

DIN EN 1999-1-5

ICS 91.010.30; 91.080.17

Ersatz für
DIN EN 1999-1-5:2010-05**Eurocode 9 –
Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken –
Teil 1-5: Schalentragwerke;
Deutsche Fassung EN 1999-1-5:2007 + AC:2009**

Eurocode 9 –
Design of aluminium structures –
Part 1-5: Shell structures;
German version EN 1999-1-5:2007 + AC:2009

Eurocode 9 –
Calcul des structures en aluminium –
Partie 1-5: Coques;
Version allemande EN 1999-1-5:2007 + AC:2009

Gesamtumfang 79 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

DIN EN 1999-1-5:2017-03

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 1999-1-5:2007 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Gremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-08-07 AA „Aluminiumkonstruktionen (SpA zu CEN/TC 250/SC 9 und CEN/TC 135)“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

In dieser Neuausgabe wurde ausschließlich die deutsche Sprachfassung geändert. Anfang und Ende der durch die Änderung eingefügten oder geänderten Texte sind jeweils durch Änderungsmarken **A11** **A11** angegeben, um eine Abgrenzung zu evtl. möglichen europäischen Änderungen zu erreichen.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 1999-1-5:2010-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) sprachliche Verbesserung der Übersetzung.

Frühere Ausgaben

DIN EN 1999-1-5: 2010-05

EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE

EN 1999-1-5
Februar 2007
+AC
November 2009

ICS 13.220.50; 91.010.30; 91.080.10

Deutsche Fassung

**Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von
Aluminiumtragwerken —
Teil 1-5: Schalentragwerke**

Eurocode 9: Design of aluminium structures —
Part 1-5: Shell structures

Eurocode 9: Calcul des structures en aluminium —
Partie 1-5: Coques

Diese Europäische Norm wurde von CEN am 11. Oktober 2006 angenommen.

Die Berichtigung AC wurde vom CEN am 4. November 2009 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, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



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

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

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
1 Allgemeines	8
1.1 Anwendungsbereich	8
1.1.1 Anwendungsbereich von EN 1999	8
1.1.2 Anwendungsbereich von EN 1999-1-5	8
1.2 Normative Verweisungen	10
1.3 Begriffe	11
1.3.1 Formen und Geometrie des Tragwerks	11
1.3.2 Spezielle Definitionen für Beulberechnungen	12
1.4 Formelzeichen	13
1.5 Vorzeichenvereinbarungen	17
1.6 Koordinatensysteme	17
2 Grundlagen für Entwurf, Berechnung und Bemessung	18
2.1 Allgemeines	18
2.2 Zuverlässigkeitsklasse und Ausführungsklasse	19
3 Werkstoffe und Geometrie	19
3.1 Werkstoffeigenschaften	19
3.2 Bemessungswerte für geometrische Daten	19
3.3 Geometrische Toleranzen und geometrische Imperfektionen	20
4 Dauerhaftigkeit	20
5 Tragwerksberechnung	20
5.1 Geometrie	20
5.2 Randbedingungen	21
5.3 Einwirkungen und Einflüsse aus der Umgebung	22
5.4 Spannungsresultanten und Spannungen	23
5.5 Berechnungsarten	23
6 Grenzzustand der Tragfähigkeit	26
6.1 Beanspruchbarkeit des Querschnitts	26
6.1.1 Bemessungswerte für die Spannungen	26
6.1.2 Bemessungswerte für die Beanspruchbarkeit	27
6.1.3 Spannungsbegrenzung	27
6.1.4 Bemessung durch numerische Analyse	27
6.2 Knickfestigkeit (Beanspruchbarkeit durch Beulen; Beulsicherheitsnachweis)	28
6.2.1 Allgemeines	28
6.2.2 Geometrische Toleranzen, die für Beulen von Belang sind	29
6.2.3 Schale unter Druck- und Schubbeanspruchungen	30
6.2.4 Einfluss des Schweißens	33
6.2.5 Bemessung durch numerische Analyse	36
7 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	36
7.1 Allgemeines	36
7.2 Durchbiegungen	37
Anhang A (normativ) Ausdrücke für Beuluntersuchungen in Schalenkonstruktionen	38
A.1 Unausgesteifte zylindrische Schalen mit konstanter Wanddicke	38
A.1.1 Anmerkungen und Randbedingungen	38

A.1.2	(Axialer) Druck in Meridianrichtung.....	38
A.1.3	Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung)	41
A.1.4	Schubbeanspruchung.....	44
A.1.5	(Axiale) Druckbeanspruchung in Meridianrichtung mit gleichzeitig vorhandener Innendruckbeanspruchung	46
A.1.6	Kombinationen von (axialer) Druckbeanspruchung in Meridianrichtung, Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung) und Schubbeanspruchung.....	47
A.2	Unausgesteifte Zylinderschalen mit gestufter Wanddicke	48
A.2.1	Allgemeines	48
A.2.2	Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialer Druck)	49
A.2.3	Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung)	49
A.2.4	Schubbeanspruchung.....	53
A.3	Unausgesteifte Zylinderschalen mit Überlappstoß	54
A.3.1	Allgemeines	54
A.3.2	Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialer Druck)	54
A.3.3	Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung)	54
A.3.4	Schubbeanspruchung.....	55
A.4	Unausgesteifte Kegelschalen.....	55
A.4.1	Allgemeines	55
A.4.2	Bemessungswerte für Beulspannungen	56
A.4.3	Nachweis der Beulfestigkeit.....	57
A.5	Ausgesteifte Zylinderschalen mit konstanter Wanddicke	58
A.5.1	Allgemeines	58
A.5.2	Isotrope Wände mit Steifen in Meridianrichtung.....	58
A.5.3	Isotrope Wände mit Steifen in Umfangsrichtung	59
A.5.4	In Umfangsrichtung profilierte Wände mit Steifen in Meridianrichtung.....	60
A.5.5	Axial profilierte Wände mit Ringsteifen	64
A.5.6	Als orthotrope Schale behandelte ausgesteifte Wand	64
A.5.7	Äquivalente orthotrope Eigenschaften des Wellblechs	67
A.6	Unausgesteifte kugelförmige Schalen unter gleichmäßigem Druck in Umfangsrichtung.....	69
A.6.1	Bezeichnungen und Randbedingungen.....	69
A.6.2	Kritische Beulspannungen.....	69
A.6.3	Beulparameter in Umfangsrichtung.....	70
Anhang B (informativ) Beulberechnung torikonischer und torisphärischer Schalen		71
B.1	Allgemeines	71
B.2	Bezeichnungen und Randbedingungen.....	71
B.3	Außendruck.....	72
B.3.1	Kritischer Außendruck	72
B.3.2	Gleichmäßiger Außendruck an der Quetschgrenze	73
B.3.3	Beulparameter unter Außendruck	74
B.4	Innendruck	74
B.4.1	Kritischer Innendruck.....	74
B.4.2	Gleichmäßiger Innendruck an der Quetschgrenze	75
B.4.3	Beulparameter unter Innendruck.....	76

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

Vorwort

Diese Europäische Norm (EN 1999-1-5:2007 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis August 2007, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis März 2010 zurückgezogen werden.

Diese Europäische Norm ersetzt ENV 1999-1-1:1998, ENV 1999-1-2:1998 und ENV 1999-2:1998.

CEN/TC 250 ist für die Erarbeitung aller Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau zuständig.

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

Hintergrund des Eurocode Programms

Im Jahre 1975 beschloss die Kommission der Europäischen Gemeinschaften, für das Bauwesen ein Aktionsprogramm auf der Grundlage des Artikels 95 der Römischen Verträge durchzuführen. Das Ziel des Programms war die Beseitigung technischer Handelshemmnisse und die Harmonisierung technischer Spezifikationen.

Im Rahmen dieses Aktionsprogramms leitete die Kommission die Bearbeitung von harmonisierten technischen Regelwerken für die Tragwerksplanung von Bauwerken ein, die im ersten Schritt als Alternative zu den in den Mitgliedsländern geltenden Regeln dienen und diese schließlich ersetzen sollten.

15 Jahre lang leitete die Kommission mit Hilfe eines Lenkungsausschusses mit Vertretern der Mitgliedsländer die Entwicklung des Eurocode-Programms, das in den 80er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts zu der ersten Eurocode-Generation führte.

Im Jahre 1989 entschieden sich die Kommission und die Mitgliedsländer der Europäischen Union und der EFTA, die Entwicklung und Veröffentlichung der Eurocodes über eine Reihe von Mandaten an CEN zu übertragen, damit diese den Status von Europäischen Normen (EN) erhielten. Grundlage war eine Vereinbarung¹⁾) zwischen der Kommission und CEN. Dieser Schritt verknüpft die Eurocodes de facto mit den Regelungen der Richtlinien des Rates und mit den Kommissionsentscheidungen, die die Europäischen Normen behandeln (z. B. die Richtlinie des Rates 89/106/EWG zu Bauprodukten (Bauproduktenrichtlinie), die Richtlinien des Rates 93/37/EWG, 92/50/EWG und 89/440/EWG zur Vergabe öffentlicher Aufträge und Dienstleistungen und die entsprechenden EFTA-Richtlinien, die zur Einrichtung des Binnenmarktes eingeführt wurden).

Das Eurocode-Programm umfasst die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

EN 1990, Eurocode 0: *Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN 1991, Eurocode 1: *Einwirkungen auf Tragwerke*

EN 1992, Eurocode 2: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetontragwerken*

EN 1993, Eurocode 3: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*

EN 1994, Eurocode 4: *Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton*

EN 1995, Eurocode 5: *Bemessung und Konstruktion von Holzbauwerken*

EN 1996, Eurocode 6: *Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten*

EN 1997, Eurocode 7: *Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik*

EN 1998, Eurocode 8: *Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben*

EN 1999, Eurocode 9: *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten*

Die EN-Eurocodes berücksichtigen die Verantwortlichkeit der Bauaufsichtsorgane in den Mitgliedsländern und haben deren Recht zur nationalen Festlegung sicherheitsbezogener Werte berücksichtigt, so dass diese Werte von Land zu Land unterschiedlich bleiben können.

1) Vereinbarung zwischen der Kommission der Europäischen Gemeinschaften und dem Europäischen Komitee für Normung (CEN) zur Bearbeitung der Eurocodes für die Tragwerksplanung von Hochbauten und Ingenieurbauwerken (BC/CEN/03/89).

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

Status und Gültigkeitsbereich der Eurocodes

Die Mitgliedsländer der EU und der EFTA betrachten die Eurocodes als Bezugsdokumente für folgende Zwecke:

- als Mittel zum Nachweis der Übereinstimmung von Hoch- und Ingenieurbauten mit den wesentlichen Anforderungen der Richtlinie des Rates 89/106/EWG, besonders mit der wesentlichen Anforderung Nr. 1: Mechanische Festigkeit und Standsicherheit und der wesentlichen Anforderung Nr. 2: Brandschutz;
- als Grundlage für die Spezifizierung von Verträgen für die Ausführung von Bauwerken und die dazu erforderlichen Ingenieurleistungen;
- als Rahmenbedingung für die Erstellung harmonisierter, technischer Spezifikationen für Bauprodukte (ENs und ETAs).

Die Eurocodes haben, da sie sich auf Bauwerke beziehen, eine direkte Verbindung zu den Grundlagendokumenten²⁾, auf die in Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie hingewiesen wird, wenn sie auch anderer Art sind als die harmonisierten Produktnormen³⁾. Daher sind die technischen Gesichtspunkte, die sich aus den Eurocodes ergeben, von den Technischen Komitees von CEN und den Arbeitsgruppen von EOTA, die an Produktnormen arbeiten, zu beachten, damit diese Produktnormen mit den Eurocodes vollständig kompatibel sind.

Die Eurocodes liefern Regelungen für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von kompletten Tragwerken und Bauteilen, die sich für die tägliche Anwendung eignen. Sie gehen auf traditionelle Bauweisen und Aspekte innovativer Anwendungen ein, liefern aber keine vollständigen Regelungen für ungewöhnliche Baulösungen und Entwurfsbedingungen. Für diese Fälle können zusätzliche Spezialkenntnisse für den Bauplaner erforderlich sein.

2) Entsprechend Artikel 3.3 der Bauproduktenrichtlinie sind die wesentlichen Anforderungen in Grundlagendokumenten zu konkretisieren, um damit die notwendigen Verbindungen zwischen den wesentlichen Anforderungen und den Mandaten für die Erstellung harmonisierter Europäischer Normen und Richtlinien für die europäische Zulassung selbst zu schaffen.

3) Nach Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie hat das Grundlagendokument

- a) die wesentliche Anforderung zu konkretisieren, indem die Begriffe und, soweit erforderlich, die technische Grundlage für Klassen und Anforderungshöhen vereinheitlicht werden,
- b) die Methode zur Verbindung dieser Klassen oder Anforderungshöhen mit technischen Spezifikationen anzugeben, z. B. rechnerische oder Testverfahren, Entwurfsregeln usw.,
- c) als Bezugsdokument für die Erstellung harmonisierter Normen oder Richtlinien für Europäische Technische Zulassungen zu dienen.

Die Eurocodes spielen de facto eine ähnliche Rolle für die wesentliche Anforderung Nr. 1 und einen Teil der wesentlichen Anforderung Nr. 2.

Nationale Fassungen der Eurocodes

Die Nationale Fassung eines Eurocodes enthält den vollständigen Text des Eurocodes (einschließlich aller Anhänge), so wie von CEN veröffentlicht, möglicherweise mit einer nationalen Titelseite und einem nationalen Vorwort sowie einem (informativen) Nationalen Anhang.

Der (informative) Nationale Anhang darf nur Hinweise zu den Parametern geben, die im Eurocode für nationale Entscheidungen offen gelassen wurden. Diese so genannten national festzulegenden Parameter (NDP) gelten für die Tragwerksplanung von Hochbauten und Ingenieurbauten in dem Land, in dem sie erstellt werden. Sie umfassen:

- Zahlenwerte für die Teilsicherheitsbeiwerte und/oder Klassen, wo die Eurocodes Alternativen eröffnen,
- Zahlenwerte, wo die Eurocodes nur Symbole angeben,
- landesspezifische geographische und klimatische Daten, die nur für ein Mitgliedsland gelten, z. B. Schneekarten,
- die Vorgehensweise, wenn die Eurocodes mehrere Verfahren zur Wahl anbieten,
- Hinweise zur Anwendung der Eurocodes, soweit diese die Eurocodes ergänzen und ihnen nicht widersprechen.

Verbindung zwischen den Eurocodes und den harmonisierten technischen Spezifikationen für Bauprodukte (ENs und ETAs)

Es besteht die Notwendigkeit, dass die harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte und die technischen Regelungen für die Tragwerksplanung⁴⁾ konsistent sind. Insbesondere sollten alle Hinweise, die mit der CE-Kennzeichnung von Bauprodukten verbunden sind und die die Eurocodes in Bezug nehmen, klar erkennen lassen, welche national festzulegenden Parameter (NDP) zugrunde liegen.

Nationaler Anhang für EN 1999-1-5

Diese Norm enthält alternative Verfahren, Zahlenwerte und Empfehlungen für Klassen zusammen mit Hinweisen, an welchen Stellen nationale Festlegungen möglicherweise getroffen werden müssen. Deshalb sollte die jeweilige nationale Ausgabe von EN 1999-1-5 einen Nationalen Anhang mit allen national festzulegenden Parametern enthalten, die für die Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken, die in dem Ausgabeland gebaut werden sollen, erforderlich sind.

Nationale Festlegungen sind in den folgenden Abschnitten von EN 1999-1-5 vorgesehen:

- 2.1(3)
- 2.1(4).

⁴⁾ Siehe Artikel 3.3 und Art. 12 der Bauproduktenrichtlinie ebenso wie die Abschnitte 4.2, 4.3.1, 4.3.2 und 5.2 des Grundlagendokumentes Nr. 1.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

1.1.1 Anwendungsbereich von EN 1999

(1)P EN 1999 gilt für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Bauwerken und Tragwerken aus Aluminium. Sie entspricht den Grundsätzen und Anforderungen an die Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken sowie den Grundlagen für ihre Bemessung und Nachweise, die in EN 1990 — Grundlagen der Tragwerksplanung — enthalten sind.

(2)P EN 1999 behandelt ausschließlich Anforderungen an die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit, die Dauerhaftigkeit und den Feuerwiderstand von Tragwerken aus Aluminium. Andere Anforderungen, wie z. B. Wärmeschutz oder Schallschutz, werden nicht behandelt.

(3) EN 1999 gilt in Verbindung mit folgenden Regelwerken:

— EN 1990, *Grundlagen der Tragwerksplanung*

— EN 1991, *Einwirkungen auf Tragwerke*

Europäische Normen für Bauprodukte, die für Aluminiumtragwerke Verwendung finden:

— EN 1090-1, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 1: Allgemeine Lieferbedingungen⁵⁾*

— EN 1090-3, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 3: Technische Regeln für die Ausführung von Aluminiumtragwerken⁵⁾*

(4) EN 1999 ist in fünf Teile gegliedert:

EN 1999-1-1, *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken: Allgemeine Bemessungsregeln*

EN 1999-1-2, *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken: Tragwerksbemessung für den Brandfall*

EN 1999-1-3, *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken: Ermüdungsbeanspruchte Tragwerke*

EN 1999-1-4, *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken: Kaltgeformte Profiltafeln*

EN 1999-1-5, *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken: Schalen*

1.1.2 Anwendungsbereich von EN 1999-1-5

(1)P EN 1999-1-5 gilt für die Bemessung von ausgesteiften und nicht ausgesteiften Aluminiumtragwerken, die in Form einer Rotationsschale oder einer als Schale gestalteten kreisförmigen Platte vorliegen.

(2) Für spezifische Anwendungsregeln bei der Tragwerksbemessung sollten die jeweils zutreffenden Teile von EN 1999 befolgt werden.

(3) Zusätzliche Informationen für bestimmte Arten von Schalen werden in EN 1993-1-6 und in den für bestimmte Anwendungen zutreffenden Teilen angegeben, z. B.:

⁵⁾ In Vorbereitung.

- Teil 3-1 für Türme und Maste;
- Teil 3-2 für Schornsteine;
- Teil 4-1 für Silos;
- Teil 4-2 für Tankbauwerke;
- Teil 4-3 für Rohrleitungen.

(4) Die in EN 1999-1-5 erfassten Bestimmungen gelten für rotationssymmetrische Schalen (Zylinder, Kegel, Kugeln) und die zugehörigen kreisförmigen oder ringförmigen Bleche sowie für Balkenprofilringe und Längssteifen, die Teile des kompletten Tragwerks sind.

(5) EN 1999-1-5 beschäftigt sich nicht ausführlich mit einzelnen Platten für Schalenkonstruktionen (zylindrisch, konisch oder kugelförmig). Die erfassten Bestimmungen können jedoch bei entsprechender Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen auch auf einzelne Platten anwendbar sein.

(6) In EN 1999-1-5 können folgende Arten von Schalenwänden erfasst werden, siehe Bild 1.1:

- Schalenwand aus flach gewalztem Blech, als ‚isotrop‘ bezeichnet;
- Schalenwand mit überlappten Verbindungen aneinandergrenzender Bleche, als ‚überlappt gestoßen‘ bezeichnet;
- Schalenwand mit an der Außenseite angebrachten Steifen, die unabhängig vom Abstand der Steifen als ‚außen versteift‘ bezeichnet werden;
- Schalenwand mit Profilierung in Meridianrichtung, als ‚axial profiliert‘ bezeichnet;
- Schalenwand aus profilierten Blechen (Wellblechen) mit Profilierung in Umfangsrichtung, als ‚in Umfangsrichtung profiliert‘ bezeichnet.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

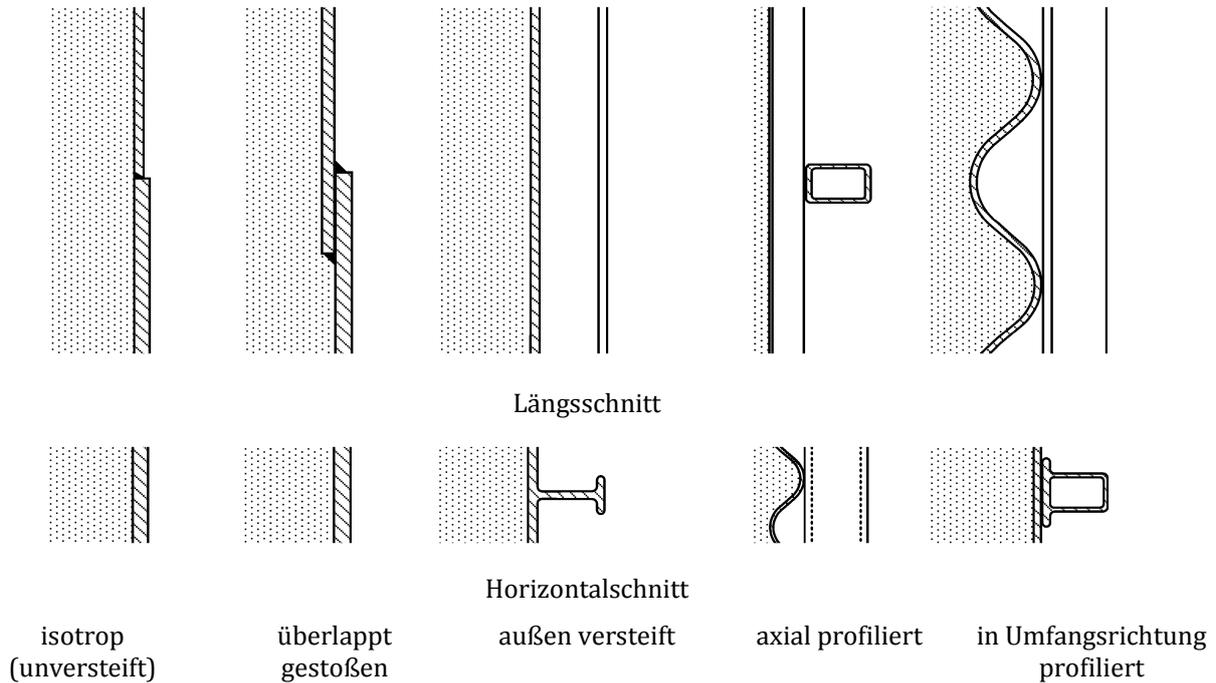


Bild 1.1 — Darstellung der Formen zylindrischer Schalen

(7) Die Bestimmungen von EN 1999-1-5 sind für einen Temperaturbereich vorgesehen, der in EN 1999-1-1 festgelegt wird. Die maximale Temperatur wird so beschränkt, dass der Einfluss des Kriechens vernachlässigt werden kann. Für Tragwerke, die bei einem Brand erhöhten Temperaturen ausgesetzt sind, siehe EN 1999-1-2.

(8) EN 1999-1-5 beschäftigt sich nicht mit Undichtheiten der Schale.

1.2 Normative Verweisungen

(1) Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 1090-1, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 1: Konformitätsnachweisverfahren für tragende Bauteile*⁶⁾

EN 1090-3, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 3: Technische Anforderungen für Aluminiumtragwerken*⁶⁾

EN 1990, *Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN 1991, *Einwirkungen auf Tragwerke; alle Teile*

EN 1993-1-6, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Allgemeine Bemessungsregeln — Ergänzende Regeln für Schalenkonstruktionen*

⁶⁾ In Vorbereitung.

EN 1993-3-2, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 3-2: Türme, Maste und Schornsteine — Schornsteine*

EN 1993-4-1, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-1: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen — Silos*

EN 1993-4-2, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-2: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen — Tankbauwerke*

EN 1993-4-3, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-3: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen — Rohrleitungen*

EN 1999-1-1, *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln*

EN 1999-1-2, *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-2: Tragwerksbemessung für den Brandfall*

EN 1999-1-3, *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-3: Ermüdungsbeanspruchte Tragwerke*

EN 1999-1-4, *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-4: Kaltgeformte Bleche*

1.3 Begriffe

(1) Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN 1999-1-1 und die folgenden Begriffe.

1.3.1 Formen und Geometrie des Tragwerks

1.3.1.1

Schale

dünnwandiger Körper, der so geformt wird, dass eine gekrümmte Oberfläche entsteht, mit einer Dicke, die bei einer Messung rechtwinklig zur Oberfläche gegenüber den in die anderen Richtungen ermittelten Maßen klein ist. Eine Schale nimmt die Lasten hauptsächlich durch Membrankräfte auf. Die Mittelfläche darf an jedem Punkt einen endlichen Krümmungsradius haben, oder sie darf in einer Richtung unendlich gekrümmt sein, z. B. eine Zylinderschale.

In EN 1999-1-5 ist eine Schale ein Tragwerk oder ein Teil des Tragwerks, das aus gekrümmten Blechen oder Strangpressteilen gebildet wird.

1.3.1.2

Rotationsschale

Schale, die aus einer Anzahl von Teilen besteht, von denen jedes eine vollständige rotationssymmetrische Schale ist

1.3.1.3

vollständige rotationssymmetrische Schale

Schale, deren Form durch die Rotation ihrer meridionalen Erzeugenden um eine zentrale Achse über 2π Radiant festgelegt wird. Die Schale kann eine beliebige Länge haben.

1.3.1.4

Schalenabschnitt

Teil einer Rotationsschale mit festgelegter Schalengeometrie und konstanter Wanddicke in Form eines Zylinders, Kegelstumpfes, Teils einer Kugel, Bodenrandblechs oder in einer anderen Form

DIN EN 1999-1-5:2017-03

EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

1.3.1.5

Schalenplatte

unvollständige rotationssymmetrische Schale, deren Form durch die Rotation einer Erzeugenden um eine Achse über weniger als 2π Radiant festgelegt wird

1.3.1.6

Mittelfläche

Fläche, die an allen Punkten der Schale in der Mitte zwischen der Schaleninnen- und -außenfläche liegt. Falls eine Aussteifung der Schale auf nur einer Seite erfolgt, bleibt die Mittelfläche des gekrümmten Schalenblechs weiter die Bezugsfläche für die Berechnung, die bei Änderungen der Dicke oder an Knotenlinien der Schale diskontinuierlich sein kann, wodurch Exzentrizitäten entstehen, die für das Verhalten der Schale wesentlich sind.

1.3.1.7

Knotenlinie

Punkt, an dem zwei oder mehr Schalenabschnitte zusammentreffen; die Knotenlinie kann auch eine Steife einschließen; die Anschlusslinie einer Ringsteife an eine Schale darf ebenfalls als Knotenlinie betrachtet werden

1.3.1.8

Längssteife

örtliches Versteifungsbauteil, das einem Schalenmeridian folgt, welcher eine Erzeugende der Rotationsschale darstellt. Eine Längssteife ist vorgesehen, um entweder die Stabilität zu verbessern oder bei der Einleitung örtlicher Lasten mitzuwirken. Sie dient nicht primär dazu, die Biegetragfähigkeit für Querlasten zu erhöhen

1.3.1.9

Rippe

örtliches Bauteil, das eine primäre Biegelastabtragung längs eines Schalenmeridians ermöglicht, welcher eine Erzeugende der Rotationsschale darstellt. Eine Rippe wird vorgesehen, um Querlasten mittels Biegung auf das Tragwerk zu übertragen oder zu verteilen.

1.3.1.10

Ringsteife

örtliches Versteifungsbauteil, das an einem bestimmten Punkt auf dem Meridian längs des Umfangs der Rotationsschale verläuft. Es wird angenommen, dass die Ringsteife keine Steifigkeit in der Meridianebene der Schale hat. Sie wird verwendet, um die Stabilität zu erhöhen oder um rotationssymmetrische Einzellasten einzuleiten, die durch rotationssymmetrische Normalkräfte in der Ebene des Ringes wirken. Sie dient nicht primär dazu, die Biegetragfähigkeit zu erhöhen.

1.3.1.11

Basisring

Tragwerkselement, das der Umfangsline an der Basis der Rotationsschale folgt und Möglichkeiten zur Anbringung der Schale an einem Fundament oder einem anderen Teil bietet. Der Basisring wird benötigt, um die angenommenen Randbedingungen praktisch sicherzustellen.

1.3.2 Spezielle Definitionen für Beulberechnungen

1.3.2.1

ideale Verzweigungslast; Grenz-Beullast

die kleinste Verzweigungs- oder Grenzlast, die unter der Annahme bestimmt wird, dass ideale Bedingungen für das elastische Verhalten des Werkstoffs, eine exakte Geometrie, eine exakte Lastaufbringung, eine exakte Unterstützung, Materialisotropie und keine Restspannungen vorhanden sind (LBA-Analyse)

1.3.2.2

ideale Beulspannung; Grenz-Beulspannung

der Nennwert der Membranspannung, der einer idealen Verzweigungslast zuzuordnen ist

1.3.2.3**charakteristische Beulspannung**

der Nennwert der Membranspannung, der einer Knickung (Beulenbildung) bei unelastischem Werkstoffverhalten und bei Vorhandensein geometrischer und konstruktiver Imperfektionen zuzuordnen ist

1.3.2.4**Bemessungswert der Beulspannung**

der Bemessungswert für die Beulspannung, der durch Dividieren der charakteristischen Beulspannung durch den Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit ermittelt wird

1.3.2.5 **$\overline{\sigma}_{11}$ maßgebender Wert $\overline{\sigma}_{11}$ der Spannung**

in einem ungleichmäßigen Spannungsfeld der Spannungswert, der beim Grenzzustand des Beulens zur Beschreibung der Größe der Spannung verwendet wird

1.3.2.6**Toleranzklasse**

die Klasse für die Anforderungen, die bei Ausführung der Arbeiten an die geometrischen Toleranzen gestellt werden

ANMERKUNG Diese geometrischen Toleranzen umfassen die Herstellungstoleranz der Bauteile und die Toleranz für die Ausführung der Arbeiten mit den Bauteilen auf der Baustelle.

1.4 Formelzeichen

(1) Außer den in EN 1999-1-1 festgelegten werden folgende Formelzeichen angewendet.

(2) Koordinatensystem (siehe Bild 1.2):

r Radiale Koordinate, rechtwinklig zur Rotationsachse;

x Meridiankoordinate;

z axiale Koordinate;

θ Koordinate in Umfangsrichtung;

ϕ Medianneigung: Winkel zwischen Rotationsachse und der Senkrechten zum Schalenmeridian;

(3) Drücke:

p_n Druck rechtwinklig zur Schale;

p_x Flächenlast in Meridianrichtung parallel zur Schale;

p_θ Flächenlast in Umfangsrichtung parallel zur Schale

(4) Linienkräfte:

P_n Last je Umfangseinheit, rechtwinklig zur Schale;

P_x Last je Umfangseinheit, in Meridianrichtung wirkend;

P_θ Last je Umfangseinheit, in Umfangsrichtung auf die Schale wirkend;

(5) Membranspannungsergebnisse (siehe Bild 1.3a):

n_x Membranspannungsergebnisse in Meridianrichtung;

n_θ Membranspannungsergebnisse in Umfangsrichtung;

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

$n_{x\theta}$ Membranschubspannungsergebnisse;

(6) Biegespannungsergebnisse (siehe Bild 1.3b):

m_x Biegemoment je Längeneinheit in Meridianrichtung;

m_θ Biegemoment je Längeneinheit in Umfangsrichtung;

$m_{x\theta}$ Drillschermoment je Längeneinheit;

q_{xn} Querkraft bei Biegung in Meridianrichtung;

$q_{\theta n}$ Querkraft bei Biegung in Umfangsrichtung;

(7) Spannungen:

σ_x Meridianspannung;

σ_θ Umfangsspannung;

σ_{eq} von-Mises-Ersatzspannung (kann unter zyklischen Belastungsbedingungen negativ sein);

$\tau, \tau_{x\theta}$ Schubspannung in einer Ebene;

$\tau_{xn}, \tau_{\theta n}$ Querschubspannungen bei Biegung in Meridianrichtung, in Umfangsrichtung

(8) Verschiebungen:

u Verschiebung in Meridianrichtung;

v Verschiebung in Umfangsrichtung;

w Verschiebung rechtwinklig zur Oberfläche der Schale;

β_ϕ Rotation in Meridianrichtung (siehe 5.3.3);

(9) Abmessungen der Schale:

d Innendurchmesser der Schale;

L Gesamtlänge der Schale;

l Länge eines Schalenabschnitts;

l_g Messlänge für die Messung der Imperfektionen;

$l_{g,\theta}$ Messlänge für die Messung der Imperfektionen in Umfangsrichtung;

$l_{g,w}$ Messlänge für die Messung der Imperfektionen über die Schweißnähte;

l_R begrenzte Länge der Schale für den Beulsicherheitsnachweis;

r Radius der Mittelfläche, rechtwinklig zur Rotationsachse;

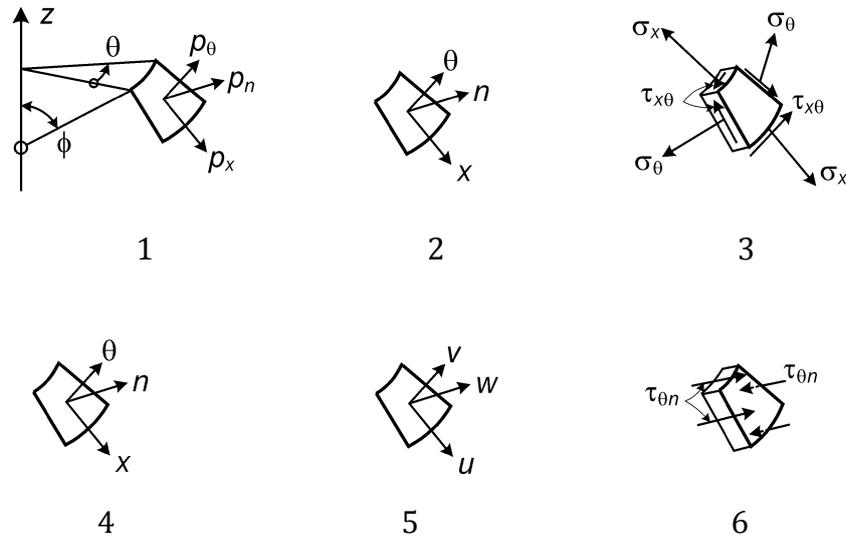
t Wanddicke der Schale;

t_{max} größte Wanddicke der Schale an einem Anschluss;

t_{min} kleinste Wanddicke der Schale an einem Anschluss;

t_{ave} mittlere Wanddicke der Schale an einem Anschluss;

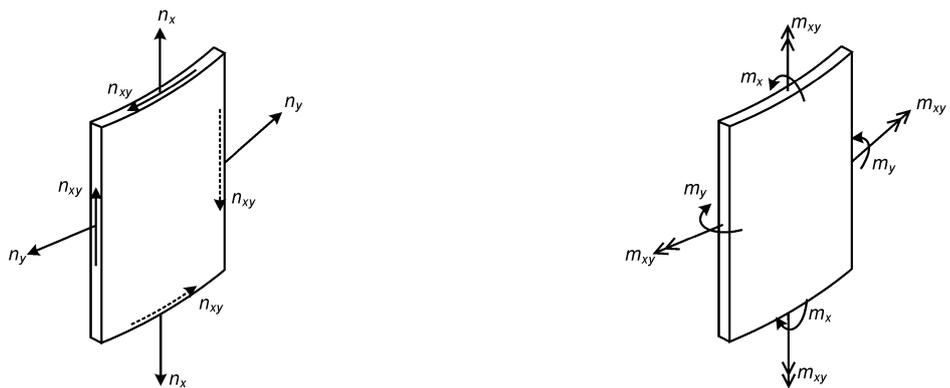
β halber Kegelspitzenwinkel;



Legende

- 1 Oberflächendrücke
- 2 Koordinaten
- 3 Membranspannungen
- 4 Richtungen:
 θ in Umfangsrichtung
 n rechtwinklig
 x in Meridianrichtung
- 5 Verschiebungen
- 6 $\tau_{\theta n}$ Querschubspannungen $\tau_{n\theta}$

Bild 1.2 — Formelzeichen für Rotationsschalen



a) Membranspannungsergebnisse

b) Biegespannungsergebnisse

**Bild 1.3 — Spannungsergebnisse in der Schalenwand
(im Bild ist x die meridiale und y die Umfangsrichtung)**

(10) Toleranzen (siehe 6.2.2):

- e Exzentrizität zwischen den Mittelflächen der verbundenen Platten;
- U_e Toleranzparameter für die unplanmäßige Exzentrizität;

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

U_r Toleranzparameter für die Rundheitsabweichung;

U_0 Toleranzparameter für die Ausgangsbeule;

Δw_0 Toleranz rechtwinklig zur Schalenoberfläche;

(11) Werkstoffeigenschaften:

f_{eq} von-Mises-Ersatzfestigkeit;

f_u charakteristischer Wert für die Bruchfestigkeit;

f_0 charakteristischer Wert für die 0,2%-Dehngrenze;

(12) Parameter zur Festigkeitsbeurteilung:

C Beiwert für den Beulsicherheitsnachweis;

C_ϕ Dehnsteifigkeit der Bleche in axialer Richtung;

C_θ Dehnsteifigkeit der Bleche in Umfangsrichtung;

$C_{\phi\theta}$ Dehnsteifigkeit der Bleche bei Schubbeanspruchung der Membran;

D_ϕ Biegesteifigkeit der Bleche in axialer Richtung;

D_θ Biegesteifigkeit der Bleche in Umfangsrichtung;

$D_{\phi\theta}$ Drillbiegesteifigkeit der Bleche beim Verdrehen;

R errechnete Beanspruchbarkeit (mit Indizes zur Kennzeichnung des Bezugs verwendet);

R_{pl} plastische Bezugs-Beanspruchbarkeit (als Lastfaktor bei Bemessung der Lasten festgelegt);

R_{cr} ideale Verzweigungslast (als Lastfaktor bei Bemessung der Lasten festgelegt);

k Kalibrierfaktor für nichtlineare Berechnungen;

$k_{(\dots)}$ Potenz in den Ausdrücken für die Interaktion der Beulfestigkeit;

μ Härtungsparameter der Legierung in den Beul-Diagrammen für Schalen;

$\alpha_{(\dots)}$ beim Beulsicherheitsnachweis der Abminderungsfaktor für Imperfektionen;

Δ Bereich der Parameter bei Einbeziehung alternierender oder zyklischer Einwirkungen;

(13) Bemessungswerte für Spannungen und Spannungsresultanten:

$\sigma_{x,Ed}$ Bemessungswerte für die beulen-relevante Membranspannung in Meridianrichtung (positiv, wenn Druck);

$\sigma_{\theta,Ed}$ Bemessungswerte für die beulen-relevante Membranspannung (Ringspannung) in Umfangsrichtung (positiv, wenn Druck);

τ_{Ed} Bemessungswerte für die beulen-relevante Membranschubspannung;

$n_{x,Ed}$ Bemessungswerte für die beulen-relevante Membranspannungsresultante in Meridianrichtung (positiv, wenn Druck);

$n_{\theta,Ed}$ Bemessungswerte für die beulen-relevante Membranspannung (Ringspannung) in Umfangsrichtung (positiv, wenn Druck);

$n_{x\theta,Ed}$ Bemessungswerte für die beulen-relevante Membranschubspannungsresultante;

(14) Kritische Beulspannungen und Widerstände gegen Beulspannungen:

- $\sigma_{x,cr}$ kritische Beulspannung in Meridianrichtung;
- $\sigma_{\theta,cr}$ kritische Beulspannung in Umfangsrichtung;
- τ_{cr} kritische Beulschubspannung;
- $\sigma_{x,Rd}$ Bemessungswert für die Beanspruchbarkeit durch Beulspannungen in Meridianrichtung;
- $\sigma_{\theta,Rd}$ Bemessungswert für die Beanspruchbarkeit durch Beulspannungen in Umfangsrichtung;
- τ_{Rd} Bemessungswert für die Beanspruchbarkeit durch Beulschubspannungen.

(15) Weitere Formelzeichen werden bei ihrer Erstverwendung definiert.

1.5 Vorzeichenvereinbarungen

(1) Mit Ausnahme von (2) gelten im Allgemeinen folgende Vorzeichenvereinbarungen:

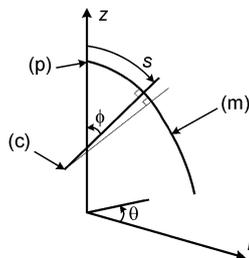
- nach außen gerichtet positiv;
- Innendruck positiv;
- Verschiebung nach außen positiv;
- Zugspannungen positiv;
- Schubspannungen wie in Bild 1.2 dargestellt.

(2) Zur Vereinfachung werden bei Beuluntersuchungen Druckspannungen als positiv angesetzt. In diesen Fällen werden sowohl Außendrucke als auch Innendrucke als positiv angesetzt.

1.6 Koordinatensysteme

(1) Im Allgemeinen wird für das globale Schalentragswerk ein zylindrisches Koordinatensystem wie folgt verwendet (siehe Bild 1.4):

Koordinate längs der Mittelachse der Rotationsschale	z
Radiale Koordinate	r
Koordinate in Umfangsrichtung	θ



Legende

- (p) Pol
- (m) Schalenmeridian
- (c) Pol der Meridiankrümmung

Bild 1.4 — Koordinatensysteme für eine kreisförmige Schale

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

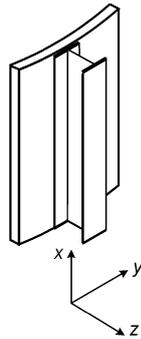
(2) Die Vereinbarung für Tragwerksteile, die mit der Tankwand verbunden sind (siehe Bild 1.5), ist für solche in Meridianrichtung und solche in Umfangsrichtung unterschiedlich.

(3) Die Vereinbarung für gerade, mit der Tankwand verbundene Tragelemente in Meridianrichtung [siehe Bild 1.5a)] ist:

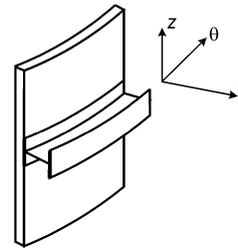
Meridiankoordinate für Zylinder, Auslaufkegel und Dachanschluss	x
Starke Biegeachse (parallel zu den Flanschen: Achse für Biegung in Meridianrichtung)	y
Schwache Biegeachse (rechtwinklig zu den Flanschen)	z

(4) Die Vereinbarung für gekrümmte, mit der Tankwand verbundene Tragelemente in Umfangsrichtung [siehe Bild 1.5b)] ist:

Achse der Umfangskoordinate (gekrümmt)	θ
Radiale Achse (Biegeachse in der Meridianebene)	r
Meridianachse (Biegeachse für Umfangsbiegung)	z



a) Meridiansteife



b) Umfangssteife

Bild 1.5 — Lokales Koordinatensystem für Meridiansteifen und Umfangssteifen bei einer Schale

2 Grundlagen für Entwurf, Berechnung und Bemessung

2.1 Allgemeines

(1)P Schalen müssen nach den in EN 1990 und EN 1999-1-1 angegebenen Regeln berechnet und bemessen werden.

(2)P Für die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit müssen geeignete Teilsicherheitsbeiwerte ausgewählt werden.

(3)P Für den rechnerischen Nachweis für die Grenzzustände der Tragfähigkeit muss der Teilsicherheitsbeiwert γ_M folgendermaßen festgelegt werden:

— Beanspruchbarkeit gegen Instabilität und Fließen:	γ_{M1}
— Beanspruchbarkeit der unter Zug stehenden Platte bis zum Bruch:	γ_{M2}
— Beanspruchbarkeit der Verbindungen:	siehe EN 1999-1-1

ANMERKUNG Im Nationalen Anhang dürfen Werte der Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mi} festgelegt werden. Folgende Zahlenwerte werden empfohlen:

$$\gamma_{M1} = 1,10$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

(4) Für Nachweise der Grenzzustände für die Gebrauchstauglichkeit sollte der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,ser}$ verwendet werden.

ANMERKUNG Im Nationalen Anhang dürfen Werte für die Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{M,ser}$ festgelegt werden. Folgender Zahlenwert wird empfohlen:

$$\gamma_{M,ser} = 1,0$$

2.2 Zuverlässigkeitsklasse und Ausführungsklasse

(1) Die Auswahl der Zuverlässigkeitsklasse 1, 2 oder 3, siehe EN 1999-1-1, sollte vom Tragwerksplaner und dem für die Bauarbeiten Verantwortlichen unter Berücksichtigung nationaler Festlegungen gemeinsam getroffen werden.

(2) Die Ausführungsklasse, siehe EN 1999-1-1, sollte in der Ausführungsspezifikation festgelegt werden.

3 Werkstoffe und Geometrie

3.1 Werkstoffeigenschaften

(1) EN 1999-1-5 gilt für die in den Tabellen 3.2a) und b) von EN 1999-1-1 aufgeführten Knetwerkstoffe (Knetlegierungen und Zustände) und für kalt umgeformte Bleche in Tabelle 2.1 von EN 1999-1-1.

(2) Für Einsatztemperaturen zwischen 80 °C und 100 °C sollten die Werkstoffeigenschaften aus EN 1999-1-1 entnommen werden.

(3) Bei einer $\overline{A_{11}}$ globalen numerischen Berechnung $\overline{A_{11}}$ sollte unter Anwendung der Nichtlinearität von Werkstoffen das jeweils geeignete Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus Anhang E von EN 1999-1-1 ausgewählt werden.

3.2 Bemessungswerte für geometrische Daten

(1) Die Dicke t der Schale sollte der in 1999-1-1 und in 1999-1-4 angegebenen Definition entsprechen.

(2) Die Mittelfläche der Schale sollte als Bezugsfläche für die Lasten angenommen werden.

(3) Der Radius r der Schale sollte als der rechtwinklig zur Rotationsachse gemessene Nennradius der Mittelfläche der Schale angenommen werden.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

3.3 Geometrische Toleranzen und geometrische Imperfektionen

(1) Folgende geometrische Abweichungen der Schalenoberfläche von der Nennform $\boxed{A_{11}}$ sollten $\langle A_{11} \rangle$ berücksichtigt werden:

$\boxed{A_{11}}$

- Unrundheit (Abweichung von der Kreisform);
- Exzentrizitäten (Abweichung von der Stetigkeit der Schalenummitte an Blechstößen, rechtwinklig zur schale betrachtet);
- örtliche Vorbeulen (örtliche Abweichungen von der Schalenummitte rechtwinklig zu ihr). $\langle A_{11} \rangle$

ANMERKUNG EN 1090-3 enthält Anforderungen an geometrische Toleranzen für Schalentragwerke $\boxed{A_{11}}$ *gestrichener Text* $\langle A_{11} \rangle$.

(2) Geometrische Toleranz für Beulen siehe 6.2.2.

4 Dauerhaftigkeit

- (1) Die grundlegenden Anforderungen sind aus Abschnitt 4 von EN 1999-1-1 zu entnehmen.
- (2) Besonders zu beachten sind die Fälle, in denen ein Verbund unterschiedlicher Werkstoffe vorgesehen ist, wenn durch elektrochemische Erscheinungen Bedingungen auftreten können, die Korrosion begünstigen.

ANMERKUNG Angaben zur Korrosionsbeständigkeit von Verbindungsmitteln für die umgebungsbedingten Korrosivitätsklassen nach EN ISO 12944-2 sind aus EN 1999-1-4 zu entnehmen.

(3) Die ab dem Zeitpunkt der Herstellung sowie bei Transport und Lagerung auf der Baustelle auftretenden Umgebungsbedingungen sollten berücksichtigt werden.

5 Tragwerksberechnung

5.1 Geometrie

- (1) Die Schale sollte durch ihre Mittelfläche repräsentiert werden.
- (2) Der Krümmungsradius sollte als Nenn-Krümmungsradius angesehen werden.
- (3) Für die Berechnung sollte eine aus mehreren Schalenabschnitten bestehende Baugruppe nur dann in einzelne Abschnitte unterteilt werden, wenn die Randbedingungen für jeden Abschnitt so ausgewählt werden, dass die Interaktionen zwischen ihnen auf herkömmliche Weise dargestellt werden.
- (4) In das Berechnungsmodell sollte ein Basisring zur Ableitung der Stützkräfte in die Schale einbezogen werden.
- (5) Exzentrizitäten und Stufen in der Mittelfläche der Schale sollten im Berechnungsmodell berücksichtigt werden, wenn sie bedingt durch den exzentrischen Verlauf der Membranspannungsergebnisse signifikante Biegeeinwirkungen einbringen.
- (6) Im Berechnungsmodell sollten an den Knotenlinien zwischen den Schalenabschnitten alle Exzentrizitäten auf den Mittelflächen der Schalenabschnitte berücksichtigt werden.
- (7) Eine Ringsteife sollte als gesondertes Tragwerksteil der Schale angesehen werden, sofern die Abstände zwischen den Ringen nicht kleiner als $1,5\sqrt{rt}$ sind.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

- (8) Eine Schale, an der diskrete Längssteifen angebracht sind, darf als gleichmäßig orthotrope Schale angesehen werden, wenn die Längssteifen nicht weiter als $5\sqrt{rt}$ voneinander entfernt sind.
- (9) Eine (axial oder in Umfangsrichtung) profilierte Schale darf als gleichmäßig orthotrope Schale angesehen werden, wenn die Wellenlänge der Profilierungen kleiner als $0,5\sqrt{rt}$ ist (siehe A.5.7).
- (10) Ein Loch in der Schale darf bei der Modellierung vernachlässigt werden, wenn das größte Lochmaß kleiner als $0,5\sqrt{rt}$ ist.
- (11) Die Gesamtstabilität des vollständigen Tragwerks kann je nach Gültigkeit in Übereinstimmung mit EN 1993, Teile 3-1, 3-2, 4-1, 4-2 oder 4-3 nachgewiesen werden.

5.2 Randbedingungen

- (1) Bei den Berechnungen für die Grenzzustände sollten die geeigneten Randbedingungen nach Tabelle 5.1 angewendet werden. Die zur Berechnung der Beulsicherheit erforderlichen Sonderbedingungen sollten aus 6.2 entnommen werden.
- (2) Beim Berechnungsmodell für den plastischen Grenzzustand dürfen Rotationsbehinderungen an den Schalengrenzen unberücksichtigt bleiben. Für kurze Schalen (siehe Anhang A) sollte eine Behinderung der Rotation in die Berechnung der Beulsicherheit einbezogen werden.
- (3) Die Randbedingungen für die Abstützung sollten überprüft werden, um sicherzustellen, dass sie keine zu große Ungleichmäßigkeit der übertragenen oder eingeleiteten Kräfte exzentrisch zur Schalenmittelfläche veranlassen.
- (4) A11 Wenn eine globale numerische Berechnung durchgeführt wird, sollte für die Verschiebung v in Umfangsrichtung dieselbe Randbedingung angesetzt werden wie für die Verschiebung w in Normalenrichtung, es sei denn, es liegen besondere Umstände vor, aufgrund derer dies nicht angemessen ist. A11

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

Tabelle 5.1 — Randbedingungen für Schalen

A11

Beul- klasse	Einfache Befestigungs- bedingung	Beschreibung			Ver- schiebungen rechtwinklig zur Oberfläche	Verschie- bungen in Meridian- richtung	Rotation in Meridian- richtung
		Radial	In Meridian- richtung	Rotation			
BC1r	Eingespannt	Unverschieb- lich	Unverschieb- lich	Eingespannt	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_\phi = 0$
BC1f		Unverschieb- lich	Unverschieb- lich	Frei	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_\phi \neq 0$
BC2r		Unverschieb- lich	Frei	Eingespannt	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi = 0$
BC2f	Gelenkig gelagert	Unverschieb- lich	Frei	Frei	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi \neq 0$
BC3	Freier Rand	Frei	Frei	Frei	$w \neq 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi \neq 0$

ANMERKUNG Die Verschiebung in Umfangsrichtung v und die Verschiebung w rechtwinklig zur Oberfläche sind so eng miteinander verknüpft, dass keine gesonderten Randbedingungen benötigt werden.

A11

5.3 Einwirkungen und Einflüsse aus der Umgebung

(1) Es sollte vorausgesetzt werden, dass die Einwirkungen auf die Mittelfläche erfolgen. Exzentrisch wirkende Lasten müssen durch statische Ersatzkräfte und -momente auf die Mittelfläche der Schale **A11** aufgebracht **A11** werden.

(2) Sofern nicht anders angegeben, sollten örtliche Einwirkungen und örtliche Korrekturen der Einwirkung nicht durch gleichmäßige Ersatzlasten dargestellt werden.

(3) Die Einwirkungen und die kombinierten Einwirkungen werden in EN 1991 und EN 1990 erfasst. Außerdem sollten diejenigen der folgenden Einwirkungen, die für das Tragwerk von Bedeutung sind, bei der Tragwerksberechnung berücksichtigt werden:

- lokale Setzung unter den Schalenwänden;
- lokale Setzung unter Einzelstützen;
- gleichmäßige Abstützung des Tragwerks;
- Temperaturunterschiede zwischen den verschiedenen Seiten des Tragwerks;
- Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Außenseite des Tragwerks;
- Windeinwirkungen auf Öffnungen und Durchbrüche;
- Interaktion von Windwirkungen auf Gruppen der Tragwerke;
- Verbindungen mit anderen Tragwerken;
- Bedingungen während der Montage.

(4) Die Schalen können bedingt durch die Art der Einleitung der Lasten durch Membrankräfte empfindlich gegenüber Änderungen der geometrischen Bedingungen sein, z. B. durch $\overline{A_{11}}$ Vorbeulen $\langle \overline{A_{11}} \rangle$. Außer den bei der Ausführung veranlassten unvermeidbaren geometrischen Abweichungen können $\overline{A_{11}}$ Vorbeulen $\langle \overline{A_{11}} \rangle$ durch unvorhergesehene Einwirkungen während des Einsatzes entstehen. Die Empfindlichkeit steigt bei Anwendung relativ dünner Bauteile. Falls $\overline{A_{11}}$ Vorbeulen $\langle \overline{A_{11}} \rangle$ eingebracht werden, deren Größe die in B.4 angegebenen Werte überschreitet, sollten die Auswirkungen auf die Tragfähigkeit untersucht werden. Es wird empfohlen, ein Programm zur regelmäßigen Überprüfung der geometrischen Bedingungen anzuwenden.

(5) Bei Auswahl des Konzeptes für Entwurf, Bemessung und Berechnung sollte die Möglichkeiten berücksichtigt werden, durch die unzulässige $\overline{A_{11}}$ Vorbeulen $\langle \overline{A_{11}} \rangle$ zu vermeiden sind. Diese Möglichkeiten können z. B. darin bestehen, dass größere als nach der Berechnung notwendige Dicken angewendet werden oder indem für die Bereiche, in denen das Risiko als signifikant eingeschätzt wird, Schutzmaßnahmen vorgesehen werden.

5.4 Spannungsresultanten und Spannungen

(1) Unter der Voraussetzung, dass das Verhältnis Radius/Dicke größer ist als $(r/t)_{\min} = 25$, darf die Krümmung der Schale bei Berechnung der Spannungsresultanten aus den Spannungen in der Schalenwand vernachlässigt werden.

5.5 Berechnungsarten

(1) Die Bemessung sollte in Abhängigkeit vom Grenzzustand und von anderen Erwägungen auf einer oder mehreren der in Tabelle 5.2 angegebenen Berechnungsarten basieren. Die Berechnungsarten werden in Tabelle 5.3 ausführlicher erläutert. Für weitere Einzelheiten wird auf EN 1993-1-6 verwiesen.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

Tabelle 5.2 — Berechnungsarten für Schalenträgerwerke

A11

Berechnungsart		Schalentheorie	Werkstoffgesetz	Schalengeometrie
Membrantheorietische Berechnung	MTA	Membrangleichgewicht	Nicht anwendbar	Ohne Imperfektionen ^a
Linear elastische Berechnung	LA	Lineare Biegung und Verzerrung	Linear	Ohne Imperfektionen ^a
Linear elastische Verzweigungs(eigenwert)-Berechnung	LBA	Lineare Biegung und Verzerrung	Linear	Ohne Imperfektionen ^a
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung	GNA	Nichtlinear	Linear	Ohne Imperfektionen ^a
Materiell nichtlineare Berechnung	MNA	Linear	Nichtlinear	Ohne Imperfektionen ^a
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung	GMNA	Nichtlinear	Nichtlinear	Ohne Imperfektionen ^a
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen	GNIA	Nichtlinear	Linear	Mit Imperfektionen ^b
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen	GMNIA	Nichtlinear	Nichtlinear	Mit Imperfektionen ^b
^a Geometrie ohne Imperfektionen bedeutet, dass bei diesem Berechnungsmodell die geometrischen Nennbedingungen ohne Berücksichtigung der entsprechenden Abweichungen angewendet werden. ^b Geometrie mit Imperfektionen bedeutet, dass bei diesem Berechnungsmodell die geometrischen Abweichungen von den geometrischen Nennbedingungen (Toleranzen) berücksichtigt werden.				

A11

Tabelle 5.3 — Beschreibung der Berechnungsarten für Schalenträgerwerke

A11

Membrantheoretische Berechnung (MTA)	Berechnung, die das Tragverhalten einer Schalenstruktur unter verteilten Lasten unter der Annahme beschreibt, dass das Gleichgewicht mit den äußeren Lasten durch Membrankräfte erreicht wird
Linear elastische Berechnung (LA)	Berechnung, die das Tragverhalten auf der Grundlage der linear-elastischen Biegetheorie beschreibt, angewendet auf die perfekte Geometrie der Schalenmittelfläche
Linear elastische Verzweigungs(eigenwert)-Berechnung (LBA)	Berechnung, die den linearen Verzweigungseigenwert auf der Grundlage der linear-elastischen Schalenbiegetheorie kleiner Verformungen beschreibt, angewendet auf die perfekte Geometrie. Es ist zu beachten, dass die Bezeichnung Eigenwert hier nicht auf Schwingungszustände bezieht.
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA)	Berechnung auf der Grundlage der auf die perfekte Geometrie angewendeten nichtlinearen Schalenbiegetheorie großer Verschiebungen und eines linear-elastischen Werkstoffgesetzes
Materiell nichtlineare Berechnung (MNA)	Berechnung wie (LA), bei der jedoch das nichtlineare Werkstoffgesetz berücksichtigt wird. Bei Schweißkonstruktionen sind die abweichenden Werkstoffeigenschaften in der Wärmeeinflusszone zu berücksichtigen.
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)	Berechnung auf der Grundlage der auf die perfekte Geometrie angewendeten nichtlinearen Schalenbiegetheorie großer Verschiebungen und eines nichtlinearen Werkstoffgesetzes. Bei Schweißkonstruktionen sind die abweichenden Werkstoffeigenschaften in der Wärmeeinflusszone zu berücksichtigen.
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA) ^a	Berechnung wie (GNA) jedoch mit geometrischen Imperfektionen
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)	Berechnung wie (GMNA) jedoch mit geometrischen Imperfektionen
^a Diese Art der Berechnung wird in dieser Norm nicht erfasst, ist jedoch hier aus Gründen einer vollständigen Darstellung aller Arten der Schalenberechnung aufgeführt.	

A11

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

6 Grenzzustand der Tragfähigkeit

6.1 Beanspruchbarkeit des Querschnitts

6.1.1 Bemessungswerte für die Spannungen

(1) An allen Punkten des Tragwerks sollte der Bemessungswert der Spannung $\sigma_{eq,Ed}$ als die höchste Primärspannung angenommen werden, die bei einer Tragwerksberechnung unter Berücksichtigung der Gesetze für das Gleichgewicht zwischen den Bemessungswerten der Verkehrslasten und der Schnittkräfte und -momente bestimmt wird.

(2) Die Primärspannung darf als Höchstwert der Spannungen angenommen werden, die für das Gleichgewicht mit den an einem Punkt oder entlang einer Linie des Schalentragwerks aufgebracht Lasten erforderlich sind.

(3) Wenn eine Berechnung nach der *Membrantheorie* (MTA) durchgeführt wird, kann das sich ergebende zweidimensionale Feld der Spannungsresultanten $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$, $n_{x\theta,Ed}$ durch den nach der folgenden Gleichung errechneten Bemessungswert der Ersatzspannung $\sigma_{eq,Ed}$ dargestellt werden:

$$\sigma_{eq,Ed} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{x,Ed}^2 + n_{\theta,Ed}^2 - n_{x,Ed}n_{\theta,Ed} + 3n_{x\theta,Ed}^2} \quad (6.1)$$

(4) Wenn eine *linear elastische Analyse* (LA) oder eine *geometrisch nichtlineare elastische Analyse* (GNA) angewendet wird, kann das sich ergebende zweidimensionale Feld der Primärspannungen durch den Bemessungswert für die von-Mises-Ersatzspannung dargestellt werden:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed}\sigma_{\theta,Ed} + 3(\tau_{x\theta,Ed}^2 + \tau_{xn,Ed}^2 + \tau_{\theta n,Ed}^2)} \quad (6.2)$$

Hierbei sind

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n_{x,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x,Ed}}{t^2/4} \right), \quad \sigma_{\theta,Ed} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n_{\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{t^2/4} \right) \quad (6.3)$$

$$\tau_{x\theta,Ed} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n_{x\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x\theta,Ed}}{t^2/4} \right), \quad \tau_{xn,Ed} = \frac{q_{xn,Ed}}{t}, \quad \tau_{\theta n,Ed} = \frac{q_{\theta n,Ed}}{t} \quad (6.4)$$

Dabei ist η ein Korrekturfaktor für das unelastische Verhalten des Werkstoffs, der sowohl von den Merkmalen des Härtens als auch von der Zähigkeit der Legierung abhängig ist.

ANMERKUNG 1 Die oben angegebenen Ausdrücke liefern eine für Bemessungszwecke vereinfachte konservative Ersatzspannung.

ANMERKUNG 2 Werte für η sind in EN 1999-1-1, Anhang H in Abhängigkeit von den Legierungseigenschaften angegeben. Für η sollten Werte angesetzt werden, die einem geometrischen Formbeiwert $\alpha_0 = 1,5$ entsprechen.

ANMERKUNG 3 Die Werte für $\tau_{xn,Ed}$ und $\sigma_{xn,Ed}$ sind im Allgemeinen sehr klein und haben keinen Einfluss auf die Beanspruchbarkeit, so dass sie in der Regel vernachlässigt werden dürfen.

6.1.2 Bemessungswerte für die Beanspruchbarkeit

(1) Der Bemessungswert für die von-Mises-Ersatzfestigkeit sollte nach folgender Gleichung errechnet werden:

Ⓐ₁₁

$$f_{\text{eq,Rd}} = \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \quad \text{außerhalb der WEZ} \quad (6.5)$$

$$f_{\text{eq,Rd}} = \min \left(\frac{\rho_{\text{u,haz}} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}, \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \right) \quad \text{im Bereich WEZ} \quad (6.6)$$

Ⓐ₁₁

Hierbei ist

Ⓐ₁₁ f_o Ⓐ₁₁ der charakteristische Wert für die 0,2%-Dehngrenze nach EN 1999-1-1;

f_u der charakteristische Wert der Bruchfestigkeit nach EN 1999-1-1;

$\rho_{\text{u,haz}}$ das Verhältnis zwischen der Bruchfestigkeit in der Wärmeeinflusszone (WEZ) und im Grundwerkstoff nach EN 1999-1-1;

γ_{M1} der in 2.1 (3) angegebene Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit;

γ_{M2} der in 2.1 (3) angegebene Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit.

(2) Der Einfluss der Löcher für Verbindungsmittel sollte nach EN 1999-1-1 berücksichtigt werden.

6.1.3 Spannungsbegrenzung

(1) Für diesen Grenzzustand sollten die Bemessungsspannungen bei allen Nachweisen die folgende Bedingung erfüllen:

$$\sigma_{\text{eq,Ed}} \leq f_{\text{eq,Rd}} \quad (6.7) \quad \text{Ⓐ}_{11}$$

6.1.4 Bemessung durch numerische Analyse

(1) Der Bemessungswert für die plastische Grenzbeanspruchbarkeit sollte als ein Lastverhältnis R bestimmt werden, der auf die Bemessungswerte der kombinierten Einwirkungen für den jeweiligen Lastfall angewendet wird.

(2) Die Bemessungswerte für die Einwirkungen F_{Ed} sollten nach 5.3 bestimmt werden.

(3) In einer *materiell nichtlinearen Analyse* (MNA) und einer *geometrisch und materiell nichtlinearen Analyse* (GMNA) auf der Grundlage des Bemessungswertes für die Grenztragfähigkeit $\text{Ⓐ}_{11} f_o / \gamma_M \text{Ⓐ}_{11}$ sollte die Schale dem um das Lastverhältnis R progressiv zunehmenden Bemessungswert der Lasten ausgesetzt werden, bis der plastische Grenzzustand erreicht ist.

(4) Wenn eine *materiell nichtlineare Analyse* (MNA) angewendet wird, darf das Lastverhältnis R_{MNA} als der größte bei der Analyse ermittelte Wert angenommen werden. Der Einfluss der Kaltverfestigung darf unter der Voraussetzung einbezogen werden, dass ein entsprechender Grenzwert für die zulässige Werkstoff-

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

verformung berücksichtigt wird. Anleitungen zu den analytischen Modellen für den bei der MNA anzuwendenden Zusammenhang Spannung-Dehnung werden in EN 1999-1-1 angegeben.

(5) Wenn eine *geometrisch und materiell nichtlineare Analyse* (GMNA) angewendet wird, sollte, sofern bei der Analyse eine Höchstlast mit nachfolgender Lastverringernng vorhergesagt wird, der Höchstwert zur Bestimmung des Lastverhältnisses R_{GMNA} angewendet werden. Falls bei einer GMNA-Analyse keine Höchstlast vorhergesagt wird, sondern ein progressiv ansteigendes Verhältnis Wirkung-Verschiebung (mit oder ohne Kaltverfestigung des Werkstoffs) erhalten wird, sollte davon ausgegangen werden, dass das Lastverhältnis R_{GMNA} nicht größer als der Wert ist, bei dem der größte von-Mises-Ersatzwert für die bleibende Dehnung im Tragwerk den im Abschnitt 3 von EN 1999-1-1 angegebenen Grenzwert für die Verformung der Legierung erreicht. Für Bemessungszwecke kann in Abhängigkeit von den Merkmalen der Legierung ein Wert für die Bruchdehnung von $\overline{\epsilon_{11}} \cdot 5 (f_0/E)$ oder $10 (f_0/E) \overline{\epsilon_{11}}$ vorausgesetzt werden.
 ~~$\overline{\epsilon_{11}}$~~ gestrichener Text $\overline{\epsilon_{11}}$

ANMERKUNG Werte für die maximale Zugdehnung ϵ_u für $\overline{\epsilon_{11}}$ ($5 (f_0/E)$ oder $10 (f_0/E) \overline{\epsilon_{11}}$) sind in EN 1999-1-1, Anhang H angegeben.

(6) Die Berechnung sollte im Ergebnis folgende Bedingung erfüllen:

$$R = \frac{F_{Rd}}{F_{Ed}} \geq 1,0 \quad (6.8)$$

hierbei ist F_{Ed} der Bemessungswert für die Einwirkung.

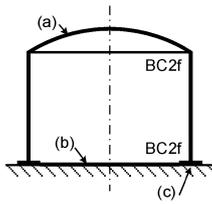
6.2 Knickfestigkeit (Beanspruchbarkeit durch Beulen; Beulsicherheitsnachweis)

6.2.1 Allgemeines

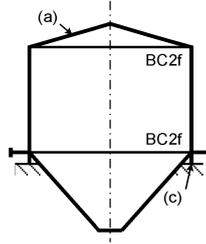
(1) Alle relevanten Kombinationen von Einwirkungen, die in der Wand der Schale Druck- oder Schub-Membranspannungen erzeugen, sollten berücksichtigt werden.

(2) Nach der Vorzeichenvereinbarung, die für die Berechnung der Beulen gilt, sollte Druck als positiv für die Spannungen und Spannungsergebnisse in Meridial- und Umfangsrichtung angesetzt werden.

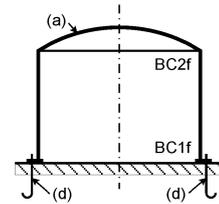
(3) Besondere Aufmerksamkeit sollte den Randbedingungen gelten, die für die bedingt durch Beulen zunehmenden Verschiebungen zutreffen (im Gegensatz zu Verschiebungen, die nicht durch Beulen entstehen). Beispiele für entsprechende Randbedingungen werden in Bild 6.1 angegeben.



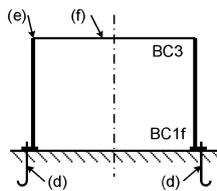
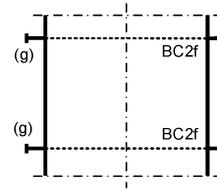
Tank ohne Verankerung



Silo ohne Verankerung



Tank mit Verankerung

Oben offener Tank
mit VerankerungAbschnitt eines langen Zylinders
mit Ringsteife

Legende

- (a) Dach
- (b) Bodenplatte
- (c) Ohne Verankerung
- (d) Ankerschrauben in dichtem Abstand
- (e) Ohne Ringsteife
- (f) Freier Rand
- (g) Ringsteife

Bild 6.1 — Schematische Darstellung für Beispiele zu den Randbedingungen für den durch Beulen bedingten Grenzzustand

6.2.2 Geometrische Toleranzen, die für Beulen von Belang sind

(1) Die in EN 1090-3 angegebenen Grenzen für die geometrischen Toleranzen sollten eingehalten werden, falls Beulen einer der zu berücksichtigenden Grenzzustände für die Tragfähigkeit sind.

ANMERKUNG 1 Die hier bestimmten Bemessungswerte für Beulspannungen schließen Imperfektionen ein, die auf geometrische Toleranzen zurückzuführen sind, mit deren Auftreten bei der Ausführung zu rechnen ist.

ANMERKUNG 2 Die in EN 1090-3 angegebenen geometrischen Toleranzen haben bekanntermaßen einen großen Einfluss auf die Sicherheit des Tragwerks.

(2) Die Toleranzklasse (Klasse 1, Klasse 2, Klasse 3 oder Klasse 4) sollte nach den in EN 1090-3 angegebenen Definitionen sowohl für den Lastfall als auch für die Toleranz ausgewählt werden. Die Beschreibung der Klassen bezieht sich nur auf die Bewertung der Festigkeit.

(3) Alle Imperfektionsarten sollten gesondert klassifiziert werden; für die gesamte Bemessung sollte die niedrigste Klasse maßgebend sein.

(4) Die unterschiedlichen Toleranzarten können als unabhängig voneinander behandelt werden, und im Allgemeinen brauchen keine Interaktionen berücksichtigt zu werden.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

6.2.3 Schale unter Druck- und Schubbeanspruchungen

6.2.3.1 Bemessungswerte für die Spannungen

(1) Die Bemessungswerte für die Spannungen $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ und τ_{Ed} sollten als die $\langle A_{11} \rangle$ maßgebenden Werte $\langle A_{11} \rangle$ für die Druck- und Schub-Membranspannungen angenommen werden, die mit Hilfe der *linearen Analyse der Schale* (LA) ermittelt werden. Unter rein rotationssymmetrischen Bedingungen der Belastung und Abstützung und in anderen einfachen Lastfällen darf allgemein die Membrantheorie angewendet werden.

(2) Sofern in Anhang A keine spezifischen Festlegungen getroffen werden, sollten als $\langle A_{11} \rangle$ maßgebende Werte $\langle A_{11} \rangle$ der Membranspannungen für jede Spannung bei der jeweils zutreffenden axialen Tragwerkskoordinate die jeweiligen Größtwerte angewendet werden.

ANMERKUNG In einigen Fällen (z. B. bei abgestuften Wänden, die durch Druck in Umfangsrichtung beaufschlagt werden, siehe A.2.3), sind die $\langle A_{11} \rangle$ maßgebenden Werte $\langle A_{11} \rangle$ der Membranspannungen fiktiv und größer als die tatsächlichen Höchstwerte.

(3) Für die üblichen Belastungsfälle dürfen die Membranspannungen mit Hilfe der jeweils zutreffenden Gleichungen errechnet werden.

6.2.3.2 Knick- bzw. Beulfestigkeit

(1) Die $\langle A_{11} \rangle$ Bemessungswerte der Beulspannung und Beultragfähigkeiten $\langle A_{11} \rangle$ sollten nach folgenden Gleichungen errechnet werden,

für nicht ausgesteifte Schalen $\langle A_{11} \rangle$

$$\sigma_{x,Rd} = \alpha_x \rho_{x,w} \chi_{x,perf} \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \quad (6.9)$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \alpha_\theta \rho_{\theta,w} \chi_{\theta,perf} \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \quad (6.10)$$

$$\tau_{Rd} = \alpha_\tau \rho_{\tau,w} \chi_{\tau,perf} \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (\text{gilt auch für ausgesteifte Schalen}) \quad (6.11)$$

$\langle A_{11} \rangle$

und für ausgesteifte und/oder profilierte Schalen

$$n_{x,Rd} = \alpha_{n,x} \chi_{x,perf} \frac{n_{x,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (6.12)$$

$$p_{n,Rd} = \alpha_{p,\theta} \chi_{\theta,perf} \frac{p_{n,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (\langle A_{11} \rangle \text{ gestrichener Text } \langle A_{11} \rangle) \quad (6.13)$$

Hierbei ist

$n_{x,Rk}$ die axiale Quetschgrenze der ausgesteiften Schale;

$p_{n,Rk}$ der gleichmäßige Druck an der Quetschgrenze der ausgesteiften oder der torikonischen und der torisphärischen Schale;

α_i der Abminderungsfaktor für die Imperfektion, der aus Anhang A zu entnehmen ist;

$\rho_{i,w}$ der Abminderungsfaktor für die Wärmeeinflusszonen nach 6.2.4.4. Für Schalen ohne Schweißnähte ist $\rho_{i,w} = 1$;

$\chi_{i,perf}$ der Abminderungsfaktor für die Beulen für eine perfekte Schale, angegeben unter (2);

γ_{M1} der Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit nach 2.1(3).

ANMERKUNG 1 Ausdruck (6.13) gilt auch für torikonische und torisphärische Schalen, siehe Anhang B.

ANMERKUNG 2 α_i für torikonische und torisphärische Schalen, siehe Anhang B.

(2) Der Abminderungsfaktor für die Beulen für eine perfekte Schale wird nach folgender Gleichung errechnet: A11

$$\chi_{i,perf} = \frac{1}{\phi_i + \sqrt{\phi_i^2 - \bar{\lambda}_i^2}} \quad \text{aber } \chi_{i,perf} \leq 1,00 \quad (6.14)$$

A11

mit:

$$\phi_i = 0,5 (1 + \mu_i (\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_{i,0}) + \bar{\lambda}_i^2) \quad (6.15)$$

Hierbei ist

μ_i ein Parameter, der von der Legierung und vom Belastungsfall abhängig und aus Anhang A zu entnehmen ist;

$\bar{\lambda}_{i,0}$ die auf die Quetschgrenze bezogene Schlankheit, die aus Anhang A zu entnehmen ist;

i der Index, der in Abhängigkeit von der Belastungsart x , θ oder τ heißt.

(3) Die Schlankheitsparameter der Schale für unterschiedliche Spannungskomponenten sollten nach folgenden Gleichungen bestimmt werden,

für nicht ausgesteifte Schalen: A11

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_o}{\sigma_{x,cr}}} \quad (6.16)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{f_o}{\sigma_{\theta,cr}}} \quad (6.17)$$

$$\bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\frac{f_o}{\sqrt{3}\tau_{cr}}} \quad (\text{gilt auch für ausgesteifte Schalen}) \quad (6.18)$$

A11

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

und für ausgesteifte und/oder profilierte Schalen

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{n_{x,Rk}}{n_{x,cr}}} \quad (6.19)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{p_{n,Rk}}{p_{n,cr}}} \quad (6.20)$$

Hierbei ist

$\sigma_{x,cr}$, $\sigma_{\theta,cr}$ und τ_{cr} die in Anhang A angegebenen oder durch die *lineare elastische Verzweigungs-Analyse* (Eigenwert-Analyse) (LBA) ermittelten kritischen Beulspannungen;

$n_{x,cr}$, $p_{n,cr}$ die kritischen Beulspannungsergebnisse für ausgesteifte oder torikonische und torisphärische Schalen, die in Anhang A angegeben oder durch die *lineare elastische Verzweigungs-Analyse* (Eigenwert-Analyse) (LBA) ermittelt werden.

ANMERKUNG 1 Die Ausdrücke (6.19) und (6.20) gelten auch für torikonische und torisphärische Schalen, siehe Anhang B.

ANMERKUNG 2 $p_{n,cr}$ für torikonische und torisphärische Schalen, siehe Anhang B.

6.2.3.3 Nachweis der Beulfestigkeit

(1) Obwohl Beulen kein nur durch Spannungen ausgelöstes Versagensphänomen darstellen, sollte der Nachweis der Beulfestigkeit durch Begrenzung der Bemessungswerte für Membranspannungen oder Spannungsergebnisse geführt werden. Der Einfluss der Biegespannungen auf die Beulfestigkeit kann unter der Voraussetzung vernachlässigt werden, dass die Spannungen als Folge von Kompatibilitätseinflüssen des Randes entstehen. Biegespannungen aus lokalen Lasten oder aus Wärmegradienten sollten besonders beachtet werden.

(2) In Abhängigkeit vom jeweiligen Belastungs- und Spannungsfall sollten eine oder mehrere der folgenden Nachweise für die $\overline{A_{11}}$ maßgebenden Werte $\overline{A_{11}}$ der einzelnen Membranspannungskomponenten durchgeführt werden:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (6.21)$$

$$\sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} \quad (6.22)$$

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd} \quad (6.23)$$

(3) Falls unter den betrachteten Einwirkungen mehr als eine der für Beulen wesentlichen Membranspannungskomponenten vorhanden ist, sollte für den kombinierten Membranspannungszustand der folgende Nachweis auf Interaktion durchgeführt werden:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right)^{k_\theta} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right) + \left(\frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}}\right)^{k_\tau} \leq 1,00 \quad (6.24)$$

Dabei sind $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ und τ_{Ed} die für eine Interaktion relevanten Gruppen der signifikanten Druck- und Schub-Membranspannungswerte in der Schale; die Werte für die Interaktionsparameter k_x , k_θ , k_τ und k_i sind nach folgenden Gleichungen zu errechnen:

$$\begin{aligned} k_x &= 1 + \chi_x^2 \\ k_\theta &= 1 + \chi_\theta^2 \\ k_\tau &= 1,5 + 0,5 \chi_\tau^2 \\ k_i &= (\chi_x \chi_\theta)^2 \end{aligned} \tag{6.25}$$

ANMERKUNG 1 Bei einem nicht ausgesteiften Zylinder, der durch axialen Druck und Druck in Umfangsrichtung und durch Schub beansprucht wird, darf die in A.1.6 angegebene Gleichung für die Interaktionsparameter angewendet werden.

ANMERKUNG 2 Die oben genannten Regeln können mitunter unzureichend sein, sie erfassen jedoch die beiden, für viele Situationen sicheren Grenzfälle: a) in sehr dünnen Schalen ist die Interaktion zwischen σ_x und σ_θ linear, und b) in sehr dicken Schalen für die Interaktion zwischen Spannungen gilt die von-Mises-Interaktion der äquivalenten Spannung oder die der in EN 1999-1-1 angegebenen alternativen Interaktionsgleichung.

(4) Wenn $\sigma_{x,Ed}$ oder $\sigma_{\theta,Ed}$ eine Zugspannung ist, sollte ihr Wert in Gleichung (6.24) gleich null gesetzt werden.

ANMERKUNG $\overline{A_{11}}$ Für axialdruckbeanspruchte Zylinder unter Innendruck $\overline{A_{11}}$ (wodurch in Umfangsrichtung eine Zugspannung entsteht), gelten die in Anhang A angegebenen besonderen Festlegungen. Der für $\sigma_{x,Rd}$ ermittelte Wert berücksichtigt sowohl die Verfestigungswirkung des Innendruckes auf die elastische Beulbeanspruchbarkeit als auch den Schwächungseinfluss des elastisch-plastischen Elefantenfuß-Phänomens [Gleichung (A.22)]. Die Beulfestigkeit wird exakt repräsentiert, wenn die Zugspannung $\sigma_{\theta,Ed}$ in Gleichung (6.24) gleich null gesetzt wird.

(5) Die Lagen und Werte für alle in Gleichung (6.24) kombiniert anzuwendenden beulen-relevanten Membranspannungen werden in Anhang A festgelegt.

6.2.4 Einfluss des Schweißens

6.2.4.1 Allgemeines

(1) Bei der Bemessung von Schalenkonstruktionen aus Aluminium sollten die allgemeinen Kriterien und Regeln für Schweißkonstruktionen nach EN 1999-1-1 eingehalten werden.

(2) Bei der Bemessung von geschweißten Schalenkonstruktionen aus kalt verfestigten oder aushärtbaren Legierungen sollte die in der Nähe von Schweißnähten auftretende Verringerung der Festigkeitswerte berücksichtigt werden. Dieser Bereich wird als Wärmeeinflusszone (WEZ) bezeichnet. Ausnahmen für diese Regel werden in EN 1999-1-1 angegeben.

(3) Zu Bemessungszwecken wird angenommen, dass die Festigkeitswerte in der gesamten Wärmeeinflusszone auf das gleiche Niveau verringert werden.

ANMERKUNG 1 Wenn auch diese Verringerung im Wesentlichen die 0,2%-Dehngrenze und die Zugfestigkeit des Werkstoffs betrifft, kann es durchaus sein, dass die Einflüsse auf druckbeanspruchte Teile von Schalenkonstruktionen, die in Abhängigkeit von der konstruktiven Schlankheit und den Eigenschaften der Legierung beulanfällig sind, signifikant sind.

ANMERKUNG 2 Der Einfluss der durch Schweißen bedingten Festigkeitsverringern ist für Beulen im plastischen Bereich signifikanter. Auch örtliche Schweißnähte in beulgefährdeten Bereichen können wegen der WEZ die Beulbeanspruchbarkeit merklich verringern. Daher wird empfohlen, in großen, nicht ausgesteiften und durch Druck beanspruchten Teilen Schweißungen zu vermeiden.

DIN EN 1999-1-5:2017-03 EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

ANMERKUNG 3 Zu Zwecken der Bemessung kann eine Schweißung als Längsstreifen auf der Schalenoberfläche angesehen werden, deren beeinflusster Bereich sich unmittelbar um die Schweißnaht ausbreitet. Außerhalb dieses Bereichs werden rasch wieder die vollständigen ungeschweißten Festigkeitswerte erreicht. Entlang dieser Streifen können Fließlinien auftreten, wenn sich Beulen in der Schale bilden.

ANMERKUNG 4 Manchmal ist es möglich, die Einflüsse der Festigkeitsverringering in der WEZ durch Warmauslagern nach dem Schweißen zu mildern, siehe EN 1999-1-1.

(4) Der Einfluss der schweißbedingten Festigkeitsverringering auf die Beulbeanspruchbarkeit der Schale sollte für alle Schweißnähte, die direkt oder indirekt einer Druckspannung ausgesetzt sind, nach den in 6.2.4.2 angegebenen Regeln überprüft werden.

6.2.4.2 Grad der Festigkeitsverringering

(1) Der Grad der schweißbedingten Festigkeitsverringering wird durch die Abminderungsfaktoren $\rho_{o,haz}$ und $\rho_{u,haz}$ angegeben, die aus den Quotienten des charakteristischen Wertes für die 0,2%-Dehngrenze $f_{o,haz}$ (bzw. für die Zugfestigkeit $f_{u,haz}$) in der Wärmeeinflusszone und des charakteristischen Wertes für $\overline{A_{11}}$ f_o ($\overline{A_{11}}$) (bzw. f_u) im Grundwerkstoff bestimmt werden:

$$\rho_{o,haz} = \frac{f_{o,haz}}{f_o} \quad \text{und} \quad \rho_{u,haz} = \frac{f_{u,haz}}{f_u} \quad (6.26)$$

(2) Die charakteristischen Werte für die Festigkeiten $\overline{A_{11}}$ $f_{o,haz}$ und $f_{u,haz}$ sowie die Werte für $\rho_{o,haz}$ und $\rho_{u,haz}$ $\overline{A_{11}}$ werden in Tabelle 3.2a von EN 1999-1-1 für Aluminiumknetlegierungen in Form von Blechen, Bändern und Platten und in Tabelle 3.2b für Strangpressteile angegeben.

(3) Die Erholungszeiten nach dem Schweißen sollten nach den in EN 1999-1-1 angegebenen Bestimmungen bewertet werden.

6.2.4.3 Ausdehnung der Wärmeeinflusszone

(1) Die in EN 1999-1-1 angegebenen allgemeinen Hinweise auf die Ausdehnung der WEZ sollten beachtet werden.

(2) Bei den Beulsicherheitsnachweisen wird davon ausgegangen, dass die WEZ in den Schalenblechen in Bereichen mit Beulrisiko mit einem Abstand b_{haz} in jede Richtung verläuft, ausgehend von der Schweißnaht und entsprechend der Darstellung in Bild 6.2 an ebenen Stumpfnähten rechtwinklig zur Mittellinie oder an Kehlnähten rechtwinklig zur Schnittlinie der Schweißnahtoberflächen gemessen:

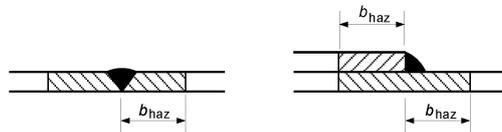


Bild 6.2 — Ausdehnung der Schweißeinflusszonen (WEZ) im Schalenblech

6.2.4.4 Beulbeanspruchbarkeit unausgesteifter geschweißter Schalen

(1) Die Beulbeanspruchbarkeit unausgesteifter geschweißter Schalen sollte in allen Fällen bewertet werden, in denen in der Schale Druckspannungsergebnisse in seitlich nicht behinderten geschweißten Tafeln auftreten.

(2) Der Nachweis des Schweißeinflusses auf Beulen kann entfallen, wenn alle Schweißnähte in den Schalen parallel zu den Druckspannungsergebnissen gelegt werden, die im Tragwerk unter allen Lastbedingungen

wirksam werden, vorausgesetzt, der durch die WEZ bedingte Abminderungsfaktor $\rho_{0,haz}$ ist nicht kleiner als 0,60.

(3) Der Einfluss des Schweißens auf die Beulbeanspruchbarkeit kann durch eine *geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Imperfektionen* (GMNIA) unter Berücksichtigung der tatsächlichen Eigenschaften sowohl des Grundwerkstoffs als auch der Schweißeinflusszonen (WEZ) bewertet werden.

(4) Wenn keine exakte GMNIA-Analyse durchgeführt werden kann, ist eine Bewertung der Beulbeanspruchbarkeit der Schale auf vereinfachte Weise mit Hilfe des Abminderungsfaktors möglich, der durch das Verhältnis $\rho_{i,w} = \chi_{i,w}/\chi_i$ der Beulfaktoren einer geschweißten Konstruktion $\chi_{w,i}$ und einer ungeschweißten Konstruktion χ_i bestimmt wird.

ANMERKUNG 1 Druckspannungsergebnisse in Schalen können nicht nur durch direkten Druck entstehen, sondern auch durch äußeren Druck, Schub und lokalisierte Lasten. Unabhängig von der Lastbedingung sind Abminderungsfaktoren $\chi_{w,i}$ anzuwenden, wenn Schweißnähte orthogonal zu den Druckspannungsergebnissen eine lokale plastische Verformung veranlassen können.

ANMERKUNG 2 $\langle A_{11} \rangle$ Der Index „i“ in den Absätzen (4) und (5) steht für „x“, „ θ “ oder „ τ “ in Abhängigkeit davon, ob sich die Abminderungsfaktoren χ und ρ auf axialen Druck, Druck in Umfangsrichtung bzw. Schub beziehen. $\langle A_{11} \rangle$

(5) Der Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Festigkeitsverringerung in der WEZ von Schalenkonstruktionen wird nach der folgenden Gleichung bestimmt:

$$\rho_{i,w} = \omega_0 + (1 - \omega_0) \frac{\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_{i,0}}{\bar{\lambda}_{i,w} - \bar{\lambda}_{i,0}} \quad \langle A_{11} \rangle \text{ mit } \rho_{i,w} \leq 1 \text{ und } \rho_{i,w} \geq \omega_0 \langle A_{11} \rangle \quad (6.27)$$

Hierbei ist $\langle A_{11} \rangle$

$$\rho_{u,haz} f_u / \gamma_{M2} \quad \text{aber } \omega_0 \leq 1 \quad (6.28)$$

$$\omega_0 = \frac{f_0 / \gamma_{M1}}{f_u / \gamma_{M2}}$$

$\rho_{u,haz}$ und $\rho_{o,haz}$ die durch die Schweißeinflusszone bedingten Abminderungsfaktoren, die Tabelle 3.2a oder Tabelle 3.2b in EN 1999-1-1 zu entnehmen sind; $\langle A_{11} \rangle$

$\bar{\lambda}_{i,0}$ der relative Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze für die zu betrachtenden Lastfälle, die Anhang A zu entnehmen sind;

$\bar{\lambda}_{i,w}$ der Grenzwert für den relativen Schlankheitsparameter, bei dessen Überschreitung der Einfluss der Schweißnaht auf Beulen verschwindet und der durch folgende Gleichung angegeben wird:
 $\bar{\lambda}_{i,w} = 1,39 (1 - \rho_{o,haz})(\bar{\lambda}_{i,w,0} - \bar{\lambda}_{i,0})$, aber $\bar{\lambda}_{i,w} \leq \bar{\lambda}_{i,w,0}$, siehe Bild 6.3;

$\bar{\lambda}_{i,w,0}$ die absolute Obergrenze der Schlankheit für den Einfluss der Schweißnaht in Abhängigkeit von Lastfall, Baustoff und Toleranzklasse der Schale, die in Tabelle 6.5 angegeben wird.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

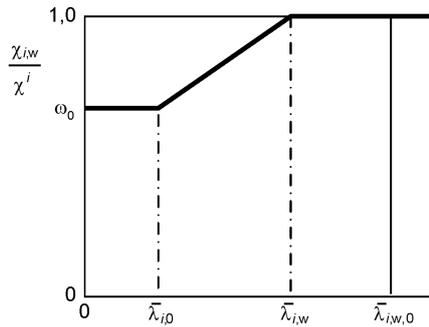


Bild 6.3 — Festlegung des durch die WEZ bedingten Abminderungsfaktors $\rho_{i,w}$

Tabelle 6.5 — $\bar{\lambda}_{i,w,0}$ -Werte für die in Anhang A berücksichtigten wesentlichen Lastfälle

Toleranz klasse	Axialer Druck $\bar{\lambda}_{x,w,0}$		Druck in Umfangsrichtung $\bar{\lambda}_{\theta,w,0}$		Torsion und Schub $\bar{\lambda}_{\tau,w,0}$	
	Werkstoff Klasse A	Werkstoff Klasse B	Werkstoff Klasse A	Werkstoff Klasse B	Werkstoff Klasse A	Werkstoff Klasse B
Klasse 1	0,8	0,7	1,2	1,1	1,4	1,3
Klasse 2	1,0	0,9	1,3	1,2	1,5	1,4
Klasse 3	1,2	1,1	1,4	1,3	1,6	1,5
Klasse 4	1,3	1,2	—	—	—	—

6.2.4.5 Beulbeanspruchbarkeit ausgesteifter geschweißter Schalen

(1) Für ausgesteifte geschweißte Schalen braucht kein Nachweis für den Einfluss des Schweißens erbracht zu werden, wenn die Steifen eine ausreichende seitliche Behinderung gegenüber den verschweißten Tafeln haben. Ist das nicht der Fall, gelten die Bestimmungen in 6.2.4.4.

6.2.5 Bemessung durch numerische Analyse

(1) Die in 5.5 und 6.1.4 für die *geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Imperfektionen* (GMNIA) angegebenen Verfahren dürfen angewendet werden. Die GMNIA-Analyse darf, als Alternative zum Verfahren nach 6.2.3, durchgeführt werden, indem die Größtwerte der in 6.2.2 angegebenen Toleranzen als anfängliche geometrische Imperfektionen angenommen werden.

(2) Für geschweißte Konstruktionen sollte für den Werkstoff in der Wärmeeinflusszone ein Modell entwickelt werden, siehe 6.2.4.2, 6.2.4.3 und 6.2.4.4.

7 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

7.1 Allgemeines

(1) Die in EN 1999-1-1 für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit angegebenen Regeln sollten auch auf Schalenkonstruktionen angewendet werden.

7.2 Durchbiegungen

- (1) Die Durchbiegungen dürfen unter der Annahme elastischen Verhaltens errechnet werden.
- (2) Die Grenzen für die Durchbiegungen sollten unter Bezug auf EN 1990, A.1.4, für jedes Projekt festgelegt und mit dem für das Projekt Verantwortlichen vereinbart werden.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

Anhang A (normativ)

Ausdrücke für Beuluntersuchungen in Schalenkonstruktionen

A.1 Unausgesteifte zylindrische Schalen mit konstanter Wanddicke

A.1.1 Anmerkungen und Randbedingungen

(1) Allgemeine Größen (Bild A.1)

l Länge des Zylinders zwischen oberer und unterer Begrenzung;

r Radius der Mittelfläche des Zylinders;

t Dicke der Schale:

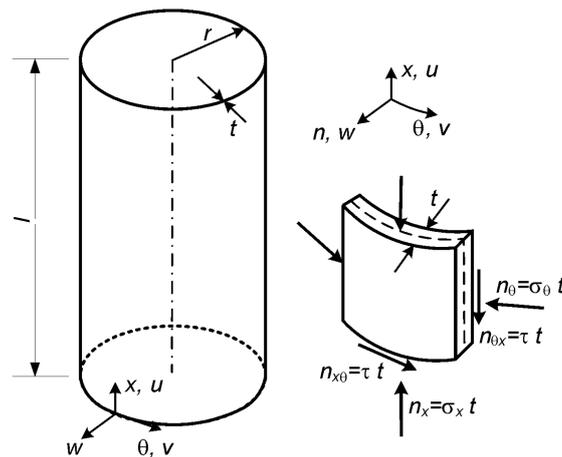


Bild A.1 — Geometrie, Membranspannungen und Spannungsergebnissen am Zylinder

(2) Die Randbedingungen werden in 5.2 und 6.2.1 festgelegt.

A.1.2 (Axialer) Druck in Meridianrichtung

(1) Zylinder brauchen nicht auf Beulen in Meridianrichtung überprüft zu werden, wenn sie die folgende Gleichung erfüllen: $\boxed{A.11}$

$$\frac{r}{t} \leq 0,03 \frac{E}{f_0} \quad (A.1) \quad \boxed{A.11}$$

A.1.2.1 Ideale Beulspannungen in Meridianrichtung

(1) Die folgenden Ausdrücke dürfen nur für Schalen mit den Randbedingungen BC 1 oder BC 2 an beiden Rändern angewendet werden.

(2) Die Länge des Schalenabschnitts wird durch den dimensionslosen Parameter ω gekennzeichnet:

$$\omega = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{l}{\sqrt{rt}} \quad (\text{A.2})$$

(3) Die kritische Beulspannung in Meridianrichtung sollte unter Anwendung der Werte für C_x aus Tabelle A.1 nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\sigma_{x,cr} = 0,605 E C_x \frac{t}{r} \quad (\text{A.3})$$

Tabelle A.1 — Faktor C_x für die kritische Beulspannung in Meridianrichtung

Zylinderschale	$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}}$	Faktor C_x
Kurze Länge	$\omega \leq 1,7$	$C_x = 1,36 - \frac{1,83}{\omega} + \frac{2,07}{\omega^2}$
Mittlere Länge	$1,7 < \omega < 0,5 \frac{r}{t}$	$C_x = 1$
Große Länge	$\omega \geq 0,5 \frac{r}{t}$	$C_x = 1 - \frac{0,2}{C_{xb}} \left(2 \omega \frac{t}{r} - 1 \right)$, aber für $C_x \geq 0,6$, wobei C_{xb} in Tabelle A.2 angegeben wird

Tabelle A.2 — Parameter C_{xb} für den Einfluss der Randbedingungen für lange Zylinder

Fall	Zylinderende	Randbedingung	C_{xb}
1	Ende 1	BC 1	6
	Ende 2	BC 1	
2	Ende 1	BC 1	3
	Ende 2	BC 2	
3	Ende 1	BC 2	1
	Ende 2	BC 2	

ANMERKUNG BC 1 schließt sowohl BC1f als auch BC1r ein.

(4) Für die in Tabelle A.1 definierten langen Zylinder, die weitere, nachfolgend angegebene Bedingungen erfüllen: A11

$$\frac{r}{t} \leq 150 \quad \text{und} \quad \frac{\omega t}{r} \leq 6 \quad \text{und} \quad 500 \leq \frac{E}{f_o} \leq 1000 \quad (\text{A.4}) \text{A11}$$

darf der Faktor C_x auch nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$C_x = C_{x,N} \frac{\sigma_{x,N,Ed}}{\sigma_{x,Ed}} + \frac{\sigma_{x,M,Ed}}{\sigma_{x,Ed}} \quad (\text{A.5})$$

Hierbei ist

$C_{x,N}$ der Parameter für einen langen Zylinder unter axialem Druck nach Tabelle A.1;

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

- $\sigma_{x,Ed}$ der Bemessungswert für die Spannung in Meridianrichtung ($\sigma_{x,Ed} = \sigma_{x,N,Ed} + \sigma_{x,M,Ed}$);
- $\sigma_{x,N,Ed}$ die Spannungskomponente aus dem axialen Druck (gleich bleibende Komponente in Umfangsrichtung);
- $\sigma_{x,M,Ed}$ die Spannungskomponente aus der globalen Biegung rohrförmiger Elemente (Spitzenwert der veränderlichen Komponente in Umfangsrichtung).

A.1.2.2 Beulparameter in Meridianrichtung

(1) Der elastische Imperfektionsfaktor in Meridianrichtung sollte nach folgender Gleichung errechnet werden: $\langle A_{11} \rangle$

$$\alpha_x = \frac{1}{1 + 2,60 \left(\frac{1}{Q} \sqrt{\frac{0,6E}{f_0}} (\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_{x,0}) \right)^{1,44}}, \text{ aber mit } \alpha_x \leq 1,00 \quad (A.6) \langle A_{11} \rangle$$

Hierbei ist

- $\bar{\lambda}_{x,0}$ der Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze in Meridianrichtung;
- Q der Toleranzparameter für den Druck in Meridianrichtung.

(2) Der Toleranzparameter Q sollte für die jeweils festgelegte Toleranzklasse aus Tabelle A.3 entnommen werden. Für Toleranzklasse 4 hängt der Toleranzparameter Q auch von den in Tabelle 5.1 definierten Randbedingungen ab.

(3) Der Legierungsfaktor und der Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze in Meridianrichtung sollten nach der in EN 1999-1-1 definierten Beulklasse des Werkstoffs aus Tabelle A.4 entnommen werden.

Tabelle A.3 — Toleranzparameter Q

Toleranzklasse	Wert für Q für die Randbedingungen	
	BC1r, BC2r	BC1f, BC2f
Klasse 1	16	
Klasse 2	25	
Klasse 3	40	
Klasse 4	60	50

Tabelle A.4 — Werte für $\bar{\lambda}_{x,0}$ und μ_x für den Druck in Meridianrichtung

Beulklasse des Werkstoffs	$\bar{\lambda}_{x,0}$	μ_x
A	0,20	0,35
B	0,10	0,20

(4) Für lange Zylinder, die den Sonderbedingungen von A.1.2.1(4) entsprechen, darf der Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze in Meridianrichtung nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\bar{\lambda}_{x,0,1} = \bar{\lambda}_{x,0} + 0,10 \frac{\sigma_{x,M,Ed}}{\sigma_{x,Ed}} \quad (\text{A.7})$$

Dabei sollte $\bar{\lambda}_{x,0}$ aus Tabelle A.4 entnommen werden, während $\sigma_{x,Ed}$ und $\sigma_{x,M,Ed}$ in A.1.2.1(4) angegeben werden.

A.1.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung)

(1) Zylinder brauchen nicht auf Beulen in Umfangsrichtung überprüft zu werden, wenn sie die folgende Gleichung erfüllen: $\boxed{\text{A11}}$

$$\frac{r}{t} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{f_0}} \quad (\text{A.8}) \quad \boxed{\text{A11}}$$

A.1.3.1 Kritische Beulspannungen in Umfangsrichtung

(1) Die folgenden Ausdrücke dürfen auf Schalen mit allen Randbedingungen angewendet werden.

(2) Die Länge des Schalenabschnitts wird durch den dimensionslosen Parameter ω gekennzeichnet:

$$\omega = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{l}{\sqrt{rt}} \quad (\text{A.9})$$

(3) Die kritische Beulspannung in $\boxed{\text{AC}}$ Umfangsrichtung $\boxed{\text{AC}}$ sollte unter Anwendung der Werte für C_θ aus Tabelle A.5 für Zylinder mit mittlerer Länge und aus Tabelle A.6 für kurze Zylinder nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\sigma_{\theta,cr} = 0,92 E \frac{C_\theta}{\omega} \frac{t}{r} \quad (\text{A.10})$$

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

Tabelle A.5 — Außendruck-Beulfaktor C_θ für Zylinder mit mittlerer Länge ($20 < \omega/C_\theta < 1,63 r/t$)

Fall	Zylinderende	Randbedingung	Faktor C_θ
1	Ende 1	BC 1	1,5
	Ende 2	BC 1	
2	Ende 1	BC 1	1,25
	Ende 2	BC 2	
3	Ende 1	BC 2	1,0
	Ende 2	BC 2	
4	Ende 1	BC 1	0,6
	Ende 2	BC 3	
5	Ende 1	BC 2	0
	Ende 2	BC 3	
6	Ende 1	BC 3	0
	Ende 2	BC 3	

Tabelle A.6 — Außendruck-Beulfaktor C_θ für kurze Zylinder ($\omega/C_\theta \leq 20$)

Fall	Zylinderende	Randbedingung	Faktor C_θ
1	Ende 1	BC 1	$C_\theta = 1,5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3}$
	Ende 2	BC 1	
2	Ende 1	BC 1	$C_\theta = 1,25 + \frac{8}{\omega^2} - \frac{4}{\omega^3}$
	Ende 2	BC 2	
3	Ende 1	BC 2	$C_\theta = 1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}}$
	Ende 2	BC 2	
4	Ende 1	BC 1	$C_\theta = 0,6 + \frac{1}{\omega^2} - \frac{0,3}{\omega^3}$
	Ende 2	BC 3	

ANMERKUNG In den Tabellen A.5 und A.6 steht BC 1 sowohl für BC1f als auch für BC1r.

(4) Für lange Zylinder ($\omega/C_\theta \geq 1,63 r/t$) sollte die Beulspannung in Umfangsrichtung nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\sigma_{\theta,cr} = E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left(0,275 + 2,03 \left(\frac{C_\theta r}{\omega t} \right)^4 \right) \quad (\text{A.11})$$

A.1.3.2 Beulparameter in Umfangsrichtung

(1) Der elastische Imperfektionsfaktor in AC Umfangsrichtung AC sollte nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\alpha_\theta = \frac{1}{1 + 0,2(1 - \alpha_{\theta,ref})(\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_{\theta,0})/\alpha_{\theta,ref}^2}, \text{ aber } \alpha_\theta \leq 1,00 \quad (\text{A.12}) \text{ AC}$$

(2) Der Bezugs-Imperfektionsfaktor $\alpha_{\theta, \text{ref}}$ in Umfangsrichtung sollte für die festgelegte Toleranzklasse aus Tabelle 7 entnommen werden:

Tabelle A.7 — Faktor $\alpha_{\theta, \text{ref}}$ in Abhängigkeit von der Toleranzklasse

Toleranzklasse	Parameter $\alpha_{\theta, \text{ref}}$
Klasse 1	0,50
Klasse 2	0,65
Klassen 3 und 4	0,75

(3) Der Legierungsfaktor und der Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze in \overline{AC} Umfangsrichtung \overline{AC} sollten entsprechend der in EN 1999-1-1 festgelegten Beulklasse des Werkstoffs aus Tabelle A.8 entnommen werden.

Tabelle A.8 — Werte für $\bar{\lambda}_{\theta, 0}$ und μ_{θ} für Druck in Umfangsrichtung

Beulklasse des Werkstoffs	$\bar{\lambda}_{\theta, 0}$	μ_{θ}
A	0,30	0,55
B	0,20	0,70

(4) Der aus der äußeren Windlast auf die Zylinder resultierende, ungleichmäßig verteilte Druck q_{eq} (siehe Bild A.1) darf im Rahmen des Beulsicherheitsnachweises für die Schale durch den folgenden äquivalenten gleichmäßigen Außendruck ersetzt werden:

$$q_{\text{eq}} = k_w q_{w, \text{max}} \quad (\text{A.13})$$

Dabei ist $q_{w, \text{max}}$ der größte Winddruck, und k_w sollte nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$k_w = 0,46 \left(1 + 0,1 \sqrt{\frac{C_{\theta} r}{\omega t}} \right) \quad (\text{A.14})$$

mit einem Wert für k_w nicht außerhalb des Bereichs $0,65 \leq k_w \leq 1,0$ und mit C_{θ} , das entsprechend den Randbedingungen aus Tabelle A.5 entnommen wird.

(5) Der in 6.2.3.3 einzusetzende Bemessungswert für die Umfangsspannung wird nach folgender Gleichung errechnet:

$$\sigma_{\theta, \text{Ed}} = (q_{\text{eq}} + q_s) \frac{r}{t} \quad (\text{A.15})$$

Dabei ist q_s der innere Saugzug, der durch Belüftung, inneres Teilvakuum oder andere Erscheinungen verursacht wird.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

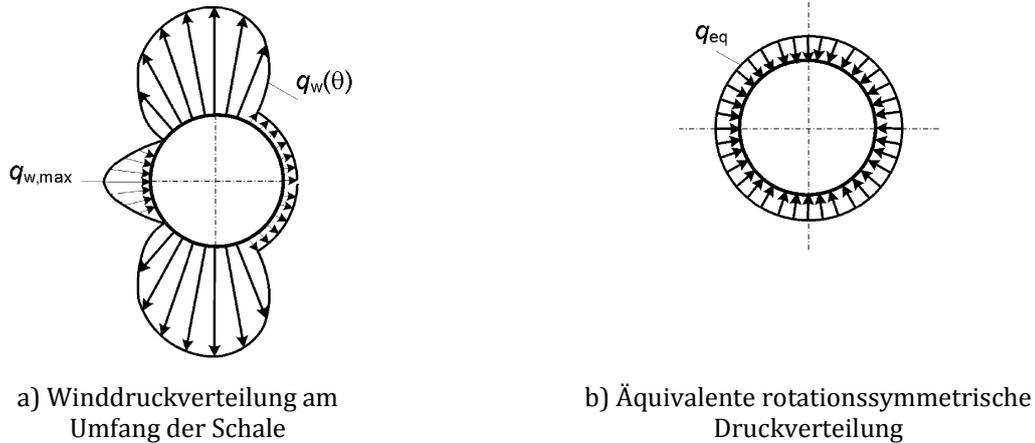


Bild A.2 — Transformation einer typischen Wind-Außendruckverteilung

A.1.4 Schubbeanspruchung

(1) Zylinder brauchen nicht auf durch Schubspannungen erzeugte Beulen überprüft zu werden, wenn sie die folgende Gleichung erfüllen: $\boxed{A.11}$

$$\frac{r}{t} \leq 0,16 \left(\frac{E}{f_o} \right)^{0,67} \quad (A.16) \quad \boxed{A.11}$$

A.1.4.1 Durch Schubbeanspruchung erzeugte kritische Beulspannungen

(1) Die folgenden Ausdrücke dürfen nur auf Schalen mit den Randbedingungen BC 1 oder BC 2 an beiden Rändern angewendet werden.

(2) Die Länge des Schalenabschnitts wird durch den dimensionslosen Parameter ω gekennzeichnet:

$$\omega = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{l}{\sqrt{rt}} \quad (A.17)$$

(3) Die durch Schub erzeugte kritische Beulspannung sollte unter Anwendung der Werte für C_τ aus Tabelle A.9 nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\tau_{cr} = 0,75 EC_\tau \frac{t}{r} \quad (A.18)$$

Tabelle A.9 — Faktor C_τ für die durch Schub erzeugte kritische Beulspannung

Zylinderschale	$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}}$	Faktor C_τ
Kurze Länge	$\omega \leq 10$	$C_\tau = \sqrt{1 + \frac{42}{\omega^3}}$
Mittlere Länge	$10 < \omega < 8,7 \frac{r}{t}$	$C_\tau = 1$
Große Länge	$\omega \geq 8,7 \frac{r}{t}$	$C_\tau = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\omega t}{r}}$

A.1.4.2 Schub-Beulparameter

(1) Der Schub-Imperfektionsfaktor sollte nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\alpha_\tau = \frac{1}{1 + 0,2(1 - \alpha_{\tau,\text{ref}})(\bar{\lambda}_\tau - \bar{\lambda}_{\tau,0}) / \alpha_{\tau,\text{ref}}^2}, \text{ aber } \alpha_\tau \leq 1,00 \quad (\text{A.19})$$

(2) Der Bezugs-Schub-Imperfektionsfaktor $\alpha_{\tau,\text{ref}}$ sollte für die festgelegte Toleranzklasse aus Tabelle **A.10** entnommen werden:

Tabelle A.10 — Faktor $\alpha_{\tau,\text{ref}}$ in Abhängigkeit von der Toleranzklasse

Toleranzklasse	Parameter $\alpha_{\tau,\text{ref}}$
Klasse 1	0,50
Klasse 2	0,65
Klassen 3 und 4	0,75

(3) Der Legierungsfaktor und der Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze in Schubrichtung sollten entsprechend der in EN 1999-1-1 festgelegten Beulklasse des Werkstoffs aus Tabelle A.11 entnommen werden.

Tabelle A.11 — $\bar{\lambda}_{\tau,0}$ - und μ_τ -Werte für Schub

Beulklasse des Werkstoffs	$\bar{\lambda}_{\tau,0}$	μ_τ
A	0,50	0,30
B	0,40	0,40

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

A.1.5 (Axiale) Druckbeanspruchung in Meridianrichtung mit gleichzeitig vorhandener Innendruckbeanspruchung

A.1.5.1 Kritische Beulspannung in Meridianrichtung unter Innendruck

(1) Es darf davon ausgegangen werden, dass die kritische Beulspannung in Meridianrichtung $\sigma_{x,cr}$ durch das Vorhandensein von Innendruck nicht beeinflusst wird; sie darf nach A.1.2.1 bestimmt werden.

A.1.5.2 Beulparameter in Meridianrichtung unter Innendruck

(1) Der Nachweis für die Beulfestigkeit in Meridianrichtung unter Innendruck sollte analog zu der Beulfestigkeit in Meridianrichtung ohne Innendruck nach 6.2.3.3 und A.1.2.2 durchgeführt werden. Der elastische Imperfektionsfaktor α_x ohne Innendruck darf jedoch durch den elastischen Imperfektionsfaktor $\alpha_{x,p}$ unter Innendruck ersetzt werden.

(2) Der kleinere der beiden folgenden Werte sollte als der elastische Imperfektionsfaktor $\alpha_{x,p}$ unter Innendruck angesehen werden:

$\alpha_{x,pe}$ ein Faktor, der die druckinduzierte elastische Stabilisierung erfasst;

$\alpha_{x,pp}$ ein Faktor, der die druckinduzierte plastische Stabilisierung erfasst.

(3) Der Faktor $\alpha_{x,pe}$ sollte nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\alpha_{x,pe} = \alpha_x + (1 - \alpha_x) \frac{\bar{p}}{\bar{p} + 0,3/\alpha_x^{0,5}} \quad (\text{A.20})$$

$$\bar{p} = \frac{p r}{t \sigma_{x,cr}} \quad (\text{A.21})$$

Hierbei ist

\bar{p} der kleinste Wert für den Innendruck an dem zu bewertendem Punkt, der garantiert gleichzeitig mit dem Druck in Meridianrichtung auftritt;

α_x der elastische Imperfektionsfaktor in Meridianrichtung ohne Innendruck nach A.1.2.2;

$\sigma_{x,cr}$ die kritische elastische Beulspannung in Meridianrichtung nach A.1.2.1(3).

(4) Der Faktor $\alpha_{x,pe}$ sollte nicht auf Zylinder angewendet werden, die nach A.1.2.1(3), Tabelle A.1, als lang eingestuft werden. Er sollte weiterhin nicht angewendet werden, wenn nicht

— der Zylinder eine mittlere Länge nach A.1.2.1(3), Tabelle A.1 hat;

— der Zylinder nach A.1.2.1(3), Tabelle A.1 kurz ist und $C_x = 1$ in A.1.2.1(3) eingeführt wurde.

(5) Der Faktor $\alpha_{x,pp}$ sollte nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\alpha_{x,pp} = \left(1 - \frac{\bar{p}^2}{\bar{\lambda}_x^4}\right) \left(1 - \frac{1}{1,12 + s^{1,5}}\right) \frac{s^2 + 1,21 \bar{\lambda}_x^2}{s(s + 1)} \quad (\text{A.22})$$

$$\bar{p} = \frac{pr}{t \sigma_{x,cr}} \quad (\text{A.23})$$

$$s = \frac{r}{400 t} \quad (\text{A.24})$$

Hierbei ist

\bar{p} der größte Wert für den Innendruck an dem zu bewertenden Punkt, der möglicherweise gleichzeitig mit dem Druck in Meridianrichtung auftritt;

$\bar{\lambda}_x$ der dimensionslose Schlankheitsparameter der Schale nach 6.2.3.2(3);

$\sigma_{x,cr}$ die kritische elastische Beulspannung in Meridianrichtung nach A.1.2.1(3).

A.1.6 Kombinationen von (axialer) Druckbeanspruchung in Meridianrichtung, Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung) und Schubbeanspruchung

(1) Die in 6.2.3.3(3) anzuwendenden Beul-Interaktionsparameter dürfen nach folgenden Gleichungen errechnet werden:

$$k_x = 1,25 + 0,75 \chi_x$$

$$k_\theta = 1,25 + 0,75 \chi_\theta \quad (\text{A.25})$$

$$k_t = 1,25 + 0,75 \chi_t$$

$$\boxed{\text{A11}} \quad k_i = (\chi_x \chi_\theta)^2 \boxed{\text{A11}}$$

wobei χ_x , χ_θ und χ_t die in 6.2.3.2 festgelegten Beul-Abminderungsfaktoren unter Anwendung der in A.1.2 bis A.1.4 angegebenen Beulparameter sind.

(2) Es sollte davon ausgegangen werden, dass die drei Membranspannungskomponenten an einem beliebigen Punkt der Schale mit Ausnahme der Ränder in kombinierter Interaktion stehen. Für alle Punkte innerhalb einer Zone, die von beiden Rändern des Zylinderabschnitts jeweils über die Länge l_s reicht, darf der Nachweis für eine Beul-Interaktion entfallen. Der Wert für l_s ist der kleinere der Werte, die nach den beiden folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$l_s = 0,1 L \quad \text{und} \quad l_s = 0,16 r \sqrt{r/t} \quad (\text{A.26})$$

(3) Falls es zu umständlich ist, die Beul-Interaktion für alle Punkten nachzuweisen, ist nach (4) und (5) eine einfachere konservative Bewertung möglich. Wenn der größte Wert einer der für Beulen relevanten Membranspannungen an den Enden einer Zylinderschale in einer der beiden Randzonen mit der Länge l_s auftritt, darf der Nachweis der Interaktion nach 6.2.3.3(3) unter Anwendung der in (4) definierten Werte durchgeführt werden.

(4) Falls die unter (3) genannte Bedingung erfüllt wird, darf für den Nachweis der Interaktion nach 6.2.3.3(3) der größte Wert für eine der für Beulen relevanten Membranspannungen angewendet werden, der innerhalb der freien Länge l_f auftritt, d. h. außerhalb der Randzonen (siehe Bild A.3a) und wobei gilt:

$$l_f = L - 2 l_s \quad (\text{A.27})$$

(5) Für die in A.1.2.1(3) in Tabelle A.1 festgelegten langen Zylinder dürfen die für eine Interaktion relevanten Gruppen, die für den Nachweis der Interaktion angewendet werden, weiter als in (3) und (4)

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

eingeschränkt werden. Die Spannungen, die als der für die Interaktion relevanten Gruppe zugehörig angesehen werden, dürfen dann auf einen beliebigen Abschnitt der Länge l_{int} innerhalb der für den Interaktionsnachweis verbleibenden freien Länge l_f eingeschränkt werden (siehe Bild A.3b); dabei gilt:

$$l_{\text{int}} = 1,3 r \sqrt{r/t} \quad (\text{A.28})$$

(6) Falls in (3) bis (5) keine spezifischen Festlegungen zur Bestimmung der relativen Lagen oder zu Aussonderungen von interaktions-relevanten Gruppen von Membranspannungskomponenten getroffen werden und weiterhin eine einfache konservative Behandlung gefordert wird, darf für jede Membranspannung der größte Wert unabhängig von der Lage in der Schale in Gleichung (6.24) eingesetzt werden.

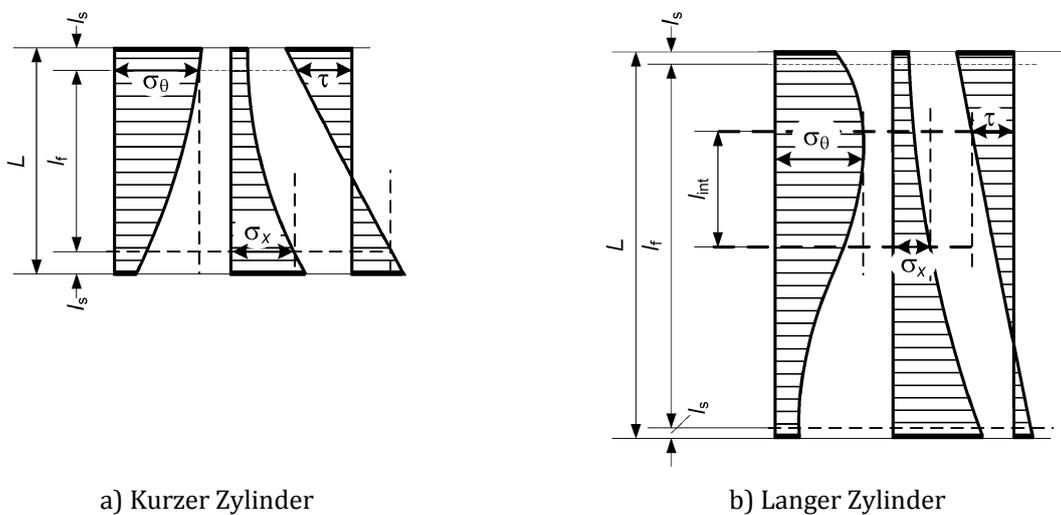


Bild A.3 — Beispiele für Gruppen von interaktions-relevanten Membranspannungskomponenten

A.2 Unausgesteifte Zylinderschalen mit gestufter Wanddicke

A.2.1 Allgemeines

A.2.1.1 Bezeichnungen und Randbedingungen

(1) In diesem Abschnitt werden folgende Bezeichnungen angewendet:

- L Gesamtlänge des Zylinders zwischen den Rändern;
- r Radius der Mittelfläche des Zylinders;
- j ganzzahliger Index zur Bezeichnung der einzelnen Zylinderabschnitte mit konstanter Wanddicke (von $j = 1$ bis $j = n$);
- t_j konstante Wanddicke des Abschnitts j des Zylinders;
- l_j Länge des Abschnitts j des Zylinders.

(2) Die folgenden Ausdrücke dürfen nur für Schalen mit den Randbedingungen BC 1 und BC 2 an beiden Rändern (siehe 5.2) angewendet werden, wobei zwischen ihnen kein Unterschied getroffen wird.

A.2.1.2 Geometrie und Absätze an Verbindungen

(1) Unter der Voraussetzung, dass die Wanddicke des Zylinders fortschreitend stufenweise vom oberen Rand bis zum Boden zunimmt (siehe Bild A.4a), dürfen die in diesem Abschnitt angegebenen Verfahren angewendet werden. Alternativ darf die *linear elastische Verzweigungsanalyse* (LBA) zur Berechnung der kritischen Beulspannung in Umfangsrichtung $\sigma_{0,cr,eff}$ in A.2.3.1(7) angewendet werden.

(2) Planmäßige Absätze e_0 zwischen den Platten benachbarter Abschnitte (siehe Bild A.4) dürfen als durch die folgenden Ausdrücke erfasst angesehen werden, vorausgesetzt, der vorgesehene Wert e_0 ist kleiner als der zulässige Wert $e_{0,p}$, der als der kleinere Wert nach einer beiden folgenden Gleichungen bestimmt werden sollte:

$$e_{0,p} = 0,5 (t_{\max} - t_{\min}) \quad \text{und} \quad \boxed{A11} \ e_{0,p} = 0,5 t_{\min} \quad \boxed{A11} \quad (A.29)$$

Hierbei ist

t_{\max} die Dicke der dickeren Platte an der Verbindung;

t_{\min} die Dicke der dünneren Platte an der Verbindung.

(3) Für Zylinder mit zulässigen planmäßigen Absätzen zwischen den Platten benachbarter Abschnitte nach (2) darf der Radius r als Mittelwert aus allen Abschnitten gebildet werden.

(4) Für Zylinder mit überlappenden Verbindungen (Überlappstößen) sollten die Bestimmungen für Konstruktionen mit Überlappstößen nach A.3 angewendet werden.

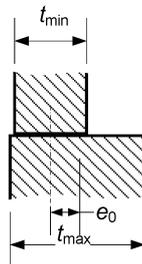


Bild A.4 — Planmäßiger Absatz e_0 in einer Schale mit Stumpfstoß

A.2.2 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialer Druck)

(1) Jeder Zylinderabschnitt j mit der Länge l_j sollte als ein äquivalenter Zylinder mit der Gesamtlänge $l = L$ und gleichmäßiger Wanddicke $t = t_j$ nach A.1.2 behandelt werden.

(2) Für die nach A.1.2.1(3), Tabelle A.1 festgelegten langen äquivalenten Zylinder sollte der Parameter C_{xb} konservativ als $C_{xb} = 1$ angenommen werden, sofern kein durch eine exaktere Analyse ermittelter besserer Wert verfügbar ist.

A.2.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung)

A.2.3.1 Kritische Beulspannungen in Umfangsrichtung

(1) Wenn der Zylinder aus zwei Abschnitten mit unterschiedlicher Wanddicke besteht, sollte das Verfahren nach (4) bis (7) angewendet werden, siehe Bild A.5(II).

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

(2) Falls der Zylinder aus nur einem Abschnitt besteht (d. h. eine konstante Wanddicke hat), sollte A.1 angewendet werden.

(3) Wenn der Zylinder aus drei Abschnitten mit unterschiedlichen Wanddicken besteht, sollte das Verfahren nach (4) bis (7) angewendet werden, wobei zwei der drei fiktiven Abschnitte, a und b, als Abschnitte mit gleicher Dicke angesehen werden.

(4) Wenn der Zylinder aus mehr als drei Abschnitten mit unterschiedlichen Wanddicken besteht (siehe Bild A.5(I)), sollte er zunächst durch einen äquivalenten Zylinder mit den drei Abschnitten a, b und c ersetzt werden (siehe Bild A.5(II)). Die Länge seines oberen Abschnitts, l_a , sollte bis zum oberen Rand des ersten Abschnitts reichen, dessen Wanddicke größer als die 1,5-fache kleinste Wanddicke t_j ist; seine Länge sollte jedoch nicht mehr als die Hälfte der Gesamtlänge L des Zylinders betragen. Die Länge der beiden anderen Abschnitte, l_b und l_c , sollte nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$l_b = l_a \text{ und } l_c = L - 2 l_a \quad \text{wenn gilt: } l_a \leq L/3 \quad (\text{A.30})$$

$$l_b = l_c = 0,5 (L - l_a) \quad \text{wenn gilt: } L/3 < l_a \leq L/2 \quad (\text{A.31})$$

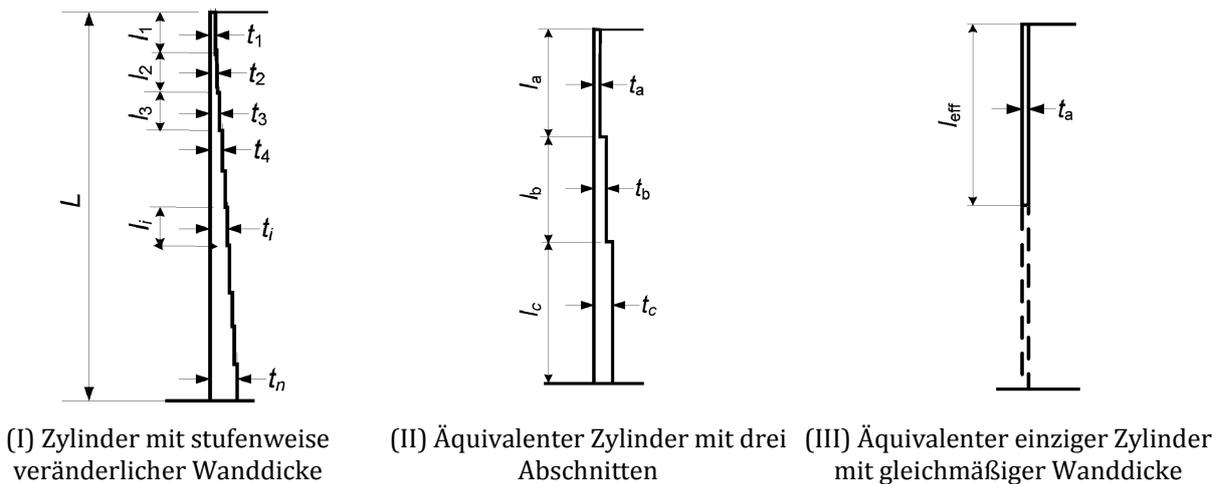


Bild A.5 — Transformation eines gestuften Zylinders in einen äquivalenten Zylinder

(5) Die fiktiven Wanddicken t_a , t_b und t_c der drei Abschnitte sollten als das gewichtete Mittel der Wanddicke für jeden der drei fiktiven Abschnitte bestimmt werden:

$$t_a = \frac{1}{l_a} \sum_a l_j t_j \quad (\text{A.32})$$

$$t_b = \frac{1}{l_b} \sum_b l_j t_j \quad (\text{A.33})$$

$$t_c = \frac{1}{l_c} \sum_c l_j t_j \quad (\text{A.34})$$

(6) Der Zylinder mit drei Abschnitten (d. h. der äquivalente bzw. der tatsächliche Zylinder) sollte durch einen einzigen äquivalenten Zylinder mit der effektiven Länge l_{eff} und mit gleichmäßiger Wanddicke $t = t_a$ (siehe Bild A.5(III)) ersetzt werden. Die effektive Länge sollte nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$l_{\text{eff}} = \frac{l_a}{\kappa} \quad (\text{A.35})$$

wobei κ ein dimensionsloser Faktor ist, der aus Bild A.6 zu entnehmen ist.

(7) Für Zylinderabschnitte mit mittlerer oder kurzer Länge sollte die kritische Beulspannung in Umfangsrichtung für jeden Zylinderabschnitt j des ursprünglichen Zylinders mit stufenweise veränderlicher Wanddicke nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\sigma_{\theta, \text{cr}, j} = \frac{t_a}{t_j} \sigma_{\theta, \text{cr}, \text{eff}} \quad (\text{A.36})$$

wobei $\sigma_{\theta, \text{cr}, \text{eff}}$ die kritische Beulspannung in Umfangsrichtung ist, die je nach Gültigkeit aus $\overline{\text{A11}}$ A.1.3.1(3) oder A.1.3.1(4) $\overline{\text{A11}}$ für den äquivalenten einzigen Zylinder mit der Länge l_{eff} nach (6) abgeleitet wird. Der Faktor C_θ sollte in diesen Ausdrücken den Wert $C_\theta = 1,0$ haben.

(8) Die Länge des Schalenabschnitts wird durch den dimensionslosen Parameter ω_j beschrieben:

$$\omega_j = \frac{l_j}{r} \sqrt{\frac{r}{t_j}} = \frac{l_j}{\sqrt{r t_j}} \quad (\text{A.37})$$

(9) Falls ein langer Zylinderabschnitt j vorliegt, sollte zusätzlich eine zweite Bewertung der Beulspannung durchgeführt werden. Es sollte der kleinere der beiden aus (7) und (10) bestimmten Werte für den Beulsicherheitsnachweis des Zylinderabschnitts j verwendet werden.

(10) Der Zylinderabschnitt j sollte als lang angesehen werden, wenn gilt:

$$\omega_j \geq 1,63 \frac{r}{t_j} \quad (\text{A.38})$$

und in diesem Fall sollte die kritische Beulspannung in Umfangsrichtung aus der folgenden Gleichung ermittelt werden:

$$\sigma_{\theta, \text{cr}, j} = E \left(\frac{t_j}{r} \right)^2 \left(0,275 + 2,03 \left(\frac{C_\theta r}{\omega_j t_j} \right)^4 \right) \quad (\text{A.39})$$

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

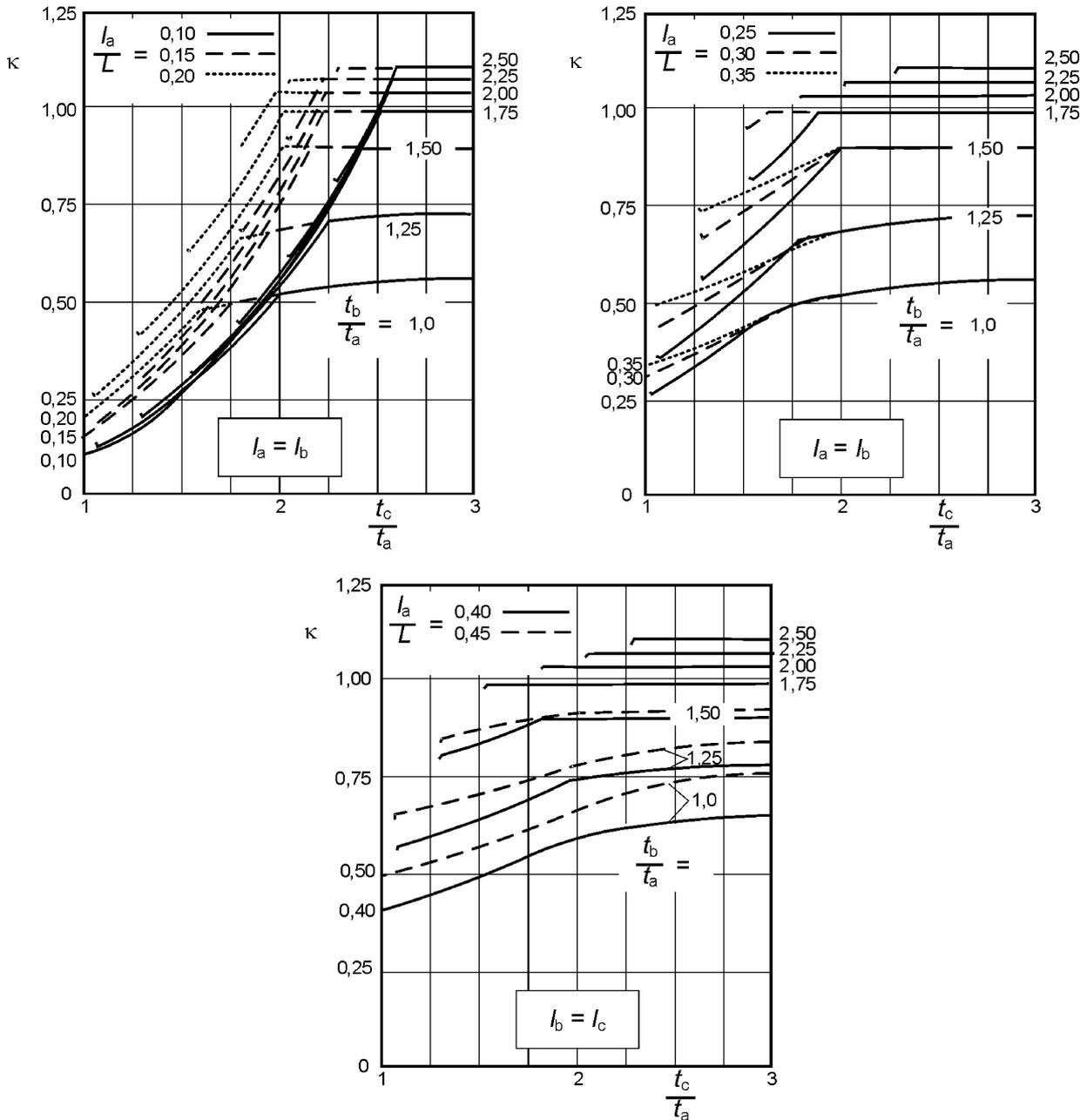


Bild A.6 — Faktor κ zur Bestimmung der effektiven Länge l_{eff}

A.2.3.2 Nachweis der Beulfestigkeit bei Druckspannung in Umfangsrichtung

(1) Für alle Zylinderabschnitte j sollten die Bedingungen von 6.2.3 erfüllt werden, und eine Überprüfung des folgenden Zusammenhanges sollte durchgeführt werden:

$$\sigma_{\theta,Ed,j} \leq \sigma_{\theta,Rd,j} \tag{A.40}$$

Hierbei ist

$\sigma_{\theta,Ed,j}$ der $\overline{A_{11}}$ maßgebende Wert $\overline{A_{11}}$ für die Membran-Druckspannung in Umfangsrichtung, auf die in den folgenden Abschnitten ausführlich eingegangen wird;

$\sigma_{\theta,Rd,j}$ der Bemessungswert für die Beulspannung in Umfangsrichtung, die aus der kritischen Beulspannung in Umfangsrichtung nach A.1.3.2 abgeleitet wird.

(2) Unter der Voraussetzung, dass der Bemessungswert für die Spannungsresultante in Umfangsrichtung $n_{\theta,Ed}$ über die Länge L konstant ist, sollte der $\langle A_{11} \rangle$ maßgebende Wert $\langle A_{11} \rangle$ für die Membran-Druckspannung in Umfangsrichtung im Abschnitt j nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\sigma_{\theta,Ed,j} \leq \frac{n_{\theta,Ed}}{t_j} \quad (A.41)$$

(3) Wenn der Bemessungswert der Spannungsresultanten in Umfangsrichtung $n_{\theta,Ed}$ innerhalb der Länge L schwankt, sollte als $\langle A_{11} \rangle$ maßgebender Wert $\langle A_{11} \rangle$ für die Membran-Druckspannung in Umfangsrichtung ein Ersatzwert $\sigma_{\theta,Ed,j,mod}$ angenommen werden, der bestimmt wird, indem der größte Wert der Spannungsresultanten in Umfangsrichtung $n_{\theta,Ed}$ an einer beliebigen Stelle innerhalb der Länge L durch die örtliche Dicke t_j (siehe Bild A.7) dividiert wird:

$$\sigma_{\theta,Ed,j,mod} = \frac{\max(n_{\theta,Ed})}{t_j} \quad (A.42)$$

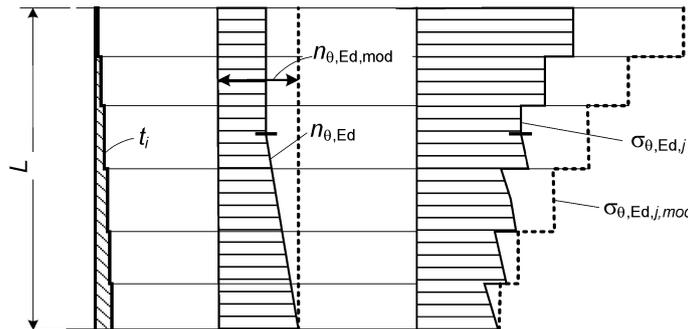


Bild A.7 — $\langle A_{11} \rangle$ Maßgebende Werte $\langle A_{11} \rangle$ für die Membran-Druckspannung in Umfangsrichtung in den Fällen, in denen $n_{\theta,Ed}$ über die Länge L schwankt

A.2.4 Schubbeanspruchung

A.2.4.1 Kritische, durch Schub erzeugte Beulspannung

(1) Wenn für die Bewertung eines äquivalenten einzigen Zylinders mit gleichmäßiger Wanddicke keine spezielle Regel verfügbar ist, dürfen die Ausdrücke von A.2.3.1(1) bis (6) angewendet werden.

(2) Die weitere Bestimmung der kritischen, durch Schub erzeugten Beulspannungen darf grundsätzlich entsprechend A.2.3.1(7) bis (10) durchgeführt werden, wobei jedoch die Ausdrücke für die Druckspannung in Umfangsrichtung aus A.1.3.1 durch die jeweils zutreffenden Ausdrücke für die Schubspannung aus A.1.4.1 ersetzt werden.

A.2.4.2 Nachweis der Beulfestigkeit bei Schubbeanspruchung

(1) Die Regeln von A.2.3.2 dürfen angewendet werden, wobei allerdings die Ausdrücke für die Druckspannung in Umfangsrichtung durch die jeweils zutreffenden Ausdrücke für die Schubspannung ersetzt werden.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

A.3 Unausgesteifte Zylinderschalen mit Überlappstoß

A.3.1 Allgemeines

A.3.1.1 Definitionen

1. Überlappstoß in Umfangsrichtung

Stoß, der in Umfangsrichtung um die Schalenachse verläuft.

2. Überlappstoß in Meridianrichtung

Stoß, der parallel zur Schalenachse (in Meridianrichtung) verläuft.

A.3.1.2 Geometrie und Spannungsergebnisse

(1) Falls eine zylindrische Schale unter Anwendung von Überlappstößen konstruiert wird (siehe Bild A.8), dürfen anstelle der Bestimmungen in A.2 die folgenden Bestimmungen verwendet werden.

(2) Die folgenden Bestimmungen gelten sowohl für Überlappstöße mit zu- als auch mit abnehmendem Mittelflächenradius der Schale. Wenn der Überlappstoß in Umfangsrichtung um die Schalenachse verläuft (Umfangs-Überlappstoß), sollten für Druck in Meridianrichtung die Bestimmungen von A.3.2 angewendet werden. Falls viele Überlappstöße in Umfangsrichtung um die Schalenachse verlaufen (Umfangs-Überlappstöße) und sich die Plattendicke über die Schale verändert, sollten die Bestimmungen von A.3.3 für Druck in Umfangsrichtung angewendet werden. Wenn ein einziger Überlappstoß parallel zur Schalenachse (Meridian-Überlappstoß) verläuft, sollten die Bestimmung von A.3.3 für Druck in Umfangsrichtung angewendet werden. In anderen Fällen brauchen keine besonderen Betrachtungen für den Einfluss der Überlappstöße auf die Beulbeanspruchbarkeit angestellt zu werden.

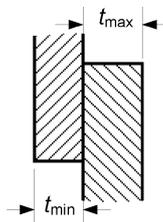


Bild A.8 — Schale mit Überlappstoß

A.3.2 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialer Druck)

(1) Wenn ein Zylinder mit meridionalen Überlappstößen einer Druckspannung in Meridianrichtung ausgesetzt wird, darf die Beulbeanspruchbarkeit je nach Gültigkeit wie für einen Zylinder mit gleichmäßiger oder gestufter Wanddicke bewertet werden, wobei jedoch der Bemessungswert für die Beanspruchbarkeit um den Faktor 0,70 verringert wird.

(2) Wenn eine Änderung der Plattendicke am Überlappstoß auftritt, darf als Bemessungswert der Beulbeanspruchung der gleiche Wert angenommen werden, der für die dünnere Platte nach (1) bestimmt wurde.

A.3.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung)

(1) Wenn ein Zylinder mit Überlappstößen einer Druckspannung in Umfangsrichtung quer zu den meridionalen Überlappstößen ausgesetzt wird, darf der Bemessungswert für die Beulbeanspruchbarkeit je nach Gültigkeit wie für einen Zylinder mit gleichmäßiger oder gestufter Wanddicke bewertet werden, wobei jedoch ein Abminderungsfaktor von 0,90 angewendet wird.

(2) Wenn ein Zylinder mit über die Schale hinab veränderlicher Plattendicke und mit vielen Überlappstößen in Umfangsrichtung einem ebenfalls in Umfangsrichtung wirkenden Druck ausgesetzt wird, sollten das Verfahren von A.2 ohne die geometrischen Einschränkungen der Stoßexzentrizität und für den Bemessungswert der Beulbeanspruchbarkeit ein Abminderungsfaktor von 0,90 angewendet werden.

(3) Wenn Überlappstöße in beiden Richtungen mit gegeneinander versetzt angeordneten, meridionalen Überlappstößen in alternierenden Plattengängen oder Schüssen angewendet werden, sollte als Bemessungswert für die Beulbeanspruchbarkeit der kleinere der nach (1) oder (2) ermittelten Werte angewendet werden. Eine weitere Abminderung für die Beanspruchbarkeit ist nicht nötig.

A.3.4 Schubbeanspruchung

(1) Wenn ein Zylinder mit Überlappstoß einer Membran-Schubspannung ausgesetzt wird, darf die Beulbeanspruchbarkeit je nach Gültigkeit wie für einen Zylinder mit gleichmäßiger oder gestufter Wanddicke festgelegt werden.

A.4 Unausgesteifte Kegelschalen

A.4.1 Allgemeines

A.4.1.1 Bezeichnungen

(1) In diesem Abschnitt werden folgende Bezeichnungen angewendet:

- h Länge des Kegelstumpfes in axialer Richtung (Höhe);
- L Länge des Kegelstumpfes in Meridianrichtung;
- r Radius der Mittelfläche des Kegels, rechtwinklig zur Rotationsachse linear über die Länge;
- r_1 Radius am kleineren Ende des Kegels;
- r_2 Radius am größeren Ende des Kegels;
- β halber Kegelspitzenwinkel.

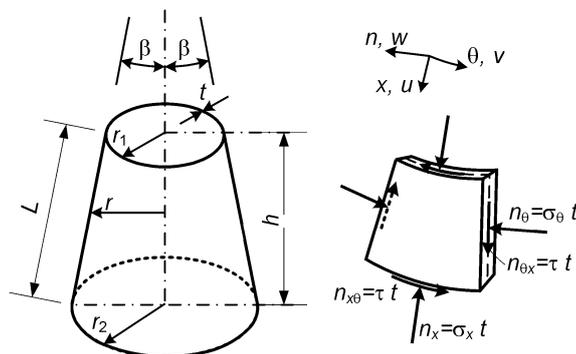


Bild A.9 — Geometrie, Membranspannungen und Spannungsergebnisse am Kegel

A.4.1.2 Randbedingungen

(1) Die folgenden Ausdrücke sollten nur auf Schalen mit den Randbedingungen BC 1 oder BC 2 an beiden Rändern angewendet werden (siehe 5.2 und 6.2), wobei zwischen ihnen keine Unterscheidung getroffen wird. Sie sollten nicht für eine Schale mit der Randbedingung BC 3 angewendet werden.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

(2) Die Regeln in diesem Abschnitt A.4.1 sollten nur auf die folgenden beiden Randbedingungen der Behinderungen für die radiale Verschiebung an beiden Enden des Kegels angewendet werden:

„Zylinderbedingung“ $\omega = 0$;

„Ringbedingung“ $u \sin \beta + \omega \cos \beta = 0$

A.4.1.3 Geometrie

(1) Die folgenden Regeln gelten nur für Kegelstümpfe mit gleichmäßiger Wanddicke und mit einem halben Kegelspitzenwinkel $\beta \leq 65^\circ$ (siehe Bild A.9).

A.4.2 Bemessungswerte für Beulspannungen

A.4.2.1 Äquivalenter Zylinder

(1) Die Bemessungswerte für die Beulspannungen, die für den Nachweis der Beulfestigkeit nach 6.2.3 benötigt werden, dürfen an einem äquivalenten Zylinder hergeleitet werden, dessen Länge l_e und dessen Radius r_e von der Art der Spannung nach Tabelle A.12 abhängen.

Tabelle A.12 — Länge und Radius des äquivalenten Zylinders

Belastung	Länge des äquivalenten Zylinders	Radius des äquivalenten Zylinders
Druckspannung in Meridianrichtung	$l_e = L$	$r_e = \frac{r}{\cos \beta}$
Druck in Umfangsrichtung (Ringspannung)	$l_e = L$	$r_e = \frac{r_1 + r_2}{2 \cos \beta}$
Gleichmäßiger äußerer Druck q Randbedingungen: An beiden Enden entweder BC 1 oder BC 2	l_e ist der kleinere der Werte: $l_{e,1} = L$ und	$r_e = \frac{0,55r_1 + 0,45r_2}{\cos \beta}$ falls $l_e = l_{e,1}$ (kürzere Kegel)
	$l_{e,2} = \frac{r_2(0,53 + 0,125\beta)}{\sin \beta}$ (β in Radiant, siehe Bild A.9)	$r_e = 0,71r_2 \frac{1 - 0,1\beta}{\cos \beta}$ falls $l_e = l_{e,2}$ (längere Kegel)
Schub	$l_e = h$	$r_e = \left(1 + \rho - \frac{1}{\rho}\right) r_1 \cos \beta$ mit $\rho = \sqrt{\frac{r_1 + r_2}{2r_1}}$
Gleichmäßige Torsion	$l_e = L$	$r_e = r_1 \cos \beta (1 - \rho^{2,5})^{0,4}$ mit $\rho = \frac{L \sin \beta}{r_2}$

(2) Für Kegel unter einem gleichmäßigen Außendruck q sollte der Nachweis der Beulfestigkeit auf der Membranspannung basieren:

$$\sigma_{\theta,Ed} = q r_e / t \quad (\text{A.43})$$

A.4.3 Nachweis der Beulfestigkeit

A.4.3.1 Druckspannung in Meridianrichtung

- (1) $\overline{A_{11}}$ Der Nachweis der Beulfestigkeit sollte an dem Punkt des Kegels durchgeführt werden $\overline{A_{11}}$, an dem die Kombination der Bemessungswerte für die in Meridianrichtung wirkende Spannung und für die Beulspannung nach A.3.2.2 am kritischsten ist.
- (2) Bei Druck in Meridianrichtung, der durch eine konstante axiale Kraft auf einen Kegelstumpf verursacht wird, sollten sowohl der kleine Radius r_1 als auch der große Radius r_2 als mögliche Lage der kritischsten Position angesehen werden.
- (3) Bei Druck in Meridianrichtung, der durch ein konstantes globales Biegemoment auf den Kegel verursacht wird, sollte der kleine Radius r_1 als am kritischsten angesehen werden.
- (4) Der Bemessungswert der Beulspannung sollte für den äquivalenten Zylinder nach A.1.2 bestimmt werden.

A.4.3.2 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung)

- (1) Wenn der Druck in Umfangsrichtung durch einen gleichmäßigen Außendruck verursacht wird, sollte der Beulsicherheitsnachweis unter Anwendung des nach Gleichung (A.43) bestimmten, in Umfangsrichtung wirkenden Bemessungswertes der Spannung $\sigma_{\theta,Ed,env}$ und des Bemessungswertes der Beulspannung nach A.3.2.1 und A.3.2.3 durchgeführt werden.
- (2) Wenn der Druck in Umfangsrichtung nicht durch einen gleichmäßigen Außendruck, sondern durch andere Einwirkungen verursacht wird, sollte die errechnete Spannungsverteilung $\sigma_{\theta,Ed}(x)$ durch eine Spannungsverteilung $\sigma_{\theta,Ed,env}(x)$ ersetzt werden, die den errechneten Wert zwar überall überschreitet, aber aus einem fiktiven gleichmäßigen Außendruck abzuleiten sein würde. Der Beulsicherheitsnachweis sollte dann wie in (1), aber unter Anwendung von $\sigma_{\theta,Ed,env}$ anstelle von $\sigma_{\theta,Ed}$ durchgeführt werden.
- (3) Der Bemessungswert der Beulspannung sollte für den äquivalenten Zylinder nach A.1.3 bestimmt werden.

A.4.3.3 Schubbeanspruchung und gleichmäßige Torsionsbeanspruchung

- (1) Für den Fall, dass die Schubspannung durch ein konstantes globales Drehmoment auf den Kegel verursacht wird, sollte der Beulsicherheitsnachweis unter Anwendung des wirkenden Bemessungswertes der Schubspannung τ_{Ed} an dem Punkt, an dem $r = r_e \cos \beta$ ist, und des Bemessungswertes der Beulspannung τ_{Rd} nach A.3.2.1 und A.3.2.4 durchgeführt werden.
- (2) Falls die Schubspannung nicht durch ein konstantes globales Drehmoment, sondern durch andere Einwirkungen verursacht wird (z. B. durch Einwirkung einer globalen Scherkraft auf den Kegel), sollte die errechnete Spannungsverteilung $\tau_{Ed}(x)$ durch eine fiktive Spannungsverteilung $\tau_{Ed,env}(x)$ ersetzt werden, die den errechneten Wert zwar überall überschreitet, aber aus einem fiktiven globalen Drehmoment abzuleiten sein würde. Der Beulsicherheitsnachweis sollte dann wie in (1), aber unter Anwendung von $\tau_{Ed,env}$ anstelle von τ_{Ed} durchgeführt werden.
- (3) Der Bemessungswert der Beulspannung τ_{Rd} sollte für den äquivalenten Zylinder nach A.1.4 bestimmt werden.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

A.5 Ausgesteifte Zylinderschalen mit konstanter Wanddicke

A.5.1 Allgemeines

- (1) Ausgesteifte Zylinderschalen können bestehen aus
- Isotropen Wänden, die mit Steifen in Meridianrichtung und in Umfangsrichtung ausgesteift sind;
 - profilierten Wänden, die mit Steifen in Meridianrichtung und in Umfangsrichtung ausgesteift sind.
- (2) In beiden Fällen können Beulsicherheitsnachweise durchgeführt werden, indem angenommen wird, dass die ausgesteifte Wand sich nach den in A.5.6 angegebenen Regeln wie eine äquivalente orthotrope Schale verhält, sofern die in A.5.6 genannten Bedingungen erfüllt sind.
- (3) Für in Umfangsrichtung gewelltes Blech ohne Steifen in Meridianrichtung kann die plastische Beulbeanspruchbarkeit nach den in A.5.4.2(3), (4) und (5) angegebenen Regeln errechnet werden.
- (4) Falls vorausgesetzt wird, dass das Wellblech in Umfangsrichtung keine axiale Last trägt, kann die Beulbeanspruchbarkeit einer einzelnen Steife nach A.5.4.3 beurteilt werden.

A.5.2 Isotrope Wände mit Steifen in Meridianrichtung

A.5.2.1 Allgemeines

- (1) Bei isotropen Wänden, die mit Steifen in Meridianrichtung (Längssteifen) versehen sind, sollte der Zwängungseinfluss der Wandverkürzung infolge Innendruck bei der Ermittlung der Druckbeanspruchung in Meridianrichtung sowohl in der Wand als auch in den Steifen berücksichtigt werden.
- (2) Die Bruchfestigkeit einer Naht in Meridianrichtung sollte wie für eine isotrope Schale bestimmt werden.
- (3) Falls in einer konstruktiven Verbindung auch die Steife zur Übertragung von Umfangszugkräften beiträgt, sollte der Einfluss dieser Zugkraft beim Nachweis von Kraft und Bruchanfälligkeit der Steife berücksichtigt werden.

A.5.2.2 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialer Druck)

- (1) Die Wand sollte für die gleichen Beul-Kriterien unter axialem Druck wie die unausgesteifte Wand bemessen werden, sofern nicht der größte horizontale Abstand zwischen den Steifen $d_{s,max}$ (Bild A.10) kleiner ist als $2\sqrt{rt}$, wobei t die örtliche Wanddicke ist.
- (2) Werden Steifen in Meridianrichtung in dichteren Abständen als $2\sqrt{rt}$ angeordnet, sollte die Beulbeanspruchbarkeit der kompletten Wand nach dem in A.5.6 angegebenen Verfahren beurteilt werden.
- (3) Die Beulfestigkeit der Steifen gegen axialen Druck sollte nach den Bestimmungen in EN 1999-1-1 bewertet werden.
- (4) Die Exzentrizität der Steifen gegenüber der Schalenwand sollte, wenn zutreffend, berücksichtigt werden.

A.5.2.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung)

- (1) Sofern keine genauere Berechnung erfolgt, ist der Beulsicherheitsnachweis wie für eine unausgesteifte Wand zu führen.
- (2) Bei einer genaueren Berechnung dürfen die Steifen in Meridianrichtung „verschmiert“ werden, damit eine orthotrope Wand erhalten wird, und die Beulspannung kann nach A.5.6 unter der Annahme errechnet

werden, dass für die Dehnsteifigkeit $C_{\phi} = C_{\theta} = Et$ und für die Schubsteifigkeit der Membran $C_{\phi\theta} = 0,38 Et$ gilt.

A.5.2.4 Schubbeanspruchung

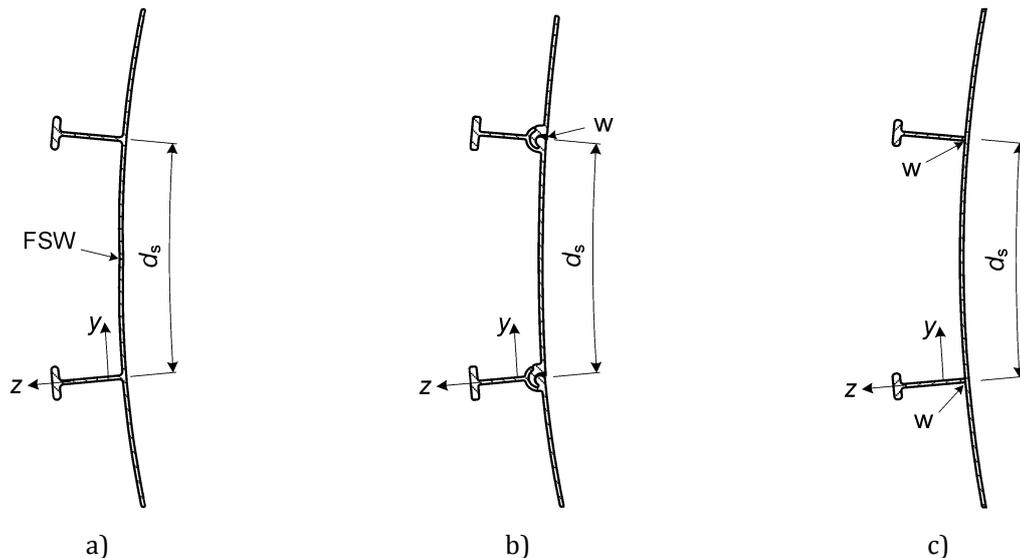
(1) Falls größere Teile der Schalenwand unter einer Schubbeanspruchung stehen (z. B. aus exzentrischem Befüllen, aus Erdbebenbelastung usw.), sollte der Beulsicherheitsnachweis der Membran gegen Schubbeanspruchung wie für eine isotrope unausgesteifte Wand geführt werden (siehe A.1.4), möglicherweise jedoch mit durch die Steifen erhöhter Beulbeanspruchbarkeit. Zu diesem Zweck darf als äquivalente Schalenlänge l der schubbeanspruchten Schale der kleinere Wert aus der Höhe zwischen Versteifungsringen oder gehaltenen Rändern und dem zweifachen meridionalen Abstand der Steifen in Meridianrichtung eingesetzt werden, wobei vorausgesetzt wird, dass jede Steife für Meridianbiegung (um ihre Achse in Umfangsrichtung) eine größere als die nach der folgenden Gleichung errechnete Biegesteifigkeit EI_y hat:

$$EI_{y,\min} = 0,1 Et^3 \sqrt{rl} \quad (\text{A.44})$$

wobei für l und t die gleichen Werte wie bei der kritischsten Beulform gelten.

(2) Endet eine diskrete Steife innerhalb der Schalenwand, sollte die Steifenkraft rechnerisch gleichmäßig über eine Höhe von nicht mehr als $4\sqrt{rt}$ in die Schale eingeleitet werden.

(3) Der Schubbeulwiderstand für die lokale Schubübertragung aus einer Steife in die Schale nach dem vorstehenden Absatz sollte den in A.1.4 angegebenen Wert nicht überschreiten.



Legende

w Schweißnaht
 FSW Reibschweißen

Bild A.10 — Typische axial ausgesteifte Schalen aus (a) und (b) Strangpressteilen und (c) Platten und Strangpressteilen

A.5.3 Isotrope Wände mit Steifen in Umfangsrichtung

(1) Für Beulsicherheitsnachweise gelten die in A.5.6 angegebenen Regeln unter der Annahme, dass sich die ausgesteifte Wand wie eine orthotrope Schale verhält.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

A.5.4 In Umfangsrichtung profilierte Wände mit Steifen in Meridianrichtung

A.5.4.1 Allgemeines

- (1) Die rechnerische Blechdicke ist ohne Überzüge und Beschichtungen (Kerndicke) und ohne geometrische Toleranzen anzusetzen.
- (2) $\boxed{A_{11}}$ Die minimale Kerndicke für die Wellblechwand sollte 0,68 mm betragen. $\boxed{A_{11}}$
- (3) In horizontal profilierten Zylinderwänden mit Meridiansteifen sollten der profilierten Wand rechnerisch keine meridionalen Lasten zugewiesen werden, es sein denn, sie wird als orthotrope Schale nach A.5.6 behandelt.
- (4) Besonders beachtet werden sollte, dass die Steifen in der Meridianebene rechtwinklig zur Wand kontinuierlich ausgebildet sein müssen, weil diese Ausbildung der Steifen wesentlich für die Beulbeanspruchbarkeit ist.
- (5) Falls die Wand mit Steifen in Meridianrichtung ausgesteift ist, sollten die Verbindungsmittel zwischen Blechen und Steifen so dimensioniert werden, dass eine Einleitung der auf alle Teile der Wandbleche verteilten Schubbeanspruchung in die Steifen sichergestellt ist. Die Blechdicke sollte so ausgewählt werden, dass Bruchversagen an diesen Verbindungsmitteln verhindert wird, wobei auch die reduzierte Lochleibungstragfähigkeit an Verbindungen in Profilblechen zu berücksichtigen ist.
- (6) Für die Bemessungswerte für Spannungsergebnisse und Widerstände und für die Nachweise sollten die Festlegungen in Abschnitt 5, 6.1 und A.1 gelten, aber mit den in den vorstehenden Absätzen (1) bis (5) angegebenen zusätzlichen Regeln.

ANMERKUNG Beispiele für die Anordnung von Wandaussteifungen werden in Bild A.11 gezeigt.

- (7) Schrauben an den Stößen zwischen Blechsegmenten sollten die Anforderungen von EN 1999-1-1 erfüllen. Als Schraubengröße sollte mindestens M8 ausgewählt werden.
- (8) Die Stoßausbildung sollten auch den Anforderungen nach $\boxed{A_{11}}$ EN 1999-1-4 $\boxed{A_{11}}$ für geschraubte Scherverbindungen entsprechen.
- (9) Der Schraubenabstand in Umfangsrichtung sollte nicht größer sein als 3° .
- (10) An Wanddurchbrüchen für Luken, Türen, Bohrer oder andere Vorrichtungen sollte an den betreffenden Stellen ein dickeres Wellblech vorgesehen werden, damit nicht die durch Steifigkeitsabweichungen verursachten Spannungserhöhungen zu örtlichen Rissen führen.

ANMERKUNG Ein typisches Schraubenbild für eine Wellblechtafel wird in Bild A.12 gezeigt.

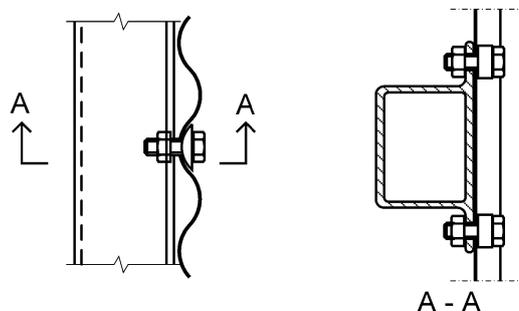


Bild A.11 — Beispiel für die Anordnung von Steifen in Meridianrichtung an in Umfangsrichtung profilierten Schalen

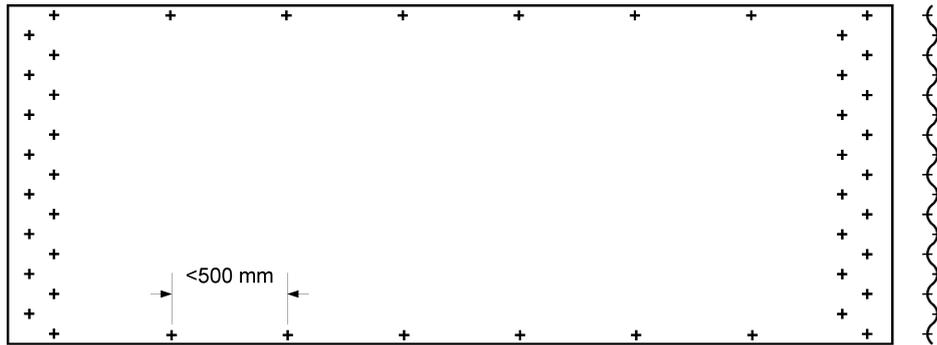


Bild A.12 — Typische Schraubenanordnung in einer Wellblechtafel

A.5.4.2 Axiale Druckbeanspruchung

(1) Der Bemessungswert für die Beanspruchbarkeit gegen axialen Druck sollte an jeder Stelle der Schale ermittelt werden, und zwar unter Berücksichtigung der für die Ausführung festgelegten Toleranzklasse, der Größe des garantiert gleichzeitig wirkenden Innendruckes p und der Ungleichmäßigkeit der Druckspannung in Umfangsrichtung. Die Veränderlichkeit des Axialdruckes in Meridianrichtung darf nicht berücksichtigt werden, es sei denn, dieser Teil enthält dazu spezielle Angaben.

(2) Für den Beulsicherheitsnachweis einer in Meridianrichtung ausgesteiften Wand sollte eines der beiden alternativen Verfahren angewendet werden:

- a) Beulen einer verschmiert-orthotropen Ersatzschale (nach A.5.6), sofern der meridionale Abstand zwischen den Steifen der Bedingung A.5.6.1(3) entspricht;
- b) Knicken der einzelnen Steifen (die profilierte Wand nimmt zwar voraussetzungsgemäß keine Axialkräfte auf, stützt aber die Steifen) nach A.5.4.3, falls der horizontale Abstand zwischen den Steifen der Bedingung in A.5.6.1(3) nicht entspricht.

(3) Für eine profilierte Schale ohne Steifen in Meridianrichtung sollte als charakteristischer Wert des lokalen plastischen Beulwiderstandes der größere der beiden folgenden Werte bestimmt werden: $\overline{A_{11}}$

$$n_{x,Rk} = \frac{t^2 f_0}{2d} \quad (\text{A.45})$$

und

$$n_{x,Rk} = \frac{r_\phi t f_0}{r} \quad (\text{A.46}) \quad \overline{A_{11}}$$

Hierbei ist

- t die Blechdicke;
- d die Amplitude (Profilhöhe) von Wellental zu Wellenberg;
- r_ϕ der örtliche Radius der Profilierung (siehe Bild A.14);
- r der Radius des Zylinders.

Der lokale plastische Beulwiderstand $n_{x,Rk}$ sollte als unabhängig vom Wert des Innendruckes p_n angesetzt werden.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

ANMERKUNG Der lokale plastische Beulwiderstand $n_{x,Rk}$ beschreibt den Widerstand der Profilierung gegen Kollaps oder „Zusammenfallen“.

(4) Der Bemessungswert des lokalen plastischen Beulwiderstandes sollte nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$n_{x,Rd} = \frac{\alpha_x n_{x,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (\text{A.47})$$

dabei ist: $\alpha_x = 0,80$ und γ_{M1} wie in 2.7.2 angegeben.

(5) An allen Stellen des Tragwerks sollten die Bemessungsspannungen die folgende Bedingung erfüllen:

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd} \quad (\text{A.48})$$

A.5.4.3 Ausgesteifte Wand, als Reihe von Axialkraft tragenden Steifen behandelt

(1) Wird eine ausgesteifte Wellblechwand unter der Annahme berechnet, dass das Blech keine Axialkräfte trägt (Verfahren (b) in A.5.4.3), darf davon ausgegangen werden, dass es alle Knickverformungen der Steifen in der Wandebene verhindert, und der Knickwiderstand der Steifen sollte alternativ nach einem der beiden folgenden Verfahren errechnet werden:

- a) Die Stützwirkung des Bleches für Knickverformungen rechtwinklig zur Wand wird vernachlässigt;
- b) die elastische Stützwirkung durch die Steifigkeit des Bleches für Knickverformungen rechtwinklig zur Wand wird berücksichtigt.

(2) Bei Anwendung des Verfahrens (1)a) kann der Widerstand einer einzelnen Steife als der Widerstand gegen zentrischen Druck auf die Steife angenommen werden. Der Bemessungswert für die Beulbeanspruchbarkeit $N_{s,Rd}$ sollte nach folgender Gleichung errechnet werden: $\langle A_{11} \rangle$

$$N_{s,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_o}{\gamma_{M1}} \quad (\text{A.49}) \quad \langle A_{11} \rangle$$

wobei A_{eff} die effektive Querschnittsfläche der Steife ist.

(3) Der Abminderungsfaktor χ sollte für Biegeknicken rechtwinklig zur Wand (um die Querschnittsachse in Umfangsrichtung) in Abhängigkeit von der Art der Legierung aus EN 1999-1-1 und unabhängig von der angewendeten Legierung nach Knickkurve 2 ($\alpha = 0,32$ und $\bar{\lambda}_0 = 0$) bestimmt werden. Als effektive Knicklänge zur Ermittlung des Abminderungsfaktors χ sollte der Abstand zwischen benachbarten Ringsteifen eingesetzt werden.

(4) Wenn die elastische Stützwirkung durch die Wand für das Knicken der Steife in Anspruch genommen wird, sollten die beiden folgenden Bedingungen erfüllt werden:

- a) Als unterstützender Wandabschnitt sollte die Breite zwischen den beiden benachbarten Steifen an diesen gelenkig gelagert angenommen werden (siehe Bild A.13).
- b) Eine mögliche Unterstützung durch die Steifigkeit des Schüttgutes sollte nicht in Anspruch genommen werden.

(5) Wenn keine genauere Berechnung durchgeführt wird, sollte die ideale elastische Verzweigungslast $N_{s,cr}$ nach der folgenden Gleichung unter der Annahme eines konstanten zentrischen Druckes errechnet werden:

$$N_{s,cr} = 2\sqrt{EI_s k} \quad (\text{A.50})$$

Hierbei ist

EI_s die Biegesteifigkeit der Steife für Biegung rechtwinklig zur Wand (Nmm^2);

k die Federsteifigkeit des Blechs (N/mm je Millimeter Wandhöhe) zwischen den in Meridianrichtung benachbarten Steifen, siehe Bild A.13.

(6) Die Federsteifigkeit k des Wandbleches sollte unter der Annahme bestimmt werden, dass das Blech als Einfeldplatte zwischen den auf jeder Seite meridional benachbarten Steifen gespannt und dort gelenkig gelagert ist, siehe Bild A.13. Der Wert für k kann nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$k = \frac{6 D_\theta}{d_s^3} \quad (\text{A.51})$$

Hierbei ist

D_θ die Biegesteifigkeit des Blechs bei Biegung in Umfangsrichtung;

d_s der Abstand der Steifen in Meridianrichtung.

(7) Für profilierte Bleche mit Bogen-Tangenten-Profil oder mit Sinusprofil darf der Wert für D_θ aus A.5.7(6) A.11 entnommen werden. Für andere Profilierungen sollte die Biegesteifigkeit bei Biegung in Umfangsrichtung für den tatsächlichen Querschnitt bestimmt werden.

(8) Für die Bemessungsspannungen der Steife sollte an allen Punkten die folgende Bedingung erfüllt werden:

$$N_{s,Ed} \leq N_{s,Rd} \quad (\text{A.52})$$

(9) Die Beanspruchbarkeit der Steifen gegen lokales Beulen und gegen Biegedrillknicken sollte nach EN 1999-1-1 bestimmt werden.

A.5.4.4 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung)

(1) Für die Nachweise der Beulsicherheit gelten die in A.5.6.3 angegebenen Regeln unter der Annahme, dass die ausgesteifte Wand sich wie eine orthotrope Schale verhält.

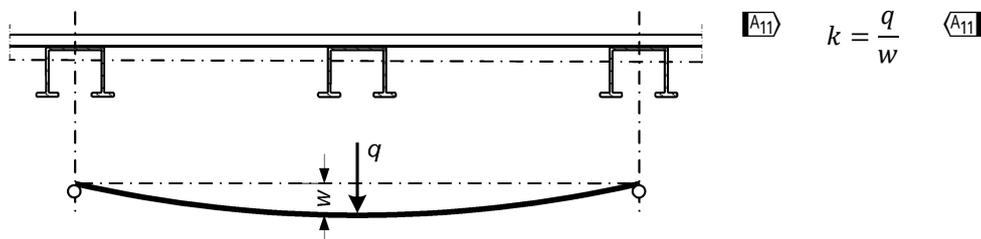


Bild A.13 — Ermittlung der Stütz-Federsteifigkeit gegen Biegeknicken

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

A.5.5 Axial profilierte Wände mit Ringsteifen

A.5.5.1 Allgemeines

(1) In zylindrischen Wänden aus Profilblechen (Wellblechen) mit axial verlaufendem Profil sollten die beiden folgenden Bedingungen eingehalten werden:

- a) Der profilierten Wand dürfen rechnerisch keine meridionalen Kräfte zugewiesen werden;
- b) das profilierte Wandblech sollte als durchlaufend von Ring zu Ring zwischen den Ringmitten spannend angenommen werden.

(2) Die Blechstöße sollten so bemessen werden, dass die angenommene Biegekontinuität sichergestellt ist.

(3) Bei Ermittlung der axialen Druckkräfte in der Wand aus Wandreibung von Schüttgut sollten der gesamte Umfang der Schale und die Profilgeometrie berücksichtigt werden.

(4) Wenn das Profilblech bis zum Boden reicht, sollte die örtliche Biegebeanspruchung aus der Randstörung beachtet werden, wobei radial unverschiebliche Lagerung anzunehmen ist.

(5) Der profilierten Wand dürfen rechnerisch keine Umfangskräfte zugewiesen werden.

(6) Der Abstand der Ringsteifen ergibt sich aus einer Berechnung des Profilbleches als über die Ringe durchlaufenden Biegeträger, wobei möglicherweise der Einfluss unterschiedlicher radialer Verformungen von unterschiedlich großen Ringsteifen zu berücksichtigen ist. Die aus dieser Biegeberechnung resultierenden Spannungen sollten beim Beulsicherheitsnachweis für Axialdruckbeanspruchung zu den Normalkraftspannungen addiert werden.

ANMERKUNG Die Meridianbiegebeanspruchung des Profilbleches kann ermittelt werden, indem angenommen wird, dass das Blech ein an den Ringen elastisch gestützter Durchlaufträger ist. Die Auflagerfedersteifigkeit ergibt sich dabei aus der Steifigkeit des Ringes bei radialer Belastung.

(7) Die Ringsteifen sollten für die Aufnahme der meridionalen Belastung nach EN 1999-1-1 bemessen werden.

A.5.5.2 Axiale Druckbeanspruchung

(1) Im Rahmen der Beulsicherheitsnachweise gelten die in A.5.6.2 angegebenen Regeln unter der Annahme, dass die ausgesteifte Wand sich wie eine orthotrope Schale verhält.

A.5.5.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung)

(1) Im Rahmen der Beulsicherheitsnachweise gelten die in A.5.6.3 angegebenen Regeln unter der Annahme, dass die ausgesteifte Wand sich wie eine orthotrope Schale verhält.

A.5.6 Als orthotrope Schale behandelte ausgesteifte Wand

A.5.6.1 Allgemeines

(1) Wenn die ausgesteifte, entweder isotrope oder profilierte Wand als orthotrope Schale angesehen wird, sollte die resultierende verschmierte Steifigkeit als gleichmäßig verteilt angenommen werden. Bei profilierten Wänden sollte die Steifigkeit des Blechs in unterschiedlichen Richtungen aus $\overline{A_{11}}$ A.5.7 $\overline{A_{11}}$ entnommen werden.

(2) Die Biege- und Dehneigenschaften der Ring- und Längssteifen und die Exzentrizitäten zwischen den Steifenachsen und aller Schalenmittelflächen sowie der Steifenabstand d_s sollten ebenfalls bestimmt werden.

(3) Der meridionale Abstand zwischen den Steifen d_s (Bild A.10) sollte $d_{s,max}$ nicht überschreiten, wobei der maximale Abstand nach folgender Gleichung zu errechnen ist:

$$d_{s,max} = 7,4 \left(\frac{r^2 D_y}{C_y} \right)^{0,25} \quad (A.53)$$

Hierbei ist

D_y die Biegesteifigkeit des Bleches je Längeneinheit in Umfangsrichtung (parallel zum Profil für in Umfangsrichtung profiliertes Blech);

C_y die Dehnsteifigkeit des Bleches je Längeneinheit in Umfangsrichtung (parallel zum Profil für in Umfangsrichtung profiliertes Blech).

A.5.6.2 Axiale Druckbeanspruchung

(1) Die kritische Beulspannungsergebnante $n_{x,cr}$ je Umfangseinheit der orthotropen Schale sollte auf allen Höhenknoten der Schale ermittelt werden, indem der folgende Ausdruck hinsichtlich der kritischen Umfangswellenzahl j und der Beulhöhe l_i minimiert wird:

$$n_{x,cr} = \frac{1,2}{j^2 \omega^2} \left(A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad (A.54)$$

mit:

$$A_1 = j^4 [\omega^4 C_{44} + 2\omega^2 (C_{45} + C_{66}) + C_{55}] + C_{22} + 2j^2 C_{25} \quad (A.55)$$

$$A_2 = 2\omega^2 (C_{12} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14}) - (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25})^2 - \omega^2 (C_{22} + \omega^2 C_{33}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14})^2 \quad (A.56)$$

$$A_3 = (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + C_{25} + \omega^2 C_{33}) - \omega^2 (C_{12} + C_{33})^2 \quad (A.57)$$

mit:

$$C_{11} = C_\phi + EA_s / d_s$$

$$C_{22} = C_\theta + EA_r / d_r$$

$$C_{12} = \nu \sqrt{C_\phi C_\theta}$$

$$C_{33} = C_{\phi\theta}$$

$$C_{14} = e_s EA_s / (r d_s)$$

$$C_{25} = e_r EA_r / (r d_r)$$

$$\boxed{A11} \quad C_{44} = \frac{1}{r^2} (D_\phi + EI_s / d_s)$$

$$C_{55} = \frac{1}{r^2} \left(D_\theta + \frac{EI_r}{d_r} \right) \quad \boxed{A11}$$

$$C_{45} = \frac{\nu}{r^2} \sqrt{D_\phi D_\theta}$$

$$\boxed{A11} \quad C_{66} = \frac{1}{r^2} \left[D_{\phi\theta} + 0,5 \left(\frac{GI_{ts}}{d_s} + \frac{GI_{tr}}{d_r} \right) \right] \quad \boxed{A11}$$

$$\omega = \frac{\pi r}{j l_i}$$

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

Hierbei ist

- l_i die Halbwellenlänge der potentiellen Beule in Meridianrichtung;
- j Anzahl der Beulwellen in Umfangsrichtung;
- A_s die Querschnittsfläche einer Längssteife;
- I_s das Flächenmoment 2. Grades (Flächenträgheitsmoment) einer Längssteife um ihre Querschnittsachse in Umfangsrichtung in der Schalenmittelfläche (Biegung in Meridianrichtung);
- d_s der Abstand zwischen den Längssteifen;
- I_{ts} das St.Venant'sche Torsionsträgheitsmoment einer Längssteife;
- e_s die Exzentrizität einer Längssteife nach außen, bezogen auf die Schalenmittelfläche;
- A_r die Querschnittsfläche einer Ringsteife;
- I_r das Flächenmoment 2. Grades (Flächenträgheitsmoment) einer Ringsteife um ihre Querschnittsachse in Meridianrichtung in der Schalenmittelfläche (Biegung in Umfangsrichtung);
- d_r der Abstand zwischen den Ringsteifen;
- I_{tr} das St.Venant'sche Torsionsträgheitsmoment einer Ringsteife;
- e_r die Exzentrizität einer Ringsteife nach außen, bezogen auf die Schalenmittelfläche;
- C_ϕ die Dehnsteifigkeit in axialer Richtung;
- C_θ die Dehnsteifigkeit in Umfangsrichtung;
- $C_{\phi\theta}$ die in der Membran erzeugte Schubsteifigkeit;
- D_ϕ die Biegesteifigkeit in axialer Richtung;
- D_θ die Biegesteifigkeit in Umfangsrichtung;
- $D_{\phi\theta}$ die Drillsteifigkeit bei Verdrehung;
- r der Radius der Schale.

ANMERKUNG 1 Für Wellblech beziehen sich die oben für Steifen angegebenen Querschnittsgrößen (A_s , I_s , I_{ts} usw.) nur auf den Querschnitt der Steife; eine Berücksichtigung von mittragenden Anteilen der Schalenwand ist nicht möglich.

ANMERKUNG 2 Dehnsteifigkeit und Biegesteifigkeit des Wellblechs, siehe A.5.7(5) und (6).

ANMERKUNG 3 Der untere Rand der Beule kann dort angenommen werden, wo sich entweder die Blechdicke oder der Querschnitt der Steife ändert; bei jeder dieser Änderungen muss die Beulbeanspruchbarkeit unabhängig überprüft werden.

(2) Der Bemessungswert für die Beulbeanspruchbarkeit $n_{x,Rd}$ für die orthotrope Schale sollte je nach Güteklasse der Schale nach A.1.2 und 6.2.3.2 bestimmt werden. Die kritische Beulbeanspruchbarkeit $n_{x,cr}$

sollte aus (1) ermittelt werden. Für ausgesteifte Schale mit isotropen Wänden darf ein erhöhter Gütefaktor $Q_{\text{stiff}} = 1,3 Q$ angewendet werden.

A.5.6.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung)

(1) Die kritische Beulspannung bei einem gleichmäßigen Außendruck $p_{n,cr}$ sollte bewertet werden, indem der folgende Ausdruck hinsichtlich der kritischen Umfangswellenzahl j minimiert wird:

$$p_{n,cr} = \frac{1}{r j^2} \left(A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad (\text{A.58})$$

wobei A_1, A_2 und A_3 den Angaben in $\boxed{\text{A11}}$ A.5.6.2(1) $\boxed{\text{A11}}$ entsprechen.

(2) Ist der Steifenquerschnitt oder die Blechdicke über die Wandhöhe veränderlich, sollten verschiedene potentielle Beullängen l_i untersucht werden, um die kritischste Beullänge zu bestimmen, wenn von der Annahme ausgegangen wird, dass stets das obere Ende der potentiellen Beule am oberen Rand des dünnsten Blechsusses liegt.

ANMERKUNG Wenn oberhalb des dünnsten Blechsusses noch ein Bereich mit dickerem Blech liegt, kann das obere Ende der potentiellen Beule nicht nur am oberen Rand des dünnsten Blechsusses liegen, sondern auch am oberen Rand der Wand.

(3) Sofern keine genauere Berechnung durchgeführt wird, sollte bei der oben beschriebenen Berechnung als Blechdicke stets die Dicke des dünnsten Blechsusses eingeführt werden.

(4) Für Schalen ohne Dach unter Windlast sollte der vorstehend errechnete Beuldruck um einen Faktor 0,6 verringert werden.

(5) Der Bemessungswert der Beulspannung für die Wand sollte in Abhängigkeit von der Güteklasse der Schale nach 6.2.3.2 und A.1.3 bestimmt werden. Der kritische Beuldruck $p_{n,cr}$ sollte nach (1) ermittelt werden. Für den in A.1.3.1 angegebenen Koeffizienten C_θ sollte $C_\theta = 1$ angewendet werden.

A.5.6.4 Schubbeanspruchung

(1) Es gelten die in A.5.2.4 angegebenen Regeln für isotrope Wände mit Steifen in Meridianrichtung.

A.5.7 Äquivalente orthotrope Eigenschaften des Wellblechs

(1) Profilbleche als Teile eines Schalentragwerkes dürfen bei der Berechnung durch gleichmäßig orthotrope Platten bzw. Schalen ersetzt werden.

(2) Für Profilbleche mit Bogen-Tangenten-Profil oder mit Sinusprofil (Wellbleche) dürfen bei Spannungs- und Beulberechnungen die nachfolgenden Eigenschaften verwendet werden. Für andere Profilierungen sollten die entsprechenden Eigenschaften nach EN 1999-1-4 für den tatsächlichen Querschnitt errechnet werden.

(3) Die Eigenschaften eines Wellbleches sollten in einem x - y -Koordinatensystem definiert werden, wobei die y -Achse parallel zur Profilierung verläuft (Geraden auf der Oberfläche) und die x -Achse rechtwinklig dazu (Wellentäler und -berge). Die Profilgeometrie wird, unabhängig von der genauen Wellenprofilierung, durch folgende Parameter beschrieben, siehe Bild A.14, wobei sind:

d das Maß zwischen zwei Wellenbergen;

l die Wellenlänge des Profils;

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

r_ϕ der örtliche Radius am Wellenberg oder im Wellental.

(4) Alle Eigenschaften dürfen als eindimensional behandelt werden, d. h., es gibt keine Poisson-Effekte zwischen den beiden Richtungen.

(5) Für die Ersatzigenschaften der Membran (Dehnsteifigkeit) darf angenommen werden:

$$C_x = Et_x = E \frac{2t^3}{3d^2} \quad (\text{A.59})$$

$$C_y = Et_y = Et \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2} \right) \quad (\text{A.60})$$

$$C_{xy} = Et_{xy} = \frac{G2t}{1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2}} \quad (\text{A.61})$$

Hierbei ist

t_x die Ersatzdicke für verschmierte Membrankräfte rechtwinklig zu den Profilierungen;

t_y die Ersatzdicke für verschmierte Membrankräfte parallel zu den Profilierungen;

t_{xy} die Ersatzdicke für verschmierte Membranschubkräfte.

(6) Für die Ersatzigenschaften (Biegesteifigkeit), die nach der Richtung indiziert werden, in der das Moment eine Biegung erzeugt (nicht nach der Biegeachse), darf angenommen werden:

$$D_x = EI_x = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2}} \quad (\text{A.62})$$

$$D_y = EI_y = 0,13 Etd^2 \quad (\text{A.63})$$

$$D_{xy} = GI_{xy} = \frac{Gt^3}{12} \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2} \right) \quad (\text{A.64})$$

Hierbei ist

I_x das Ersatzflächenmoment 2. Grades (Ersatzträgheitsmoment) für verschmierte Biegung rechtwinklig zur Profilierung;

I_y das Ersatzflächenmoment 2. Grades (Ersatzträgheitsmoment) für verschmierte Biegung parallel zur Profilierung;

I_{xy} das Ersatzflächenmoment 2. Grades (Ersatzträgheitsmoment) für verschmierte Biegung für Drillung.

ANMERKUNG 1 Biegung parallel zur Profilierung aktiviert die Biegesteifigkeit des Profils und ist der eigentliche Grund für den Einsatz von Profilblechen.

ANMERKUNG 2 Alternative Ausdrücke für die orthotropen Ersatzsteifigkeiten profilierter Bleche werden in den in EN 1993-4-1 angegebenen Verweisungen genannt.

(7) In kreisförmigen Schalen mit in Umfangsrichtung verlaufender Profilierung sollten die Richtungen x und y in den vorstehenden Ausdrücken als axiale Koordinate ϕ bzw. als Umfangskoordinate θ genommen werden. Verläuft die Profilierung in Meridianrichtung, sollten die Richtungen x und y als Umfangskoordinate θ bzw. als axiale Koordinate ϕ genommen werden, A.11 siehe Bild A.14 A.11 .

(8) Die Schubeigenschaften sollten als unabhängig von der Profilierungsrichtung angenommen werden. Für G darf ein Wert von $E/2,6$ angewendet werden.

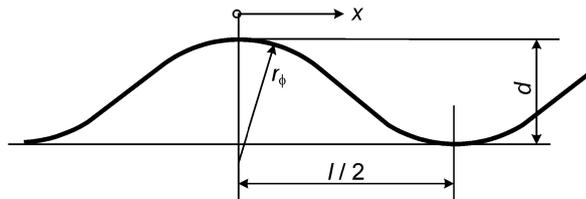


Bild A.14 — Wellblechprofil und geometrische Parameter

A.6 Unausgesteifte kugelförmige Schalen unter gleichmäßigem Druck in Umfangsrichtung

A.6.1 Bezeichnungen und Randbedingungen

(1) Allgemeine Größen (Bild A.15):

r Radius der Mittelfläche der Kugel;

t Dicke der Schale:

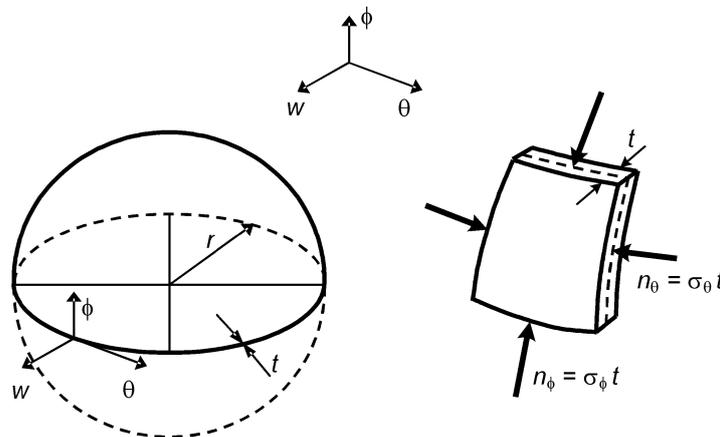


Bild A.15 — Geometrie der Kugel sowie Membranspannungen und Spannungsresultanten

(2) Die Randbedingungen werden in 5.2 und 6.2.2 festgelegt.

A.6.2 Kritische Beulspannungen

(1) Die folgenden Ausdrücke dürfen nur auf vollständige Kugeln oder Kugelkappen mit den Randbedingungen BC1r oder BC1f am unteren Rand angewendet werden.

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

(2) In Kugeln oder Kugelkappen entsteht ein gleichmäßiger Druck in Umfangsrichtung durch Einwirkung eines gleichmäßigen Außendrucks, oder er kann auf kreisförmige Silos oder Tankdächer wirken, wenn bei Auftreten einer Vertikallast (Falllast) eine Verblasungsaktion erfolgt.

(3) Für den Fall eines Druckes in Umfangsrichtung durch gleichmäßigen Außendruck p kann die entsprechende Spannung nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\phi} = \frac{pr}{2t} \quad (\text{A.65})$$

(4) Die kritische Beulspannung unter gleichmäßigem Druck in Umfangsrichtung sollte nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\sigma_{\theta,cr} = \sigma_{\phi,cr} = 0,605 E \frac{t}{r} \quad (\text{A.66})$$

A.6.3 Beulparameter in Umfangsrichtung

(1) Der elastische Imperfektionsfaktor sollte nach folgender Gleichung errechnet werden: $\langle A_{11} \rangle$

$$\alpha_{\theta} = \frac{1}{1 + 2,60 \left(\frac{1}{Q} \sqrt{\frac{0,6 E}{f_0}} (\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_{\theta,0}) \right)^{1,44}} \quad \text{aber } \alpha_{\theta} \leq 1,00 \quad (\text{A.67}) \langle A_{11} \rangle$$

Hierbei ist

$\bar{\lambda}_{\theta,0}$ der Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze;

Q der Toleranzparameter.

(2) Der Toleranzparameter Q sollte für die jeweils festgelegte Toleranzklasse aus Tabelle A.13 entnommen werden.

(3) Der Legierungsfaktor und der Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze sollten entsprechend der in EN 1999-1-1 festgelegten Beulklasse des Werkstoffs aus Tabelle A.14 entnommen werden.

Tabelle A.13 — Toleranzparameter Q

Toleranzklasse	Q
Klasse 1	16
Klasse 2	25
Klassen 3 und 4	40

Tabelle A.14 — Werte für $\bar{\lambda}_{\theta,0}$ und $\langle A_{11} \rangle \mu_{\theta} \langle A_{11} \rangle$ für gleichmäßigen Druck in Umfangsrichtung

Beulklasse des Werkstoffs	$\bar{\lambda}_{\theta,0}$	$\langle A_{11} \rangle \mu_{\theta} \langle A_{11} \rangle$
A	0,20	0,35
B	0,10	0,20

Anhang B (informativ)

Beulberechnung torikonischer und torisphärischer Schalen

B.1 Allgemeines

(1) Für die konischen und kugelförmigen Enden von Zylinderschalen oder ähnlichen Konstruktionen, die mit Hilfe eines Ringkörpers oder direkt ($r_T = 0$) mit dem Zylinder verbunden sind, gelten die in diesem Abschnitt angegebenen Regeln.

B.2 Bezeichnungen und Randbedingungen

(1) In diesem Abschnitt werden die folgenden Bezeichnungen angewendet, siehe Bild B.1:

r Radius der Mittelfläche der Zylinderschale;

r_s Radius der Kugelschale;

α Winkel der Ringkörperschale oder halber Spitzenwinkel der Kegelschale;

r_T Radius des Ringkörpers;

t_T Dicke der Schale für Ringkörper, Kegel oder Kugel;

l Länge des anschließenden Zylinders;

t_C Wanddicke des anschließenden Zylinders.

(2) Die Regeln gelten bei konstantem Außendruck, der orthogonal auf die Oberfläche der Schale wirkt.

(3) Der folgende Anwendungsbereich gilt:

$$t_T \leq t_C \quad (\text{B.1})$$

$$35 \leq r/t_C \leq 1\,250 \quad (\text{B.2})$$

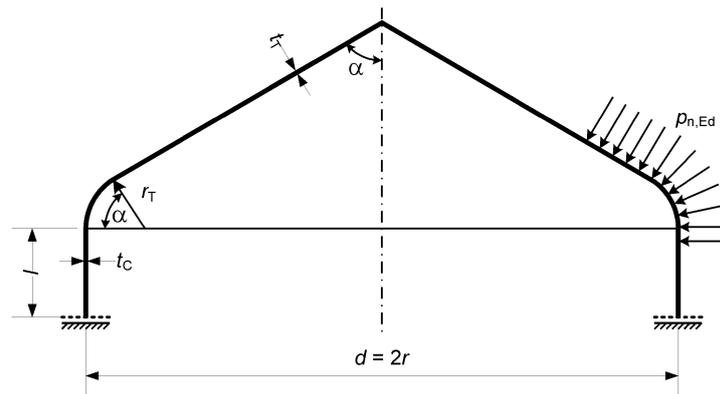
$$45^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ \quad (\text{B.3})$$

$$0 \leq r_T/r \leq 0,4 \quad (\text{B.4})$$

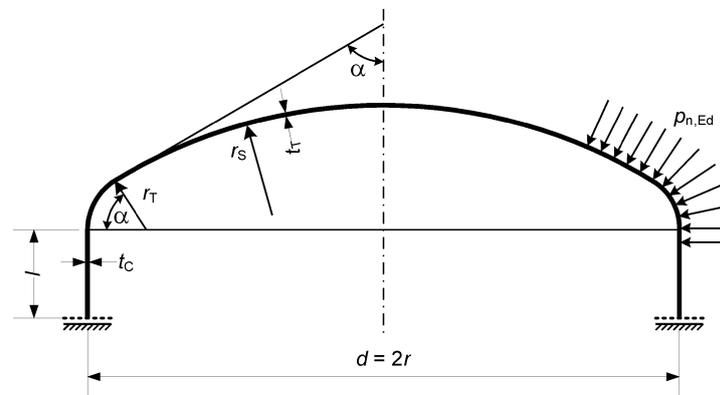
$$\boxed{A_{11}} 1,2 \leq r_s/r \leq 3 \boxed{A_{11}} \quad (\text{B.5})$$

$$\boxed{A_{11}} 1 \leq 1\,000 f_0/E \leq 4 \boxed{A_{11}} \quad (\text{B.6})$$

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)



a) Torikonische Form



b) Torisphärische Form

Bild B.1 — Geometrie und Lasten an den Enden des Zylinders**B.3 Außendruck****B.3.1 Kritischer Außendruck**

(1) Für eine torikonische Schale wird der kritische Außendruck (Beuldruck) nach einer der folgenden Gleichungen errechnet:

$$p_{n,cr} = \frac{2,42}{(1 - \nu^2)^{0,75}} E \sin \alpha (\cos \alpha)^{1,5} \left(\frac{t_T}{\bar{r}} \right)^{2,5} \quad \text{oder} \quad (B.7)$$

$$p_{n,cr} = 2,60 E \sin \alpha (\cos \alpha)^{1,5} \left(\frac{t_T}{\bar{r}} \right)^{2,5} \quad \text{für } \nu = 0,3$$

Hierbei ist

$$\bar{r} = r - r_T(1 - \cos \alpha) + \sqrt{r_T t_T} \sin \alpha \quad \text{mit } \bar{r} \leq r$$

(2) Für eine torisphärische Schale wird der kritische Beul-Außendruck nach folgender Gleichung errechnet:

$$p_{n,cr} = 1,21 C_k E \left(\frac{t_T}{r_s} \right)^2 \quad (B.8)$$

mit:

$$C_k = (r_s/r)^2 \beta^{0,7\sqrt{r_s/r-1}}$$

wobei β der größere der folgendermaßen bestimmten Werte ist:

$$\beta = 0,105 \left(\frac{t_c}{r}\right)^{0,19} \quad \text{und} \quad \beta = 0,088 \left(\frac{r_T}{r}\right)^{0,23}$$

B.3.2 Gleichmäßiger Außendruck an der Quetschgrenze

(1) Für torikonische und torisphärische Schalen darf der gleichmäßige Außendruck an der Quetschgrenze $\langle A_{11} \rangle$ nach (B.9) bestimmt werden oder darf $\langle A_{11} \rangle$ aus der graphischen Darstellung in Bild B.2 entnommen oder für $r_T = 0$ nach Gleichung (B.10) oder nach Gleichung (B.11) angenähert errechnet werden.

$$p_{n,Rk} = f_o \left(14,5 - 450 \frac{f_o}{E}\right) \left(1 + 2 \frac{r_T}{r} + 7,13 \left(\frac{r_T}{r}\right)^2\right) \frac{\cos\alpha}{\left(\frac{2r}{t}\right)^{1,5}} \tag{B.9}$$

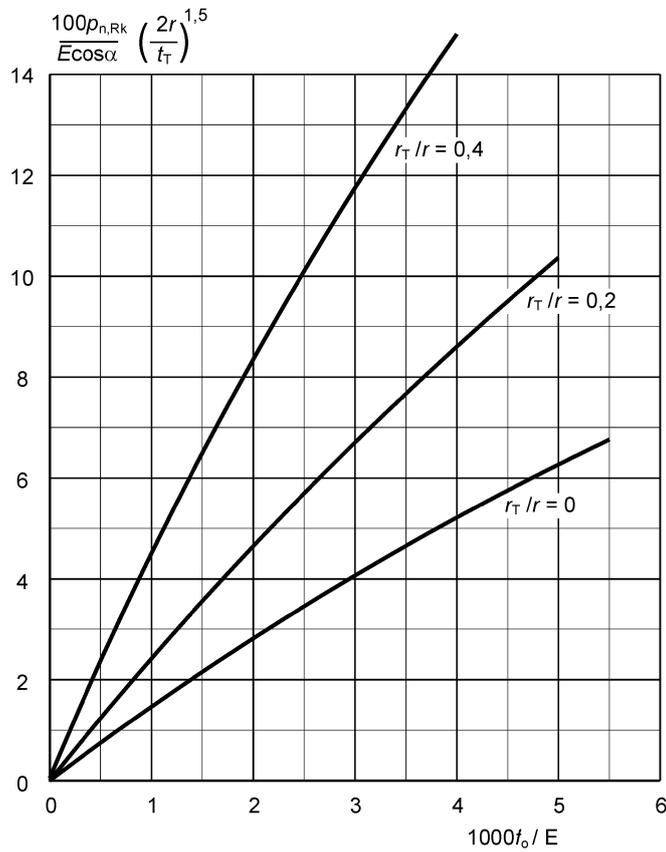


Bild B.2 — Bleibender Außendruck für torikonische und torisphärische Schalen

— Für eine torikonische Schale: $\langle A_{11} \rangle$

$$p_{n,Rk} = 4,4 \sqrt{\frac{t_T}{r}} f_o \frac{t_T}{r / \cos\alpha} \tag{B.10}$$

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

— Für eine torisphärische Schale:

$$p_{n,Rk} = 4,4 \sqrt{\frac{t_T}{r}} f_o \frac{t_T}{r_S} \quad (B.11) \quad \langle A_{11} \rangle$$

B.3.3 Beulparameter unter Außendruck

(1) Der elastische Imperfektionsfaktor sollte nach folgender Gleichung errechnet werden: $\langle A_{11} \rangle$

$$\alpha_\theta = \frac{1}{1 + 2,60 \left(\frac{1}{Q} \sqrt{\frac{0,6 E}{f_o}} (\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_{\theta,0}) \right)^{1,44}} \quad \text{aber } \alpha_\theta \leq 1,00 \quad (B.12) \quad \langle A_{11} \rangle$$

Hierbei ist

$\bar{\lambda}_{\theta,0}$ der Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze;

Q der Toleranzparameter.

(2) Der Toleranzparameter Q sollte für die jeweils festgelegte Toleranzklasse aus Tabelle B.1 entnommen werden.

(3) Der Legierungsfaktor und der Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze sollten entsprechend der in EN 1999-1-1 festgelegten Beulklasse des Werkstoffs aus Tabelle B.2 entnommen werden.

Tabelle B.1 — Toleranzparameter Q

Toleranzklasse	Q
Klasse 1	16
Klasse 2	25
Klassen 3 und 4	40

Tabelle B.2 — Werte für $\bar{\lambda}_{\theta,0}$ und $\langle A_{11} \rangle \mu_\theta \langle A_{11} \rangle$ für Außendruck

Beulklasse des Werkstoffs	$\bar{\lambda}_{\theta,0}$	$\langle A_{11} \rangle \mu_\theta \langle A_{11} \rangle$
A	0,20	0,35
B	0,10	0,20

B.4 Innendruck

B.4.1 Kritischer Innendruck

(1) Der kritische (Beul-)Inndruck für eine torikonische Schale ist

$$p_{n,cr} = 1\,000 E \left(\frac{56\,300}{\alpha^{2,5}} - 0,71 \right) \left(\frac{t}{2r} \right)^3 \quad \text{wenn} \quad \frac{r_T}{2r} = 0 \quad (B.13)$$

$$p_{n,cr} = 1\,000 \eta E \frac{r_T}{2r} \left(\frac{t}{2r}\right)^3 \quad \text{wenn} \quad \frac{r_T}{2r} \neq 0 \quad (\text{B.14})$$

Wobei der Parameter η aus Bild B.3 entnommen werden sollte.

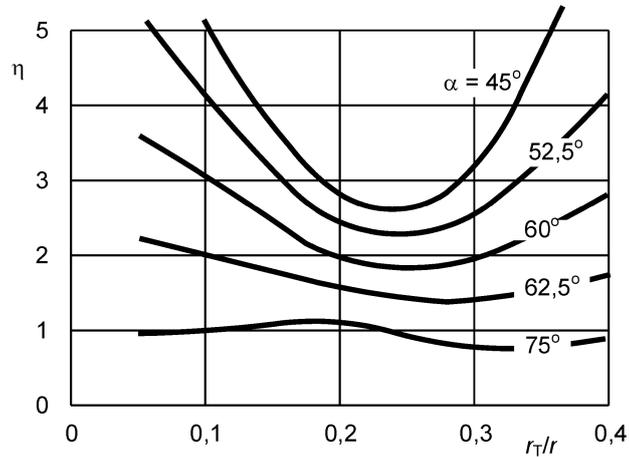


Bild B.3 — Parameter für Ausdruck (B.14)

(2) Der kritische Beulinnendruck für eine torisphärische Schale ist

$$p_{n,cr} = 100E \left(1,85 \frac{r_T}{r} + 0,68\right) \left(\frac{t}{r_S}\right)^{2,45} \quad (\text{B.15})$$

B.4.2 Gleichmäßiger Innendruck an der Quetschgrenze

(1) Der gleichmäßige Innendruck an der Quetschgrenze für torikonische und torisphärische Schalen ist durch den Ausdruck (B.16) gegeben oder kann dem Diagramm in Bild B.4 entnommen werden:

$$p_{n,Rk} = f_o \left(1,2 - 120 \frac{f_o}{E}\right) \left(1 + 3,9 \frac{r_T}{r} + 67 \left(\frac{r_T}{r}\right)^2\right) \frac{\cos \alpha}{\left(\frac{2r}{t}\right)^{1,25}} \quad (\text{B.16})$$

DIN EN 1999-1-5:2017-03
EN 1999-1-5:2007 + AC:2009 (D)

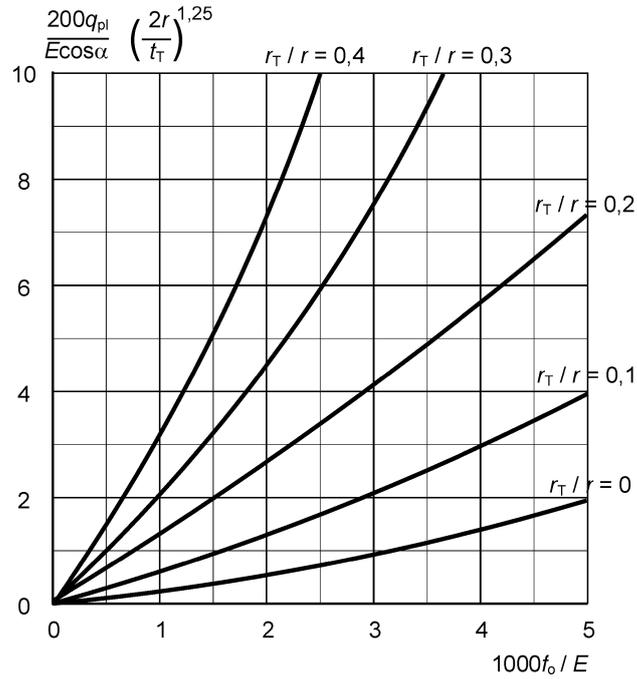


Bild B.4 — Bleibender Innendruck für torikonische und torisphärische Schalen

B.4.3 Beulparameter unter Innendruck

(1) Der Imperfektionsfaktor sollte nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\alpha_{\theta} = \frac{1}{1 + 2,60 \left(\frac{1}{Q} \sqrt{\frac{0,6E}{f_0}} (\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_{\theta,0}) \right)^{1,44}} \quad \text{aber } \alpha_{\theta} \leq 1,00 \quad (\text{B.17})$$

Hierbei ist

$\bar{\lambda}_{\theta,0}$ der Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze;

Q der Toleranzparameter.

(2) Der Toleranzparameter Q sollte für die jeweils festgelegte Toleranzklasse aus Tabelle B.3 entnommen werden.

(3) Der Legierungsfaktor und der Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze sollten entsprechend der in EN 1999-1-1 festgelegten Beulklasse des Werkstoffes aus Tabelle B.4 entnommen werden.

Tabelle B.3 — Toleranzparameter Q für Innendruck

Toleranzklasse	Q
Klasse 1	16
Klasse 2	25
Klassen 3 und 4	40

Tabelle B.4 — Werte $\bar{\lambda}_{\theta,0}$ und μ_{θ} für Innendruck

Beulklasse des Werkstoffs	$\bar{\lambda}_{\theta,0}$	μ_{θ}
A	0,20	0,35
B	0,10	0,20