

	Kryo-Behälter Große ortsbewegliche, vakuum-isolierte Behälter Teil 2: Bemessung, Herstellung und Prüfung Deutsche Fassung EN 13530-2:2002	DIN EN 13530-2
--	--	--

ICS 23.020.40

Cryogenic vessels — Large transportable vacuum insulated vessels —
Part 2: Design, fabrication, inspection and testing;
German version EN 13530-2:2002

Réipients cryogéniques — Grands réipients transportables isolés sous vide —
Partie 2: Conception, fabrication, contrôles et essais;
Version allemande EN 13530-2:2002

Die Europäische Norm EN 13530-2:2002 hat den Status einer Deutschen Norm.

Beginn der Gültigkeit

Die EN 13530-2:2002 wurde am 29. Mai 2002 angenommen.

Nationales Vorwort

Die vorliegende Europäische Norm EN 13530-2:2002 wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 268 „Kryo-Behälter“ erarbeitet.

Fortsetzung 99 Seiten EN

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

— Leerseite —

Deutsche Fassung

Kryo-Behälter

Große ortsbewegliche, vakuum-isolierte Behälter
Teil 2: Bemessung, Herstellung und Prüfung

Cryogenic vessels - Large transportable vacuum insulated
vessels - Part 2: Design, fabrication, inspection and testing

Réceptifs cryogéniques - Grand réceptifs transportables, isolés
sous vide - Partie 2: Calcul, fabrication, contrôles et essai

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 29. Mai 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, 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	5
3.1 Begriffe	5
3.2 Symbole	6
4 Bemessung	7
4.1 Möglichkeiten für den Nachweis der Bemessung	7
4.2 Allgemeine Anforderungen für die Bemessung	7
4.3 Rechnerischer Nachweis	13
5 Herstellung	55
5.1 Allgemeines	55
5.2 Schneiden	55
5.3 Kaltumformen	55
5.4 Warmumformen	56
5.5 Fertigungstoleranzen	57
5.6 Schweißen	62
5.7 Andere Verbindungen als Schweißverbindungen	63
6 Prüfung	63
6.1 Prüfplan	63
6.2 Probeplatten für die Arbeitsprüfungen	64
6.3 Zerstörungsfreie Prüfungen	65
6.4 Ausbesserung von Fehlern	68
6.5 Druckprüfungen	69
Anhang A (informativ) Elastische Spannungsanalyse	70
Anhang B (normativ) Zusätzliche Anforderungen für 9 %-Nickel-Stähle	80
Anhang C (normativ) Druckverstärkung an Behältern aus austenitischen nicht rostenden Stählen	82
Anhang D (informativ) Besondere Angaben zum Schweißen	93
Anhang E (normativ) Erhöhte Eigenschaften für austenitische nicht rostende Stähle	97
Anhang F (informativ) Schutzeinrichtungen für den Außenmantel	98
Literaturhinweise	99

Vorwort

Dieses Dokument EN 13530-2:2002 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 März 2003 und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis März 2003 zurückgezogen werden.

Diese Europäische Norm wurde zur Bezugnahme ins RID und/oder in die technischen Anhänge des ADR vorgeschlagen. Daher gelten die in diesem Zusammenhang in den normativen Verweisungen aufgeführten Normen, welche Grundanforderungen des ADR/RID umfassen, die in der vorliegenden Norm nicht behandelt wurden, nur dann als normativ, wenn diese Normen selbst im RID und/oder in den technischen Anhängen des ADR in Bezug genommen werden.

EN 13530 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.*

Die Anhänge A, D und F sind informativ, die Anhänge B, C und E sind normativ.

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 großen ortsbeweglichen, vakuum-isolierten Kryo-Behältern mit einem Fassungsraum von mehr als 1000 Liter für festverbundene Tanks (von Tank- oder Schienenfahrzeugen), Aufsetztanks, Tanks von Batterie-Fahrzeugen und Tankcontainern (TC) für tiefgekühlte verflüssigte Gase im Sinne der Regelungen für die Beförderung gefährlicher Güter.

Diese Norm gilt für große ortsbewegliche, vakuum-isolierte Kryo-Behälter mit Fluiden, die in EN 13530-1:2002 festgelegt sind, und sie gilt nicht für giftige Fluide.

Diese Europäische Norm enthält keine allgemeinen Anforderungen an Fahrzeuge wie z. B. an Fahrgestell, Bremsen, Beleuchtung usw., diese müssen mit den relevanten Normen/Gesetzen übereinstimmen.

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 287-1:1992, *Prüfen von Schweißern — Schmelzschweißen — Teil 1: Stähle.*

EN 287-2:1992, *Prüfen von Schweißern — Schmelzschweißen — Teil 2: Aluminium und Aluminiumlegierungen.*

EN 288-1:1992, *Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe — Teil 1: Allgemeine Regeln für das Schmelzschweißen.*

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 288-8:1992, *Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe — Teil 8: Anerkennung durch eine Schweißprüfung vor Fertigungsbeginn.*

EN 473:2000, *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 — Querzugversuch.*

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 °C.*

EN 1252-2:2001, *Cryogenic vessels — Materials — Toughness requirements for temperature between – 80 °C and – 10 °C.*

EN 1418:1997, *Schweißpersonal — Prüfung von Bedienern von Schweißeinrichtungen zum Schmelzschweißen und von Einrichtern für das Widerstandsschweißen für vollmechanisches und automatisches Schweißen von metallischen Werkstoffen.*

EN 1435:1997, *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen — Durchstrahlungsprüfung von Schmelzschweißverbindungen.*

EN 1626:1999, *Tiefkalte Behälter — Ventile für tiefkalten Betrieb.*

EN 1797:2002, *Kryo-Behälter — Verträglichkeit von Gas/Werkstoffen.*

EN 10028-4:1994, *Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen — Teil 4: Nickellegierte kaltzähe Stähle.*

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

EN 12300:1998, *Kryo-Behälter — Reinheit für den tiefkalten Betrieb.*

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

EN 13068-3:2001, *Zerstörungsfreie Prüfung — Radioskopische Prüfung — Teil 3: Allgemeine Grundlagen für die radioskopische Prüfung von metallischen Werkstoffen mit Röntgen- und Gammastrahlen.*

prEN 13445-3:1999, *Unbefeuerte Druckbehälter — Teil 3: Konstruktion.*

EN 13530-1:2002, *Kryo-Behälter — Ortsfeste, vakuum-isolierte Behälter — Teil 1: Grundanforderungen.*

prEN 13648-3:2001, *Kryo-Behälter — Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung — Teil 3: Ermittlung des erforderlichen Ausflusses; Ausflussmassenstrom und Größenbemessung.*

ISO 1106-1:1984, *Empfohlene Praxis für die radiographische Untersuchung schmelzgeschweißter Verbindungen in Stahlplatten bis zu 50 mm Dicke.*

3 Begriffe und Symbole

Für die Anwendung dieser Europäischen Norm gelten die folgenden Begriffe und Symbole.

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieser Europäischen Norm gelten die folgenden Begriffe zusätzlich zu denen in Teil 1.

3.1.1

großer ortsbeweglicher Kryo-Behälter

Behälter mit einem Fassungsraum von mehr als 1 000 l für den Transport für eines oder mehrere tiefkalter Fluide, der aus einem Innenbehälter, einem Außenmantel, allen Armaturen und Ausrüstungsteilen zusammen mit einem zusätzlichen Rahmen (Gestell) besteht

3.1.2

festverbundener Tank (Tankfahrzeug)

großer ortsbeweglicher Behälter, der dauerhaft an einem Fahrzeug oder Fahrgestell befestigt ist oder stattdessen verwendet wird

3.1.3

Aufsetztank

großer ortsbeweglicher Behälter, der nicht dauerhaft an einem Fahrzeug befestigt ist. Wenn er mit einem Transportfahrzeug verbunden ist, erfüllt er die Anforderungen an einen festverbundenen Tank. Er ist so ausgelegt, dass er nur im leeren Zustand angehoben werden kann

3.1.4

Innenbehälter

Behälter, der für die Aufnahme des tiefkalten Fluids vorgesehen ist

3.1.5

Außenmantel

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

3.1.6

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

3.1.7

zulässiger Druck, p_s

maximaler Druck, der unter den normalen Betriebsbedingungen entstehen kann, normalerweise der aus Sicherheitsgründen festgelegte Druck am oberen Teil der Ausrüstung

3.1.8

Entlastungsplatte/-stopfen

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

3.1.9

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

Für die Anwendung dieser Europäischen Norm gelten die folgenden Symbole.

c	Zuschlag für Korrosion	mm
d_i	Innendurchmesser eines Rohres oder Stutzens	mm
d_a	Außendurchmesser eines Rohres oder Stutzens	mm
f	schmale Seite einer rechteckigen oder elliptischen Platte	mm
l_b, l'_b	Beullänge	mm
n	Anzahl	–
p	Berechnungsdruck wie in 4.3.2.2 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	Prüfdruck (siehe 4.2.3.2)	
r	Radius, z. B. innerer Krempenradius eines gewölbten Bodens und von Kegeln	mm
s	erforderliche Wanddicke einschließlich Zuschläge	mm
s_e	ausgeführte Wanddicke	mm
v	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
C, β	Berechnungsbeiwerte	–
D	Durchmesser	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
R_e	scheinbare Streckgrenze oder 0,2 %- Dehngrenze (1%-Dehngrenze für austenitische Stähle)	N/mm ²
R_m	Mindestwert der Zugfestigkeit (tatsächlicher oder garantierter Wert)	N/mm ²
K	Festigkeitskennwert	N/mm ²
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	–
Z	Hilfswert	–
ν	Querkontraktionszahl	–
u	Unrundheit	–

4 Bemessung

4.1 Möglichkeiten für den Nachweis der Bemessung

4.1.1 Allgemeines

Der Nachweis der Bemessung muss nach einer der Möglichkeiten von 4.1.2, 4.1.3 oder 4.1.4 durchgeführt werden.

Metallische Werkstoffe für tiefkalte Temperaturen müssen die Anforderungen in den jeweiligen Abschnitten von EN 1252-1:1998 oder EN 1252-2:2001 erfüllen.

Bei 9 %-Nickel-Stahl müssen die zusätzlichen Anforderungen von Anhang B erfüllt werden.

4.1.2 Rechnerischer Nachweis

Die Berechnung aller druckführenden und lasttragenden Bauteile muss durchgeführt werden. 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 dynamische Belastungen nachzuweisen.

4.1.3 Rechnerischer Nachweis und Druckverstärkung

Die Druckhaltefähigkeit der Innenbehälter, die aus austenitischem rostfreien 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 Festigkeitskennwerte bestätigen. Ein Beispiel wäre die Anwendung von Dehnungsmessstreifen zur Bewertung der Höhe der mechanischen Beanspruchung.

4.2 Allgemeine Anforderungen für die Bemessung

4.2.1 Allgemeines

Die Anforderungen in 4.2.2 bis 4.2.7 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 rostfreien Stahl auf Aluminium);
- 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.

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;
- Maße und zulässiges Gewicht unter Berücksichtigung der Fahrzeugeigenschaften;
- Lage der Befestigungspunkte und Belastungen in diesen Punkten;
- Befüll- und Entnahmeraten;
- Bereich der Umgebungstemperatur, falls von EN 13530-1:2002, 7.2, abweichend.

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, durch Druckverstärkung, welche durch Experiment und aufgrund von Erfahrungen 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.

4.2.3 Bemessungslasten

4.2.3.1 Allgemeines

Der große ortsbewegliche Kryo-Behälter muss sicher den mechanischen, thermischen und chemischen Belastungen, denen er während der Druckprüfung und des bestimmungsgemäßen Gebrauchs ausgesetzt ist, standhalten, wie nachstehend angegeben.

Zur Berücksichtigung der Bemessungslasten während des Transportes müssen die statischen Lasten durch statische plus dynamische Lasten ersetzt werden. Die statischen Lasten müssen wie folgt sein:

- in Fahrtrichtung : $2 \times$ Gesamtmasse;
- rechtwinklig zur Fahrtrichtung : $1 \times$ Gesamtmasse;
- senkrecht von unten nach oben : $1 \times$ Gesamtmasse;
- senkrecht von oben nach unten : $2 \times$ Gesamtmasse.

Jede dieser Lasten wirkt für sich unter Berücksichtigung der Masse der zu betrachtenden Komponenten.

4.2.3.2 Innenbehälter

Es muss davon ausgegangen werden, dass die folgenden Lasten mit Ausnahme von a) in Kombination wirken:

a) Druckprüfung: Der Wert für den Nachweis muss sein:

$$p_T \geq 1,3(p_s + 1) \text{ bar} \quad (1)$$

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

p_s ist der maximal zulässige Druck in bar.

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

Der Innenbehälter muss in der Lage sein, dem Prüfmedium ohne eine plastische Verformung zu widerstehen.

Der Mindest-Prüfdruck muss 3 bar betragen.

b) Druck p_C während des Betriebes, wenn:

$$p_C = p_s + p_L + 1 \text{ bar} \quad (2)$$

darin sind

p_L der Druck, in bar, den der Flüssigkeitsinhalt ausübt, wenn der Behälter bis zu seinem Fassungsvermögen gefüllt wird und jeder der Lasten in 4.2.3.1 ausgesetzt wird mit entweder

- 1) einer Siedeflüssigkeit bei Atmosphärendruck oder

- 2) einer tiefkalte Flüssigkeit bei ausgeglichenem Tripelpunkt oder Fließpunkttemperatur bei Atmosphärendruck.
- c) Reaktionen an den Abstützpunkten des Innenbehälters durch die Masse des Innenbehälters und seines Inhaltes und jeder der Lasten in 4.2.3.1;
- d) Die Belastung, welche 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).
- e) Die Belastung des Innenbehälters an seinen Abstützungspunkten, wenn er sich von der Umgebungs- auf die Betriebstemperatur abkühlt.

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 den Innenbehälter und seinen Inhalt an den Abstützungspunkten im Außenmantel, wenn dieser jeder Belastung nach 4.2.3.1 unterworfen wird;
- d) die Belastung durch die Rohrleitung entsprechend 4.2.3.2 d);
- 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 an den Befestigungspunkten des Außenmantels durch den ortsbeweglichen Kryo-Behälter und seinem Inhalt bei voller Befüllung, wenn er jeder dynamischen Belastung ausgesetzt ist.

4.2.3.4 Selbsttragende Behälter

Bei Fahrzeugen, bei denen der Innenbehälter und möglicherweise der Außenmantel selbsttragend sind, müssen der Innenbehälter und Außenmantel so berechnet werden, dass sie den dadurch entstehenden Beanspruchungen neben anderen auftretenden Beanspruchungen (siehe 4.2.3.2 c) und 4.2.3.3 f)) standhalten können.

4.2.3.5 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.

4.2.3.6 Schwallbleche

Der Innenbehälter muss durch Schwallbleche unterteilt sein, damit die Stabilität und die Begrenzung der dynamischen Belastungen aufgrund der Anforderungen von 4.2.3 gegeben sind, wenn er zu mehr als 80 % seines Fassungsraumes gefüllt oder tatsächlich leer ist. Die Fläche des Schwallbleches muss mindestens 70 % der Querschnittsfläche dieses Behälters betragen.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Begrenzung des Rauminhaltes bis zu 7 500 Liter zwischen den Schwallblechen diesen Anforderungen genügt.

Die Schwallbleche und ihre Befestigungen an der Behälterwand müssen den Belastungen infolge eines Druckes auf die Fläche des Schwallbleches standhalten. Dieser Druck errechnet sich aus der Masse der Flüssigkeit zwischen den Blechen infolge einer Beschleunigung mit $2 g$ (4.2.3).

4.2.3.7 Abstützungen des Außenmantels

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

4.2.3.8 Befestigungspunkte

Die Befestigungspunkte müssen zum Befestigen des großen ortsbeweglichen Kryo-Behälters am Fahrzeug geeignet sein, wenn er jeder dynamischen Belastung nach 4.2.3 ausgesetzt ist.

4.2.3.9 Schutz der Einrichtungen an der Oberseite

Die Einrichtungen und Ausrüstungsteile auf der Oberseite des Behälters müssen gegen Beschädigung bei einem eventuellen Überrollen geschützt sein. Dieser Schutz kann aus Verstärkungsreifen, Schutzkappen oder Teilen eines quer oder längs angeordneten Profils bestehen, die einen wirksamen Schutz bieten.

4.2.3.10 Stabilität

Die Breite über alles der Aufstandsfläche am Boden (Entfernung zwischen den äußeren Berührungspunkten des rechten und des linken Reifens einer Achse mit dem Boden) muss mindestens 90 % der Höhe des Schwerpunktes des beladenen Tankfahrzeuges betragen. Bei Sattelkraftfahrzeugen darf die höchstzulässige Achslast des Sattelanhängers 60 % der zulässigen Gesamtmasse des Sattelkraftfahrzeuges nicht übersteigen.

4.2.3.11 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: mindestens gleich dem zulässigen Arbeitsdruck p_S plus 1 bar für die Rohrleitungen innerhalb des Vakuummantels;
- b) Druck im Betrieb: mindestens gleich dem an der Druckentlastungseinrichtung des Systems eingestellten Druck;
- c) die thermischen Belastungen nach 4.2.3.2 d);
- d) dynamische Belastungen;
- e) Einstelldruck der Entlastungseinrichtungen, soweit vorhanden;
- f) die Belastungen, die durch das Ausströmen bei der Druckentlastung entstehen.

Die Ausrüstungsteile müssen so geschützt und angebracht sein, dass sie während des Transportes gegen Losreißen gesichert sind.

Bei flüssigem Wasserstoff ist insbesondere die Möglichkeit der Luftkondensierung an unisolierten kalten Teilen zu berücksichtigen.

Die Dichtheit der Bedienungsausrüstung muss auch beim Umkippen des Tankfahrzeuges gewährleistet sein. Die Dichtungen müssen aus einem Werkstoff nach EN 1797:2000 sein, der sich mit dem beförderten Gut verträgt.

Jeder Tank mit Untenbefüllung oder -entleerung muss mit zwei hintereinander liegenden, voneinander unabhängigen Verschlüssen versehen sein, wobei der erste aus einer mit dem Außenmantel verbundenen äußeren Absperreinrichtung versehen sein darf, wenn diese durch einen Schutz, der mindestens dieselbe Sicherheit wie der Außenmantel bietet, gesichert ist.

Bei flüssigen brennbaren Gasen muss der erste Verschluss mit einer schnellschließenden Absperreinrichtung versehen sein, die bei einer ungewollten Bewegung des Fahrzeuges oder bei einem Brand automatisch schließt. Das Schließen dieser Einrichtung muss auch aus sicherer Entfernung ausgelöst werden können. Alle Entlüftungsleitungen einschließlich der angeschlossenen Druckentlastungseinrichtungen und Abblaseventile ermöglichen ein sicheres Entleeren. Das Gehäuse mit den Überwachungseinrichtungen muss belüftet werden, sodass sich keine brennbaren Gase ansammeln können.

4.2.4 Ermüdung

Die Bemessung muss die Wechselbeanspruchungen des Innenbehälters, des Außenmantels und deren Zubehörteile während der normalen Betriebsdauer berücksichtigen.

Bei Betrachtung für den Fall der Ermüdung ist die Dimensionierung der Belastungen nach 4.2.3 so auszuführen, dass sie deren Einflüssen angepasst wird. Es kann notwendig sein, besondere Einzelheiten für die Abstützungen und Rohrleitungssysteme festzulegen, um somit Spannungserhöhungen vorzubeugen.

4.2.5 Korrosionszuschlag

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.

4.2.6 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.

4.2.7 Druckentlastung

Die Systeme müssen so bemessen sein, dass sie den Anforderungen in 4.2.7.1 bis 4.2.7.3 genügen.

4.2.7.1 Innenbehälter

Der Innenbehälter muss mit mindestens zwei Druckentlastungseinrichtungen ausgerüstet sein, von denen mindestens eine ein Abblaseventil ist. Die Einrichtungen dürfen in üblicher Weise angebracht werden.

Eine Einrichtung muss den Behälter gegen Überdruck infolge einer normalen Wärmeeinströmung schützen. Die Einrichtungen zusammen müssen den Behälter gegen Überdruck infolge

- a) einer Wärmeeinströmung bei Vakuumverlust oder
- b) einer Wärmeeinströmung ohne Vakuumverlust bei geöffneter Stellung des Druckaufbausystems schützen.

Überdruck bedeutet einen Druck von mehr als 110 % des höchstzulässigen Arbeitsdruckes für die Bedingung a) und einen Druck größer als der Prüfdruck für die Bedingung b) oder einen Druck größer als der Prüfdruck minus 1 bar für die Bedingung c).

Zur Berechnung der Auslegung der Druckentlastungseinrichtungen für den Innenbehälter müssen diese Einrichtungen mit prEN 13648-3:2001 übereinstimmen.

Das Druckentlastungssystem muss so dimensioniert sein, dass der Druckabfall während des Ausströmens nicht bewirkt, dass das Ventil sofort wieder schließt.

4.2.7.2 Außenmantel

Die Druckentlastungsarmaturen am Außenmantel müssen Anhang F entsprechen.

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.

4.2.7.3 Rohrleitungen

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

4.2.8 Absperrarmaturen

Die Absperrarmaturen müssen EN 1626:1999 entsprechen.

4.2.9 Isolierung

Für Sauerstoff oder Gase mit einer Siedetemperatur unter -182°C bei Atmosphärendruck müssen alle Werkstoffe (einschließlich der wärmeisolierenden Schutzeinrichtung) im Zwischenraum von Innenbehälter und Außenmantel EN 1797:2001 entsprechen, da Sauerstoffanreicherung eintreten kann.

4.2.10 Füllfaktor

Bei Tanks für brennbare Gase muss der Füllungsgrad so bemessen sein, dass bei Erwärmung des Inhalts auf die Temperatur, bei der der Dampfdruck dem Öffnungsdruck der Sicherheitsventile gleichkommt, das Volumen der Flüssigkeit 95 % des Fassungsraumes des Tanks bei dieser Temperatur nicht überschreitet. Große ortsbewegliche vakuum-isolierte Behälter für nicht-brennbare Gase dürfen bei Fülltemperatur und Fülldruck zu 98 % gefüllt werden. Es müssen Maßnahmen vorgesehen werden, die sicherstellen, dass die Grenzwerte nicht überschritten werden.

4.2.11 Elektrische Leitfähigkeit

Alle metallischen Teile eines großen ortsbeweglichen vakuum isolierten Behälters für brennbare Gase müssen elektrisch miteinander verbunden sein. Der große ortsbewegliche Behälter muss eine Erdungseinrichtung haben, deren Erdungswiderstand weniger als 5 Ohm beträgt. Alle metallischen Kontakte, die zu einer elektro-chemischen Korrosion führen, müssen vermieden werden.

4.3 Rechnerischer Nachweis

4.3.1 Allgemeines

Die Wanddicken des Innenbehälters und des Außenmantels müssen mindestens gleich denen sein, die nach diesem Abschnitt bestimmt wurden.

4.3.2 Innenbehälter

4.3.2.1 Allgemeines

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

Die tatsächliche Wanddicke darf nicht kleiner sein als in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 — Mindestwanddicke des Innenbehälters

Innenbehälter Durchmesser D , in Millimeter	Mindestwanddicke s_0 in Millimeter für Referenzstahl ^a
$D \leq 1\,800$	3
$1\,800 < D$	4

^a Bezugsstahl ist ein Werkstoff mit einem Produkt $R_m \times A_5$ von 10 000.
Für andere Werkstoffe ist die Mindestdicke nach folgender Formel zu berechnen:

$$s = \frac{464 \times s_0}{\sqrt[3]{(R_m \times A_5)^2}}$$

darin sind

R_m die Zugfestigkeit des gewählten Werkstoffes, in Newton pro Quadratmillimeter; bei einer Umgebungstemperatur, die nicht tiefer ist als die Temperatur bei Sättigung des Fluides bei dem Druck P_s ,

A_5 die Bruchdehnung des gewählten Werkstoffes, in Prozent, bei gleicher Temperatur.

Die Mindestwanddicke darf jedoch nicht geringer sein als jene, die in 6.8 der technischen Anhänge des ADR festgelegt ist, wenn andere Werkstoffe verwendet werden.

Unter diesen Bedingungen kann die äquivalente Bezugs-Dicke des Stahls für den Innenbehälter wie folgt bestimmt werden:

$$s = s_e \frac{\sqrt[3]{(R_m \times A_5)^2}}{464} \quad (3)$$

darin bedeutet

s_e die tatsächliche Wanddicke des Innenbehälters.

Die Werte für R_m und A_5 bei einer Temperatur, die nicht unter der verbliebenen Temperatur des Fluides bei einem Druck p_s liegen, müssen nach der jeweiligen Werkstoffnorm bestimmt oder vom Werkstoffhersteller garantiert werden.

4.3.2.2 Berechnungsdruck p

Der Berechnungsinnendruck p muss größer als p_T sein, wie in 4.2.3.2 a) definiert, oder p_G , wie in 4.2.3.2.b) definiert, korrigiert auf Betriebsbedingungen,

$$\left(\text{wie z. B. } \times \frac{K_{20}}{K_T} \right)$$

um die Kälteigenschaften des verwendeten Werkstoffes zu berücksichtigen. Daraus folgt, dass K_{20} in der folgenden Formel angewendet werden muss, worin p als Bemessungsdruck angegeben ist.

Der Innenbehälter muss für einen Außendruck bemessen sein, der dem Ansprechdruck der Druckentlastungseinrichtung des Außenmantels entspricht.

4.3.2.3 Festigkeitskennwert K

4.3.2.3.1 Allgemeines

Der bei den Berechnungen zu verwendende Festigkeitskennwert K muss

— für austenitischen nicht rostenden Stahl und Aluminium, R_e = die 1 %-Dehngrenze sein;



— für Kohlenstoffstähle, Aluminium und Aluminiumlegierungen, R_e = Streckgrenze und, wenn nicht vorhanden, die 0,2 %-Dehngrenze sein.

Für Kohlenstoffstähle darf der obere Wert der Streckgrenze angewendet werden.

Zur Berechnung muss der Festigkeitskennwert K für den Innenbehälter 2/3 von R_m sein.

4.3.2.3.2 K_{20}

R_e und R_m müssen die aus der Werkstoffnorm entnommenen Mindestwerte bei 20 °C sein (siehe Anhang E).

Für die Konstruktion von geschweißten Tanks dürfen Werte, die das Verhältnis R_e/R_m 0,85 überschreiten, nicht angewendet werden. Zur Bestimmung dieses Verhältnisses R_e/R_m 0,85 müssen die Mindestwerte für R_e und R_m aus der Werkstoff-Festlegung entnommen werden.

4.3.2.3.3 K_t

Die zulässigen Werte von R_e und R_m müssen für den Werkstoff bei Betriebstemperatur bestimmt werden, die der Sättigungstemperatur – bei dem höchstzulässigen Behälterdruck – des eingefüllten tiefkalten Mediums bei dem Druck p_s entspricht. Die Werte für R_e , R_m und E müssen durch die Werkstoff-Norm (siehe EN 10028-7, Anhang F für austenitische nicht rostende Stähle) bestimmt oder müssen vom Werkstoffhersteller garantiert werden.

4.3.2.3.4 Versprödung

Der Werkstoff darf bei seiner Mindest-Betriebstemperatur keinem Versprödungsbruch ausgesetzt werden, siehe EN 1251-1:1998 und EN 1252-2:2000.

4.3.2.3.5 Bruchdehnung

Die Bruchdehnung in % für Stahl darf nicht weniger sein als $\frac{10\,000}{\text{ermittelte Zugfestigkeit in N/mm}^2}$ bei 20 °C (4)

und darf bei Feinkornstählen nicht weniger als 16 % und bei anderen Stählen nicht weniger als 20 % betragen. Bei Aluminiumlegierungen darf die Bruchdehnung nicht weniger als 12 % betragen.

Bruchdehnung und ermittelte Zugfestigkeit sind als tatsächliche Werte in der Werkstoffbescheinigung enthalten.

4.3.2.4 Sicherheitsbeiwerte S , S_p und S_k

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

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

$$S = 1,33$$

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

— Zylindermantel $S_p = 1,4$

$$— S_k = 2,6$$

— Kugelbereich $S_p = 2,1$

$$— S_k = 2,6 + 0,0018 R/s_e$$

— Krempenbereich $S_p = 1,6$

4.3.2.5 Schweißnahtfaktoren ν

In allen Fällen muss $\nu = 1$ angewendet werden, die schließt Umfangsnähte mit dauerhaften Unterlegstreifen und Sickenähte ein.

4.3.2.6 Korrosionszuschläge c

$c = 0$

Korrosionszuschläge sind nicht erforderlich.

4.3.3 Außenmantel

4.3.3.1 Allgemeines

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

Die Mindestdicke für den Bezugsstahl ist nach folgender Formel zu berechnen:

$$s = s_e \frac{\sqrt[3]{(R_m \times A_5)^2}}{464} \quad (5)$$

Dabei ist

s_e die tatsächliche Wanddicke des Außenmantels;

R_m Mindestzugfestigkeit in N/mm²;

A_5 Bruchdehnung in % bei 20 °C.

Die Mindestdicke für den Bezugsstahl des Außenmantels und des Innenbehälters darf nicht weniger als 5 mm betragen, wenn der Durchmesser des Innenbehälters nicht mehr als 1 800 mm ist, und dürfen nicht weniger als 6 mm betragen, wenn dieser über 1 800 mm ist.

4.3.3.2 Berechnungsdruck p

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

Der Berechnungsdruck gegen Außendruck muss gleich 1 bar sein.

4.3.3.3 K_{20}

Siehe 4.3.2.3.2.

4.3.3.4 Sicherheitsbeiwerte S , S_p und S_k im Verhältnis zu R_e

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

$$S = 1,1$$

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

— Zylindermantel $S_p = 1,1$

— $S_k = 2,0$

- Kugelbereich $S_p = 1,6$
 - $S_k = 2,0 + 0,0014 R / (s_{e.... c})$
- 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 Korrosionszuschläge c

Austenitischer nicht rostender Stahl $c = 0$

Aluminiumlegierungen $c = 0$

Kohlenstoffstahl $c = 1,0 \text{ mm}$

ANMERKUNG c kann auf 0 reduziert werden, wenn die äußere Oberfläche in geeigneter Weise korrosionsgeschützt ist.

4.3.4 Zubehör

Für das am Innenbehälter anzubringende Zubehör darf die Belastung nicht den niedrigeren Wert von $0,75R_e$ oder $0,5R_m$ übersteigen. Anderes Zubehör im Mantel muss für die in 4.2.3.1 festgelegten Belastungen – unter Anwendung anerkannter Auslegungsverfahren und eines Sicherheitsbeiwertes von höchstens $0,75R_e$ – ausgelegt sein. Siehe auch Anhang A.

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 bei einer Temperatur, die niedriger als die bei dem Druck p_s verbleibende Temperatur.

4.3.5 Rohrleitungen

Die Rohrleitungen müssen für die in 4.2.3.11 definierten Belastungen bemessen werden, wobei bewährte Bemessungsverfahren und Sicherheitsfaktoren zu benutzen sind.

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

$$s = \frac{D_a p}{20 \frac{K_{20}}{S} v + p} + c \quad (6)$$

— für Kugelschalen

$$s = \frac{D_a p}{40 \frac{K_{20}}{S} v + p} + c \quad (7)$$

4.3.6.2 Zylinderschalen unter äußerem Überdruck (Druck auf die konvex gewölbte 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 maximale Länge des Körpers zwischen den verstärkten Zylinderschalen (siehe Bild 2).

ANMERKUNG 2 Für Behälter mit gewölbten Böden beginnt die Beullänge am Übergang des Zylinders in den Bereich des gewölbten Bodens (siehe Bild 1).

4.3.6.2.4 Elastisches Einbeulen

Die Berechnungen werden mit Hilfe der nachstehenden Formel durchgeführt:

$$p_e = E / S_k \left\{ \frac{20}{(n^2 - 1) \times [1 + (n / Z)^2]^2} \times \frac{s - c}{D_a} + \frac{80}{12 \times (1 - \nu^2)} \times \left[n^2 - 1 + \frac{2n^2 - 1 - \nu}{1 + (n / Z)^2} \right] \times \left[\frac{s - c}{D_a} \right]^3 \right\} \quad (8)$$

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:

$$n = 1,63 \sqrt[4]{D_a^3 / [l_b^2 (s - c)]} \quad (9)$$

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

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

4.3.6.2.5 Plastische Beulen

Für $D_a/l_b \geq 5$ gilt

$$p_p = \frac{20K}{S_p} \times \frac{s-c}{D_a} \times \frac{1}{1 + \frac{1,5u(1-0,2 D_a/l_b) D_a}{100(s-c)}} \quad (11)$$

Für $D_a/l_b > 5$ muss der höhere der sich aus den Gleichungen (12) und (13) ergebenden Drücke mindestens gleich dem äußeren Berechnungsdruck sein.

$$p_p = \frac{20K}{S_p} \frac{(s-c)}{D_a} \quad (12)$$

$$p_p = \frac{30K}{S_p} \times \left(\frac{s-c}{l_b} \right)^2 \quad (13)$$

4.3.6.2.6 Versteifungsringe

Außer den Böden dürfen die in Bild 3 dargestellten Profile als effektive Verstärkungselemente angesehen werden. Die Verstärkungselemente einschliesslich der an Schale angeschweißten Versteifungsringe und der Anteil L müssen den folgenden Bedingungen genügen:

$$I \geq 0,042 S_k \frac{p D_a^3 l'_b}{10E} \quad (14)$$

Aufgrund ausreichender Erfahrung ist ein Sicherheitsbeiwert S_k von größer gleich 1,3 annehmbar.

$$A \geq 0,5 S_p \frac{p D_a l'_b}{10K} \quad (15)$$

Das Trägheitsmoment I ist auf die neutrale Achse des Querschnitts der Versteifungsringe parallel zur Mantelachse bezogen (siehe Achse $x - x$ in Bild 3).

Versteifungen mit rechteckigem Querschnitt und I-Profil-, T-Profil-, H-Profil- oder U-Profil-Versteifungen müssen die Bedingungen von Bild 3 erfüllen.

Die Versteifungsringe müssen den Behälter vollständig umschließen und sicher angebracht sein.

Wenn Versteifungsringe durch unterbrochene Schweißnähte an den Mantel angeschweißt sind, müssen die Kehlnähte auf jeder Seite mindestens ein Drittel des Mantelumfangs überdecken, (siehe Bild 1) und muss die Anzahl der Schweißnahtunterbrechungen mindestens $2n$ betragen. Die Anzahl n der Einbeulungen ergibt sich nach 4.3.6.2.4.

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

Kugelschalen, die einem äußeren Überdruck unterworfen sind, müssen nach 4.3.6.2.4 bewertet werden.

4.3.6.4 Gewölbte Böden unter innerem oder 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 $2 : 1 \quad R = 0,8 D_a$ 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 Berechnung bei innerem Überdruck (Druck auf die konkav gewölbte Oberfläche)

4.3.6.4.2.1 Dicke der Kalotte und der Halbkugel

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

Ausschnitte im Scheitelbereich von $0,6 D_a$ torisphärischer Böden 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.

4.3.6.4.2.2 Wanddicke von torisphärischen Böden und Dicke des Halbkugelanschlusses

Die geforderte Wanddicke von Krempen und Halbkugelanschlüssen muss sein:

— für Innenbehälter:

$$s = \frac{D_a p \beta}{40 \frac{K_{20}}{S} v} \quad (16)$$

— für Außenmantel:

$$s = \frac{D_a p \beta}{40 \frac{K}{S} v} + c \quad (17)$$

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

Bei Vollböden in Halbkugelform muss ein β -Wert unabhängig vom Verhältnis $(s - c)/D_a$ von 1,1 innerhalb des Abstands x der Tangente des Bodens an den Zylinder benutzt werden, hier gilt:

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

D_a ist der Durchmesser des zylindrischen Bords nach den Bildern 4a) und 4b).

Befinden sich Ausschnitte außerhalb des Bereichs von $0,6 D_a$, so gelten die niedrigeren Kurven aus den Bildern 5 und 6.

Befinden sich Ausschnitte außerhalb des Bereichs von $0,6 D_a$, so wird die erforderliche Dicke den Bildern 5 und 6 entnommen unter Berücksichtigung der Kurve für den relevanten Wert von d_i/D_a .

4.3.6.4.2.3 Wird ein gewölbter Boden aus Kalotten- und Halbkugelkomponenten zusammengeschweißt, muss die Naht in einem ausreichenden Abstand vom Krempenrand 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:

$$x = 0,5 \sqrt{R(s - c)} \quad (18)$$

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 Scheitelpunktbereich von $0,6 D_a$ liegen, siehe Bilder 4 e) und 4 f).

4.3.6.4.2.4 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, siehe auch 4.3.6.7.10.

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

Elastisches Einbeulen

Der Widerstand gegen elastisches Beulen ist ausreichend, wenn:

$$p \leq 3,66 \frac{E}{S_k} \left(\frac{s-c}{R} \right)^2 \quad (19)$$

Plastisches Beulen

Der Widerstand gegen plastisches Beulen wird nach 4.3.6.4.2 mit dem entsprechenden Sicherheitsbeiwert S_p nach 4.3.2.4 und 4.3.3.4 ermittelt.

4.3.6.5 Kegelförmige Mäntel unter innerem und äußerem Überdruck

4.3.6.5.1 Symbole und Einheiten

Für die Anwendung von 4.3.6.5 gelten die folgenden Symbole und Einheiten zusätzlich zu denen in 3.2.

A	Fläche des Versteifungsringes	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_i	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 4.3.6.5.5)	mm
φ	Kegelöffnungswinkel	—
d_i	Durchmesser der Ausschnittsöffnung	mm
r	Krempenradius	mm

4.3.6.5.2 Anwendungsbereich

Kegel nach Bild 7 mit

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

und

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

Kleine Böden mit Krempe, die durch Eckstoß verbunden sind, können hiernach beurteilt werden.

Für den äußeren Überdruck gilt $|\varphi| \leq 70^\circ$.

Andere 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

$$D_i = \frac{D_s + d_i |\sin \varphi|}{\cos \varphi} \quad (20)$$

Bei $|\varphi| \geq 70^\circ$ ist nach 4.3.6.6 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 7.

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, x_3 definiert, die aus folgenden Gleichungen berechnet werden können:

$$x_1 = \sqrt{D_{a1} (s_1 - c)} \quad (21)$$

$$x_2 = 0,7 \sqrt{D_{a1} (s_1 - c) / \cos \varphi} \quad (22)$$

$$x_3 = 0,5 x_1 \quad (23)$$

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

a) Innerhalb des Abklingbereichs

Unter Verwendung der Variablen

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

aus den Bildern 10.1 bis 10.7 für den großen Kegelmantel/-Boden und Bild 10.8 für den kleinen Kegelmantel/-Boden wird die geforderte Wanddicke (s_1) berechnet.

Für eine Eckstoßverbindung ist die Kurve für $\frac{r}{D_{a1}} = 0$ 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 folgt sein:

b) Außerhalb des Abklingbereichs

Die geforderte Wanddicke s_g außerhalb des Abklingbereichs wird berechnet nach:

$$s_g = \frac{D_k p}{20 \frac{K}{S} v - p} \times \frac{1}{\cos \varphi} + c \quad (24)$$

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 D_k der größte Durchmesser des Kegels, bei dem die Wanddicke gleich s_g ist.

4.3.6.5.6 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

$$s_1 = s_g = 0,3 (D_{a1} - r) \times \frac{|\varphi|}{90} \times \sqrt{\frac{p}{10 (K / S) v}} + c \quad (25)$$

4.3.6.5.7 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

$$D_a = \frac{D_{a1} + D_{a2}}{2 \cos |\varphi|} \quad (26)$$

und für die Länge des äquivalenten Zylinders gilt

$$l = \frac{D_{a1} + D_{a2}}{2 \sin |\varphi|} \quad (27)$$

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 Versteifung angesehen werden.

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

$$l \geq 0,0104 S_k \frac{p(D_{a1})^4}{10E} \tan|\varphi| \quad (28)$$

$$A \geq 0,125 S_p \frac{p(D_{a1})^2}{10K} \tan|\varphi| \quad (29)$$

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

S_p 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 $0,5 \sqrt{D_{a1} s l}$ 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 4.3.6.5.7 unter Verwendung des um 20 % erhöhten Sicherheitsbeiwertes S_p aus 4.3.2.4 oder 4.3.3.4 nachgewiesen werden. 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 , Durchmesser von ebenen Böden, in mm, wie in Bild 12 angegeben.

4.3.6.6.2 Anwendungsbereich

Geschweißte oder massive ebene Böden mit einer Poissonzahl von ungefähr 0,3 und

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

und

$$3 \frac{(s_e - c)}{D_1} \leq 1$$

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

$$s = C D_1 \sqrt{0,1 p S / K} + c \quad (30)$$

C und D_1 sind Bild 12 zu entnehmen.

Die geforderte Mindestwanddicke einer rechteckigen oder elliptischen Platte beträgt

$$s = C C_E f \sqrt{0,1 p S / K} + c \quad (31)$$

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
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 prEN 13445-3:1999 berechnet werden.

4.3.6.7.3 Formen der Verstärkungen

Ausschnitte dürfen nach einem oder mehreren der folgenden Verfahren 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 und des Stutzens, so ist die Verstärkung im Verhältnis zu den Festigkeitskennwerten zu reduzieren. In dem Fall, bei dem der Körper nur einem Innendruck ausgesetzt ist und bei dem in Reihe angeordneten Stutzen mit voll durchgeschweißten Nähten am Körper befestigt sind, ist eine Berechnung jeder einzelnen Verstärkung nicht erforderlich. Zur Berechnung der Wanddicke des Körpers für den Innendruck muss der Wert für den Verschwächungsfaktor entweder v_A aus Gleichung (34) oder v sein.

Ausschnitte können auch entsprechend folgender Beziehung verstärkt werden:

$$\frac{p}{10} \left(\frac{A_p}{A_\sigma} + \frac{1}{2} \right) \leq \frac{K}{S} \quad (32)$$

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 (35) und für Stutzen höchstens bis l_s nach Formel (37) oder (38) erstrecken.

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

$$l'_s = 0,5 l_s \quad (33)$$

einbezogen werden.

Die Beschränkungen nach 4.3.6.7.6 und 4.3.6.7.7 sind zu beachten.

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

$$\left(\frac{K}{S} - \frac{p}{20} \right) A_{\sigma 0} + \left(\frac{K_1}{S} - \frac{p}{20} \right) A_{\sigma 1} + \left(\frac{K_2}{S} - \frac{p}{20} \right) A_{\sigma 2} \geq \frac{p}{10} \cdot A_p \quad (34)$$

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

$$b = \sqrt{(D_i + s_A - c)(s_A - c)} \quad (35)$$

mindestens jedoch $3 \times s_A$ (siehe Bilder 16, 17 und 18).

Für Berechnungszwecke muss s_A auf höchstens das Zweifache der tatsächlichen Wanddicke begrenzt sein.

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

$$b_1 h_1 \geq b h \quad (36)$$

verringert wird und die oben angegebenen Grenzen eingehalten werden.

4.3.6.7.7 Rohrförmige Verstärkung

Für die Berechnungszwecke darf s_s nicht mehr als 2-mal der tatsächliche Wanddicke s_A sein.

Die Stützenwanddicke darf nicht mehr als 2-mal der tatsächliche Wanddicke s_A sein.

Die Wanddicke s_A am Ausschnitt muss über eine Breite b nach Formel (35) berechnet mindestens gleich $3 s_A$ sein.

Die Grenzen für die Verstärkung am Behälter sind:

$$\text{– für Zylinder und Kegel} \quad l_s = 1,25 \sqrt{(d_i + s_s - c) (s_s - c)} \quad (37)$$

$$\text{– für Kugeln} \quad l_s = \sqrt{(d_i + s_s - c) (s_s - c)} \quad (38)$$

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

$$l_{s1} s_{s1} \geq l_s s_s \quad (39)$$

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 Verstärkung der Wanddicke kann durch eine aktuelle Erhöhung in der Wanddicke oder durch Zugabe einer Scheibe erreicht werden.

4.3.6.7.9 Mehrfachausschnitte

Siehe auch 4.3.6.4.2.4.

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

$$l \geq \sqrt{(D_i + s_A - c) (s_A - c)} \quad (40)$$

Ist l kleiner als nach Formel (40) 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 (32) bzw. (34), 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 $\left(\frac{tD_1}{2}\right)$ 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:

$$v_A = \frac{(t - d_i)}{t} \quad (41)$$

Bei nicht volltragend angeschlossenen Rohren ist D_A in die Formel (41) 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 müssen statische Belastungen durch statische plus dynamische Belastungen ersetzt werden.

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:

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

Geplante und überwachte Experimente dürfen zur Bestätigung der Berechnung angewendet werden, beispielsweise Lehren zur Feststellung der Spannung.

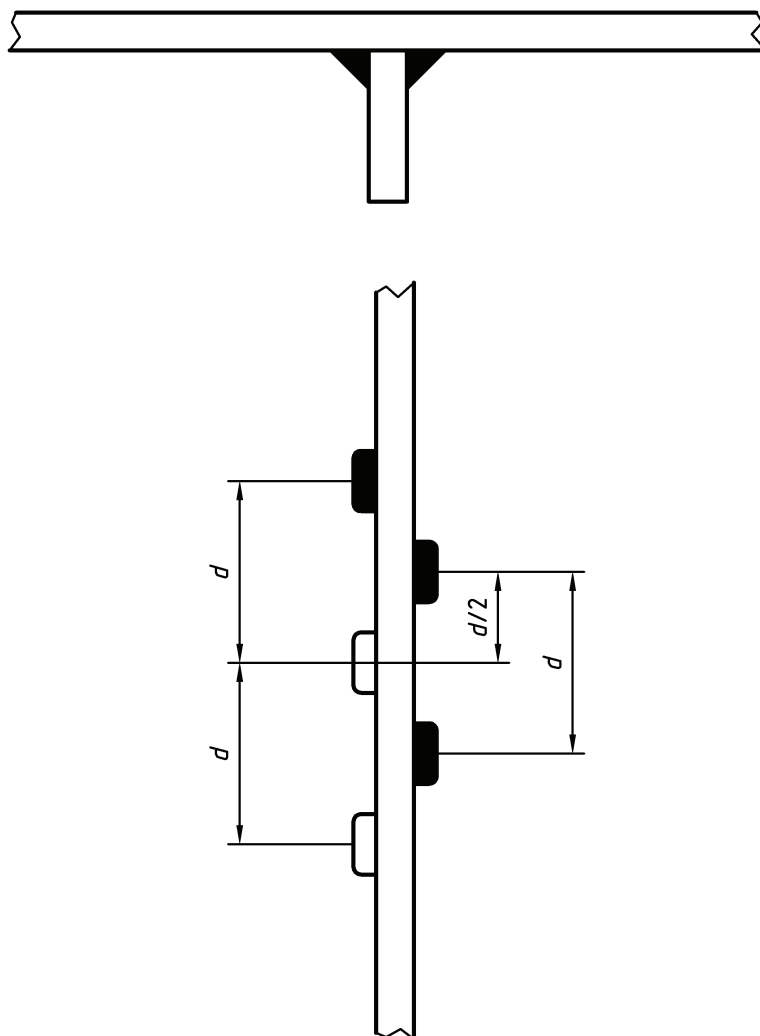


Bild 1 — Beispiele für die Verbindung von Versteifungsringen am Behälterkörper