in 3.2:

b	Breite der aufgesetzten, eingesetzten oder rohrförmigen Verstärkung	mm
h	Höhe der scheibenförmigen Verstärkung	mm
l	Steg zwischen zwei Stützen	mm
l'_s	mittragende Stützenlänge	mm
m	innerer Rohrüberstand	mm
s	mittragende Stützenlänge	mm
s_A	geforderte Wanddicke am Ausschnittsrand	mm
s_s	Wanddicke des Stützens	mm
t	hier: Mittenabstand zweier Stützen	mm

4.3.6.7.2 Anwendungsbereich

Runde Ausschnitte und die Verstärkung runder Ausschnitte mit unbegrenztem Durchmesser in Zylinder- und Kugelmänteln in den folgenden Grenzen:

$$0,002 \leq (s - c)/D_a \leq 0,1$$

$$(s - c)/D_a < 0,002 \text{ ist zulässig, wenn } d_i/D_a \leq 1/3 \text{ ist.}$$

Diese Regeln gelten nur für Kegelmäntel, deren Wanddicke aus der Umfangsspannung ermittelt wird.

ANMERKUNG 1 Zusätzliche äußere Kräfte und Momente werden in diesem Abschnitt nicht behandelt und müssen erforderlichenfalls besonders untersucht werden.

ANMERKUNG 2 Diese Bemessungsregeln gestatten plastische Verformungen bis zu 1 % bei Prüfdruck an hochbeanspruchten Stellen. Deshalb sollen die Ausschnitte sehr sorgfältig bemessen werden, und plötzliche Änderungen der Geometrie sind zu vermeiden.

Die Bemessungsregeln für nicht senkrechte Stützen müssen auf denen von senkrechten Stützen beruhen, unter Verwendung der Maße der großen elliptischen Achse oder sie müssen nach EN 13445-3 berechnet werden.

4.3.6.7.3 Formen der Verstärkungen

Ausschnitte dürfen nach einem oder mehreren der folgenden Formen verstärkt werden:

- Vergrößerung der Wanddicke, siehe Bilder 14 und 15;
- eingesetzte ringförmige Verstärkungen, siehe Bilder 16 und 17;
- aufgesetzte Verstärkung, siehe Bild 18;
- Rohrförmige Verstärkung, siehe Bilder 19 und 20;
- Scheiben- und rohrförmige Verstärkung, siehe Bild 21.

Wenn eine scheibenförmige Verstärkung am Innenbehälter eingesetzt wird, muss der Raum zwischen den beiden Kehlnähten in den Vakuumraum entlüftet werden.

4.3.6.7.4 Bemessung von Ausschnitten

Die Kehlnaht an einer scheibenförmigen Verstärkung muss mindestens halb so dick sein wie die Höhe der Verstärkung.

Bei rohrförmigen Verstärkungen muss die tragende Schweißnahtdicke mindestens gleich der erforderlichen Dicke der dünneren angeschlossenen Wandung sein.

Ist der Festigkeitskennwert für die Verstärkung kleiner als der entsprechende Wert für die zu verstärkende Wand, so ist dies bei der Berechnung nach 4.3.6.7.5 zu berücksichtigen. Ist der Festigkeitskennwert für die Verstärkung größer als der für die zu verstärkende Wand, so darf der höhere Festigkeitskennwert nicht berücksichtigt werden.

4.3.6.7.5 Berechnung

Wenn der Festigkeitskennwert K der Verstärkung kleiner als der der Wand ist, so ist bei scheibenförmigen Verstärkungen die Fläche des Verstärkungsquerschnittes und bei rohrförmigen Verstärkungen die Wanddicke des Stutzens im entsprechenden Verhältnis zum Rechnungsgang zu reduzieren. Bei einem Behältermantel, mit volltragend angeschlossenen Rohren, deren Wanddicke nur nach der Innendruck-Formel bemessen ist mit in Reihe angeordneten angeschweißten Stutzen, ist eine Berechnung jeder einzelne geforderten Verstärkung des Stutzens nicht erforderlich.

Es muss jedoch die erforderliche Wanddicke gegen inneren Druck aus dem Wert für v_A nach Formel (34) oder v entnommen werden.

Ausschnitte können auch entsprechend folgender Beziehung verstärkt werden:

$$\frac{p}{10} \left(\frac{A_p}{A_\sigma} + \frac{1}{2} \right) \leq \frac{K}{S} \quad (26)$$

die auf dem Gleichgewicht zwischen der druckbelasteten Fläche A_p und dem tragenden Querschnitt A_σ basiert. Die mit Hilfe dieser Beziehung ermittelte Wanddicke darf nicht kleiner sein als für die Behälterwand ohne Ausschnitte erforderlich ist. Die druckbelastete Fläche A_p und der tragende Querschnitt A_σ , der gleich $A_{\sigma 0} + A_{\sigma 1} + A_{\sigma 2}$ ist, ergeben sich aus den Bildern 22 bis 25.

Die tragende Querschnittsfläche darf sich für Mäntel höchstens bis b nach Formel (28) und für Stutzen höchstens bis l_s nach Formel (30) oder (31) erstrecken.

Bei einem nach innen überstehenden Stutzenteil darf als tragende Querschnittsfläche bis zu einer größten Länge

$$l'_s = 0,5 l_s$$

einbezogen werden.

Die Beschränkungen nach 4.3.6.7.7 und 4.3.6.7.8 sind zu beachten.

Ist der Festigkeitskennwert K_1 , K_2 , usw. der Verstärkung niedriger als der für die Wand, müssen die Maße die Beziehung

$$\left(\frac{K}{S} - \frac{p}{20} \right) A_{\sigma 0} + \left(\frac{K_1}{S} - \frac{p}{20} \right) A_{\sigma 1} + \left(\frac{K_2}{S} - \frac{p}{20} \right) A_{\sigma 2} \geq \frac{p}{10} \cdot A_p \quad (27)$$

erfüllen.

4.3.6.7.6 Scheibenförmige Verstärkung

Ist die tatsächliche Wanddicke des Zylinders oder der Kugel kleiner als die geforderte Dicke s_A am Ausschnitt, dann genügt es, wenn die Wanddicke s_A in einer Breite von

$$b = \sqrt{(D_i + s_A - c)(s_A - c)} \quad (28)$$

mindestens jedoch $3 \times s_A$ um den Ausschnitt vorhanden ist – siehe Bild 16, 17 und 18.

Für Berechnungszwecke muss s_A auf nicht mehr als das Zweifache der tatsächlichen Wanddicke begrenzt werden.

Die Wanddicke der aufgesetzten Verstärkung nach Bild 18 darf nicht größer sein als die tatsächliche Dicke der Wand, auf die die Verstärkung aufgetragen ist.

Von innen aufgesetzte Verstärkung ist nicht zulässig.

Die Breite der aufgesetzten Verstärkung darf auf b_1 verringert werden, wenn die Scheibenhöhe h_1 entsprechend

$$b_1 h_1 \geq b h \quad (29)$$

verringert wird und die oben angegebenen Grenzen eingehalten werden.

4.3.6.7.7 Rohrförmige Verstärkung

Für Berechnungszwecke muss s_s auf nicht mehr als das Zweifache der tatsächlichen Wanddicke begrenzt werden.

Die Stützenwanddicke darf nicht mehr als das Zweifache der tatsächlichen Wanddicke des Behälters sein.

Die Wanddicke s_A am Ausschnitt muss über eine Breite b nach Formel (28) berechnet mindestens gleich $3 s_A$ sein.

Die Grenzen für die Verstärkung am Behälter sind:

— für Zylinder und Kegel $l_s = 1,25 \sqrt{(d_i + s_s - c)(s_s - c)} \quad (30)$

— für Kugeln $l_s = \sqrt{(d_i + s_s - c)(s_s - c)} \quad (31)$

Der Abstand l_s darf auf l_{s1} verringert werden, wenn die Dicke s_s entsprechend

$$l_{s1} s_{s1} \geq l_s s_s \quad (32)$$

auf s_{s1} erhöht wird und die genannten Grenzen sind zu beobachten.

4.3.6.7.8 Verstärkung durch Kombination von scheiben- und rohrförmiger Verstärkung

Scheiben- und rohrförmige Verstärkungen können gemeinsam zur Ausschnittsverstärkung herangezogen werden (Bild 21). Für die Berechnung der Verstärkung sind 4.3.6.7.6 und 4.3.6.7.7 zusammen anzuwenden. Die Erhöhung der Wanddicke kann durch eine aktuelle Erhöhung in der Wanddicke oder durch Zugabe einer Scheibe erreicht werden.

4.3.6.7.9 Mehrfachausschnitte

Mehrfache Ausschnitte gelten als Einzelausschnitte, wenn der Abstand l zwischen zwei benachbarten Ausschnitten nach den Bildern 24 und 26 folgende Beziehung erfüllt:

$$l \geq \sqrt{(D_i + s_A - c)(s_A - c)} \quad (33)$$

Ist l kleiner als nach Formel (33) erforderlich, so muss geprüft werden, ob der zwischen den Ausschnittsrändern verbleibende Restquerschnitt der auf ihn wirkenden Belastung standhält. Die Verstärkung ist ausreichend, wenn die entsprechende Anforderung von Formel (26) bzw. (27), soweit zutreffend, erfüllt ist.

Wenn die angrenzenden Ausschnitte unmittelbar zwischen der Längs- und Umfangsrichtung liegen, muss das Berechnungsverfahren für die Längsrichtung (Bild 24) angewendet werden, aber die druckbeaufschlagten Teile — entsprechend dem einteiligen Behälter ($t \ D_i / 2$) — können um einen Faktor $= 0,5 (1 + \cos 2 \varphi)$ reduziert werden. Winkel φ siehe Bild 25.

Bei in Reihe angeordneten Ausschnitten mit volltragend angeschlossenen Rohren, deren Wanddicke nur nach der Innendruck-Formel bemessen ist, kann als Verschwächungsbeiwert eingesetzt werden:

$$v_A = \frac{(t - d_i)}{t} \quad (34)$$

Bei nicht volltragend angeschlossenen Rohren ist D_a in die Formel (34) einzusetzen.

4.3.7 Berechnungen für Betriebslasten

Ist das Bemessungsmerkmal durch Experiment nachgewiesen worden, so können zusätzliche Berechnungen zu denen in 4.3.6 erforderlich sein, um sicherzustellen, dass die Spannungen durch die Betriebsbelastungen innerhalb der zulässigen Grenzen liegen. Es müssen alle während des Betriebes zu erwartenden Belastungsbedingungen berücksichtigt werden (siehe 4.2.3).

Bei diesen Berechnungen werden statische Belastungen durch statische plus dynamische Belastungen ersetzt.

Die Analyse muss die gesamten strukturellen Unstetigkeiten berücksichtigen, jedoch keine örtlichen Spannungskonzentrationen.

Anhang A liefert die Begriffe und annehmbare Spannungsgrenzen, wenn eine Analyse für elastische Spannungen durchgeführt wurde.

Zulässige Berechnungsverfahren sind z. B.:

- das Finite-Elemente-Verfahren;
- das Differenzengleichungsverfahren;
- das Randelementverfahren;
- anerkannte Lehrbücher, veröffentlichte Berichte, Regeln und Normen.

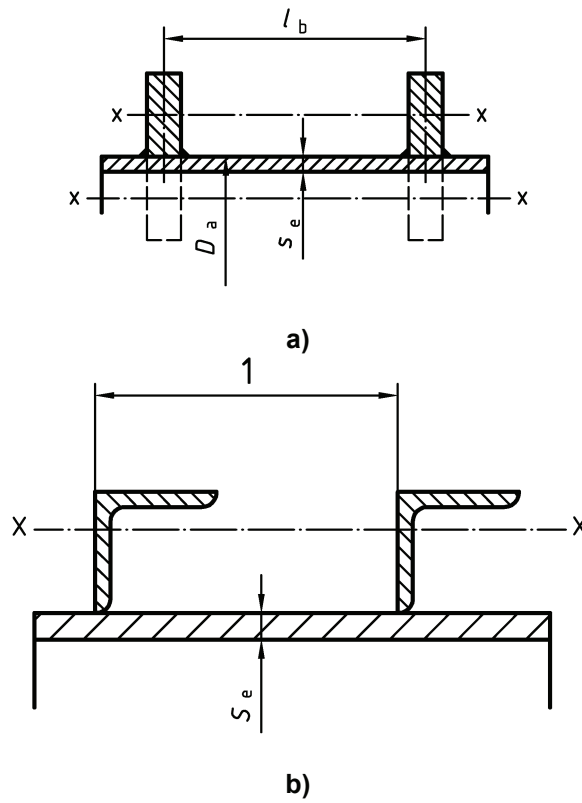


Bild 1 — Rechteckringe als Versteifung

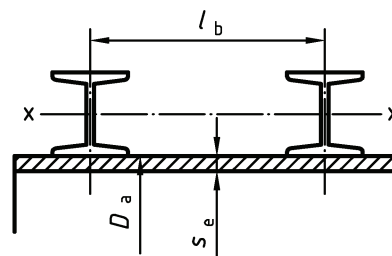


Bild 2 — Profilringe als Versteifung

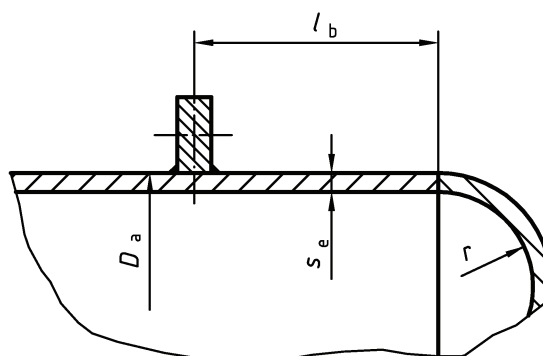


Bild 3 — Gewölbter Boden