

DIN EN 1999-1-5

ICS 91.010.30; 91.080.17

EntwurfEinsprüche bis 2021-04-26
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 1999-1-5:2017-03**Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken –
Teil 1-5: Schalentragwerke;
Deutsche und Englische Fassung prEN 1999-1-5:2021**Eurocode 9: Design of aluminium structures –
Part 1-5: Shell structures;
German and English version prEN 1999-1-5:2021Eurocode 9: Calcul des structures en aluminium –
Partie 1-5: Coques;
Version allemande et anglaise prEN 1999-1-5:2021**Anwendungswarnvermerk**

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2021-02-26 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

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

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

Gesamtumfang 151 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1999-1-5:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium 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).

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

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

Änderungen

Gegenüber DIN EN 1999-1-5:2017-03 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) das Dokument wurde vollständig überarbeitet.

<i>Titel de:</i>	Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-5: Schalentragwerke
<i>Titel en:</i>	Eurocode 9: Design of aluminium structures — Part 1-5: Shell structures
<i>Titel fr:</i>	Eurocode 9: Calcul des structures en aluminium — Partie 1-5: Coques

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	7
1.1 Anwendungsbereich von EN 1999-1-5	7
1.2 Annahmen	8
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe und Symbole	9
3.1 Begriffe	9
3.1.1 Formen und Geometrie des Tragwerks	9
3.1.2 Spezielle Definitionen für Beulberechnungen	10
3.2 Symbole	11
3.3 Vorzeichenvereinbarungen	16
3.4 Koordinatensysteme	16
4 Grundlagen der Bemessung	17
4.1 Allgemeines	17
4.2 Versagensfolgeklasse und Ausführungsklasse	18
5 Werkstoffe und Geometrie	18
5.1 Werkstoffeigenschaften	18
5.2 Bemessungswerte der Abmessungen	18
5.3 Geometrische Toleranzen und geometrische Imperfektionen	18
6 Dauerhaftigkeit	19
7 Tragwerksberechnung	19
7.1 Geometrie	19
7.2 Randbedingungen	20
7.3 Einwirkungen und Umwelteinflüsse	20
7.4 Spannungsergebnisse und Spannungen	21
7.5 Berechnungskonzepte	21
8 Grenzzustand der Tragfähigkeit	23
8.1 Beanspruchbarkeit des Querschnitts	23
8.1.1 Bemessungswerte der Spannungen	23
8.1.2 Bemessungswerte für die Beanspruchbarkeit	24
8.1.3 Spannungsbegrenzung	25
8.1.4 Bemessung durch numerische Analyse	25
8.2 Beulwiderstand	25
8.2.1 Allgemeines	25
8.2.2 Beulrelevante geometrische Toleranzen	26
8.2.3 Schale unter Druck- und Schubbeanspruchung	27
8.2.4 Einfluss des Schweißens	30
8.2.5 Bemessung durch numerische Berechnung	33
9 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	33
9.1 Allgemeines	33
9.2 Durchbiegungen	33
Anhang A (normativ) Formeln für den Beulsicherheitsnachweis von Schalenkonstruktionen	34

A.1	Anwendung dieses Anhangs.....	34
A.2	Anwendungs- und Gültigkeitsbereich	34
A.3	Unversteifte zylindrische Schalen mit konstanter Wanddicke	34
A.3.1	Bezeichnungen und Randbedingungen.....	34
A.3.2	Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung)	35
A.3.3	Druck in Umfangsrichtung (Ringspannung)	37
A.3.4	Schub.....	40
A.3.5	Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung) mit gleichzeitig wirkendem Innendruck	42
A.3.6	Kombinationen von Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialdruck), Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung) und Schubbeanspruchung	43
A.4	Unversteifte Zylinderschalen mit abgestufter Wanddicke	44
A.4.1	Allgemeines	44
A.4.2	Druck in Meridianrichtung (Axialrichtung)	46
A.4.3	Druck in Umfangsrichtung (Ringspannung)	46
A.4.4	Schub.....	49
A.5	Unversteifte Zylinderschalen mit Überlappstößen	49
A.5.1	Geometrie und Spannungsergebnisse.....	49
A.5.2	Druck in Meridianrichtung (Axialrichtung)	50
A.5.3	Druck in Umfangsrichtung (Ringspannung)	50
A.5.4	Schub.....	50
A.6	Unversteifte Kegelschalen.....	51
A.6.1	Allgemeines	51
A.6.2	Bemessungswerte der Beulspannungen.....	52
A.6.3	Beulsicherheitsnachweis.....	52
A.7	Versteifte Zylinderschalen mit konstanter Wanddicke	53
A.7.1	Allgemeines	53
A.7.2	Isotrope Schalen mit Steifen in Meridianrichtung.....	54
A.7.3	Isotrope Schalen mit Steifen in Umfangsrichtung.....	55
A.7.4	In Umfangsrichtung profilierte Wände mit Steifen in Meridianrichtung.....	55
A.7.5	Axial profilierte Schalenwand mit Ringsteifen.....	59
A.7.6	Als orthotrope Schale behandelte versteifte Wand	60
A.7.7	Orthotrope Ersatzsteifigkeiten von profilierten Wandblechen.....	63
A.8	Unversteifte Kugelschalen unter gleichmäßigem Druck in Umfangsrichtung	65
A.8.1	Bezeichnungen und Randbedingungen.....	65
A.8.2	Kritische Beulspannungen.....	65
A.8.3	Imperfektionsbeiwert	66
Anhang B (informativ) Formeln für die Beulberechnung torikonischer und torisphärischer Schalen		67
B.1	Anwendung dieses Anhangs.....	67
B.2	Anwendungs- und Gültigkeitsbereich	67
B.3	Bezeichnungen und Randbedingungen.....	67
B.4	Außendruck.....	69
B.4.1	Kritischer Außendruck	69
B.4.2	Gleichmäßiger Außendruck an der vollplastischen Grenzlast.....	69
B.4.3	Imperfektionsbeiwert bei Außendruckbelastung	71
B.5	Innendruck	72
B.5.1	Kritischer Innendruck.....	72
B.5.2	Gleichmäßiger Innendruck an der vollplastischen Grenzlast	72
B.5.3	Imperfektionsbeiwert bei Innendruck.....	73
Literaturhinweise.....		75

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1999-1-5:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist für alle Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus zuständig. Die Verantwortung für alle Angelegenheiten der Tragwerks- und geotechnischen Planung wurde dem CEN/TC 250 von CEN übertragen.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN 1999-1-5:2007 ersetzen.

Die erste Generation der EN Eurocodes wurde zwischen den Jahren 2002 und 2007 veröffentlicht. Dieses Dokument wurde als Teil der zweiten Generation der Eurocodes im Rahmen des Mandats M/515 erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben.

Die Eurocodes wurden erarbeitet, um in Verbindung mit einschlägigen Ausführungs-, Werkstoff-, Produkt- und Prüfnormen angewendet zu werden und um Anforderungen an Ausführung, Werkstoffe, Produkte und Prüfung zu identifizieren, auf denen die Eurocodes beruhen.

Die Eurocodes erkennen die Verantwortlichkeit aller Mitgliedstaaten an und wahren deren Recht, sicherheitsbezogene Werte auf nationaler Ebene in Nationalen Anhängen festzulegen.

Einleitung

0.1 Einleitung zu den Eurocodes

Die Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus umfassen die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

- EN 1990, *Eurocode: 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 Holzbauten*
- 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 Aluminiumtragwerken*
- <Neue Teile>

Die Eurocodes sind für die Anwendung durch Tragwerksplaner, Bauherren, Hersteller, Ausführende, zuständige Behörden (bei der Wahrnehmung ihrer Aufgaben in Übereinstimmung mit nationalen oder internationalen Vorschriften), Lehrkräfte, Softwareentwickler und Normenausschüsse, in denen verwandte Produktnormen, Prüfnormen und Ausführungsnormen erarbeitet werden, gedacht.

ANMERKUNG Einige Entwurfs- und Bemessungsaspekte werden am zutreffendsten von den zuständigen Behörden festgelegt oder können, sofern keine Festlegungen getroffen wurden, für ein bestimmtes Bauvorhaben zwischen den beteiligten Parteien wie Tragwerksplanern und Bauherren vereinbart werden. In den Eurocodes werden solche Aspekte durch ausdrückliche Bezugnahme auf die zuständigen Behörden und die beteiligten Parteien gekennzeichnet.

0.2 Einleitung zu EN 1999, Eurocode 9

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.

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.

EN 1999 behandelt nicht die besonderen Anforderungen an die Auslegung gegen Erdbeben. Bestimmungen zu diesen Anforderungen sind in EN 1998 in Ergänzung zu und Übereinstimmung mit EN 1999 angegeben.

EN 1999 ist in fünf Teile gegliedert:

- EN 1999-1-1, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln*
- EN 1999-1-2, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-2: Tragwerksbemessung für den Brandfall*
- EN 1999-1-3, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-3: Ermüdungsbeanspruchte Tragwerke*
- EN 1999-1-4, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-4: Kaltgeformte Profiltafeln*
- EN 1999-1-5, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-5: Schalenträgerwerke*

0.3 Einleitung zu EN 1999-1-5

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.

0.4 In den Eurocodes verwendete Verbformen

Das Verb „muss“ beschreibt eine Anforderung die zwingend zu befolgen ist und von der bei Anwendung der Eurocodes keine Abweichung zulässig ist.

Das Verb „sollte“ beschreibt eine streng empfohlene Auswahl oder Vorgehensweise. In Abhängigkeit von nationalen Regeln und/oder relevanten Vertragsbestimmungen könnten alternative Lösungen verwendet/angenommen werden, wenn sie technisch verifiziert sind.

Das Verb „darf“ beschreibt eine erlaubte Vorgehensweise innerhalb der Anwendungsgrenzen der Eurocodes.

Das Verb „kann“ beschreibt Möglichkeiten und Fähigkeiten; es wird für Tatsachenfeststellungen und Erklärungen verwendet.

0.5 Nationaler Anhang zu prEN 1999-1-5

Nationale Festlegungen können dann getroffen werden, wenn in diesem Dokument im Rahmen von Anmerkungen eine Wahl ausdrücklich gestattet ist. Nationale Festlegungen schließen die Wahl von Werten für national festzulegende Parameter (NDP, en: nationally determined parameters) ein.

Hierzu kann die jeweilige nationale Ausgabe von EN 1999-1-5 einen Nationalen Anhang mit allen national festgelegten Parametern enthalten, die für den Entwurf und die Bemessung von Hoch- und Ingenieurbauten im jeweiligen Land Verwendung finden.

Wird keine nationale Festlegung angeführt, ist der in diesem Dokument angegebene Standardwert anzuwenden.

Wenn keine nationale Festlegung angeführt wird und kein Standardwert in diesem Dokument angegeben ist, kann die Festlegung durch eine zuständige Behörde getroffen werden, oder sofern keine Festlegungen getroffen wurden, können die beteiligten Parteien im Einzelfall eine Vereinbarung treffen.

Nationale Festlegungen sind in EN 1999-1-5 zu den folgenden Abschnitten gestattet:

- N/A

Nationale Festlegungen sind in EN 1999-1-5 bei der Anwendung der folgenden informativen Anhänge gestattet:

Anhang B (informativ), Gleichungen für die Beulberechnung torikonischer und torisphärischer Schalen.

1 Anwendungsbereich

1.1 Anwendungsbereich von EN 1999-1-5

(1) 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) EN 1999-1-5 behandelt zusätzliche Bestimmungen in Ergänzung zu denen, die in den maßgebenden Teilen von EN 1999 für die Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten angegeben sind.

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

- 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 Ringe mit Balkenprofil und Längssteifen, die Teile des kompletten Tragwerks sind.

(5) EN 1999-1-5 beschäftigt sich nicht ausdrücklich mit einzelnen Schalenstreifen (zylindrisch, konisch oder kugelförmig). Die Regeln können jedoch bei entsprechender Berücksichtigung der zutreffenden Randbedingungen anwendbar sein.

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

- Schalenwand aus flach gewalztem Blech mit durch Stumpfschweißnähte verbundenen aneinandergrenzenden Blechen, 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.

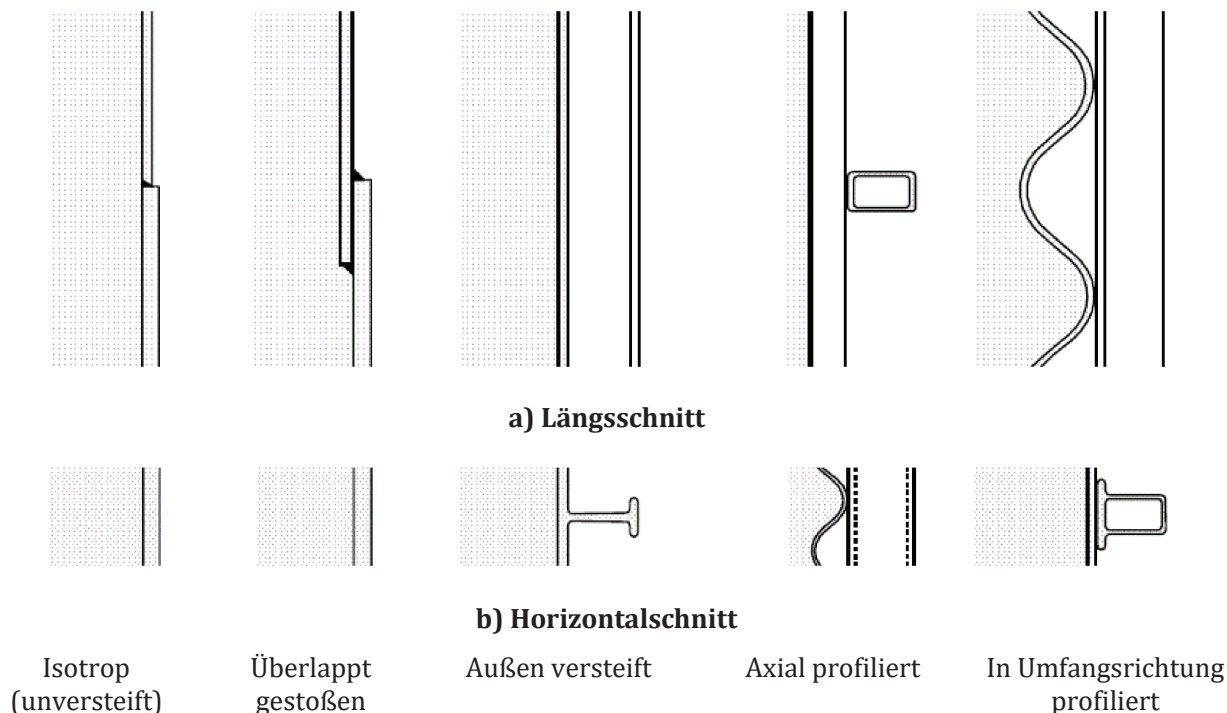


Bild 1.1 — Darstellung der Formen zylindrischer Schalen

(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 Undichtheit der Schale.

1.2 Annahmen

(1) Es gelten die allgemeinen Annahmen nach EN 1990.

(2) Es gelten die Bestimmungen nach EN 1999-1-1.

(3) Die Bemessungsverfahren sind nur anwendbar, wenn die Anforderungen an die Ausführung nach EN 1090-3 oder andere äquivalente Anforderungen erfüllt sind.

(4) Für die Bemessung und Konstruktion neuer Tragwerke ist prEN 1999 (alle Teile) vorgesehen, für die direkte Anwendung in Zusammenhang mit EN 1990, EN 1991, EN 1992, EN 1993, EN 1994, EN 1995, EN 1997 und EN 1998.

(5) EN 1999 (alle Teile) gilt in Verbindung mit folgenden Regelwerken:

- Europäische Normen für Bauprodukte, die für Aluminiumtragwerke Verwendung finden:
- EN 1090-1, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 1: Konformitätsnachweisverfahren für tragende Bauteile*
- EN 1090-3, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 3: Technische Regeln für die Ausführung von Aluminiumtragwerken*

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 1990, *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*

prEN 1999-1-1:2021, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln*

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe

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

3.1.1 Formen und Geometrie des Tragwerks

3.1.1.1

Schale

dünnwandiger Körper, der so geformt wird, dass eine gekrümmte Fläche entsteht, deren rechtwinklig zur Fläche gemessene Dicke gegenüber den Abmessungen in anderen Richtungen klein ist

Anmerkung 1 zum Begriff: 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 einen unendlichen Krümmungsradius haben, z. B. eine Zylinderschale.

Anmerkung 2 zum Begriff: In EN 1999-1-5 ist eine Schale ein Aluminiumtragwerk oder ein Teil des Tragwerks, das aus gekrümmten Blechen oder Strangpressteilen gebildet wird.

3.1.1.2

Rotationsschale

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

3.1.1.3

vollständige rotationssymmetrische Schale

Schale, deren Form durch die Rotation ihrer meridionalen Erzeugenden um eine zentrale Achse über 360° festgelegt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Schale kann eine beliebige Länge haben.

3.1.1.4

Schalenabschnitt

Teil einer Rotationsschale mit festgelegter Schalengeometrie und konstanter Wanddicke

Anmerkung 1 zum Begriff: Beispiele für Formen sind ein Zylinder, ein Kegelstumpf, ein Teil einer Kugel, eine Kreisringplatte oder eine andere Form.

3.1.1.5

Schalenstreifen

unvollständige rotationssymmetrische Schale, deren Form durch die Rotation einer Erzeugenden um eine Achse über weniger als 360° festgelegt wird

3.1.1.6

Mittelfläche

Fläche, die an allen Punkten der Schale in der Mitte zwischen der Schaleninnen- und -außenfläche liegt

Anmerkung 1 zum Begriff: 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.

3.1.1.7

Knotenlinie

Linie, an der zwei oder mehr Schalenabschnitte zusammentreffen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Knotenlinie kann auch eine Steife einschließen; die Anschlusslinie einer Ringsteife an die Schale kann ebenfalls als Knotenlinie betrachtet werden.

3.1.1.8

Längssteife

örtliches Versteifungsbauteil längs des Schalenmeridians (Erzeugende der Rotationsschale)

Anmerkung 1 zum Begriff: 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.

3.1.1.9

Rippe

örtliches Bauteil, das eine primäre Biegelastabtragung längs eines Schalenmeridians ermöglicht, welcher eine Erzeugende der Rotationsschale darstellt

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Rippe wird vorgesehen, um Querlasten mittels Biegung zu übertragen oder zu verteilen.

3.1.1.10

Ringsteife

örtliches Versteifungsbauteil, das an einem bestimmten Punkt auf dem Meridian längs des Umfangs der Rotationsschale verläuft

Anmerkung 1 zum Begriff: 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.

3.1.1.11

Basisring

Tragwerkselement, das der Umfangslinie an der Basis der Rotationsschale folgt und Möglichkeiten zur Anbringung der Schale an einem Fundament oder einem anderen Teil bietet

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Basisring wird benötigt, um die angenommenen Randbedingungen praktisch sicherzustellen.

3.1.2 Spezielle Definitionen für Beulberechnungen

3.1.2.1

ideale Verzweigungslast

kleinste Verzweigungs- oder Durchschlagslast, berechnet unter den idealisierenden Annahmen elastischen Werkstoffverhaltens, perfekter Geometrie, perfekter Lasteinleitung, perfekter Auflagerung, isotropen Werkstoffes und Abwesenheit von Eigenspannungen (LBA-Analyse)

3.1.2.2

ideale Beulspannung

Nennwert der Membranspannung, der einer idealen Verzweigungslast zuzuordnen ist

3.1.2.13

charakteristische Beulspannung

Nennwert der Membranspannung, der der Beullast bei unelastischem Werkstoffverhalten und bei Vorhandensein geometrischer und konstruktiver Imperfektionen zuzuordnen ist

3.1.2.4

Bemessungswert der Beulspannung

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

3.1.2.5

maßgebende Spannung

in einem ungleichmäßigen Spannungsfeld der Spannungswert, der beim Grenzzustand des Beulens zur Charakterisierung der Beanspruchung verwendet wird

3.1.2.6

Toleranzklasse

Klasse der geometrischen Toleranzen, die bei der Ausführung einzuhalten sind

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese geometrischen Toleranzen umfassen die Herstellungstoleranz der Bauteile und die Toleranz für die Ausführung der Arbeiten mit den Bauteilen auf der Baustelle.

3.2 Symbole

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Symbole nach EN 1999-1-1 und die folgenden Symbole.

Koordinatensystem (siehe Bild 3.1):

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.

Drücke:

p_n	Druck rechtwinklig zur Schale;
p_x	Flächenlast in Meridianrichtung parallel zur Schale;
p_θ	Flächenlast in Umfangsrichtung parallel zur Schale;

Linienkräfte:

- P_n Last je Umfangslängeneinheit, rechtwinklig zur Schale;
 P_x Last je Umfangslängeneinheit, in Meridianrichtung wirkend;
 P_θ Last je Umfangslängeneinheit, in Umfangsrichtung wirkend;

Membranspannungsresultanten [siehe Bild 3.2 a)]:

- n_x Membranspannungsresultante in Meridianrichtung;
 n_θ Membranspannungsresultante in Umfangsrichtung;
 $n_{x\theta}$ Membranschubspannungsresultante;

Biegespannungsresultanten [siehe Bild 3.2 b)]:

- m_x Biegemoment je Längeneinheit infolge Spannungen in Meridianrichtung;
 m_θ Biegemoment je Längeneinheit infolge Spannungen in Umfangsrichtung;
 $m_{x\theta}$ Drillmoment je Längeneinheit;
 θ_{xn} Querkraft bei Biegung in Meridianrichtung;
 $\theta_{\theta n}$ Querkraft bei Biegung in Umfangsrichtung;

Spannungen:

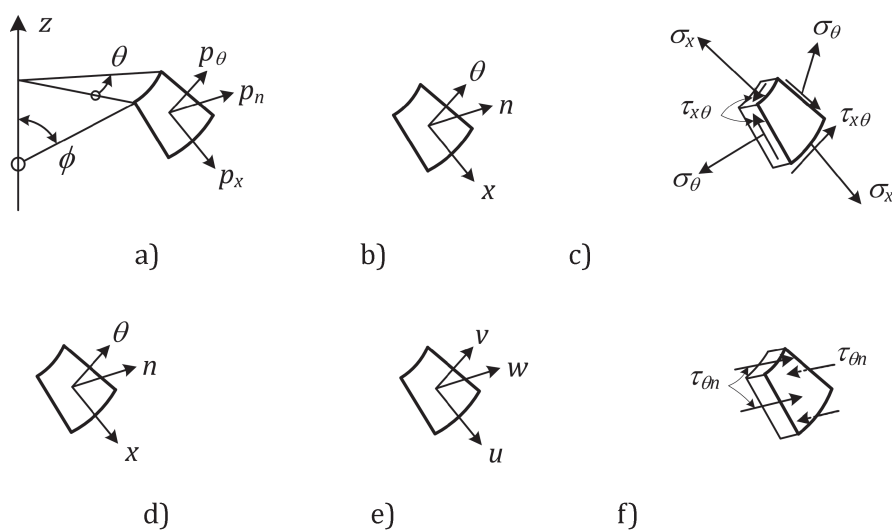
- σ_x Meridianspannung;
 σ_θ Umfangsspannung;
 σ_{eq} von-Mises-Ersatzspannung (kann unter zyklischen Belastungsbedingungen negativ sein);
 $\tau, \tau_{x\theta}$ Membranschubspannung;
 $\tau_{xn}, \tau_{\theta n}$ Querkraftschubspannungen bei Biegung in Meridianrichtung, in Umfangsrichtung;

Verschiebungen:

- u Verschiebung in Meridianrichtung;
 v Verschiebung in Umfangsrichtung;
 w Verschiebung rechtwinklig zur Schalenmittelfläche;
 β_ϕ Verdrehung in Meridianrichtung (siehe 7.2);

Abmessungen der Schale:

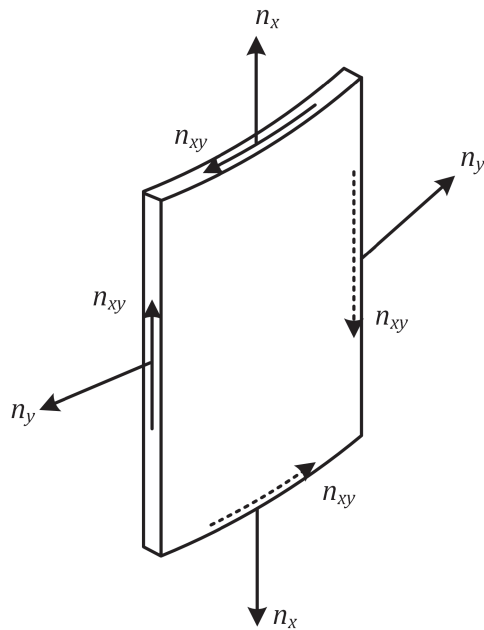
d	Innendurchmesser der Schale;
L	Gesamtlänge der Schale;
l	Länge eines Schalenabschnitts;
l_g	Messlänge für die Messung der Imperfektionen;
$l_{g,\theta}$	Messlänge für die Messung der Imperfektionen in Umfangsrichtung;
$l_{g,w}$	Messlänge für die Messung der Imperfektionen über die Schweißnähte hinweg;
l_R	Grenzlänge der Schale für den Beulsicherheitsnachweis;
r	Radius der Mittelfläche, rechtwinklig zur Rotationsachse;
t	Wanddicke der Schale;
$t_{\max}$	größte Wanddicke der Schale an einem Stoß;
$t_{\min}$	kleinste Wanddicke der Schale an einem Stoß;
t_{ave}	mittlere Wanddicke der Schale an einem Stoß;
β	halber Öffnungswinkel eines Kegels;



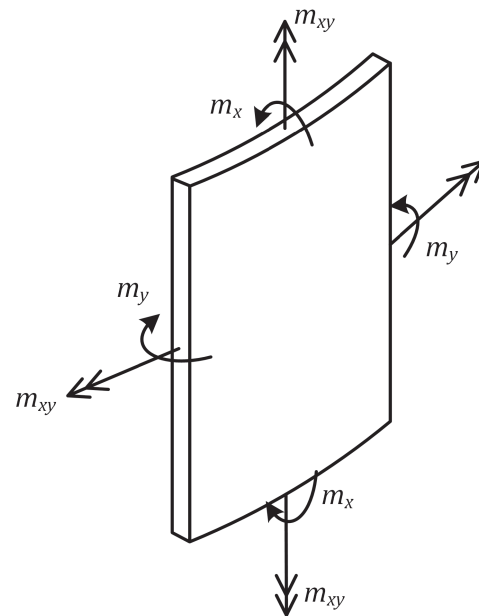
Legende

- a) Oberflächendrücke
- b) Koordinaten
- c) Membranspannungen
- d) Richtungen:
 θ = in Umfangsrichtung
 n = in Normalenrichtung
 x = in Meridianrichtung
- e) Verschiebungen
- f) Querschubspannungen

Bild 3.1 — Bezeichnungen für Rotationsschalen



a) Membranspannungsergebnisse



b) Biegespannungsergebnisse

Bild 3.2 — Spannungsergebnisse der Schalenwand (im Bild ist x die Meridianrichtung und y die Umfangsrichtung)

Toleranzen (siehe 8.2.2):

- e Exzentrizität zwischen den Schalenmittelflächen miteinander verbundener Bleche;
- U_e Toleranzparameter für die unplanmäßige Exzentrizität;
- U_r Toleranzparameter für die Unrundheit;
- U_0 Toleranzparameter für die Vorbeule;
- Δw_0 Toleranz rechtwinklig zur Schalenoberfläche;

Werkstoffeigenschaften:

- f_{eq} von-Mises-Vergleichsfließspannung;
- f_u charakteristischer Wert der Zugfestigkeit;
- f_o charakteristischer Wert der 0,2 %-Dehngrenze;

Parameter zur Festigkeitsbeurteilung:

- C Beiwert für den Beulsicherheitsnachweis;
- C_ϕ Dehnsteifigkeit der Bleche in axialer Richtung;
- C_θ Dehnsteifigkeit der Bleche in Umfangsrichtung;

$C_{\phi\theta}$	Membranschubsteifigkeit der Bleche;
D_{ϕ}	Biegesteifigkeit der Bleche in axialer Richtung;
D_{θ}	Biegesteifigkeit der Bleche in Umfangsrichtung;
$D_{\phi\theta}$	Drillsteifigkeit der Bleche;
R	bezogener Referenzwiderstand (mit Indizes zur Kennzeichnung des Bezugs);
R_{pl}	bezogener plastischer Referenzwiderstand (als Lastfaktor für die Bemessungslasten festgelegt);
R_{cr}	bezogener idealer Beulwiderstand (als Lastfaktor für die Bemessungslasten festgelegt);
k	Kalibrierungsfaktor für nichtlineare Berechnungen;
$k_{(...)}$	Potenz in den Gleichungen für die Beulinteraktion;
μ	Legierungs- und belastungsabhängiger Verfestigungsparameter für die Beulkurven;
$a_{(...)}$	Abminderungsfaktor für den Einfluss von Imperfektionen auf die elastische Beullast;
Δ	Schwingbreite bei alternierenden oder zyklischen Einwirkungen;

Bemessungswerte für Spannungen und Spannungsresultanten:

$\sigma_{x,Ed}$	Bemessungswerte für die beulrelevante Membranspannung in Meridianrichtung (positiv, wenn Druck);
$\sigma_{\theta,Ed}$	Bemessungswerte für die beulrelevante Membranspannung (Ringspannung) in Umfangsrichtung (positiv, wenn Druck);
τ_{Ed}	Bemessungswerte für die beulrelevante Membranschubspannung;
$n_{x,Ed}$	Bemessungswerte für die beulrelevante Membranspannungsresultante in Meridianrichtung (positiv, wenn Druck);
$n_{\theta,Ed}$	Bemessungswerte für die beulrelevante Membranspannung (Ringspannung) in Umfangsrichtung (positiv, wenn Druck);
$n_{x\theta,Ed}$	Bemessungswerte für die beulrelevante Membranschubspannungsresultante;

Ideale Beulspannungen und ideale Beulwiderstände:

$\sigma_{x,cr}$	ideale Beulspannung in Meridianrichtung;
$\sigma_{\theta,cr}$	ideale Beulspannung in Umfangsrichtung;
τ_{cr}	ideale Beulschubspannung;
$\sigma_{x,Rd}$	Bemessungswert des idealen Beulwiderstandes in Meridianrichtung;

- $\sigma_{\theta,Rd}$ Bemessungswert des idealen Beulwiderstandes in Umfangsrichtung;
- τ_{Rd} Bemessungswert des idealen Beulwiderstandes bei Schubbeanspruchungen.

3.3 Vorzeichenvereinbarungen

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

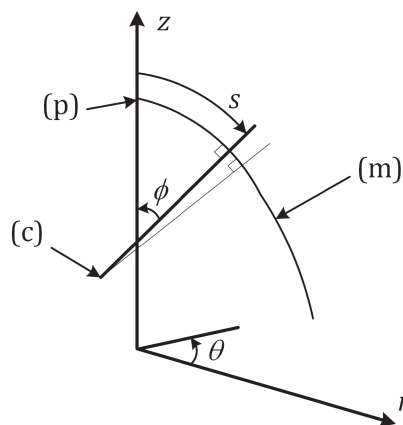
- nach außen gerichtet positiv;
- Innendruck positiv;
- Verschiebung nach außen positiv;
- Zugspannungen positiv;
- Schubspannungen wie in Bild 3.1 dargestellt.

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

3.4 Koordinatensysteme

(1) Im Allgemeinen wird für das globale Schalentragsystem ein zylindrisches Koordinatensystem wie folgt verwendet (siehe Bild 3.3):

- Koordinate längs der Mittelachse der Rotationsschale z ;
- radiale Koordinate r ;
- Koordinate in Umfangsrichtung θ .



Legende

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

Bild 3.3 — Koordinatensysteme für eine kreisförmige Schale

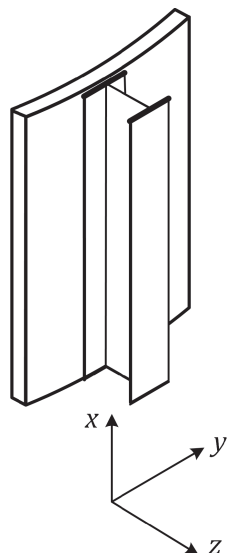
(2) Das Koordinatensystem für Tragwerksteile, die mit der Tankwand verbunden sind (siehe Bild 3.4), ist für solche in Meridianrichtung und solche in Umfangsrichtung unterschiedlich.

(3) Das Koordinatensystem für gerade, mit der Schalenwand verbundene Tragelemente in Meridianrichtung [siehe Bild 3.4(I)] ist:

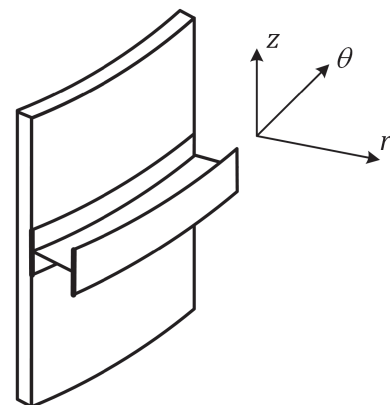
- Meridiankoordinate für Zylinder, Auslaufkegel und Dachanschluss x ;
- starke Biegeachse (parallel zu den Flanschen: Achse für Biegung in Meridianrichtung) y ;
- schwache Biegeachse (rechtwinklig zu den Flanschen) z .

(4) Die Vereinbarung für gekrümmte, mit der Schalenwand verbundene Tragelemente in Umfangsrichtung [siehe Bild 3.4(II)] ist:

- Achse der Umfangskoordinate (gekrümmt) θ ;
- radiale Achse (Biegeachse in der Meridianebene) r ;
- Meridianachse (Biegeachse für Umfangsbiegung) z .



a) Meridiansteife



b) Umfangssteife

Bild 3.4 — Lokales Koordinatensystem für Meridiansteifen und Umfangssteifen bei einer Schale

4 Grundlagen der Bemessung

4.1 Allgemeines

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

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

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

- Widerstand gegen Instabilität und Fließen: γ_{M1} ;
- Widerstand des unter Zug stehenden Bleches gegen Bruch: γ_{M2} ;
- Beanspruchbarkeit der Verbindungen: siehe EN 1999-1-1.

ANMERKUNG Werte für γ_{Mi} siehe EN 1999-1-1.

4.2 Versagensfolgeklasse und Ausführungsklasse

(1) Die Auswahl der Versagensfolgeklasse, siehe EN 1990 und EN 1999-1-1, sollte vom Tragwerksplaner und dem Eigentümer des Bauwerks unter Berücksichtigung nationaler Festlegungen gemeinsam getroffen werden.

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

5 Werkstoffe und Geometrie

5.1 Werkstoffeigenschaften

(1) EN 1999-1-5 gilt für die in prEN 1999-1-1:2021, Tabelle 5.2a und Tabelle 5.2b, aufgeführten Knetwerkstoffe (Legierungen und Zustände) und für kaltgeformte Bleche nach prEN 1999-1-4:2021, Tabelle 5.1.

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

(3) Für eine globale numerische Berechnung mit werkstofflichen Nichtlinearitäten werden Hinweise für das jeweils geeignete Spannungs-Dehnungs-Diagramms in prEN 1999-1-1:2021, Anhang F gegeben.

5.2 Bemessungswerte der Abmessungen

(1) Die Dicke t der Schale sollte der in EN 1999-1-1 und in EN 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.

5.3 Geometrische Toleranzen und geometrische Imperfektionen

(1) Folgende Abweichungen der Schalengeometrie von den Nennwerten sollten berücksichtigt werden:

- Unrundheit (Abweichung von der Kreisform);
- Exzentrizitäten (Abweichung von der Stetigkeit der Schalenmitte an Blechstößen, rechtwinklig zur Schale betrachtet);
- örtliche Vorbeulen (örtliche Abweichungen von der Schalenmitte rechtwinklig zu ihr).

ANMERKUNG EN 1090-3 enthält Festlegungen für geometrische Toleranzen für Schalentragwerke.

(2) Zu geometrischen Toleranzen in Zusammenhang mit Beulwiderstand siehe 8.2.2.

6 Dauerhaftigkeit

(1) Es gelten die grundlegenden Anforderungen nach prEN 1999-1-1:2021, Abschnitt 6.

(2) Besonders beachtet werden sollten die Fälle, in denen ein Verbund unterschiedlicher Werkstoffe vorgesehen ist, wenn dadurch elektrochemische Erscheinungen Bedingungen hervorrufen könnten, 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.

7 Tragwerksberechnung

7.1 Geometrie

(1) Die Schale sollte durch ihre Mittelfläche beschrieben werden.

(2) Als Krümmungsradius sollte dessen Nennwert verwendet werden.

(3) Eine aus Schalenabschnitten bestehende Schale sollte nicht für die Berechnung in einzelne Abschnitte zerlegt werden, es sei denn, die Randbedingungen für jeden Abschnitt werden so gewählt, dass ihre gegenseitigen Beeinflussungen auf der sicheren Seite wiedergegeben werden.

(4) Sofern es mit den tatsächlichen Randbedingungen verträglich ist, darf ein starrer Basisring zur Ableitung der Stützkkräfte in die Schale in das Berechnungsmodell einbezogen werden.

(5) Exzentrizitäten und Sprünge in der Mittelfläche der Schale sollten im Berechnungsmodell berücksichtigt werden, da sie, bedingt durch den exzentrischen Verlauf der Membranspannungsergebnisse, signifikante Biegeeinwirkungen einbringen können.

(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.

(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.7.7).

(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 sollte je nach Gültigkeit in Übereinstimmung mit EN 1993-3-1, EN 1993-3-2, EN 1993-4-1, EN 1993-4-2 oder EN 1993-4-3 nachgewiesen werden.

7.2 Randbedingungen

(1) Bei den Berechnungen für die Grenzzustände sollten die geeigneten Randbedingungen nach Tabelle 7.1 angewendet werden. Hinsichtlich spezieller Bedingungen, die für Beulberechnungen benötigt werden, sollte 8.2 berücksichtigt werden.

(2) Beim Berechnungsmodell für den Grenzzustand der Tragfähigkeit dürfen Rotationsbehinderungen an den Schalengrenzen in allen Fällen, in denen Versagen in großem Abstand von den unverschieblichen Schalenden erfolgt, unberücksichtigt bleiben. Bei kurzen und/oder dicken Schalen, axial beanspruchten Zylindern der Toleranzklasse 4 und höher sowie, allgemeiner gefasst, in allen Fällen, in denen Kollaps (z. B. infolge Beulen) wahrscheinlich in der Nähe der unverschieblichen Schalenden auftreten wird (siehe Anhang A), sollte die Rotationsbehinderung in die Berechnung der Beulsicherheit einbezogen werden.

(3) Die Auflager-Randbedingungen sollten überprüft werden, um sicherzustellen, dass sie keine zu große Ungleichmäßigkeit der übertragenen Kräfte verursachen oder Kräfte exzentrisch zur Schalenmittelfläche einleiten.

(4) 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.

Tabelle 7.1 — Randbedingungen für Schalen

Randbe- dingung Typ	Einfache Bezeichnung	Beschreibung			Verschie- bungen rechtwink- lig zur Oberfläche	Verschie- bungen in Meridian- richtung	Rotation in Meridian- richtung
		Radial	In Meridian- richtung	Rotation			
BC1r	Eingepannt	Unver- schieblich	Unver- schieblich	Eingepannt	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_\phi = 0$
BC1f		Unver- schieblich	Unver- schieblich	Frei	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_\phi \neq 0$
BC2r		Unver- schieblich	Frei	Eingepannt	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi = 0$
BC2f	Gelenkig gelagert	Unver- schieblich	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 ist mit der Verschiebung rechtwinklig zur Oberfläche w so eng verknüpft, dass keine gesonderten Randbedingungen benötigt werden.							

7.3 Einwirkungen und Umwelteinflüsse

(1) Es sollte vorausgesetzt werden, dass alle Einwirkungen auf die Mittelfläche der Schale wirken. Exzentrisch wirkende Lasten sollten durch statisch äquivalente Kräfte und Momente auf die Mittelfläche der Schale erfasst werden.

(2) Örtliche und kleinflächige Einwirkungen sollten nicht durch äquivalente gleichmäßige Lasten dargestellt werden, wenn es nicht anders festgelegt ist.

(3) Zusätzlich zu den Einwirkungen und Einwirkungskombinationen nach der Reihe EN 1991 und EN 1990 sollten diejenigen der folgenden Einwirkungen, die für das Tragwerk von Bedeutung sind, bei der Tragwerksberechnung berücksichtigt werden:

- lokale Setzung unter den Schalenwandungen;
- lokale Setzung unter Einzelstützen;
- gleichmäßige Abstützung des Tragwerks;
- Temperaturunterschiede der einen Seite des Tragwerks gegenüber einer anderen;
- Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Außenseite des Tragwerks;
- Windeffekte an Öffnungen und Durchdringungen;
- Interaktion von Windwirkungen für Gruppen von Tragwerken;
- Verbindungen mit anderen Tragwerken;
- Bedingungen während der Montage.

(4) Die Schalen könnten bedingt durch die Lastabtragung durch Membrankräfte empfindlich gegenüber Änderungen der Geometrie sein, z. B. durch Vorbeulen. Außer den bei der Ausführung unvermeidbaren geometrischen Abweichungen können Vorbeulen durch unvorhergesehene Einwirkungen während der Nutzung entstehen. Die Empfindlichkeit steigt bei relativ dünnen Bauteilen. Falls die Größe der Vorbeulen die in EN 1090-3 angegebenen Werte überschreitet, sollten die Auswirkungen auf die Tragfähigkeit untersucht werden.

(5) Insbesondere, wenn eine hohe Toleranzklasse (3 oder 4) vorliegt, sollte ein Programm zur regelmäßigen Überprüfung der Geometrie befolgt werden.

(6) Bei dem Entwurfskonzept sollten geeignete Maßnahmen zur Vermeidung des Risikos unzulässiger Vorbeulen berücksichtigt werden. Diese Maßnahmen können z. B. darin bestehen, dass eine größere Dicke angewendet wird, als nach Berechnung für die Nachweise der Einwirkungseinflüsse erforderlich ist, oder dass in Bereichen, in denen das Risiko als signifikant eingeschätzt wird, Schutzmaßnahmen vorgesehen werden.

7.4 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.

7.5 Berechnungskonzepte

(1) Die Berechnung sollte in Abhängigkeit vom Grenzzustand und von anderen Erwägungen auf einer oder mehreren der in Tabelle 7.2 angegebenen Berechnungskonzepte basieren. Die Berechnungskonzepte werden in Tabelle 7.3 ausführlich erläutert. Für weitere Einzelheiten wird auf EN 1993-1-6 verwiesen.

Tabelle 7.2 — Berechnungskonzepte für Schalentragwerke

Berechnungskonzept		Schalentheorie	Werkstoffgesetz	Schalen-geometrie
Membrantheorietische Berechnung	MTA	Membran-gleichgewicht	Nicht anwendbar	perfekt ^a
Linear elastische Berechnung	LA	Lineare Biegung und Verzerrung	Linear	perfekt ^a
Linear elastische Verzweigungs-berechnung	LBA	Lineare Biegung und Verzerrung	Linear	perfekt ^a
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung	GNA	Nichtlinear	Linear	perfekt ^a
Materiell nichtlineare Berechnung	MNA	Linear	Nichtlinear	perfekt ^a
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung	GMNA	Nichtlinear	Nichtlinear	perfekt ^a
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen	GNIA	Nichtlinear	Linear	imperfekt ^b
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen	GMNIA	Nichtlinear	Nichtlinear	imperfekt ^b
^a perfekt bedeutet, dass bei diesem Berechnungsmodell die geometrischen Nennbedingungen ohne Berücksichtigung der entsprechenden Abweichungen angewendet werden. ^b imperfekt bedeutet, dass bei diesem Berechnungsmodell die geometrischen Abweichungen von den geometrischen Nennbedingungen (Toleranzen) berücksichtigt werden.				

(2) Für die Beuluntersuchung sind die zwei folgenden Verfahrensweisen anwendbar:

- linear elastische Verzweigungs-berechnung zur Bestimmung der Verzweigungslast (LBA) des Tragwerks ohne Imperfektionen und anschließende Anwendung von Abminderungsfaktoren nach 8.1 zur Berücksichtigung geometrischer und materieller Nichtlinearität;
- vollständig nichtlineare Berechnung mit geometrischer und materieller Nichtlinearität (GMNIA), unter Verwendung der Form und Amplitude geometrischer Imperfektionen nach EN 1090-3 und des nichtlinearen Berechnungsmodells für das Spannungs-Dehnungsgesetz.

ANMERKUNG Zu Modellen für Spannungs-Dehnungsgesetze siehe prEN 1999-1-1:2021, Anhang F.

Tabelle 7.3 — Beschreibung der Berechnungskonzepte für Schalenträgerwerke

Membrantheorietische Berechnung (MTA)	Berechnung, die das Tragverhalten 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 mit der linear-elastischen Biegetheorie kleiner Verschiebungen für die perfekte Geometrie beschreibt
Linear elastische Verzweigungsberechnung (LBA)	Berechnung, die den linearen Verzweigungseigenwert mit der linear-elastischen Schalenbiegetheorie kleiner Verschiebungen für die perfekte Geometrie ermittelt. Es ist zu beachten, dass die Bezeichnung Eigenwert sich hier nicht auf Schwingungszustände bezieht.
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA)	Berechnung mit der auf die perfekte Geometrie angewendeten nichtlinearen Schalenbiegetheorie großer Verschiebungen und eines linear-elastischen Werkstoffgesetzes
Materiell nichtlineare Berechnung (MNA)	Berechnung ähnlich (LA), bei der jedoch das nichtlineare Werkstoffgesetz berücksichtigt wird. Bei Schweißkonstruktionen sollten die abweichenden Werkstoffeigenschaften in der Wärmeeinflusszone berücksichtigt werden.
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)	Berechnung mit der auf die perfekte Geometrie angewendeten nichtlinearen Schalenbiegetheorie großer Verschiebungen und eines nichtlinearen Werkstoffgesetzes. Bei Schweißkonstruktionen sollten die abweichenden Werkstoffeigenschaften in der Wärmeeinflusszone berücksichtigt werden.
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 diesem Document nicht erfasst. Sie ist jedoch hier aus Gründen einer vollständigen Darstellung aller Arten der Schalenberechnung aufgeführt.	

8 Grenzzustand der Tragfähigkeit

8.1 Beanspruchbarkeit des Querschnitts

8.1.1 Bemessungswerte der Spannungen

(1) Als Bemessungswert der Spannung $\sigma_{eq,Ed}$ sollte an jedem Punkt des Tragwerks die größte in der Tragwerksberechnung bestimmte Spannung angenommen werden.

(2) Wenn eine Berechnung nach der *Membrantheorie* (MTA) durchgeführt wird, darf das sich ergebende zweidimensionale Feld der Spannungsresultanten $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$, $n_{x\theta,Ed}$ durch den nach Gleichung (8.1) berechneten Bemessungswert der Vergleichsspannung $\sigma_{eq,Ed}$ dargestellt werden:

$$\sigma_{eq,Ed} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{x,Ed}^2 + n_{\theta,Ed}^2 - n_{x,Ed}n_{\theta,Ed} + 3n_{x\theta,Ed}^2} \quad (8.1)$$

(3) Wenn eine *linear elastische Analyse* (LA) oder eine *geometrisch nichtlineare elastische Analyse* (GNA) angewendet wird, darf das sich ergebende zweidimensionale Feld der Spannungen durch den Bemessungswert der von-Mises-Vergleichsspannung nach Gleichung (8.2) bis Gleichung (8.4) dargestellt werden:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed}\sigma_{\theta,Ed} + 3(\tau_{x\theta,Ed}^2 + \tau_{xn,Ed}^2 + \tau_{\theta n,Ed}^2)} \quad (8.2)$$

Dabei ist

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n_{x,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x,Ed}}{t^2/4} \right), \quad \sigma_{\theta,Ed} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n_{\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{t^2/4} \right), \quad (8.3)$$

$$\tau_{x\theta,Ed} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n_{x\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x\theta,Ed}}{t^2/4} \right), \quad \tau_{xn,Ed} = \frac{q_{xn,Ed}}{t}, \quad \tau_{\theta n,Ed} = \frac{q_{\theta n,Ed}}{t} \quad (8.4)$$

η ein Korrekturfaktor für das unelastische Verhalten des Werkstoffs, der sowohl von den Verfestigungs- als auch von den Zähigkeitseigenschaften der Legierung abhängig ist.

ANMERKUNG 1 Die vorstehend angegebenen Gleichungen liefern eine für Bemessungszwecke vereinfachte konservative Vergleichsspannung.

ANMERKUNG 2 Werte für η sind in prEN 1999-1-1:2021, Anhang K, als Funktion der Legierungsmerkmale (Verfestigung und Zähigkeit) angegeben.

(4) Für η sollten Werte angesetzt werden, die einem geometrischen Formbeiwert $\alpha_0 = 1,5$ entsprechen.

(5) 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.

8.1.2 Bemessungswerte für die Beanspruchbarkeit

(1) Der Bemessungswert der von-Mises-Grenz-Vergleichsspannung sollte nach Gleichung (8.5) und Gleichung (8.6) errechnet werden:

$$f_{eq,Rd} = \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \quad \text{außerhalb der WEZ} \quad (8.5)$$

$$f_{eq,Rd} = \min \left(\frac{\rho_{u,haz} f_u}{\gamma_{M2}}, \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \right) \quad \text{im Bereich der WEZ} \quad (8.6)$$

Dabei ist/sind

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

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

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

γ_{M1}, γ_{M2} die Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeit [siehe 4.1(3)];

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

8.1.3 Spannungsbegrenzung

(1) Für diesen Grenzzustand müssen die Bemessungsspannungen bei allen Nachweisen Gleichung (8.7) entsprechen:

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd} \quad (8.7)$$

8.1.4 Bemessung durch numerische Analyse

(1) Der Bemessungswert des plastischen Grenzwiderstandes sollte als Lastverhältnis R bezogen auf die Bemessungswerte der für den betrachteten Lastfall maßgebenden Einwirkungskombination ermittelt werden.

(2) Die Bemessungswerte der Einwirkungen sollten nach 7.3 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 f_o/γ_M sollte die Schale dem um das Lastverhältnis R stufenweise zunehmenden Bemessungswert der Kombination von Einwirkungen 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 Berechnung ermittelte Wert angenommen werden. Der Einfluss der Verfestigung darf unter der Voraussetzung einbezogen werden, dass ein entsprechender Grenzwert für die zulässige Werkstoffverformung berücksichtigt wird.

(5) Sofern bei einer *geometrisch und materiell nichtlinearen Analyse* (GMNA) einer Höchstlast ein abfallender Lastverformungspfad folgt, sollte der Höchstwert zur Bestimmung des Lastverhältnisses R_{GMNA} verwendet werden. Liefert eine GMNA-Analyse keine Höchstlast, sondern ein stetig ansteigendes Verhältnis Einwirkung/Verschiebung (mit oder ohne Verfestigung des Werkstoffs), sollte das Lastverhältnis R_{GMNA} nicht größer werden als der Wert, bei dem die größte plastische Dehnung im Tragwerk den in prEN 1999-1-1:2021, Abschnitt 5, angegebenen Verformungsgrenzwert der Legierung erreicht. Für Bemessungszwecke darf in Abhängigkeit von den Zähigkeitsmerkmalen der Legierung ein Wert für die Bruchdehnung von annähernd $5(f_o/E)$ oder $10(f_o/E)$ vorausgesetzt werden.

(6) Der bei der Berechnung ermittelte Endwert für R muss Gleichung (8.8) entsprechen:

$$R \geq 1,0 \quad (8.8)$$

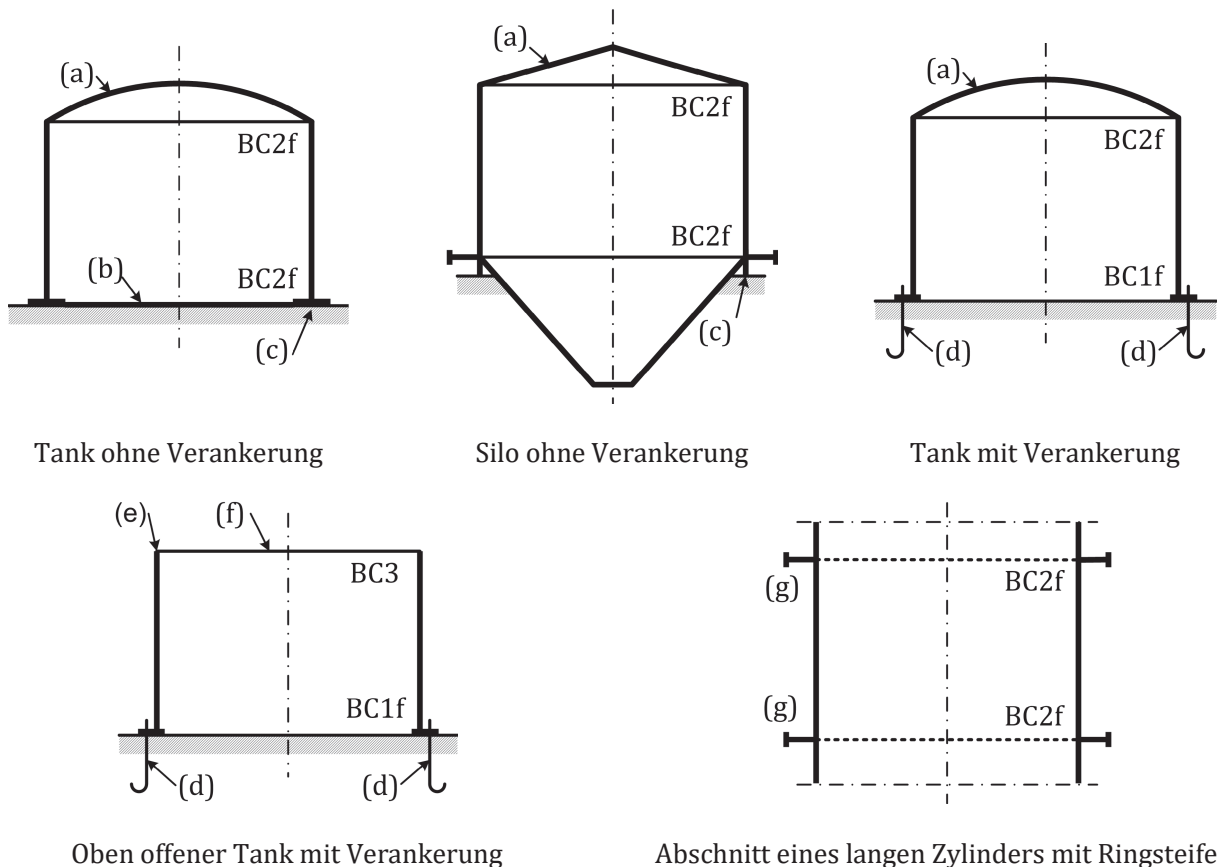
8.2 Beulwiderstand

8.2.1 Allgemeines

(1) Alle relevanten Einwirkungskombinationen, die in der Schalenwand Druck- oder Schub-Membranspannungen erzeugen, sollten berücksichtigt werden.

(2) Bei der Beulberechnung, sollte Druck als positiv für die Spannungen und Spannungsresultanten in Meridian- und Umfangsrichtung angesetzt werden.

(3) Besondere Aufmerksamkeit sollte den Randbedingungen gelten, die für die inkrementellen Verschiebungen beim Beulvorgang wirksam sind (im Gegensatz zu den Vorbeulverschiebungen). Beispiele für baupraktische Randbedingungen werden in Bild 8.1 angegeben.



Legende

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

Bild 8.1 — Schematische Beispiele von Randbedingungen für den durch Beulen bedingten Grenzzustand

8.2.2 Beulrelevante geometrische Toleranzen

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

ANMERKUNG 1 Die hier bestimmten Bemessungswerte für Beulspannungen schließen alle Imperfektionen ein, die zu geometrischen Toleranzen gehören, deren Einhaltung bei der Herstellung vorausgesetzt wird.

ANMERKUNG 2 Die in EN 1090-3 angegebenen geometrischen Toleranzen sind jene mit bekanntermaßen großem Einfluss auf die Sicherheit von Tragwerken.

(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 Klassifizierung bezieht sich nur auf die Tragsicherheit.

(3) Jeder Imperfektionstyp sollte gesondert nach den festgelegten Toleranzklassen klassifiziert werden; für die gesamte Bemessung sollte die niedrigste Klasse maßgebend sein.

(4) Die verschiedenen Toleranztypen dürfen unabhängig voneinander behandelt werden, und im Allgemeinen brauchen keine Interaktionen zwischen Ihnen berücksichtigt zu werden.

8.2.3 Schale unter Druck- und Schubbeanspruchung

8.2.3.1 Bemessungswerte der Spannungen

(1) Bei rein axialsymmetrischen Belastungs- und Auflagerbedingungen und in anderen einfachen Lastfällen darf allgemein die Membrantheorie angewendet werden. Die größten mit *linearer Analyse der Schale* (LA) ermittelten Bemessungswerte der Spannungen $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ und τ_{Ed} sollten als die maßgebenden Werte für die Druck- und Schub-Membranspannungen angenommen werden, sofern Anhang A keine spezifischen diesbezüglichen Festlegungen enthält.

ANMERKUNG In einigen Fällen (z. B. bei abgestuften Wänden, die mit Druck in Umfangsrichtung beaufschlagt werden, siehe A.4.3) sind die maßgebenden Werte der Membranspannungen fiktiv und größer als die tatsächlichen Höchstwerte.

(2) Für Basis-Lastfälle dürfen die Membranspannungen mit Hilfe der jeweils zutreffenden üblichen Formeln berechnet werden.

8.2.3.2 Beultragfähigkeit

(1) Die Bemessungswerte der Beultragfähigkeit sollten für unversteifte Schalen nach Gleichung (8.9) bis Gleichung (8.11) berechnet werden:

$$\sigma_{x,Rd} = \alpha_x \rho_{x,w} \chi_{x,perf} \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \quad (8.9)$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \alpha_{\theta} \rho_{\theta,w} \chi_{\theta,perf} \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \quad (8.10)$$

$$\tau_{Rd} = \alpha_{\tau} \rho_{\tau,w} \chi_{\tau,perf} \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (8.11)$$

und für versteifte und/oder profilierte Schalen nach Gleichung (8.11) sowie Gleichung (8.12) und Gleichung (8.13) berechnet werden:

$$n_{x,Rd} = \alpha_x \chi_{x,perf} \frac{n_{x,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (8.12)$$

$$p_{n,Rd} = \alpha_{\theta} \chi_{\theta,perf} \frac{p_{n,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (8.13)$$

Dabei ist

$n_{x,Rk}$ die axiale plastische Grenzlast der versteiften Schale;

$p_{n,Rk}$ der gleichmäßige Druck bei der plastischen Grenzlast der versteiften oder der torikonischen und der torisphärischen Schale;

α_i der Abminderungsfaktor für die Imperfektion nach Anhang A;

$\rho_{i,w}$ der Abminderungsfaktor für die Wärmeeinflusszonen nach 8.2.4.4. Für Schalen ohne Schweißnähte ist $\rho_{i,w} = 1$;

$\chi_{i,perf}$ der unter (2) angegebene Abminderungsfaktor für Beulen einer Schale ohne Imperfektionen;

γ_{M1} der Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit [siehe 4.1(3)];

ANMERKUNG 1 Gleichung (8.13) gilt auch für torikonische und torisphärische Schalen, siehe Anhang B.

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

ANMERKUNG 3 Für Wände mit Profilierung in Umfangsrichtung und Steifen in Meridianrichtung gilt A.7.6.2(3).

(2) Der Abminderungsfaktor für Beulen einer Schale ohne Imperfektionen sollte nach Gleichung (8.14) und Gleichung (8.15) angesetzt werden:

$$\chi_{i,perf} = \frac{1}{\varphi_i + \sqrt{\varphi_i^2 - \bar{\lambda}_i^2}} \text{ aber } \chi_{i,perf} \leq 1,00 \quad (8.14)$$

mit:

$$\varphi_i = 0,5 \left(1 + \mu_i (\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_{i,0}) + \bar{\lambda}_i^2 \right) \quad (8.15)$$

Dabei ist

μ_i ein Parameter, der von der Legierung und vom Belastungsfall abhängig ist nach Anhang A;

$\bar{\lambda}_{i,0}$ die auf die vollplastische Grenzlaster bezogene Schlankheit nach Anhang A;

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

(3) Die Schlankheitsparameter der Schale für unterschiedliche Spannungskomponenten in unverteiften Schalen sollten nach Gleichung (8.16) bis Gleichung (8.19) bestimmt werden:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_0}{\sigma_{x,cr}}} \quad (8.16)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{f_0}{\sigma_{\theta,cr}}} \quad (8.17)$$

$$\bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\frac{f_0}{\sqrt{3}\tau_{cr}}} \quad (8.18)$$

Die Schlankheitsparameter der Schale für versteifte und/oder profilierte Schalen sollten nach Gleichung (8.18) sowie Gleichung (8.19) und Gleichung (8.20) bestimmt werden:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{n_{x,Rk}}{n_{x,cr}}} \quad (8.19)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{p_{n,Rk}}{p_{n,cr}}} \quad (8.20)$$

Dabei sind

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

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

ANMERKUNG 1 Gleichung (8.19) und Gleichung (8.20) gelten auch für torikonische und torisphärische Schalen, siehe Anhang B.

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

8.2.3.3 Nachweis der Beulsicherheit

(1) Obwohl Beulen kein nur durch Spannungen ausgelöstes Versagensphänomen darstellt, darf der Nachweis der Beulsicherheit durch Begrenzung der Bemessungswerte der Membranspannungen oder Spannungsergebnisse geführt werden. Der Einfluss der Biegespannungen auf den Beulwiderstand darf unter der Voraussetzung vernachlässigt werden, dass diese Spannungen als Folge von geometrischen Verträglichkeitsbedingungen an Rändern entstehen. Biegespannungen aus lokalen Lasten oder aus Wärmegradienten sollten besonders beachtet werden.

(2) In Abhängigkeit von der jeweiligen Belastungs- und Spannungssituation sollten eine oder mehrere der Nachweise nach Gleichung (8.21) bis Gleichung (8.23) für die maßgebenden Werte der einzelnen Membranspannungskomponenten durchgeführt werden:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (8.21)$$

$$\sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} \quad (8.22)$$

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd} \quad (8.23)$$

(3) Falls in der betrachteten Bemessungssituation mehr als eine der drei für Beulen wesentlichen Membranspannungskomponenten vorhanden ist, sollte für den kombinierten Membranspannungszustand der Nachweis mit der Interaktion nach Gleichung (8.24) und den Gleichungen (8.25) durchgeführt werden:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right)^{k_\theta} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right) + \left(\frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}}\right)^{k_\tau} \leq 1,00 \quad (8.24)$$

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 sollten wie folgt ermittelt werden:

$$\begin{aligned}k_x &= 1 + \chi_x^2 \\k_\theta &= 1 + \chi_\theta^2 \\k_\tau &= 1,5 + 0,5\chi_\tau^2 \\k_i &= (\chi_x \chi_\theta)^2\end{aligned}\tag{8.25}$$

(4) Bei unversteiften Zylindern, die durch eine Kombination von axialem Druck, Druck in Umfangsrichtung und Schub beansprucht werden, sind die in A.3.6 angegebenen Gleichungen für die Interaktionsparameter anwendbar.

(5) Die vorstehend genannten Regeln können mitunter sehr vorsichtig 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 gilt für die Interaktion zwischen Spannungen die von-Mises-Interaktion der Vergleichsspannung oder die der in EN 1999-1-1 angegebenen alternativen Interaktionsgleichungen.

(6) Wenn $\sigma_{x,Ed}$ oder $\sigma_{\theta,Ed}$ eine Zugspannung ist, sollte ihr Wert in Gleichung (8.24) gleich null gesetzt werden.

ANMERKUNG Für axial gedrückte Zylinder unter Innendruck (wodurch in Umfangsrichtung eine Zugspannung entsteht) gelten die in Anhang A angegebenen besonderen Festlegungen. Der für $\sigma_{x,Rd}$ ermittelte Wert berücksichtigt sowohl die aussteifende Wirkung des Innendruckes auf die elastische Beullast als auch den Schwächungseinfluss des elastisch-plastischen Elefantenfuß-Phänomens (siehe A.3.5.2). Der Beulwiderstand wird exakt angegeben, wenn die Zugspannung $\sigma_{\theta,Ed}$ in Gleichung (8.24) gleich null gesetzt wird.

(7) Die Orte und Werte für alle in Gleichung (8.24) kombiniert anzuwendenden beulrelevanten Membranspannungen sind in Anhang A angegeben.

8.2.4 Einfluss des Schweißens

8.2.4.1 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 kaltverfestigten oder aushärtbaren Legierungen sollte die in der Nähe von Schweißnähten, d. h. in der Wärmeeinflusszone (WEZ), auftretende Verringerung der Festigkeitswerte berücksichtigt werden. Ausnahmen von dieser Regel sind 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 Wenn auch diese Verringerung im Wesentlichen die 0,2 %-Dehngrenze und die Zugfestigkeit des Werkstoffs betrifft, können die Einflüsse auf druckbeanspruchte Teile von beulgefährdeten Schalenkonstruktionen, in Abhängigkeit von der geometrischen Schlankheit und den Eigenschaften der Legierung, signifikant sein.

(4) Schweißnähte in druckbeanspruchten, großen, unversteiften Teilen sollten möglichst vermieden werden.

ANMERKUNG 1 Der Einfluss der durch Schweißen bedingten Festigkeitsminderung ist für Beulen im plastischen Bereich bedeutsamer. Auch örtliche Schweißnähte in beulgefährdeten Bereichen können wegen der WEZ den Beulwiderstand merklich verringern.

ANMERKUNG 2 Mitunter können die Einflüsse der Festigkeitsminderung in der WEZ durch Warmauslagern nach dem Schweißen gemildert werden, siehe EN 1999-1-1.

(5) Zu Zwecken der Bemessung darf eine Schweißung als linearer Streifen auf der Schalenfläche angesehen werden, deren beeinflusster Bereich unmittelbar beiderseits der Schweißnaht liegt. Außerhalb dieses

Bereichs werden rasch wieder die vollständigen Werte des ungeschweißten Werkstoffes erreicht. Entlang dieser Linien können beim Beulen vorzeitig Fließlinien auftreten.

(6) Der Einfluss der schweißbedingten Festigkeitsminderung auf den Beulwiderstand der Schale sollte für alle Schweißnähte, die direkt oder indirekt einer Druckspannung ausgesetzt sind, entsprechend den Regeln nach 8.2.4.2 überprüft werden.

8.2.4.2 Grad der Festigkeitsminderung

(1) Der Grad der schweißbedingten Festigkeitsminderung sollte durch die Abminderungsfaktoren $\rho_{o,haz}$ und $\rho_{u,haz}$ ausgedrückt werden, die aus den Quotienten des charakteristischen Wertes der 0,2 %-Dehngrenze $f_{o,haz}$ (Zugfestigkeit $f_{u,haz}$) in der Wärmeeinflusszone sowie des charakteristischen Wertes von f_o (f_u) im Grundwerkstoff nach Gleichung (8.26):

$$\rho_{o,haz} = f_{o,haz}/f_o \text{ und } \rho_{u,haz} = f_{u,haz}/f_u \quad (8.26)$$

bestimmt werden.

(2) Die charakteristischen Werte der Festigkeiten $f_{o,haz}$ und $f_{u,haz}$ sowie die Werte für $\rho_{o,haz}$ und $\rho_{u,haz}$ sind in prEN 1999-1-1:2021, Tabelle 5.2a, für Aluminiumknetlegierungen in Form von Blechen, Bändern und Platten und in Tabelle 5.2b für Strangpressteile angegeben.

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

8.2.4.3 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 beulgefährdeten Schalenblechen mit einer Breite b_{haz} in jede Richtung, ausgehend von der Schweißnaht, verläuft, an ebenen Stumpfnähten rechtwinklig zur Mittellinie oder an Kehlnähten rechtwinklig zur Schnittlinie der geschweißten Oberflächen (siehe Bild 8.2).

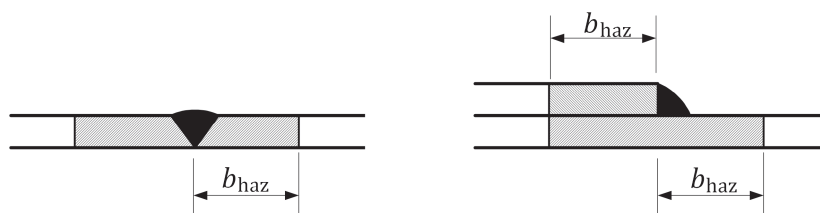


Bild 8.2 — Ausdehnung der Wärmeeinflusszonen (WEZ) im Schalenblech

8.2.4.4 Beulwiderstand unverteilter geschweißter Schalen

(1) Der Beulwiderstand unverteilter geschweißter Schalen sollte in allen Fällen bewertet werden, in denen in rechtwinklig zur Oberfläche nicht gestützten geschweißten Tafeln der Schale Druckspannungsrésultanten auftreten.

(2) Der Nachweis des Schweißeinflusses auf das Beulen darf entfallen, wenn alle Schweißnähte in den Schalen in allen Bemessungssituationen für das Tragwerk parallel zu den Druckspannungsrésultanten verlaufen, vorausgesetzt, der durch die WEZ bedingte Abminderungsfaktor $\rho_{o,haz}$ ist nicht kleiner als 0,60.

(3) Der Einfluss des Schweißens auf den Beulwiderstand darf durch eine *geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Imperfektionen* (GMNIA) unter Berücksichtigung der tatsächlichen Eigenschaften sowohl des Grundwerkstoffes als auch der Wärmeeinflusszonen (WEZ) bewertet werden.

(4) Wenn keine exakte GMNIA-Analyse durchgeführt werden kann, ist eine Bewertung des Beulwiderstandes 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 Druckkräfte entstehen, sondern auch durch Außendruck, Schub und örtliche Lasten. Unabhängig von der Last sind bei Schweißnähten, die rechtwinklig zu den Druckspannungsergebnissen verlaufen, Abminderungsfaktoren $\chi_{w,i}$ anzuwenden, da diese zu einer örtlichen plastischen Verformung führen können.

ANMERKUNG 2 Der Index „i“ in Absatz (4) und Absatz (5) steht für „x“, „θ“ oder „t“ in Abhängigkeit davon, ob die Abminderungsfaktoren χ und ρ für axialen Druck, Druck in Umfangsrichtung oder Schub gelten.

(5) Der Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Festigkeitsminderung in der WEZ von Schalenkonstruktionen wird nach Gleichung (8.27) und Gleichung (8.28) bestimmt:

$$\rho_{i,w} = \omega_0 + (1 - \omega_0) \frac{\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_{i,0}}{\bar{\lambda}_{i,w} - \bar{\lambda}_{i,0}} \text{ aber } \rho_{i,w} \leq 1 \text{ und } \rho_{i,w} \geq \omega_0 \quad (8.27)$$

Dabei ist

$$\omega_0 = \frac{\rho_{u,haz} f_u / \gamma_{M2}}{f_o / \gamma_{M1}} \text{ aber } \omega_0 \leq 1 \quad (8.28)$$

$\rho_{u,haz}$ und $\rho_{o,haz}$ die durch die Wärmeeinflusszone bedingten Abminderungsfaktoren, die prEN 1999-1-1:2021, Tabelle 5.2a oder Tabelle 5.2b zu entnehmen sind;

$\bar{\lambda}_{i,0}$ die bezogene Schlankheit für die vollplastische Grenzlast für die zu betrachtende Bemessungssituation nach Anhang A;

$\bar{\lambda}_{i,w}$ der Grenzwert für die bezogene Schlankheit, bei dessen Überschreitung der Einfluss der Schweißnaht auf das Beulen verschwindet und der wie folgt 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 8.3;

$\bar{\lambda}_{i,w,0}$ die absolute Obergrenze der Schlankheit für den Einfluss der Schweißnaht in Abhängigkeit von Lastfall, Werkstoff und Toleranzklasse der Schale, die in Tabelle 8.5 angegeben wird.

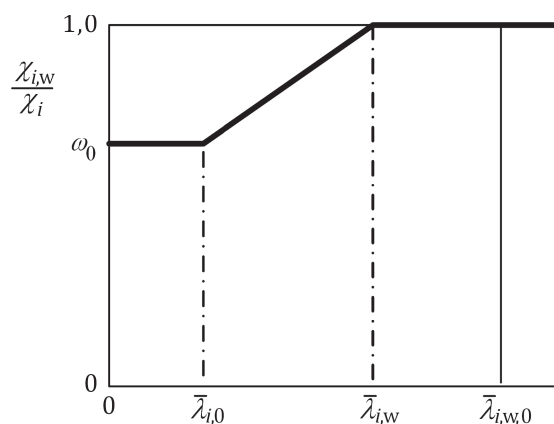


Bild 8.3 — Festlegung des durch die WEZ bedingten Abminderungsfaktors $\rho_{i,w}$

Tabelle 8.5 — Werte für $\bar{\lambda}_{i,w,0}$ für die in Anhang A berücksichtigten wesentlichen Lastfälle

Toleranzklasse	Axiale Druckbeanspruchung $\bar{\lambda}_{x,w,0}$		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	—	—	—	—

8.2.4.5 Beulwiderstand versteifter geschweißter Schalen

(1) Der Einfluss des Schweißens auf versteifte geschweißte Schalen braucht beim Beulsicherheitsnachweis nicht berücksichtigt werden, wenn die Steifen die seitliche Verformung der verschweißten Tafeln ausreichend verhindern. Ist das nicht der Fall, so gelten die Bestimmungen nach 8.2.4.4.

8.2.5 Bemessung durch numerische Berechnung

(1) Die in 7.5 und 8.1.4 für die *geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Imperfektionen* (GMNIA) angegebenen Verfahren dürfen angewendet werden. Die GMNIA-Berechnung darf, als Alternative zum Verfahren nach 8.2.3, durchgeführt werden, indem die Höchstwerte der in 8.2.2 angegebenen Toleranzen als anfängliche geometrische Imperfektionen angenommen werden.

(2) Für geschweißte Konstruktionen sollte der Werkstoff in der Wärmeeinflusszone abgebildet werden, siehe 8.2.4.2, 8.2.4.3 und 8.2.4.4.

9 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

9.1 Allgemeines

(1) Die in EN 1999-1-1 für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit angegebenen Regeln gelten auch für Schalenkonstruktionen.

9.2 Durchbiegungen

(1) Durchbiegungen dürfen unter der Annahme elastischen Verhaltens errechnet werden.

(2) Die Grenzen für Durchbiegungen sollten unter Bezug auf EN 1990 für jedes Projekt festgelegt und mit dem Bauherren vereinbart werden.

Anhang A (normativ)

Formeln für den Beulsicherheitsnachweis von Schalenkonstruktionen

A.1 Anwendung dieses Anhangs

(1) Dieser normative Anhang enthält zusätzliche Bestimmungen in Ergänzung zu 7.2, 8.2.3.1, 8.2.3.2, 8.2.3.3 und 8.2.4.4 zu den Gleichungen für Beuluntersuchungen in Schalenkonstruktionen.

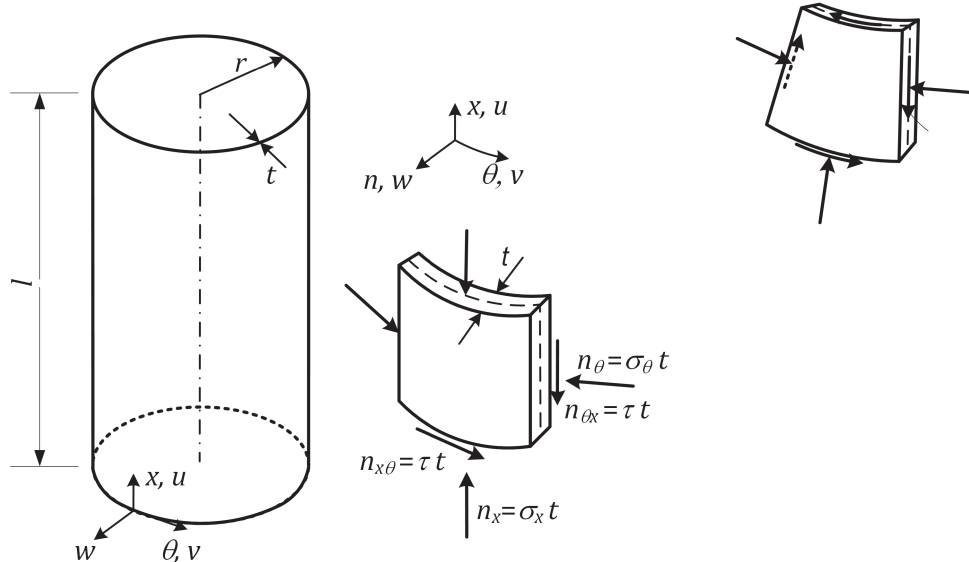
A.2 Anwendungs- und Gültigkeitsbereich

(1) Dieser normative Anhang enthält Formeln für Beulsicherheitsnachweise von Schalenkonstruktionen. Er behandelt unversteifte Zylinderschalen mit konstanter Wanddicke, unversteifte Zylinderschalen mit abgestufter Wanddicke, unversteifte Zylinderschalen mit Überlappstößen, unversteifte Kegelschalen, versteifte Zylinderschalen mit konstanter Wanddicke sowie unversteifte Kugelschalen unter gleichmäßigem Druck in Umfangsrichtung.

A.3 Unversteifte zylindrische Schalen mit konstanter Wanddicke

A.3.1 Bezeichnungen und Randbedingungen

(1) Allgemeine Größen (Bild A.1)



Legende

- l Länge des Zylinders zwischen den Rändern
- r Radius der Mittelfläche des Zylinders
- t Dicke der Schale

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

(2) Die Randbedingungen werden in 7.2 und 8.2.1 festgelegt.

A.3.2 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung)

A.3.2.1 Allgemeines

(1) Die Überprüfung der Zylinder auf Beulen unter Axialdruck darf entfallen, wenn sie Gleichung (A.1) entsprechen:

$$\frac{r}{t} \leq 0,03 \frac{E}{f_o} \quad (\text{A.1})$$

A.3.2.2 Kritische Beulspannungen in Meridianrichtung

(1) Gleichung (A.2) bis Gleichung (A.5) können nur für Schalen mit den Randbedingungen BC 1 oder BC 2 an beiden Rändern angewendet werden.

(2) Die Länge des Schalenabschnitts sollte durch den dimensionslosen Parameter ω nach Gleichung (A.2) erfasst werden:

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

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

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

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

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

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

Fall	Zylinderrand	Randbedingung	C_{xb}
1	Rand 1 Rand 2	BC 1 BC 1	6
2	Rand 1 Rand 2	BC 1 BC 2	3
3	Rand 1 Rand 2	BC 2 BC 2	1
ANMERKUNG BC 1 schließt sowohl BC1f als auch BC1r ein.			

(4) Für die in Tabelle A.1 definierten langen Zylinder, welche die zusätzlichen Bedingungen nach Gleichung (A.4) und Gleichung (A.5) erfüllen:

$$r/t \leq 150, \omega t/r \leq 6 \text{ und } 500 \leq E/f_0 \leq 1\,000 \quad (\text{A.4})$$

darf der Faktor C_{xb} auch nach folgender Gleichung ermittelt werden:

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

Dabei ist

- $C_{x,N}$ der Parameter für einen langen Zylinder unter axialem Druck nach Tabelle A.1;
- $\sigma_{x,Ed}$ der Bemessungswert der Spannung in Meridianrichtung ($\sigma_{x,Ed} = \sigma_{x,N,Ed} + \sigma_{x,M,Ed}$);
- $\sigma_{x,N,Ed}$ die Spannungskomponente aus dem axialen Druck (über den Umfang konstant);
- $\sigma_{x,M,Ed}$ die Spannungskomponente aus der Biegung des Kreisrohres (Spitzenwert des über den Umfang veränderlichen Spannungsanteils).

A.3.2.3 Beulparameter für die Meridianrichtung

(1) Der Imperfektionsfaktor für die Meridianrichtung sollte nach Gleichung (A.6) errechnet werden:

$$\alpha_x = \frac{1}{1 + 0,6 \left(\frac{1}{Q^{0,7}} \sqrt{\frac{r}{t}} \right)^{1,6}} \text{ aber } \alpha_x \leq 1,00 \quad (\text{A.6})$$

Dabei ist

- $\bar{\lambda}_{x,0}$ der Schlankheitsparameter für die vollplastische Grenzlast 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 7.1 definierten Randbedingungen ab.

(3) Der Legierungsfaktor und der Schlankheitsparameter für die vollplastische Grenzlast in Meridianrichtung nach 8.2.3.2 sollten nach der in EN 1999-1-1 definierten Beulklasse des Werkstoffs aus Tabelle A.4 entnommen werden.

Tabelle A.3 — Toleranzparameter Q für Gleichung (A.6)

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	0,6	0,3
B	0,65	0,35
C	0,7	0,4

(4) Für lange Zylinder, die den Sonderbedingungen von A.3.2.2(4) entsprechen, darf der Schlankheitsparameter für die vollplastische Grenzlast in Meridianrichtung nach Gleichung (A.7) errechnet werden:

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

Dabei sollte $\bar{\lambda}_{x,0}$ aus Tabelle A.4 entnommen werden, während $\sigma_{x,Ed}$ und $\sigma_{x,M,Ed}$ nach A.3.2.2(4) verwendet werden.

A.3.3 Druck in Umfangsrichtung (Ringspannung)

A.3.3.1 Allgemeines

(1) Die Überprüfung der Zylinder auf Beulen infolge Druck in Umfangsrichtung darf entfallen, wenn sie Gleichung (A.8) entsprechen:

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

A.3.3.2 Kritische Beulspannungen in Umfangsrichtung

(1) Die folgenden Formeln dürfen auf Schalen mit beliebiger Randbedingung angewendet werden.

(2) Die Länge des Schalenabschnitts sollte durch den dimensionslosen Parameter ω nach Gleichung (A.9) erfasst werden:

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

(3) Die kritische Beulspannung in Umfangsrichtung sollte unter Anwendung der Werte für C_0 aus Tabelle A.5 für Zylinder mit mittlerer Länge und aus Tabelle A.6 für kurze Zylinder nach Gleichung (A.10) errechnet werden:

$$\sigma_{\theta,cr} = 0,92 E C_0 t / \omega r \quad (A.10)$$

Tabelle A.5 — Außendruck-Beulfaktor C_θ in Gleichung (A.10) für Zylinder mit mittlerer Länge
($20 < \omega/C_\theta < 1,63r/t$)

Fall	Zylinderrand	Randbedingung	Faktor C_θ
1	Rand 1 Rand 2	BC 1 BC 1	1,5
2	Rand 1 Rand 2	BC 1 BC 2	1,25
3	Rand 1 Rand 2	BC 2 BC 2	1,0
4	Rand 1 Rand 2	BC 1 BC 3	0,6
5	Rand 1 Rand 2	BC 2 BC 3	0
6	Rand 1 Rand 2	BC 3 BC 3	0
ANMERKUNG BC 1 schließt sowohl BC1f als auch BC1r ein.			

Tabelle A.6 — Außendruck-Beulfaktor C_θ in Gleichung (A.10) für kurze Zylinder ($\omega/C_\theta \leq 20$)

Fall	Zylinderrand	Randbedingung	Faktor C_θ
1	Rand 1 Rand 2	BC 1 BC 1	$C_\theta = 1,5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3}$
2	Rand 1 Rand 2	BC 1 BC 2	$C_\theta = 1,25 + \frac{8}{\omega^2} - \frac{4}{\omega^3}$
3	Rand 1 Rand 2	BC 2 BC 2	$C_\theta = 1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}}$
4	Rand 1 Rand 2	BC 1 BC 3	$C_\theta = 0,6 + \frac{1}{\omega^2} - \frac{0,3}{\omega^3}$
ANMERKUNG BC 1 schließt sowohl BC1f als auch BC1r ein.			

(4) Für lange Zylinder ($\omega/C_\theta \geq 1,63r/t$) sollte die Beulspannung in Umfangsrichtung nach Gleichung (A.11) errechnet werden:

$$\sigma_{\theta,cr} = 0,56Et^2/r^2 \quad (A.11)$$

A.3.3.3 Beulparameter für die Umfangsrichtung

(1) Der Imperfektionsfaktor für die Umfangsrichtung sollte nach Gleichung (A.12) errechnet werden:

$$\alpha_{\theta} = \alpha_{\theta, \text{ref}} + (1 - \alpha_{\theta, \text{ref}}) e^{-0,003(r/t)^{1,5} \cdot L/r} \text{ aber } \alpha_{\theta} \leq 1,00 \quad (\text{A.12})$$

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

Tabelle A.7 — Faktor $\alpha_{\theta, \text{ref}}$ in Gleichung (A.12) in Abhängigkeit von der Toleranzklasse

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

(3) Der Legierungsfaktor und der Schlankheitsparameter nach 8.2.3.2 für die vollplastische Grenzlaster für die Umfangsrichtung 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	0,4	0,3
B	0,45	0,35
C	0,5	0,4

(4) Der ungleichmäßig verteilte Druck q_{eq} (siehe Bild A.2) infolge der Windlast auf die Zylinder darf für den Beulsicherheitsnachweis für die Schale durch den äquivalenten konstanten Außendruck nach Gleichung (A.13) 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 Gleichung (A.14) errechnet werden:

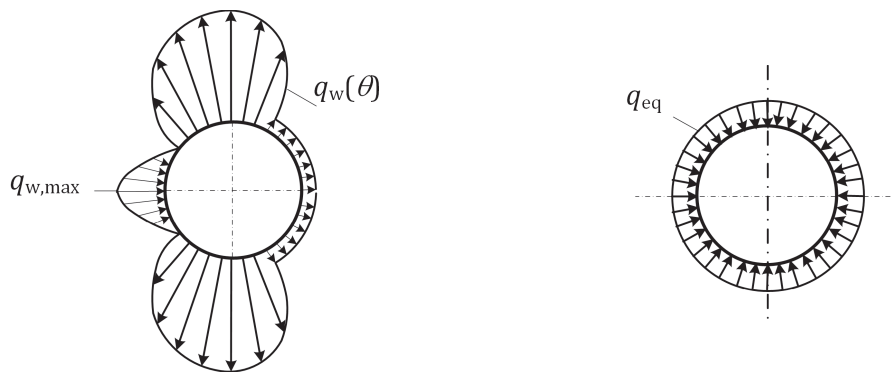
$$k_w = 0,46 \left(1 + 0,1 \sqrt{\frac{C_{\theta} r}{\omega t}} \right) \quad (\text{A.14})$$

mit einem Wert für k_w im Bereich $0,65 \leq k_w \leq 1,0$ und C_{θ} nach Tabelle A.5 entsprechend den Randbedingungen.

(5) Der in 8.2.3.3 einzusetzende Bemessungswert für die Umfangsspannung wird nach Gleichung (A.15) errechnet:

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

Dabei ist q_s der durch Belüftung, inneres Teilvakuum oder andere Phänomene verursachte innere Sog.



a) Winddruckverteilung am Umfang
der Schale

b) Äquivalente rotationssymmetrische
Druckverteilung

Bild A.2 — Ersatz der typischen Winddruckverteilung

A.3.4 Schub

A.3.4.1 Allgemeines

(1) Die Überprüfung der Zylinder auf Beulen durch Schub darf entfallen, wenn sie Gleichung (A.16) entsprechen:

$$\frac{r}{t} \leq 0,16 \left(\frac{E}{f_0} \right)^{0,67} \quad (\text{A.16})$$

A.3.4.2 Kritische Schubbeulspannungen

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

(2) Die Länge des Schalenabschnitts sollte durch den dimensionslosen Parameter ω nach Gleichung (A.17) erfasst werden:

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

(3) Die kritische Schubbeulspannung sollte unter Anwendung der Werte für C_τ nach Tabelle A.9 nach Gleichung (A.18) errechnet werden:

$$\tau_{cr} = 0,75 E C_\tau \sqrt{\frac{1}{\omega} \frac{t}{r}} \quad (\text{A.18})$$

Tabelle A.9 — Faktor C_τ in Gleichung (A.18) für die kritische Schubbeulspannung

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

A.3.4.3 Schub-Beulparameter

(1) Der Imperfektionsfaktor für Schub sollte nach Gleichung (A.19) errechnet werden:

$$\alpha_\tau = \alpha_{\tau,\text{ref}} + (1 - \alpha_{\tau,\text{ref}})e^{-0,002r/t} \text{ aber } \alpha_\tau \leq 1,00 \quad (\text{A.19})$$

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

Tabelle A.10 — Faktor $\alpha_{\tau,\text{ref}}$ in Gleichung (A.19) in Abhängigkeit von der Toleranzklasse

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

(3) Der Legierungsfaktor und der Schlankheitsparameter für die vollplastische Schubgrenzlast nach 8.2.3.2 sollten entsprechend der in EN 1999-1-1 festgelegten Beulklasse des Werkstoffs aus Tabelle A.11 entnommen werden.

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

Beulklasse des Werkstoffs	$\bar{\lambda}_{\tau,0}$	μ_τ
A	0,5	0,4
B	0,55	0,35
C	0,6	0,3

A.3.5 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung) mit gleichzeitig wirkendem Innendruck

A.3.5.1 Kritische Meridianbeulspannung bei gleichzeitig wirkendem Innendruck

(1) Es kann davon ausgegangen werden, dass die kritische Beulspannung in Meridianrichtung $\sigma_{x,cr}$ durch das Vorhandensein von Innendruck nicht beeinflusst wird; sie kann nach A.3.2.2 bestimmt werden.

A.3.5.2 Beulparameter für Druck in Meridianrichtung und Innendruck

(1) Der Nachweis für den Beulwiderstand in Meridianrichtung bei gleichzeitig wirkendem Innendruck sollte analog zu dem Beulwiderstand in Meridianrichtung ohne Innendruck nach 8.2.3.3 und A.3.2.3 durchgeführt werden. Der Imperfektionsfaktor α_x ohne Innendruck darf jedoch durch den elastischen Imperfektionsfaktor $\alpha_{x,p}$ unter Innendruck nach Gleichung (A.20) bis Gleichung (A.23) ersetzt werden:

$$\alpha_{x,p} = \left(1 - \left(\frac{\sigma_{eq} \gamma_{M1}}{f_0} \right)^{n_p} \right) \alpha_{x,pe} \quad (A.20)$$

Dabei ist

$$\alpha_{x,pe} = \left(\alpha_x + (1 - \alpha_x) \frac{\bar{p}}{\bar{p} + 0,3/\sqrt{\alpha_x}} \right) \quad (A.21)$$

$$\bar{p} = \frac{p r}{t \sigma_{x,cr}} \quad (A.22)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x \sigma_\theta} \quad (A.23)$$

p der kleinste Wert für den Innendruck an dem zu bewertenden Punkt, der garantiert gleichzeitig mit dem Druck in Meridianrichtung auftritt;

α_x der Imperfektionsfaktor in Meridianrichtung ohne Innendruck nach A.3.2.3;

$\sigma_{x,cr}$ die kritische elastische Beulspannung in Meridianrichtung nach A.3.2.2(3);

n_p der Ramberg-Osgood-Exponent nach prEN 1999-1-1:2021, Tabelle 5.2a oder Tabelle 5.2b.

(2) Der Faktor $\alpha_{x,pe}$ sollte in langen Zylindern nach A.3.2.2(3), Tabelle A.1, gleich 1,0 gesetzt werden. Zudem sollte $\alpha_{x,pe}$ gleich 1,0 gesetzt werden, sofern der Zylinder nicht

- eine mittlere Länge nach A.3.2.2(3), Tabelle A.1, aufweist und
- nach A.3.2.2(3), Tabelle A.1, kurz ist und $C_x = 1$ in A.3.2.2(3) eingeführt wurde.

A.3.6 Kombinationen von Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialdruck), Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung (Ringspannung) und Schubbeanspruchung

(1) Die in 8.2.3.3(3) anzuwendenden Beul-Interaktionsparameter dürfen nach Gleichung (A.24) und Gleichung (A.25) errechnet werden:

$$\begin{aligned}k_x &= 1,25 + 0,75\chi_x \\k_\theta &= 1,25 + 0,75\chi_\theta \\k_\tau &= 1,75 + 0,25\chi_\tau\end{aligned}\tag{A.24}$$

$$k_i = (\chi_x \chi_\theta)^2\tag{A.25}$$

Dabei sind χ_x , χ_θ und χ_τ die in 8.2.3.2 festgelegten Beul-Abminderungsfaktoren unter Anwendung der in A.3.2 bis A.3.4 angegebenen Beulparameter.

(2) Es sollte davon ausgegangen werden, dass die drei Membranspannungskomponenten an jedem Punkt der Schale, mit Ausnahme der an die Ränder angrenzenden, miteinander interagieren. Für alle Punkte innerhalb einer Randzone, die von beiden Rändern des Zylinderabschnitts jeweils über die der Länge l_s an beiden Enden des Zylinderabschnitts reicht, darf der Nachweis für eine Beul-Interaktion entfallen. Der Wert für l_s ist der kleinere der Werte, die nach Gleichung (A.26) bestimmt werden:

$$l_s = 0,1l \text{ und } l_s = 0,16r\sqrt{r/t}\tag{A.26}$$

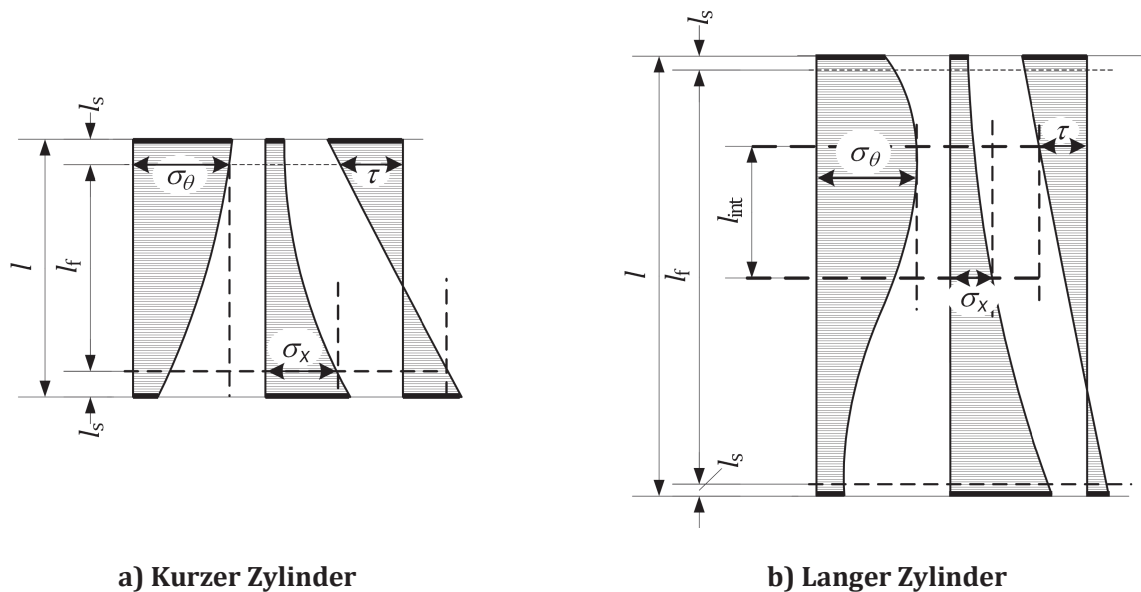
(3) Wenn der größte Wert einer der für Beulen relevanten Membranspannungen an den Enden einer Zylinderschale in einer der beiden Randzonen mit der Länge l_s auftritt, dürfen in den Beulinteraktionsnachweis nach 8.2.3.3(3) die größten Werte der für Beulen relevanten Membranspannungen eingeführt werden, die innerhalb der freien Länge l_f außerhalb der Randzonen [siehe Bild A.3a)] auftreten, wobei l_f durch Gleichung (A.27) gegeben ist:

$$l_f = l - 2l_s\tag{A.27}$$

(4) Für lange Zylinder nach A.3.2.2(3), Tabelle A.1, dürfen die interaktionsrelevanten Spannungsgruppen auf jeden Abschnitt der Länge l_{int} begrenzt werden, der innerhalb der für den Interaktionsnachweis verbleibenden freien Länge l_f liegt [siehe Bild A.3b)], wobei l_{int} durch Gleichung (A.28) gegeben ist:

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

(5) Falls in (3) oder (4) keine spezifischen Festlegungen zur Bestimmung der relativen Lage oder zur Auswahl von interaktions-relevanten Gruppen von Membranspannungskomponenten getroffen werden, dürfen die Maximalwerte der einzelnen Membranspannungen unabhängig von der Stelle ihres Auftretens in der Schale konservativ in Gleichung (8.24) eingesetzt werden.



a) Kurzer Zylinder

b) Langer Zylinder

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

A.4 Unversteifte Zylinderschalen mit abgestufter Wanddicke

A.4.1 Allgemeines

A.4.1.1 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 Index zur Bezeichnung der einzelnen Zylinderabschnitte mit konstanter Wanddicke (für $j = 1$ bis n);
- t_j konstante Wanddicke des Zylinderschusses j ;
- l_j Länge des Zylinderschusses j .

(2) Die folgenden Gleichungen können nur für Schalen mit den Randbedingungen BC 1 und BC 2 an beiden Rändern (siehe 7.2) angewendet werden, wobei zwischen beiden Randbedingungen nicht unterschieden wird.

A.4.1.2 Geometrie und planmäßiger Versatz

(1) Unter der Voraussetzung, dass die Wanddicke des Zylinders schussweise einsinnig vom oberen Rand bis zum Boden zunimmt [siehe Bild A.4(I)], dürfen die in diesem Abschnitt angegebenen Verfahren angewendet werden. Alternativ darf die *linear elastische Verzweigungsanalyse* (LBA) zur Berechnung der kritischen Beulspannung in Umfangsrichtung $\sigma_{\theta,cr,eff}$ in A.4.3.1(7) angewendet werden.