

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)

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

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

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

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).

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.

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 Lieferbedingungen*⁵⁾

— EN 1090-3, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 3: Technische Regeln für die Ausführung von Aluminiumtragwerken*⁵⁾

(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.

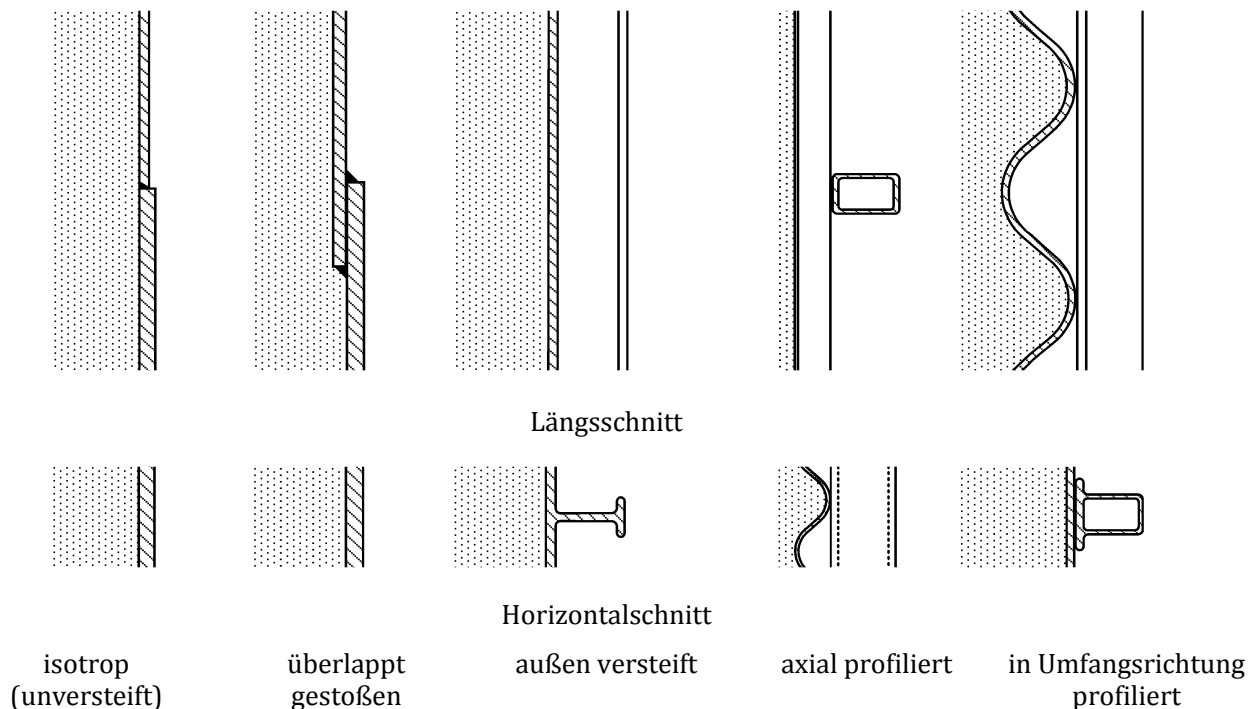


Bild 1.1 — Darstellung der Formen zylindrischer Schalen

(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 Schallengeometrie und konstanter Wanddicke in Form eines Zylinders, Kegelstumpfes, Teils einer Kugel, Bodenrandblechs oder in einer anderen Form

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 Umfanges 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 Umfangslinie 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 Grenzlasterlast, 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

σ_{11} maßgebender Wert σ_{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) Membranspannungsresultanten (siehe Bild 1.3a):

n_x	Membranspannungsresultante in Meridianrichtung;
n_θ	Membranspannungsresultante in Umfangsrichtung;

$n_{x\theta}$ 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;

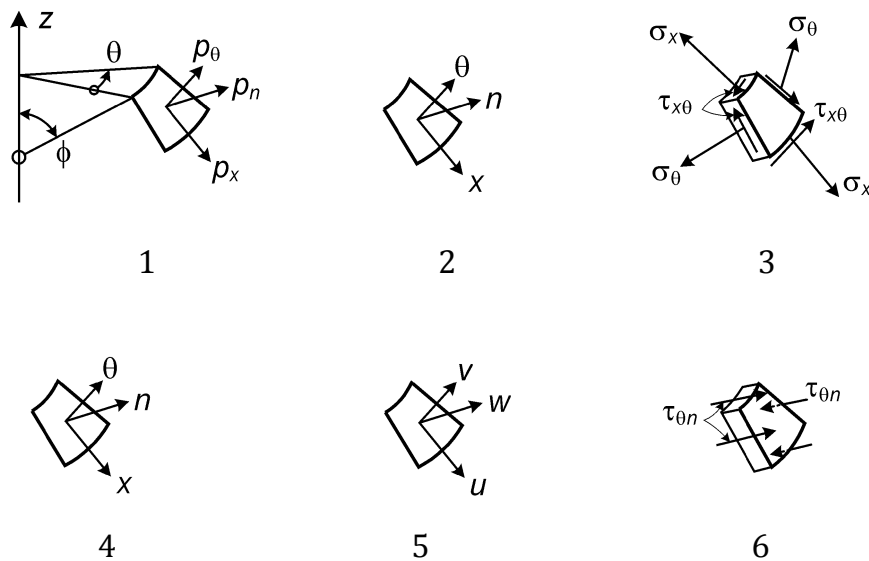
t Wanddicke der Schale;

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;

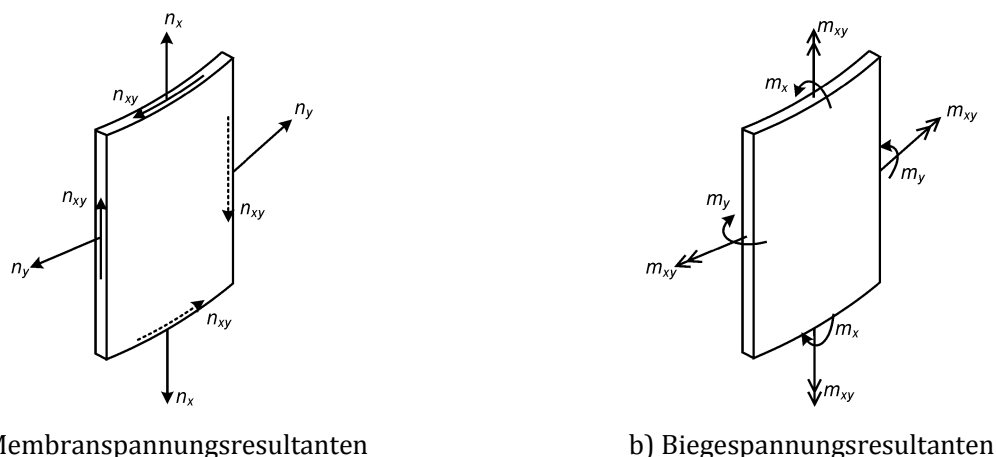
β halber Kegelspitzenwinkel;



Legende

- 1 Oberflächendrücke
- 2 Koordinaten
- 3 Membranspannungen
- 4 Richtungen:
 θ in Umfangsrichtung
 n rechtwinklig
 x in Meridianrichtung
- 5 Verschiebungen
- 6 $\overline{A_{11}}$ Querschubspannungen $\overline{A_{11}}$

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;

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;

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

Δ Bereich der Parameter bei Einbeziehung alternierender oder zyklischer Einwirkungen;

(13) Bemessungswerte für Spannungen und Spannungsergebnisse:

$\sigma_{x,Ed}$ 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 Membranspannungsergebnisse 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 Membranschubspannungsergebnisse;

(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:

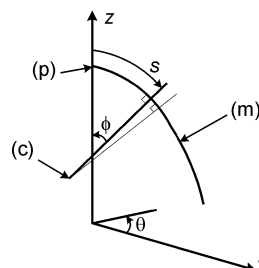
- nach außen gerichtet positiv;
- Innendruck positiv;
- Verschiebung nach außen positiv;
- Zugspannungen positiv;
- Schubspannungen wie in Bild 1.2 dargestellt.

(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 Schalentragsystem 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

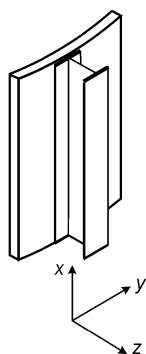
(2) Die Vereinbarung für Tragwerksteile, die mit der Tankwand verbunden sind (siehe Bild 1.5), ist für solche in Meridianrichtung und solche in Umfangsrichtung unterschiedlich.

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

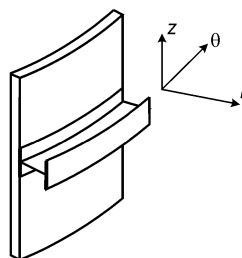
Meridiankoordinate für Zylinder, Auslaufkegel und Dachanschluss	x
Starke Biegeachse (parallel zu den Flanschen: Achse für Biegung in Meridianrichtung)	y
Schwache Biegeachse (rechtwinklig zu den Flanschen)	z

(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_{M1} 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 1999-1-4.

(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.

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 Schalenmitte an Blechstößen, rechtwinklig zur schale betrachtet);
- örtliche Vorbeulen (örtliche Abweichungen von der Schalenmitte rechtwinklig zu ihr). $\langle A_{11} \rangle$

ANMERKUNG EN 1090-3 enthält Anforderungen an geometrische Toleranzen für Schalentragswerke $\boxed{A_{11}}$ *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 Stützkkräfte 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.

- (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) $\boxed{A_{11}}$ 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. $\boxed{A_{11}}$

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	Eingepannt	Unverschieb- lich	Unverschieb- lich	Eingepannt	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_\phi = 0$
BC1f		Unverschieb- lich	Unverschieb- lich	Frei	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_\phi \neq 0$
BC2r		Unverschieb- lich	Frei	Eingepannt	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi = 0$
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.