

DIN EN 1993-1-6



ICS 91.010.30; 91.080.13

EntwurfEinsprüche bis 2023-03-27
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 1993-1-6:2017-07**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen;
Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-1-6:2023**Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures;
German and English version prEN 1993-1-6:2023Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-6: Résistance et stabilité des structures en coque;
Version allemande et anglaise prEN 1993-1-6:2023**Anwendungswarnvermerk**

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2023-01-27 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 Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 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 334 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1993-1-6:2023) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) 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.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung (SpA zu CEN/TC 250/SC 3, ISO/TC 167/SC 1)“ 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 1993-1-6:2017-07 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) das Dokument wurde vollständig überarbeitet;
- b) redaktionelle Anpassungen vorgenommen.

<i>Titel de:</i>	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen
<i>Titel en:</i>	Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-6: Strength and stability of shell structures
<i>Titel fr:</i>	Eurocode 3: Calcul des structures en acier — Partie 1-6: Résistance et stabilité des structures en coque

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
0 Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	9
1.1 Anwendungsbereich von prEN 1993-1-6	9
1.2 Voraussetzungen	10
2 Normative Verweisungen	11
3 Begriffe und Symbole	11
3.1 Begriffe	11
3.2 Symbole	21
3.3 Vorzeichenvereinbarungen	28
4 Grundlagen der Bemessung	29
4.1 Allgemeine Regeln	29
4.2 Berechnungskonzepte	30
4.3 Schalenrandbedingungen	33
4.4 Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten	34
5 Baustoffe und Geometrie	35
5.1 Baustoffeigenschaften	35
5.2 Bemessungswerte geometrischer Daten	36
5.3 Geometrische Toleranzen und geometrische Imperfektionen	36
6 Ermittlung der Schnittgrößen	37
6.1 Bemessungskonzepte	37
6.2 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen	40
6.3 Zu beachtende Grenzzustände der Tragfähigkeit	44
6.4 Konzepte für den Grenzzustandsnachweis	47
7 Grenzzustand des plastischen Versagens (LS1)	47
7.1 Bemessungswerte der Einwirkungen	47
7.2 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis	48
7.3 Bemessung anhand rechnergestützter MNA- oder GMNA-Berechnung	50
7.4 Bemessung anhand von Standardgleichungen	51
8 Grenzzustand des zyklischen Plastizierens (LS2)	51
8.1 Bemessungswerte von Einwirkungen	51
8.2 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis	52
8.3 Bemessung mittels rechnergestützter GMNA-Berechnung	53
8.4 Bemessung mittels Standardgleichungen	54
9 Grenzzustand des Beulens (LS3)	54
9.1 Bemessungswerte von Einwirkungen	54
9.2 Spezielle Definitionen und Symbole	54
9.3 Beulrelevante Randbedingungen	55
9.4 Beulrelevante geometrische Toleranzen	58
9.5 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis	70
9.6 Bemessung mittels Referenzwiderständen	74
9.7 Bemessung mittels rechnergestützter Berechnung durch LBA- und MNA-Berechnungen	77
9.8 Bemessung mittels rechnergestützter Berechnung durch GMNIA-Berechnung	82

10	Grenzzustand der Ermüdung (LS4)	90
10.1	Bemessungswerte von Einwirkungen	90
10.2	Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis	90
Anhang A (informativ) Membrantheoretische Spannungen in unverteiften Schalen		95
A.1	Anwendung dieses Anhangs	95
A.2	Umfang und Anwendungsbereich	95
A.3	Allgemeines	95
A.4	Zylinderschalen	96
A.5	Kegelschalen	98
A.6	Kugelschalen	100
Anhang B (informativ) Gleichungen für plastische Referenzwiderstände von unverteiften Schalen und Kreisplatten		101
B.1	Anwendung dieses Anhangs	101
B.2	Umfang und Anwendungsbereich	101
B.3	Allgemeines	101
B.4	Konstante unverteifte Zylinderschalen	102
B.5	Zylinderschalen mit lokalen Ringsteifen	105
B.6	Knotenlinien zwischen Kegel- und Zylinderschalen	107
B.7	Kreisplatten mit rotationssymmetrischen Randbedingungen	110
Anhang C (informativ) Gleichungen für lineare elastische Membran- und Biegespannungen in unverteiften Zylinderschalen und Kreisplatten		112
C.1	Anwendung dieses Anhangs	112
C.2	Umfang und Anwendungsbereich	112
C.3	Allgemeines	112
C.4	Am Fuß eingespannte Zylinderschalen	113
C.5	An der Grundfläche gelenkig gelagerte Zylinderschalen	117
C.6	Innere Bedingungen in Zylinderschalen	121
C.7	Lokale Ringsteife an einer Zylinderschale	123
C.8	Kreisplatten mit gelenkig gelagerten Randbedingungen	126
C.9	Kreisplatten mit eingespannten Randbedingungen	127
Anhang D (normativ) Gleichungen zur Bestimmung des Beulwiderstands unverteifter Schalen beim spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweis		129
D.1	Anwendung dieses Anhangs	129
D.2	Umfang und Anwendungsbereich	129
D.3	Zylinderschalen mit konstanter Wanddicke: grundlegende Lastfälle	129
D.4	Zylinderschalen mit konstanter Wanddicke: kombinierte Lastfälle	140
D.5	Zylinderschalen mit stufenweise veränderlicher Wanddicke	145
D.6	Zylinderschalen mit Überlappstößen	154
D.7	Kegelschalen (vollständige Kegel und Kegelstümpfe)	156
Anhang E (normativ) Gleichungen zur Bestimmung des Beulwiderstands unverteifter Schalen für die Bemessung des Referenzwiderstands		161
E.1	Anwendung dieses Anhangs	161
E.2	Umfang und Anwendungsbereich	161
E.3	Zylinderschalen unter globaler Biegebeanspruchung	161
E.4	Schalen mit halbkugelförmigen Kuppeln	166
Literaturhinweise		171

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1993-1-6:2023) 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 1993-1-6:2007 einschließlich Änderungen und Berichtigungen 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.

0 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 sind in Erarbeitung, z. B. Eurocode für die Bemessung und Konstruktion von Tragwerken aus Glas

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 1993 (alle Teile)

EN 1993 (alle Teile) gilt für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Hoch- und Ingenieurbauten aus Stahl. Eurocode 3 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 1993 (alle Teile) behandelt ausschließlich Anforderungen an die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit, die Dauerhaftigkeit und den Feuerwiderstand von Tragwerken aus Stahl. Andere Anforderungen, wie z. B. bezüglich Wärmeschutz oder Schallschutz, werden nicht berücksichtigt.

EN 1993 ist in mehrere Teile unterteilt:

EN 1993-1, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*;

EN 1993-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 2: Stahlbrücken*;

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

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

EN 1993-5, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 5: Pfähle und Spundwände*;

EN 1993-6, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 6: Kranbahnen*;

EN 1993-7¹, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 7: Bemessung von Sandwich-Elementen*.

EN 1993-1 existiert nicht als physisches Dokument, sondern besteht aus den folgenden 14 Einzelteilen, deren grundlegender Teil EN 1993-1-1 ist:

EN 1993-1-1, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*;

EN 1993-1-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-2: Allgemeine Regeln — Tragwerksbemessung für den Brandfall*;

EN 1993-1-3, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-3: Allgemeine Regeln — Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche*;

ANMERKUNG Kaltgeformte Hohlquerschnitte nach EN 10219 werden in EN 1993-1-1 behandelt.

EN 1993-1-4, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln — Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen*;

EN 1993-1-5, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile*;

EN 1993-1-6, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen*;

EN 1993-1-7, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-7: Plattenförmige Bauteile mit Querbelaastung*;

EN 1993-1-8, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*;

EN 1993-1-9, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-9: Ermüdung*;

EN 1993-1-10, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung*;

EN 1993-1-11, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl*;

EN 1993-1-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S700*;

1 In Vorbereitung.

EN 1993-1-13², *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-13: Regeln für Träger mit großen Stegöffnungen*;

EN 1993-1-14³, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-14: Bemessung mithilfe von Finite-Elemente-Berechnung*.

Alle nachfolgenden Teile von EN 1993-1-2 bis EN 1993-1-14 behandeln allgemeine Themen, die unabhängig von der Art des Tragwerks sind, wie die Tragwerksbemessung für den Brandfall, kaltgeformte Bauteile und Bleche, nichtrostende Stähle, plattenförmige Bauteile usw.

Alle nachfolgenden Teile von EN 1993-2 bis EN 1993-7 behandeln Themen, die für eine bestimmte Tragwerksart maßgebend sind, wie Stahlbrücken; Türme, Maste und Schornsteine; Silos und Tankbauwerke; Pfähle und Spundwände; Kranbahnen usw. EN 1993-2 bis EN 1993-7 beziehen sich auf die allgemeinen Regeln nach EN 1993-1 und ergänzen, ändern oder ersetzen diese.

0.3 Einleitung zu EN 1993-1-6

prEN 1993-1-6 enthält Anforderungen für die Bemessung und Konstruktion von Schalenkonstruktionen aus Stahl, welche Kräften und Drücken ausgesetzt sind, die Membran- und Biegeschnittgrößen in der Schale verursachen. prEN 1993-1-6 deckt ebenfalls Kreisringplatten und Ringsteifen ab. Die hier enthaltenen Bestimmungen können unter Anwendung von rechnergestützten Verfahren für ein breites Spektrum gekrümmter Tragwerke mit oder ohne Steifen verwendet werden. prEN 1993-1-6 gilt für Silos, Tankbauwerke, Schornsteine, Türme von Windenergieanlagen, Biofermenter und Pfähle.

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 gerechtfertigt 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 für EN 1993-1-6

Nationale Festlegungen sind in dieser Norm zulässig, wo diese Möglichkeit ausdrücklich in Anmerkungen angegeben wird. Nationale Festlegungen umfassen die Auswahl der Werte für national festzulegende Parameter (NDP, en: Nationally Determined Parameters).

Die jeweilige nationale Ausgabe von prEN 1993-1-6 kann einen Nationalen Anhang mit allen national festzulegenden 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 dieser Norm angegebene Standardwert anzuwenden.

2 In Vorbereitung.

3 In Vorbereitung.

Wenn keine nationale Festlegung angeführt wird und kein Standardwert in dieser Norm 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 prEN 1993-1-6 durch Anmerkungen zu den folgenden Abschnitten gestattet:

4.4 (3)	6.3.2 (3)	6.3.4 (2)	9.8.2 (12)
---------	-----------	-----------	------------

Nationale Festlegungen sind in prEN 1993-1-6 zulässig bei Anwendung der folgenden informativen Anhänge:

Anhang A	Anhang B	Anhang C
----------	----------	----------

1 Anwendungsbereich

1.1 Anwendungsbereich von prEN 1993-1-6

(1) prEN 1993-1-6 enthält Grundregeln für die Tragwerksplanung von Stahlkonstruktionen in Form von Rotationsschalen (rotationssymmetrische Schalen).

(2) Dieses Dokument ist unter Anwendung sowohl algebraischer als auch rechnergestützter Verfahren auf unversteifte zusammengesetzte rotationssymmetrische Schalen, die durch Umformen isotroper Walzbleche hergestellt werden, sowie unter Anwendung rechnergestützter Verfahren auf versteifte rotationssymmetrische Schalen mit unterschiedlichen Wandkonstruktionen anwendbar. Es gilt auch für zugehörige Kreis- oder Kreisringplatten sowie für stabförmige Ring- und Längssteifen, soweit sie Teile der vollständigen Schalenkonstruktion sind. Die allgemeinen rechnergestützten Verfahren gelten für alle Schalenformen.

(3) Dieses Dokument gilt nicht für industriell hergestellte Schalen oder für Schalenplatten oder elliptische Schalenformen mit der Ausnahme, dass die allgemeinen rechnergestützten Verfahren für alle Schalenkonstruktionen gelten. Es gilt nicht für Tragwerke unter dynamischer oder Erdbebenbeanspruchung. Es deckt keine Dichtigkeitsaspekte in Zusammenhang mit gelagerten Flüssigkeiten oder Feststoffen ab.

(4) Zylindrische und kegelförmige Schalenteile, -felder und -abschnitte werden in dieser Norm nicht explizit behandelt. Die Bestimmungen nach 9.8 können jedoch angewendet werden, sofern die zutreffenden Randbedingungen berücksichtigt werden.

(5) Dieses Dokument definiert die charakteristischen Werte und die Bemessungswerte des Tragwerkswiderstands.

(6) Dieses Dokument behandelt die Anforderungen an die Bemessung gegen die folgenden Grenzzustände der Tragfähigkeit:

- plastisches Versagen;
- zyklisches Plastizieren;
- Beulen;
- Ermüdung.

(7) Das Gesamtgleichgewicht des Tragwerks (Gleiten, Abheben, Umkippen) ist nicht Gegenstand dieser Norm. Besondere Überlegungen für spezielle Anwendungen werden in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 behandelt.

(8) In den Anhängen sind detaillierte Gleichungen für die einfache Berechnung von unversteiften Zylindern, Kegeln und halbkugelförmigen Kuppeln angegeben.

(9) Bestimmungen für einfache Berechnungen bestimmter versteifter Schalentypen sind in EN 1993-4-1 angegeben.

(10) Diese Norm ist zur Anwendung auf stählerne Schalenkonstruktionen vorgesehen. In Abwesenheit bestehender Normen zu Schalenkonstruktionen aus anderen Metallen, einschließlich hochfesten Stählen, gelten die Bestimmungen dieser Norm unter der Voraussetzung, dass die jeweiligen Baustoffeigenschaften des Metalls berücksichtigt werden.

(11) Die Bestimmungen dieser Norm sind zur Anwendung innerhalb der in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 definierten Temperaturbereiche vorgesehen.

(12) Sofern kein abweichender Bereich in einem Anwendungsteil festgelegt ist, gilt diese Norm für Tragwerke innerhalb der folgenden Grenzen:

- Bemessungswerte der Metalltemperatur liegen innerhalb des Bereichs von -50 °C bis $+100\text{ °C}$, ausgenommen bei Anwendung der speziellen Bestimmungen nach 5.1;
- Radius/Dicken-Verhältnisse (r/t) liegen innerhalb des Bereichs von 50 bis 2 000;
- industriell hergestellte kreisförmige Hohlprofile nach EN 10210 und EN 10219 fallen nicht in den Anwendungsbereich dieser Norm und werden durch EN 1993-1-1 abgedeckt. Liegen jedoch keine anderen Bestimmungen vor, sind die Regeln dieser Norm nützlich für industriell hergestellte kreisförmige Hohlprofile. Diese Norm ist insbesondere anwendbar für die Bemessung industriell hergestellter Pfähle (siehe EN 1993-5), sofern die Anforderungen bezüglich Imperfektionen und Toleranzen nach EN 1993-5 statt der in prEN 1993-1-6 festgelegten angewendet werden und die jeweilige Pfahlgeometrie durch keine andere Norm abgedeckt wird.

ANMERKUNG 1 Versuchsdaten und theoretische Daten zu industriell hergestellten kreisförmigen Hohlprofilen wurden beim Entwurf dieser Norm nicht berücksichtigt. Die Anwendung dieser Norm auf solche Tragwerke liegt somit weiterhin in der Verantwortung des Anwenders.

ANMERKUNG 2 Die Regeln zum spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweis nach dieser Norm können bei Anwendung auf einige Geometrien und Beanspruchungsbedingungen von verhältnismäßig dickwandigen Schalen eher konservativ sein.

ANMERKUNG 3 Schalen mit dünneren Wandungen als $r/t = 2\,000$ können unter Anwendung dieser Bestimmungen behandelt werden, diese wurden jedoch nicht für solche dünnwandigen Schalen nachgewiesen.

ANMERKUNG 4 Der Höchstwert der Temperatur ist so festgelegt, dass Kriecheinflüsse vernachlässigt werden können, sofern Kriecheinflüsse bei hohen Temperaturen nicht durch den einschlägigen Anwendungsteil abgedeckt werden.

ANMERKUNG 5 Für den Fall von Temperaturen außerhalb des vorstehend angegebenen Bereichs sind die temperaturangepassten Eigenschaften EN 1993-1-2 oder anderen zutreffenden CEN-Normen zu entnehmen. Für den Fall, dass keine andere Norm verfügbar ist, wird auf EN 1993-1-2 verwiesen, die zwar für die Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten für den Brandfall vorgesehen ist, aber allgemeine temperaturabhängige Baustoffeigenschaften mit breiterer Anwendbarkeit enthält (siehe 5.1 (10)).

1.2 Voraussetzungen

(1) Sofern nicht spezifisch angegeben, gelten die Bestimmungen nach EN 1990, EN 1991 (alle Teile) und die anderen maßgebenden Teile von EN 1993-1 (alle Teile).

(2) Die in prEN 1993-1-6 angegebenen Bemessungsverfahren sind anwendbar, sofern:

- die Ausführungsqualität den Festlegungen nach EN 1090-2 entspricht; und
- die verwendeten Baustoffe und -produkte den Festlegungen der maßgebenden Teile von EN 1993 (alle Teile) oder der anderen maßgebenden Baustoff- und Produktspezifikationen entsprechen.

ANMERKUNG Die beulbezogenen Toleranzanforderungen nach dieser Norm unterscheiden sich in einigen Aspekten von jenen nach EN 1090-2 (siehe Abschnitt 9).

(3) Die in dieser Norm angegebenen Bestimmungen gelten für Baustoffe, die den in EN 1993-1-4, EN 1993-1-10 und EN 1993-1-12 angegebenen Bestimmungen bezüglich Spröbruch entsprechen.

(4) Im Rahmen dieser Norm wird vorausgesetzt, dass Windlast, Erdbebeneinwirkungen und Schüttgutfluss im Allgemeinen als quasi-statische Einwirkungen behandelt werden können.

(5) Dynamische Auswirkungen liegen außerhalb des Anwendungsbereichs von prEN 1993-1-6 und werden einschließlich Ermüdungsfolgen durch den einschlägigen Anwendungsteil von EN 1993 oder EN 1998 abgedeckt. In diesem Teil werden die Schnittgrößen aus dynamischem Verhalten jedoch als quasi-statisch behandelt.

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).

ANMERKUNG In den Literaturhinweisen sind weitere zitierte Dokumente aufgelistet, die keine normativen Verweisungen sind, einschließlich solcher Dokumente, die als Empfehlungen (d. h. durch „sollte“-Sätze), Erlaubnisse („darf“-Sätze), Möglichkeiten („kann“-Sätze) und in Anmerkungen in Bezug genommen werden.

EN 1090-2, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken*

EN 1990, *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN 1991 (alle Teile), *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke*

EN 1993 (alle Teile), *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*

ISO 8930, *General principles on reliability for structures — Vocabulary*

3 Begriffe und Symbole

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN 1990, EN 1993-1-1, ISO 8930 und die folgenden Begriffe.

3.1 Begriffe

3.1.1 Tragwerksformen und Geometrie

3.1.1.1

Basisring

Tragwerkselement, das der Umfangslinie der Rotationsschale an deren Basis folgt und die Möglichkeit bietet, die Schale an ein Fundament oder ein anderes Tragwerkselement anzuschließen, und dazu benötigt wird, die angenommenen Randbedingungen praktisch sicherzustellen

3.1.1.2

Umfangstoß

Stoß, der um den Umfang einer rotationssymmetrischen Schale verläuft

3.1.1.3

gesamte Schale oder Schalenbaugruppe

Schale, die aus einer Anzahl von (zylindrischen, kegelförmigen, kugelförmigen usw.) Schalensegmenten besteht

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Rahmen dieser Norm wird jedes Segment der Schalenbaugruppe als Rotationsschale angenommen.

3.1.1.4

Konstruktionsdetail

Teil einer Schale, dessen Geometrie lokal erhöhte Spannungen verursacht, die für den Grenzzustand der Ermüdung (LS4) maßgebend sind, wie z. B. Schweißnähte, geschraubte Anschlüsse und Verbindungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Das geometrische Merkmal, welches die Auswirkung des Spannungsanstiegs verursacht, wird in EN 1993-1-9 auch als „Kerbe“ bezeichnet.

3.1.1.5

Schuss

Satz von Walzblechen, die durch Vertikalstöße verbunden sind und eine einzelne Schalenlage zwischen Horizontalstößen bilden

Anmerkung 1 zum Begriff: Mehrere Schüsse (en: course) derselben Dicke können einen gemeinsamen Schuss (en: strake) bilden.

3.1.1.6

zusammengesetzte Schale

Schalenskonstruktion, die hergestellt wird, indem Bleche zu gekrümmten zylindrischen Blechprofilen gewalzt und diese anschließend zu einer vollständigen Schalenform verschweißt oder verschraubt werden

3.1.1.7

Stoß

Linie zwischen zwei Schalenteilen, die Teil desselben Schalensegments sind, aber aus verschiedenen Schalenblechteilen zusammengesetzt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Stoß kann durch Schweißen, Verschrauben oder anderweitiges Verbinden hergestellt werden. Der Begriff „Stoß“ (en: joint) wird verbreitet für Schalenskonstruktionen verwendet, allerdings mit einer leicht abweichenden Bedeutung als der Begriff „Anschluss“ (en: joint) nach EN 1993-1-8.

3.1.1.8

Knotenlinie

Linie, an der zwei oder mehr Schalensegmente zusammentreffen

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Knotenlinie kann auch eine Steife einschließen, welche als Knotenlinie an der Anschlusslinie einer Ringsteife an der Schale behandelt werden kann.

3.1.1.9

Überlappstoß

Stoß, bei dem sich die beiden Schalenplatten darüber hinweg überlappen, was zu lokaler Erhöhung der gesamten Schalendicke führt

3.1.1.10

industriell hergestellte Schale

Schale oder rohrförmiges Bauteil, welche(s) in kontrollierten Prozessen in einem Werk hergestellt wird, wobei die gesamte Kreis- oder Ellipsenform durch Falten, Walzen oder vergleichbare Prozesse sowie Längs- oder Spiralschweißen erzeugt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Industriell hergestellte Schalen oder rohrförmige Bauteile werden typischerweise zur Übereinstimmung mit den Festlegungen nach EN 10210 oder EN 10219 hergestellt. Industriell hergestellte Schalen liegen außerhalb des Anwendungsbereichs dieses Dokuments mit Ausnahme der nach 1.1 (3) und 1.1 (12) zulässigen Fälle.

3.1.1.11

Meridian und Meridianrichtung

Linie auf einer Schalenoberfläche, die in der Ebene durch die rotationssymmetrische Schalenachse liegt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Meridianrichtung ist die Tangente des Meridians an einem beliebigen Punkt. In einem Zylinder ist der Meridian parallel zur Achse und die Meridianrichtung ist gleichbedeutend mit der Axialrichtung. In kegelförmigen Schalen ist der Meridian gerade, aber zur Achse geneigt. Bei anderen Schalenformen ändert sich die Meridianrichtung mit der axialen Lage.

3.1.1.12

Meridianstoß

Stoß, der auf dem Meridian einer rotationssymmetrischen Schale verläuft

3.1.1.13

Schalenmittelfläche

Fläche, die an jedem Punkt der Schale mittig zwischen ihrer inneren und äußeren Oberfläche liegt und als Bezugsfläche für die Berechnung dient und an Waddickensprüngen oder an Knotenlinien diskontinuierlich sein kann, was zu Exzentrizitäten führt, die für das Tragwerksverhalten der Schale wichtig sein können

Anmerkung 1 zum Begriff: Falls die Schale an entweder einer oder beiden Oberflächen versteift ist, wird trotzdem die Mittelfläche des gekrümmten Schalenblechs als Bezugs-Schalenmittelfläche verwendet.

3.1.1.14

Kerbe

Stelle in einem Konstruktionsdetail, an der lokal erhöhte Spannungen auftreten, die für den Grenzzustand der Ermüdung (LS4) maßgebend sind

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Begriff „Kerbe“ wird verbreitet in EN 1993-1-9 verwendet.

3.1.1.15

Rippe

örtliches Bauteil, das eine primäre Biegelastabtragung längs eines Schalenmeridians ermöglicht, welcher eine Erzeugende der Rotationsschale darstellt und der Übertragung oder Verteilung von Querlasten mittels Biegung dient

3.1.1.16

Ringträger oder Ringbalken

Versteifungsbauteil in Umfangsrichtung, das sowohl in Ringebene als auch rechtwinklig dazu eine Biegesteifigkeit- und -festigkeit aufweist und ein lasttragendes primäres Tragwerksbauteil zur Weiterleitung örtlicher Lasten in die Schale ist

3.1.1.17

Ringsteife

örtliches Versteifungsbauteil, das der Umfangsline der Rotationsschale an einem bestimmten Punkt des Schalenmeridians folgt und von dem gewöhnlich angenommen wird, dass die Steifigkeit der Ringsteife in Bezug auf Verformungen aus der eigenen Ebene (meridionale Verschiebungen der Schale) vernachlässigbar ist, sie jedoch in Bezug auf Verformungen in der Ringebene steif ist; sie wird entweder vorgesehen, um die Stabilität zu verbessern oder in Ringebene angreifende örtliche Lasten einzuleiten

3.1.1.18

Schale

Tragwerk oder Tragwerkselement, das aus einer gekrümmten dünnen Wandung besteht

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Krümmung ist von entscheidender Bedeutung für ihren Tragwerkswiderstand und kann entweder in eine Richtung (zylindrisch oder kegelförmig) oder zwei Richtungen (kugelförmig, oval, torusförmig, hyperboloidförmig usw.) verlaufen.

3.1.1.19

Rotationsschale

Schale, deren geometrische Form durch eine Mittelfläche definiert ist, welche durch Rotation einer meridionalen Linie (Erzeugenden) um eine einzelne Achse über ein Bogenmaß von 2π erzeugt wird

3.1.1.20

Schalengefeld

unvollständige Rotationsschale

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Rotationsschale wird als unvollständig bezeichnet, wenn ihre Meridianränder an Punkten auf dem Umfang liegen, die ein Bogenmaß von weniger als 2π voneinander entfernt sind.

Anmerkung 2 zum Begriff: Schalengefelder liegen außerhalb des Anwendungsbereichs dieses Dokuments mit Ausnahme der nach 1.1 (4) zulässigen Fälle.

3.1.1.21

Schalensegment

Rotationsschale mit definierter Geometrie und gewöhnlich konstanter Wanddicke, die jedoch mitunter aus mehreren Schüssen besteht

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Schalensegment kann ein Zylinder, Kegelstumpf, Kugelstumpf, eine Kreisringplatte, Toroidkrempe oder eine beliebige andere Form von Rotationsschale sein.

3.1.1.22

Schalenwandung mit abgestufter Dicke

Schale mit fester geometrischer Form (zylindrisch, kegelförmig usw.), in der verschiedenen Teile unterschiedliche Dicken aufweisen, um die Schwankung lokaler Widerstandsanforderungen zu berücksichtigen

3.1.1.23

Schuss

Bereich mit konstanter Dicke innerhalb einer Schalenwandung mit abgestufter Dicke

3.1.1.24

Längssteife

örtliches Versteifungsbauteil, das dem Schalenmeridian folgt, welcher eine Erzeugende der Rotationsschale darstellt, und die Stabilität verbessern oder bei der Einleitung örtlicher Lasten mitwirken soll, aber nicht primär dafür vorgesehen ist, den Widerstand gegen Biegeauswirkungen infolge Querlasten zu erhöhen

3.1.2 Grenzzustände

3.1.2.1

Beulen (LS3)

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem die Schalenkonstruktion unter Membrandruck- und/oder Membranschubbeanspruchung plötzlich seine Stabilität verliert, was entweder zu großen Verformungen führt oder dazu, dass die Schale nicht mehr in der Lage ist, die einwirkenden Lasten zu tragen

3.1.2.2

zyklisches Plastizieren (LS2)

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem durch Be- und Entlastungszyklen wiederholtes Fließen verursacht wird, was zum Versagen infolge Kurzzeitermüdung führt, wenn die Kapazität des Werkstoffes zur Energieabsorption erschöpft ist

3.1.2.3

Ermüdung (LS4)

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem mehr als N_f Lastspiele Rissbildung in einem Teil des Tragwerks verursachen, so dass weitere Lastspiele zum Bruch führen können

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser Grenzzustand wird in EN 1990 als „Ermüdung mit hoher Lastspielzahl“ bezeichnet. Der Wert von N_f ist in 6.3.4(2) festgelegt. EN 1993-1-9 enthält keine Bestimmungen für Lastspielzahlen unter 10 000. Für geringere Lastspielzahlen mit hohen Spannungen ist Abschnitt 8 (LS2) maßgebend.

3.1.2.4

Grenzzustand des plastischen Versagens (LS1)

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem die Schale Fließzonen mit kombinierten Membran- und Biegeverformungen in einer derartigen Anordnung entwickelt, dass ihre Fähigkeit, höheren Lasten zu widerstehen, als erschöpft betrachtet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Viele duktile Schalenkonstruktionen können weiterhin erhöhter Beanspruchung mit ausgedehntem Fließen und erheblichen Änderungen der Geometrie widerstehen. Für diese Bedingungen wird eine Verformungsbegrenzung verwendet, um den Grenzzustand des plastischen Versagens zu definieren.

3.1.2.5

Zugbruch (LS1)

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem die Schalenwandung infolge Membranzugbeanspruchung reißt

3.1.3 Einwirkungen

3.1.3.1

Axiallast

extern aufgebrachte Belastung, die in Axialrichtung in einer rotationssymmetrischen Schale einwirkt

3.1.3.2

axiale Druckbeanspruchung

axiale Last, welche durch Druckmembranspannungen in einer Zylinderschale aufgebracht wird

3.1.3.3

Außendruck

Anteil der Flächenbelastung, der normal zur Schalenoberfläche in Richtung q nach innen gerichtet einwirkt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Größenordnung des Außendrucks kann sowohl in Meridian- als auch in Umfangsrichtung veränderlich sein (z. B. unter Schneelast, siehe EN 1991-1-3, oder Windlast, siehe EN 1991-1-4).

3.1.3.4

globale Biegebeanspruchung

Einwirkungen, welche die Biegung einer zylindrischen oder kegelförmigen Schale als gesamtes Tragwerk um eine Achse senkrecht zur Schalenachse verursachen

Anmerkung 1 zum Begriff: Dies entspricht einer Kosinusvariation (Harmonische 1) der Axialspannungen um den Schalenumfang und ist gleichzusetzen mit Trägerbiegung.

3.1.3.5

hydrostatischer Druck

linear mit der Axialkoordinate einer rotationssymmetrischen Schale veränderlicher Druck, dessen Achse als vertikal angenommen wird

3.1.3.6

Innendruck

Anteil der Flächenbelastung, der senkrecht zur Schale in Richtung p nach außen gerichtet wirkt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Größenordnung des Innendrucks kann sowohl in Meridian- als auch in Umfangsrichtung veränderlich sein (z. B. unter Schüttgutbeanspruchung in einem Silo, siehe EN 1991-4, oder Sloshing-Druckverteilung in einem Tankbauwerk, siehe EN 1998-4, oder Kippsetzungen unter Tankbauwerken mit großem Durchmesser).

3.1.3.7

örtliche Last

Punktlast oder über einen begrenzten Bereich des Schalenumfangs und der Höhe verteilte Last

3.1.3.8

Teilvakuum

konstanter Außendruck (Unterdruck), der typischerweise durch Entnahme gespeicherter Flüssigkeiten, Schüttgüter oder Gase aus einem unzureichend belüfteten Behälter verursacht wird (siehe EN 1991-4)

3.1.3.9

Teilflächenlast

örtliche Flächenlast normal zur Schalenoberfläche

3.1.3.10

Radiallast

extern aufgebrachte Belastung normal zur Oberfläche einer Zylinderschale oder zur Achse in einer rotationssymmetrischen Schale

3.1.3.11

Soglast

konstanter Außendruck (Unterdruck) q infolge des niedrigeren Innendrucks in einer Schale (z. B. aufgrund von betrieblichen oder Belüftungsöffnungen unter Windeinwirkung, siehe EN 1991-1-4, oder aufgrund von Teilvakuum)

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Außendruck ist mit einer gesonderten Notation q versehen, um die Bestimmungen dieses Dokuments zu vereinfachen. Andernfalls würden viele Gleichungen negative Werte des nach außen wirkenden Drucks p enthalten.

3.1.3.12

thermische Einwirkung

veränderliche Temperaturen entweder in Längs- oder in Umfangs- oder in Dickenrichtung der Schale oder in Kombinationen aus diesen räumlichen Variationen

3.1.3.13

Wandreibungslast

meridionaler Anteil der Flächenbelastung entlang der Schalenwandung infolge Reibung, verbunden mit Innendruck (z. B. wenn die Schale Schüttgut enthält, siehe EN 1991-4)

3.1.4 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen

3.1.4.1

Biegespannungen

Biegeschnittgrößen multipliziert mit 6 und dividiert durch das Quadrat der Schalendicke (nur von Bedeutung für Bedingungen mit elastischer Schale)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Notationen für Indizes einer Biegespannung beziehen sich auf die Spannungsrichtung, nicht auf die Achse, um welche die Schale verformt wird.

3.1.4.2

Biegeschnittgrößen

Biege- und Torsionsmomente je Längeneinheit der Schale, welche sich aus dem Integral des Flächenmomentes ersten Grades des Verlaufs der Normalspannungen und der Schubspannungen parallel zur Schalenmittelfläche über die Schalendicke ergeben, so dass unter elastischen Bedingungen jede dieser Schnittgrößen einen Spannungszustand erzeugt, der über die Schalendicke linear verläuft mit dem Wert Null an der Schalenmittelfläche; das ergibt zwei Biegemomente und ein Torsionsmoment an jedem Punkt (siehe Bild 3.3b)

Anmerkung 1 zum Begriff: Unter plastischen und teilweise plastischen Verformungsbedingungen führen dieselben Schnittgrößen zu unterschiedlichen und häufig komplexen Spannungsmustern über die Schalendicke.

3.1.4.3

Membranspannungen

Membranschnittgrößen geteilt durch die Schalendicke (siehe Bild 3.2 und Bild 3.3a)

3.1.4.4

Membranschnittgröße

Kraft je Längeneinheit der Schalenwandung, welche sich aus dem Integral des Verlaufs der Normalspannungen und der Schubspannungen parallel zur Schalenmittelfläche über die Schalendicke ergibt

Anmerkung 1 zum Begriff: Unter elastischen Bedingungen erzeugt jede dieser Schnittgrößen einen Spannungszustand, der konstant über die Schalendicke verläuft; das ergibt drei Membranschnittgrößen an jedem Punkt (siehe Bild 3.2 und Bild 3.3a).

3.1.4.5

Querschubschnittgrößen

Kräfte je Längeneinheit der Schale, welche sich aus dem Integral des Verlaufes des Querschubes senkrecht zur Schalenmittelfläche über die Schalendicke ergeben, so dass unter elastischen Bedingungen jede dieser Schnittgrößen einen Spannungszustand erzeugt, der parabelförmig über die Schalendicke verläuft; das ergibt zwei Querschubschnittgrößen an jedem Punkt (siehe Bild 3.2 und Bild 3.3a)

3.1.5 Berechnungskonzepte und deren Anwendung

3.1.5.1

rechnergestützte Berechnung

Verwendung von Schalenberechnungssoftware (gewöhnlich Finite Elemente) für eine numerische Tragwerksberechnung

Anmerkung 1 zum Begriff: Sie kann unterschiedliche Formen annehmen in Abhängigkeit von den beim numerischen Modell zugrunde gelegten Annahmen.

3.1.5.2

Eigenwert

Multiplikator zu den aufgebrachten Einwirkungen, der zu einer Verzweigung führt

Anmerkung 1 zum Begriff: In einer rechnergestützten Schalenbeulberechnung ist das Erkennen von Verzweigungen im primären Lastpfad erforderlich. Derartige mögliche Verzweigungen werden mittels Eigenwertberechnung festgestellt. Die Beulform, die einem Eigenwert entspricht, wird als dessen Eigenform bezeichnet. Der in dieser Norm verwendete Begriff Eigenwert bezieht sich nicht auf eine Schwingungsform.

3.1.5.3

geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)

rechnergestützte Berechnung auf der Grundlage der für die perfekte Struktur geltenden Schalenbiegetheorie unter der Annahme einer nichtlinearen Theorie großer Verformungen für die Verschiebungen und eines vollständig nichtlinearen elastisch-plastisch aushärtenden Werkstoffgesetzes, sofern geeignet, wobei diese Berechnung eine Verzweigungseigenwert-Überprüfung auf jedem Belastungsniveau einschließt

3.1.5.4

geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)

rechnergestützte Berechnung, bei der Imperfektionen ausdrücklich eingeschlossen sind und die auf der Grundlage der auf das imperfekte Tragwerk angewendeten Schalenbiegetheorie erfolgt, einschließlich eines vollständig nichtlinearen elastisch-plastisch aushärtenden Werkstoffgesetzes sowie einer nichtlinearen Theorie großer Verformungen für Verschiebungen, die allen Änderungen der Geometrie, die durch die Einwirkungen auf die Schale hervorgerufen werden, in vollem Umfang Rechnung trägt und eine Verzweigungseigenwert-Überprüfung auf jedem Lastniveau einschließt; die Definition des rechnergestützten Modells umfasst eines oder mehrere der folgenden unbeabsichtigten Merkmale: Abweichungen der Schalenmittelfläche von der idealen Form, Eigenspannungen, Dickenvariationen, Versatz der Bleche und Imperfektionen in den Randbedingungen

3.1.5.5

geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA)

rechnergestützte Berechnung auf der Grundlage der auf das perfekte Tragwerk angewendeten Schalenbiegetheorie und eines linear-elastischen Werkstoffgesetzes, jedoch einschließlich einer nichtlinearen Theorie großer Verformungen für die Verschiebungen, die allen Änderungen der Geometrie, die durch die Einwirkungen auf die Schale hervorgerufen werden, in vollem Umfang Rechnung trägt und eine Verzweigungseigenwert-Überprüfung auf jedem Lastniveau einschließt

3.1.5.6

geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)

rechnergestützte Berechnung, bei der Imperfektionen ausdrücklich eingeschlossen sind, vergleichbar mit einer GNA-Berechnung nach 3.1.5.5, aber unter Verwendung eines Modells für die Tragwerksgeometrie, das eines oder mehrere der folgenden unbeabsichtigten Merkmale umfasst: Abweichungen der Schalenmittelfläche von der idealen Form, Eigenspannungen, Dickenvariationen, Versatz der Bleche und Imperfektionen in den Randbedingungen; es umfasst eine Verzweigungseigenwert-Überprüfung auf jedem Lastniveau

3.1.5.7

globale Berechnung

Berechnung, die das gesamte Tragwerk umfasst, anstatt einzelne Tragwerksteile separat zu behandeln

Anmerkung 1 zum Begriff: Dabei handelt es sich gewöhnlich um eine rechnergestützte Berechnung.

3.1.5.8

lineare elastische Berechnung (LA)

Berechnung, die das Tragverhalten einer dünnwandigen Schalenstruktur auf der Grundlage der linear-elastischen Schalenbiegetheorie kleiner Verformungen beschreibt, angewendet auf die perfekte Geometrie der Schalenmittelfläche

Anmerkung 1 zum Begriff: Dabei sind Standardgleichungen (siehe Anhang C) oder rechnergestützte Berechnungen anwendbar.

3.1.5.9

lineare elastische Verzweigungs(eigenwert)-Berechnung (LBA)

Berechnung, die den linearen Verzweigungseigenwert für eine dünnwandige Schalenstruktur auf der Grundlage der linear-elastischen Schalenbiegetheorie kleiner Verformungen beschreibt, angewendet auf die perfekte Geometrie der Schalenmittelfläche

Anmerkung 1 zum Begriff: Dabei sind Standardgleichungen (siehe Anhang D und Anhang E) oder rechnergestützte Berechnungen anwendbar.

3.1.5.10

Lastniveau

Lastbedingung am Ende jeder der fortlaufenden Einwirkungsstufen bis zum Erreichen des Grenzzustands in einer rechnergestützten nichtlinearen Berechnung (GNA, GNIA, MNA, GMNA oder GMNIA)

3.1.5.11

materiell nichtlineare Berechnung (MNA)

Berechnung auf der Grundlage der für das perfekte Tragwerk geltenden Schalenbiegetheorie unter der Annahme der Theorie kleiner Verformungen, jedoch unter Anwendung eines idealen elastisch-plastischen Werkstoffgesetzes (idealisiertes perfektes plastisches Verhalten nach dem Fließen) und ohne Begrenzung der plastischen Dehnung, die sich entwickeln kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Dabei sind Standardgleichungen (siehe Anhang B) oder rechnergestützte Berechnungen anwendbar.

3.1.5.12

membrantheoretische Berechnung

Berechnung, die das Tragverhalten einer dünnwandigen Schalenstruktur unter verteilten Lasten unter der Annahme beschreibt, dass das Gleichgewicht mit den äußeren Lasten ausschließlich durch Membrankräfte erreicht wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei globaler Biegung einer zylindrischen oder kegelförmigen Schale ohne asymmetrische Normaldrücke führen die Membrantheorie und die Balkentheorie zum gleichen Ergebnis. Wenn Wind oder andere asymmetrische Normaldrücke beteiligt sind, ist die Balkentheorie nicht länger gültig.

3.1.5.13

semi-membrantheoretische Berechnung

Berechnung, die das Verhalten einer asymmetrisch belasteten oder gelagerten dünnwandigen zylinderförmigen Schale unter der Annahme beschreibt, dass das Gleichgewicht mit den äußeren Lasten ausschließlich durch Membrankräfte und Umfangsbiegemomente erreicht wird

3.1.6 Beim spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweis verwendete Spannungskategorien

3.1.6.1

Primärspannungen

System von Spannungen, das zur Herstellung des Gleichgewichts mit den wirkenden Lasten erforderlich ist und in erster Linie Membranspannungen umfasst; unter bestimmten Bedingungen können jedoch auch Biegespannungen erforderlich sein, um Gleichgewicht herzustellen

3.1.6.2

Sekundärspannungen

Spannungen, die entweder durch die interne Kompatibilität entstehen oder durch die Kompatibilität mit den Randbedingungen, verbunden mit einwirkenden Lasten oder Verschiebungen (Temperatur, Vorspannung, Setzung, Schrumpfen) und die nicht erforderlich sind, um Gleichgewicht zwischen einem internen Spannungszustand und den externen Lasten herzustellen

3.1.6.3

Lokalspannungen

Spannungen in Zusammenhang mit der Ausbildungsgeometrie von Konstruktionsdetails und Kerben in der Schalenwandung

Anmerkung 1 zum Begriff: Maßgebende Konstruktionsdetails und Kerben beziehen sich auf Stellen wie Löcher, Schweißnähte, gestufte Wandungen, Befestigungen, Versteifungsabschlüsse, Knotenlinien und Stöße der Schale, Verbindungen und vergleichbare lokale Bedingungen. Diese Stellen führen zu Lokalspannungen, die sich rasch verändern auf einer Skala, die kleiner ist als die lokale Dicke der Schale. Diese Lokalspannungen können im Allgemeinen bei Bewertungen des Tragwerkswiderstands vernachlässigt werden, mit Ausnahme derjenigen, die die Ermüdung betreffen.

3.1.7 Spezielle Definitionen für Beulberechnungen

3.1.7.1

Belastungskurve

algebraische Beschreibung der Widerstände aller Tragsysteme, von elastischen imperfekten schlanken Systemen über elastisch-plastische bis hin zu vollständig plastischen und härtenden Systemen, anhand der Belastungsparameter α_G , α_I , β , η_0 , η_p , λ_0 und χ_h (siehe 9.5.2 und 9.6.3)

3.1.7.2

charakteristischer Beulwiderstand

Beullast unter Berücksichtigung der in praktischen Stahlbauten unvermeidbaren geometrischen und strukturellen Imperfektionen, des inelastischen Werkstoffverhaltens, sofern zutreffend, und gegebenenfalls vorhandener Folgelasteffekte (definiert in Bezug auf die charakteristischen Werte des Moduls und der Fließgrenze des Baustoffs)

3.1.7.3

charakteristische Beulspannung

zum charakteristischen Beulwiderstand gehörende Membranspannung oder Membranspannungskomponente

Anmerkung 1 zum Begriff: Die meisten Spannungszustände in einer Schale in der Praxis umfassen Membranspannungen in verschiedenen Richtungen an beliebiger Stelle, hier als Membranspannungskomponenten bezeichnet. Bei der Beurteilung von Beulen wird typischerweise nur die signifikanteste Komponente für die Beurteilung des Beulwiderstands verwendet, mitunter modifiziert durch schwächere Auswirkungen anderer Komponenten.

3.1.7.4

charakteristischer plastischer Widerstand

Last in Zusammenhang mit der Bildung eines vollständigen plastischen Mechanismus, der im Allgemeinen große Verschiebungen und starke Kaltverfestigung einschließt (definiert durch den charakteristischen Wert der Fließspannung des Baustoffs). Sie darf durch das Erreichen eines zulässigen Verschiebungskriteriums begrenzt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Der charakteristische plastische Widerstand ist gewöhnlich deutlich größer als der plastische Referenzwiderstand, da der vollständige plastische Mechanismus in einer Schale komplexe und räumlich veränderliche Interaktion zwischen Membran- und Biegeschnittgrößen gemeinsam mit einer signifikanten Änderung der Geometrie umfasst.

3.1.7.5

idealer Beulwiderstand

kleinste Verzweigungslast, berechnet unter Annahme der idealisierten Bedingungen elastischen Baustoffverhaltens, der Theorie kleiner Verformungen (keine Änderung der Geometrie), perfekter Geometrie, perfekter Lasteinleitung, perfekter Auflagerung, isotropen Baustoffs sowie der Abwesenheit von Eigenspannungen (modelliert mittels LBA-Berechnung)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Benennung „ideal“ (en: critical) ist ausschließlich auf diese Bedeutung begrenzt.

3.1.7.6

ideale Beulspannung

zum idealen Referenzbeulwiderstand gehörende Membranspannung

3.1.7.7

Bemessungsbeulwiderstand

Bemessungswert der Beullast, ermittelt aus dem charakteristischen Beulwiderstand durch Division durch den Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand

3.1.7.8

Bemessungsbeulspannung

zum Bemessungsbeulwiderstand gehörende Membranspannung oder Membranspannungskomponente

3.1.7.9

plastischer Bemessungswiderstand

Bemessungswert des plastischen Widerstands, ermittelt aus dem charakteristischen plastischen Widerstand durch Division durch den Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand

3.1.7.10

Herstelltoleranz-Qualitätsklasse

für die Bemessung angenommene Kategorie der Anforderungen an die Herstellgenauigkeit (siehe 9.4)

3.1.7.11

maßgebende Spannung

festgelegter Wert in einem veränderlichen Spannungsfeld, der zur Charakterisierung des vollständigen Musters veränderlicher Spannungen in einem Beulsicherheitsnachweis verwendet wird

3.1.7.12

idealer Referenzbeulwiderstand

idealer Beulwiderstand, der bei der Festlegung des charakteristischen Widerstands einer Schale als Referenzwiderstand in Zusammenhang mit den Interaktionen zwischen elastischem und plastischem Verhalten verwendet wird (modelliert mittels LBA-Berechnung)

3.1.7.13

plastischer Referenzwiderstand

plastische Grenzlast, berechnet unter den idealisierten Bedingungen starr-plastischen Baustoffverhaltens, der Theorie kleiner Verformungen (keine Änderung der Geometrie), perfekter Geometrie, perfekter Lasteinleitung, perfekter Auflagerung sowie isotropen Baustoffs (modelliert mittels MNA-Berechnung)

3.2 Symbole

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Symbole.

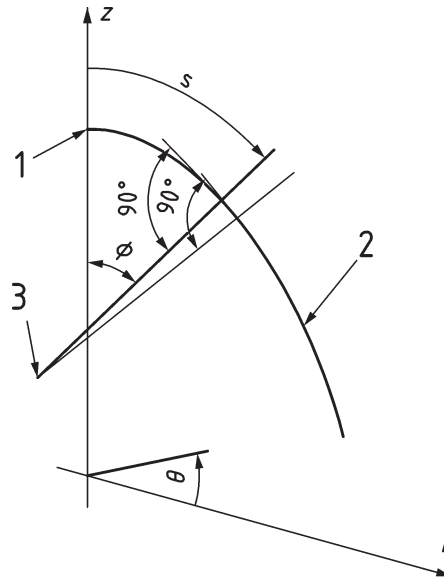
3.2.1 Koordinatensystem

Zum Koordinatensystem siehe Bild 3.1:

- r Radius der Schalenmittelfläche, rechtwinklig zur Rotationsachse;
- s krummlinige Meridiankoordinate auf im Allgemeinen rotationssymmetrischer Schale;
- x Richtung tangential zum Schalenmeridian;

ANMERKUNG Diese Definition von x liegt auf der Axialrichtung einer Zylinderschale.

- z axiale Koordinate eines Punktes auf der Schalenmittelfläche;
- θ Umfangskoordinate eines Punktes auf der Schalenmittelfläche;
- ϕ Meridianneigung: Winkel zwischen der Rotationsachse und der Senkrechten zum Schalenmeridian.



Legende

- 1 Pol
- 2 Schalenmeridian
- 3 momentaner Mittelpunkt der Meridiankrümmung

Bild 3.1 — Koordinatensystem für eine Rotationsschale

3.2.2 Schalenmaße

- d Durchmesser der Mittelfläche einer Zylinderschale;
- h_i Höhe der Schale zwischen oberem Rand und Unterkante des Schusses i ;
- h_{cr} Höhe der idealen Beule in einem Zylinder mit abgestufter Wandung unter Außendruck;
- L Zylinder- oder Kegellänge zwischen definierten Rändern;
- ℓ_S Länge eines Schalensegments zwischen Rändern, die entweder BC1 oder BC2 sind;
- ℓ_g Messlänge für die Messung geometrischer Imperfektionen;
- $\ell_{g\theta}$ Messlänge für die Messung geometrischer Imperfektionen in Umfangsrichtung;
- ℓ_{gw} Messlänge für die Messung geometrischer Imperfektionen über Schweißnähte hinweg;
- ℓ_{gx} Messlänge für die Messung geometrischer Imperfektionen in Meridianrichtung;
- ℓ_R Randzonenlänge, in der die Beurteilung der Beultragsicherheit entfallen darf (siehe D.4.3);
- r Radius der Schalenmittelfläche, rechtwinklig zur Achse einer rotationssymmetrischen Schale;
- r_1, r_2 einfache Radien der Ober- und Unterseite einer Kegelschale;
- r_s Radius einer Kugelschale;
- t Dicke der Schalenwandung;
- t_{max} maximale Dicke der Schalenwandung an einem Stoß;
- t_{min} Minstdicke der Schalenwandung an einem Stoß;
- t_{av} mittlere Dicke der Schalenwandung an einem Stoß;

x_e	Ausschlussabstand für Spannungsorte einschließlich einer Verringerung des Tangentenmoduls (siehe 5.1);
β	halber Öffnungswinkel eines Kegels;
ϕ_0	Meridianneigung am Auflager einer Kugelschale.

3.2.3 Verteilte Oberflächenlasten und -drücke

P_n	Druck senkrecht zur Schale (nach außen gerichtet);
P_x	Oberflächenbeanspruchung in Meridianrichtung parallel zur Schale;
p_θ	Oberflächenbeanspruchung in Umfangsrichtung parallel zur Schale;
q	Druck senkrecht zur Schale (nach innen gerichtet).

3.2.4 Linienlasten

P_n	Last je Umfangslängeneinheit senkrecht zur Schale (nach außen gerichtet);
P_x	Last je Umfangslängeneinheit, die in Meridianrichtung einwirkt;
P_θ	Last je Umfangslängeneinheit, die in Umfangsrichtung auf die Schale einwirkt.

3.2.5 Membranschnittgrößen

n_x	Membranschnittgröße in Meridianrichtung (Axialrichtung in einem Zylinder);
n_θ	Membranschnittgröße in Umfangsrichtung;
$n_{x\theta}$	Membranschubschnittgröße.

3.2.6 Biegeschnittgrößen

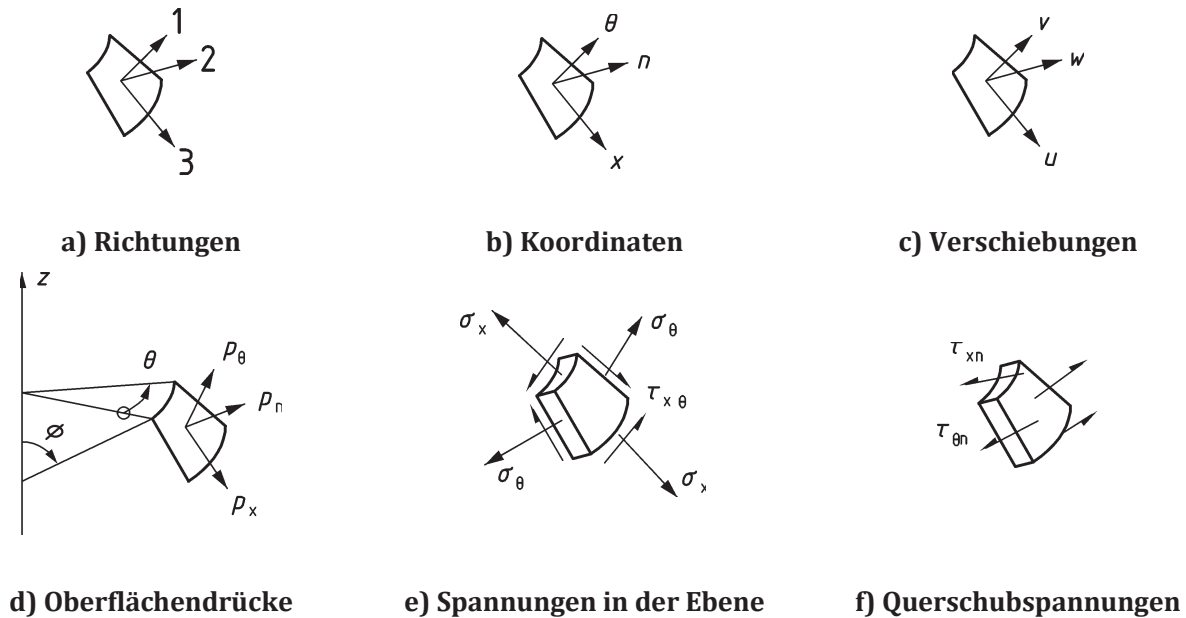
m_x	Biegemoment je Längeneinheit in Meridianrichtung (Axialrichtung in einem Zylinder);
m_θ	Biegemoment je Längeneinheit in Umfangsrichtung;
$m_{x\theta}$	Drillschubmoment je Längeneinheit;
q_{xn}	zur Meridianbiegebeanspruchung zugehörige Querschubkraft;
$q_{\theta n}$	zur Umfangsbiegebeanspruchung zugehörige Querschubkraft.

3.2.7 Spannungen

σ_x	Spannung in Meridianrichtung (Axialrichtung in einem Zylinder);
σ_θ	Umfangsspannung;
σ_{eq}	Von-Mises-Vergleichsspannung (kann bei zyklischer Beanspruchung auch negative Werte annehmen);
$\tau, \tau_{x\theta}$	Schubspannung in der Ebene;
$\tau_{xn}, \tau_{\theta n}$	zur Biegebeanspruchung zugehörige Querschubspannungen in Meridianrichtung, Umfangsrichtung.

3.2.8 Verschiebungen bezogen auf die perfekte oder imperfekte Schalenoberfläche

- u Verschiebung in Meridianrichtung;
 v Verschiebung in Umfangsrichtung;
 w Verschiebung senkrecht zur Schalenoberfläche;
 β_ϕ Rotation in Meridianrichtung, siehe 4.3 (4) und 6.2.2.



Legende

- 1 Umfangsrichtung
 2 senkrecht
 3 Meridianrichtung

Bild 3.2 — Symbole in einer Rotationsschale

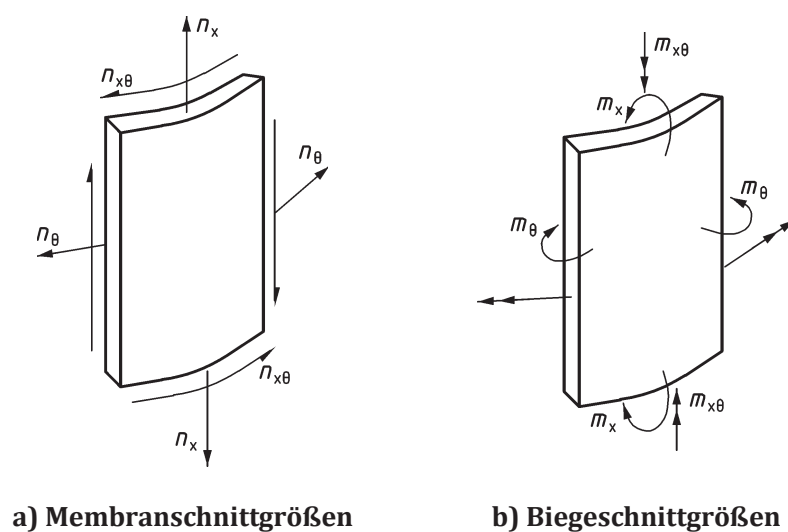


Bild 3.3 — Membran- und Biegeschnittgrößen in einer Zylinderschale

3.2.9 Toleranzen

e_a	Exzentrizität zwischen den Mittelflächen miteinander verbundener Bleche;
U_e	Toleranzparameter für unplanmäßige Exzentrizität;
U_r	Toleranzparameter für Unrundheit;
U_n	Parameter für die Imperfektionsamplitude für Vorbeule bei rechnergestützten Berechnungen;
U_0	Toleranzparameter für Vorbeule;
δ_a	berechnete Amplitude in einer rechnergestützten Behandlung (Bild 9.4);
δ_0	Toleranz senkrecht zur Schalenmittelfläche;
δ_0	Amplitude einer angenommenen geometrischen Imperfektion;
δ_{u0}	Toleranz für Auflager-Unebenheit in Meridianrichtung zwischen einer Schale und ihrem Auflager;
δ_{u0}	Amplitude einer angenommenen Auflager-Unebenheit;
δ_m	gemessene Amplitude mit Toleranzmessung (Bild 9.4).

3.2.10 Baustoffeigenschaften

E	Elastizitätsmodul;
E_{red}	verringertes Elastizitätsmodul zur Berücksichtigung der Auswirkungen von nichtlinearem Spannungs-Dehnungs-Verhalten oder thermischer Auswirkungen;
E_{sh}	Tangentenmodul für Kaltverfestigung;
f_{eq}	Von-Mises-Vergleichsfließspannung;
$f_{p,0}$	temperaturabhängige Spannungs-Dehnungs-Proportionalitätsgrenze;
f_y	Streckgrenze;
f_u	Zugfestigkeit;
ν	Poissonzahl.

3.2.11 Parameter für Widerstandsbeurteilung

$a_{p,eq}$	Beurteilungsfaktor für zyklisches Plastizieren;
a_i	Koeffizient für Beulinteraktion (siehe D.4.3);
C_x	Koeffizient des idealen Beulwiderstands unter axialer Druckbeanspruchung;
$C_\theta, C_{\theta s}$	Koeffizienten des idealen Beulwiderstands unter Außendruck;
$C_\tau, C_{\tau s}, C_{\tau L}$	Koeffizienten des idealen Beulwiderstands unter Schubbeanspruchung;
D	akkumulierter Ermüdungsschaden (siehe EN 1993-1-9);
f_{lim}	Grenzspannung für Ermüdungsnachweis (siehe 6.3.4 (2));
F	allgemeine Einwirkung;
F_{Ed}	einer Bemessungssituation entsprechende Einwirkung auf ein vollständiges Tragwerk (Bemessungswerte);

F_{Rd}	berechnete Werte der Einwirkung im Zustand des höchsten Tragwerkswiderstands (Bemessungswerte);
j_i	Verbindungswirksamkeitsfaktor, wobei gilt $i = 1$ oder 2 ;
k_f	Spannungskonzentrationsfaktor für Ermüdungsbeurteilung auf der Grundlage linearer Berechnung;
$k_{f,imp}$	Spannungskonzentrationsfaktor für Ermüdungsbeurteilung zur Berücksichtigung lokaler Imperfektion;
k_{GMNIA}	Kalibrierfaktor für den Widerstand bei nichtlinearen Berechnungen;
$k_x, k_\theta, k_\tau, k_i$	Verhältnis zwischen dem Bemessungswert der i -ten Spannungskomponente und dem Bemessungswert der zugehörigen konstanten Spannungskomponente (siehe 9.4.2);
$k_{ix}, k_{i\theta}, k_{i\tau}$	Interaktionsparameter bei Beulinteraktion (siehe D.4.3);
k_{eq}	Verhältnis zwischen der Von-Mises-Vergleichsoberflächenspannung und der Vergleichsmembranspannung an einem Punkt;
N_f	Lastspielzahl in einer Ermüdungsbeurteilung (LS4);
N_{cp}	Lastspielzahl in einer Beurteilung zyklischen Plastizierens (LS2);
Q	Herstelltoleranz-Qualitätsparameter;
R	allgemeiner Widerstand;
R_{cr}	bezogener idealer elastischer Referenzbeulwiderstand (definiert als Lastfaktor zu Bemessungslasten mittels LBA-Berechnung);
R_k	charakteristischer bezogener Referenzbeulwiderstand (mit Indizes zur Identifizierung der Grundlage): definiert als Lastfaktor zu Bemessungslasten mit dem Verhältnis (F_{Rk}/F_{Ed});
R_{pl}	bezogener plastischer Referenzwiderstand (definiert als Lastfaktor zu Bemessungslasten mittels MNA-Berechnung);
R_{plf}	bezogener plastischer Versagenswiderstand (definiert als Lastfaktor zu Bemessungslasten mittels GMNA-Berechnung);
R_{GNA}	bezogener Beulwiderstand, bestimmt mittels GNA-Berechnung;
R_{GMNA}	bezogener Beulwiderstand, bestimmt mittels GMNA-Berechnung;
R_{GMNIA}	bezogener Beulwiderstand, bestimmt mittels GMNIA-Berechnung (gewöhnlich als R_k);
R_{MNA}	bezogener plastischer Widerstand, bestimmt mittels MNA-Berechnung;
s_{irat}	Verhältnis des i -ten Spannungszustands bei Bestimmung der beherrschenden Spannungskomponente für Beulen;
α	Abminderungsfaktor für elastisches Beulen beim Beulsicherheitsnachweis;
α_G	geometrischer Abminderungsfaktor;
α_I	Abminderungsfaktor für Imperfektion;
α_{SLM}	Abminderungsfaktor für elastisches Beulen eines Segments im LBA-MNA-Verfahren;
α_S	Abminderungsfaktor für elastisches Beulen eines Segments oder eines ganzen Tragwerks;
β	Faktor für plastischen Bereich bei Beulinteraktion;

γ_F	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen und Auswirkungen von Einwirkungen;
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand;
γ_{M0}	Teilsicherheitsbeiwert für den plastischen Widerstand;
γ_{M1}	Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand gegen Stabilitätsverlust (Beulen);
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert für Zugbruchwiderstand, einschließlich Netto-Querschnitt in verschraubten Konstruktionen;
γ_{M4}	Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand gegen zyklisches Plastizieren;
γ_{Mf}	Teilsicherheitsbeiwert für den Ermüdungswiderstand;
γ_{Ff}	Teilsicherheitsbeiwert für Ermüdungslasten und Auswirkungen von Lasten;
Δ	Parameterbereich bei alternierenden oder zyklischen Einwirkungen;
ε_{mps}	zulässiger Höchstwert der tatsächlichen plastischen Von-Mises-Vergleichsdehnung;
ε_p	plastische Dehnung;
$\varepsilon_{p,eq,Ed}$	Gesamtwert der akkumulierten plastischen Von-Mises-Vergleichsdehnung unter zyklischem Plastizieren;
η	Interaktionsexponent für Beulen;
η_0	Wert des Interaktionsexponenten bei $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_0$;
η_p	Wert des Interaktionsexponenten bei $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_p$;
$\bar{\lambda}$	bezogener Schlankheitsgrad einer Schale;
$\bar{\lambda}_s$	gesamter bezogener Schlankheitsgrad einer ganzen Schale oder Schalenbaugruppe (mehrere Segmente);
$\bar{\lambda}_{sLM}$	bezogener Schlankheitsgrad eines Schalensegments im LBA-MNA-Verfahren;
$\bar{\lambda}_0$	vollplastischer Grenzsclankheitsgrad (Wert von $\bar{\lambda}$, oberhalb dessen der Widerstand aufgrund von Instabilität oder Änderung der Geometrie gemindert wird);
$\bar{\lambda}_p$	teilplastischer Grenzsclankheitsgrad (Wert von $\bar{\lambda}$, unterhalb dessen die Plastizität die Stabilität beeinflusst);
μ	Verfestigungsexponent für Beulen;
μ_0	Wert des Verfestigungsexponenten bei $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_0$;
μ_h	Wert des Verfestigungsexponenten bei $\bar{\lambda} = 0$;
ψ	Lastkombinationsfaktor;
ω	erster bezogener Längenparameter für eine Zylinderschale;
ω_s	oberer Grenzwert der bezogenen Länge für kurze Zylinderschalen unter Außendruck;
Ω	zweiter bezogener Längenparameter für eine Zylinderschale;
ξ	dritter bezogener Längenparameter für eine Zylinderschale;
χ	Beul-Abminderungsfaktor einschließlich elastisch-plastischer Auswirkungen beim Beulsicherheitsnachweis;
χ_h	Beul-Abminderungsfaktor in der Verfestigungszone bei $\bar{\lambda} = 0$;

χ_s Beul-Abminderungsfaktor einer ganzen Schale einschließlich elastisch-plastischer Auswirkungen in einer Schalenbaugruppe.

3.2.12 Indizes

E	Spannungs- oder Verschiebungswert (infolge Bemessungseinwirkungen);
F	Einwirkungen;
M	Baustoff/Material;
R	Widerstand;
cr	idealer Beulwert (siehe 3.1.7.4);
d	Bemessungswert;
eq	Von-Mises-Vergleichswert;
f	Ermüdung;
int	innen;
k	charakteristischer Wert;
max	Höchstwert;
min	Mindestwert;
nom	Nennwert;
pl	plastischer Wert;
plf	Wert für plastisches Versagen (LS1);
s	für eine ganze Schale, potenziell mit mehreren Segmenten, die eine Schalenbaugruppe bilden;
u	Tragfähigkeit;
y	Fließen.

Weitere Symbole werden bei erstmaligem Auftreten definiert.

3.3 Vorzeichenvereinbarungen

(1) Nach außen gerichtet positiv: Innendruck positiv, Verschiebung nach außen positiv, mit der in (5) angegebenen Ausnahme.

(2) Zugspannungen positiv, mit der in (5) angegebenen Ausnahme.

ANMERKUNG Druck wird in EN 1993-1-1 als positiv betrachtet.

(3) Schubspannungen positiv wie in Bild 3.2 und Bild D.1 dargestellt.

ANMERKUNG Obwohl sich die Richtungen der direkten Spannungseinwirkungen in Bild 3.2 und Bild D.1 unterscheiden, bleibt die Richtung der Schubbeanspruchung in der Ebene unverändert.

(4) Biegemomente werden als positiv definiert, wenn sie Zugspannungen in der Außenfläche der Schale verursachen.

(5) Zur Vereinfachung werden in Abschnitt 9 sowie in Anhang D und Anhang E Druckspannungen als positiv betrachtet. In diesen Fällen werden sowohl Außendrucke als auch Innendrucke, wenn sie auftreten, als positiv betrachtet, obwohl die Notationen p und q zur Kennzeichnung der Richtung verwendet werden.

4 Grundlagen der Bemessung

4.1 Allgemeine Regeln

4.1.1 Grundlegende Anforderungen

(1) Die Bemessung von Schalenkonstruktionen muss den allgemeinen Regeln nach EN 1990 und EN 1991 (alle Teile) sowie den jeweiligen in den anderen einschlägigen Teilen von EN 1993-1 (alle Teile) angegebenen Bemessungsvorschriften für Stahltragwerke entsprechen.

(2) Nach diesem Dokument bemessene Stahltragwerke müssen in Übereinstimmung mit EN 1090-2 unter Verwendung von Baustoffen und -produkten entsprechend den Festlegungen nach den einschlägigen Teilen von EN 1993 oder den maßgebenden Baustoff- und Produktspezifikationen ausgeführt werden.

(3) Diese Norm ist vorgesehen zur Anwendung in Zusammenhang mit EN 1993-1-1, EN 1993-1-2, EN 1993-1-3, EN 1993-1-4, EN 1993-1-7, EN 1993-1-9, EN 1993-1-14⁴ sowie mit den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993, diese sind u. a.:

- Teil 3 für Türme, Maste und Schornsteine;
- Teil 4-1 für Silos;
- Teil 4-2 für Tankbauwerke;
- Teil 5 für Pfähle.

4.1.2 Besondere Anforderungen

(1) Die Schale sollte so bemessen werden, dass sie alle Einwirkungen aufnimmt und die folgenden Anforderungen erfüllt:

- Gesamtgleichgewicht;
- Gleichgewicht zwischen Einwirkungen und inneren Schnittgrößen, siehe Abschnitt 7 und Abschnitt 9;
- Begrenzung von Rissen infolge zyklischen Plastizierens, siehe Abschnitt 8;
- Begrenzung von Rissen infolge Ermüdung, siehe Abschnitt 10.

(2) Die Bemessung der Schale sollte die Gebrauchstauglichkeitsanforderungen entsprechend ihrem vorgesehenen Verwendungszweck und in Übereinstimmung mit den zutreffenden Anwendungsnormen (EN 1993-4-1 und EN 1993-4-2) erfüllen.

(3) Die Schale darf anhand versuchsgestützter Bemessung dimensioniert werden. Die Anforderungen sind in der zutreffenden Anwendungsnorm (EN 1993, Teil 3, Teil 4-1 und Teil 4-2) festgelegt.

(4) Alle Einwirkungen sollten mit ihren Bemessungswerten nach EN 1990, EN 1991 (alle Teile) sowie EN 1993-4-1 und EN 1993-4-2 eingeführt werden, sofern zutreffend.

4 In Vorbereitung.

4.2 Berechnungskonzepte

4.2.1 Allgemeines

(1) In Abhängigkeit vom Grenzzustand und von anderen Überlegungen sollte(n) eines oder mehrere der folgenden Berechnungskonzepte angewendet werden:

- globale Berechnung, siehe 4.2.2;
- membrantheoretische Berechnung, siehe 4.2.3;
- semi-membrantheoretische Berechnung, siehe 4.2.4;
- lineare elastische Berechnung (LA), siehe 4.2.5;
- lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA), siehe 4.2.6;
- geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA), siehe 4.2.7;
- materiell nichtlineare Berechnung (MNA), siehe 4.2.8;
- geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA), siehe 4.2.9;
- geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA), siehe 4.2.10;
- geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung Imperfektionen (GMNIA), siehe 4.2.11.

4.2.2 Globale Berechnung

(1) In einer globalen Berechnung dürfen einzelne Teiltragwerke mit einer Zylinder-, Kegel-, Kugel- oder anderen Tragwerksform vereinfacht behandelt werden, sofern die Verbindungen zwischen verschiedenen Teilen angemessen modelliert werden.

4.2.3 Membrantheoretische Berechnung

(1) Eine membrantheoretische Berechnung darf angewendet werden, sofern die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- die Randbedingungen sind geeignet, um die Spannungen in der Schale ohne unzulässige Biegeauswirkungen in Auflagerreaktionen zu überführen;
- die Schalengeometrie ist stetig veränderlich in der Form (ohne Inhomogenitäten);
- die Lasten sind stetig verteilt (ohne örtlich konzentrierte oder punktförmige Lasten).

(2) Eine membrantheoretische Berechnung erfüllt nicht die Anforderungen bezüglich Verformungskompatibilität an Rändern oder zwischen Schalensegmenten unterschiedlicher Form oder zwischen unterschiedlich belasteten Schalensegmenten. Die ermittelten Membranschnittkräfte erfüllen jedoch die Anforderungen in Bezug auf das Gleichgewicht der Primärspannungen (nützlich für LS1).

ANMERKUNG Eine membrantheoretische Berechnung unter Verwendung einer Reihe von Harmonischen kann nützlich sein bei stetig veränderlichen asymmetrischen Lasten (bis einschließlich $\cos 4\theta$), wobei axiale Randverschiebungen nicht berücksichtigt werden (siehe z. B. prEN 1991-1-4:—, C.4.4).

4.2.4 Semi-membrantheoretische Berechnung

(1) Eine semi-membrantheoretische Berechnung darf angewendet werden, wenn eine lange Zylinderschale einer in Umfangsrichtung veränderlichen Last ausgesetzt ist, wobei die Änderungsgeschwindigkeit einen einzelnen vollständigen Kosinus um den Umfang übersteigt (d. h. $\cos \theta$ oder „Harmonische 1“), sowie axialen Verschiebungen an einem Rand (z. B. Windlast mit periodischen Verankerungen oder diskret aufgelagerten Schalen) unterliegt.

4.2.5 Lineare elastische Berechnung (LA)

(1) Die Linearität der Theorie folgt aus den Annahmen eines linear-elastischen Werkstoffgesetzes und der Theorie kleiner Verformungen. Die Theorie kleiner Verformungen impliziert, dass die angenommene Geometrie identisch mit derjenigen des unverformten Tragwerks bleibt. Sie erfüllt sowohl die Bedingungen der Verformungskompatibilität als auch des Gleichgewichts. Die ermittelten Membran- und Biegespannungen erfüllen die Anforderungen bezüglich Primär- und Sekundärspannungen (nützlich für LS1, LS2, LS3 und LS4).

(2) Diese Berechnung erfolgt gewöhnlich rechnergestützt, in begrenzten Fällen dürfen jedoch auch algebraische Gleichungen verwendet werden (siehe Anhang C).

(3) Bei Durchführung einer rechnergestützten Berechnung sollten die Modellierungs-, Netz-, Validierungs- und Nachweiskriterien nach EN 1993-1-14 erfüllt werden.

4.2.6 Lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA)

(1) Die Bedingungen nach 4.2.5 bezüglich der Annahmen zu Baustoff und Geometrie werden erfüllt. Unter der Annahme unveränderter Geometrie und Lasteinwirkungsrichtung sowie keiner Baustoffzersetzung liefert diese lineare Verzweigungsberechnung jedoch den kleinsten Eigenwert, bei dem die Schale in einen anderen Verformungszustand beulen kann. Imperfektionen aller Art werden vernachlässigt. Diese Berechnung ergibt den elastischen idealen Referenzbeulwiderstand R_{cr} (siehe 9.6, 9.7 und 9.8; nützlich für LS3), der als Lasterhöhungsfaktor R_{cr} für den Bemessungswert der Lasten F_{Ed} angesehen werden kann.

(2) Diese Berechnung erfolgt gewöhnlich rechnergestützt, in begrenzten Fällen dürfen jedoch auch algebraische Lösungen verwendet werden (siehe Anhang D und Anhang E).

(3) Bei Durchführung einer rechnergestützten Berechnung sollten die Modellierungs-, Netz-, Validierungs- und Nachweiskriterien nach EN 1993-1-14 erfüllt werden.

(4) Diese ideale elastische Beanspruchung einer perfekten Schale sollte stets bestimmt werden, wenn der Grenzzustand LS3 mittels GMNIA-Berechnung nachgewiesen wird (siehe 9.8).

(5) Wird diese Berechnung als Grundlage für ein LBA-MNA-Bemessungsverfahren verwendet, sollten mehrere Eigenwerte (nicht nur der kleinste Eigenwert) und deren zugehörige Eigenformen betrachtet werden, um sicherzustellen, dass die Eigenform ermittelt wird, deren Imperfektionsempfindlichkeit zur niedrigsten Vorhersage des elastischen Beulens führen kann (siehe 9.7).

ANMERKUNG Die Imperfektionsempfindlichkeit der Schale ist abhängig von der Größe und Form der potenziellen Beulform, so dass mit einem geringeren Eigenwert, der einer unempfindlichen Form entspricht, die Form dem geringsten Beulwiderstand der imperfekten Schale nicht ermittelt werden kann.

4.2.7 Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA)

(1) Eine GNA-Berechnung erfüllt sowohl die Bedingungen des Gleichgewichts als auch der Verformungskompatibilität, und zwar unter Einbeziehung der Änderung der Tragwerksgeometrie infolge Beanspruchung. Das ermittelte Spannungsfeld entspricht der Definition von Primär- und

Sekundärspannungen (nützlich für LS2 und LS4). Die Durchführung erfolgt gewöhnlich als rechnergestützte Berechnung.

(2) Wenn Membrandruck- oder -schubspannungen in einigen Teilen der Schale überwiegen, liefert eine GNA-Berechnung die elastische Beullast des perfekten Tragwerks, einschließlich Änderungen der Geometrie, die beim Grenzzustandsnachweis LS3 hilfreich sein kann (siehe 9.8).

(3) Wird diese Berechnung für eine Beullastbewertung verwendet, müssen die Eigenwerte des Systems über den gesamten Lastpfad überprüft werden, um sicherzustellen, dass der numerische Prozess tatsächlich eine Verzweigung im Lastpfad erkennt.

(4) Die Modellierungs-, Netz-, Validierungs- und Nachweiskriterien nach EN 1993-1-14 sollten erfüllt werden.

4.2.8 Materiell nichtlineare Berechnung (MNA)

(1) Das Ergebnis einer MNA-Berechnung ist der Bezugswert der plastischen Grenzlasterhöhungsfaktor R_{pl} zum Bemessungswert der Lasten F_{Ed} formuliert werden kann. Diese Berechnung liefert den in 9.6, 9.7 und 9.8 verwendeten bezogenen plastischen Referenzwiderstand R_{pl} .

(2) Diese Berechnung darf mittels rechnergestützter Berechnung oder algebraischer Gleichungen erfolgen (siehe Anhang B).

(3) Bei Durchführung einer rechnergestützten Berechnung sollten die Modellierungs-, Netz-, Validierungs- und Nachweiskriterien nach EN 1993-1-14 erfüllt werden.

(4) Eine MNA-Berechnung darf für den Nachweis des Grenzzustands LS1 verwendet werden.

(5) Eine MNA-Berechnung darf durchgeführt werden, um das plastische Dehnungssinkrement $\Delta\epsilon_p$ während eines Lastspiels zyklischer Belastung zu ermitteln, welches für den Nachweis des Grenzzustands LS2 verwendet werden darf.

(6) Diese plastische Grenzlasterhöhungsfaktor einer perfekten Schale sollte stets bestimmt werden, wenn der Grenzzustand LS3 mittels GMNA-Berechnung nachgewiesen wird (siehe 9.8).

4.2.9 Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)

(1) Entsprechend 4.2.7 ist das Ergebnis einer GMNA-Berechnung die geometrisch nichtlineare plastische Versagenslast des perfekten Tragwerks und das plastische Dehnungssinkrement, welche für den Nachweis der Grenzzustände LS1 und LS2 verwendet werden können. Die Durchführung erfolgt ausschließlich als rechnergestützte Berechnung.

ANMERKUNG Liegt weder Fließen noch Plastizieren vor, liefert eine GMNA-Berechnung dasselbe Ergebnis wie eine GNA-Berechnung.

(2) Wenn Druck- oder Schubspannungen in einigen Teilen der Schale überwiegen, liefert eine GMNA-Berechnung die elastisch-plastische Beullast des perfekten Tragwerks. Diese perfekte Schalenbeullast sollte stets bestimmt werden, wenn der Grenzzustand LS3 mittels GMNA-Berechnung nachgewiesen wird (siehe 9.8).

(3) Wird diese Berechnung für eine Beullastbewertung verwendet, sollten die Eigenwerte des Systems überprüft werden, um sicherzustellen, dass der numerische Prozess tatsächlich eine Verzweigung im Lastpfad erkennt.

(4) Die Modellierungs-, Netz-, Validierungs- und Nachweiskriterien nach EN 1993-1-14 sollten erfüllt werden.

4.2.10 Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)

(1) Eine GNIA-Berechnung wird in Fällen verwendet, in denen Druck- oder Schubspannungen in der Schale überwiegen. Sie liefert elastische Beullasten des imperfekten Tragwerks, welche für den Nachweis der Grenzzustände LS3 und LS4 nützlich sein können (siehe 9.8). Dabei handelt es sich ausschließlich um eine rechnergestützte Berechnung.

(2) Wird diese Berechnung für eine Beullastbewertung (LS3) verwendet, sollten die Eigenwerte des Systems überprüft werden, um sicherzustellen, dass der numerische Prozess tatsächlich eine Verzweigung im Lastpfad erkennt. Es muss sichergestellt werden, dass die Lokalspannungen keine Werte überschreiten, bei denen die Nichtlinearität von Baustoff das Verhalten beeinflussen kann.

ANMERKUNG 1 Die GNIA-Berechnung ist häufig nützlich bei sehr dünnwandigen Schalen, bei denen Plastizieren unbedeutend für den Grenzzustand der Tragfähigkeit ist.

ANMERKUNG 2 Ergibt eine GNIA-Berechnung einen Beulwiderstand, der dem Ergebnis einer GNA-Berechnung sehr ähnlich ist, dann ist das Tragwerk unempfindlich gegenüber der bei der GNIA-Berechnung modellierten Imperfektion.

(3) Die Modellierungs-, Netz-, Validierungs- und Nachweiskriterien nach EN 1993-1-14 sollten erfüllt werden, aber die Imperfektionen sollten nach diesem Dokument definiert werden.

4.2.11 Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)

(1) Eine GMNIA-Berechnung wird in Fällen verwendet, in denen Druck- oder Schubspannungen in der Schale überwiegen. Sie liefert elastisch-plastische Beullasten für das imperfekte Tragwerk, welche für den Nachweis des Grenzzustands LS3 verwendet werden dürfen (siehe 9.8). Dabei handelt es sich ausschließlich um eine rechnergestützte Berechnung.

(2) Wird diese Berechnung für eine Beullastbewertung verwendet, sollten die Eigenwerte des Systems überprüft werden, um sicherzustellen, dass der numerische Prozess tatsächlich eine Verzweigung im Lastpfad erkennt.

(3) Wird diese Berechnung für eine Beullastbewertung verwendet, sollten zusätzlich stets auch LBA-, MNA- und GMNA-Berechnungen der perfekten Schale durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass der Schlankheitsgrad ordnungsgemäß erkannt wird und der Grad der Imperfektionsempfindlichkeit des Tragsystems ermittelt wird.

ANMERKUNG Darüber hinaus ist die Durchführung einer zusätzlichen GNA-Berechnung zwar nicht erforderlich, aber wünschenswert, um das Höchstmaß an Erkenntnissen bezüglich des Tragwerksverhaltens unter nichtlinearen Bedingungen zu erzielen.

(4) Die Modellierungs-, Netz-, Validierungs- und Nachweiskriterien nach EN 1993-1-14 sollten erfüllt werden, aber die Imperfektionen sollten nach diesem Dokument definiert werden.

4.3 Schalenrandbedingungen

(1) Die für die Bemessungsberechnung angenommenen Randbedingungen sollten so gewählt werden, dass das Erzielen eines realistischen oder konservativen Modells der tatsächlichen Konstruktion sichergestellt ist. Besondere Beachtung sollte nicht nur der Behinderung von Verschiebungen rechtwinklig zur Schalenwandung (Durchbiegungen) gewidmet werden, sondern auch dem Vorliegen einer angemessenen Behinderung von Verschiebungen in der Ebene der Schalenwandung (in Meridian- und in Umfangsrichtung), da diese Verschiebungen signifikante Auswirkungen auf die Festigkeit und den Beulwiderstand der Schale haben können.

ANMERKUNG Der Beulwiderstand einer Schale ist häufig empfindlich gegenüber geringfügigen Schwankungen der Randbedingungen, wodurch die Modellierung realistischer Randbedingungen kritischer ist als bei einer einfachen Lastverformungsberechnung. Auf Membranverschiebungen in der Schale bezogene Randbedingungen haben häufig einen wesentlichen Einfluss auf Beulwiderstände.

(2) In Schalenbeulberechnungen (Eigenwertberechnungen) (Grenzzustand LS3) sollte sich die Definition der Randbedingungen auf die schrittweisen Verschiebungen während des Beulprozesses beziehen statt auf Gesamtverschiebungen, die vor dem Beulen von den aufgetragenen Einwirkungen erzeugt wurden.

(3) Bei den Randbedingungen an einem durchgehend aufgelagerten unteren Rand einer Schale sollte berücksichtigt werden, ob örtliches Anheben der Schale vollständig verhindert wird oder nicht.

(4) Die Verdrehung des Schalenrandes β_ϕ sollte insbesondere in kurzen Schalen sowie bei der Berechnung von Sekundärspannungen in längeren Schalen (entsprechend den Grenzzuständen LS2 und LS4) berücksichtigt werden.

(5) Die in 6.2.2.2 beschriebenen Randbedingungen sollten für rechnergestützte Berechnungen sowie bei der Auswahl von Gleichungen aus Anhang A bis Anhang E verwendet werden.

(6) Die tragenden Verbindungen zwischen Schalensegmenten an einer Knotenlinie sollten so beschaffen sein, dass die Übereinstimmung mit den für die Bemessung der einzelnen Schalensegmente angenommenen Randbedingungen sichergestellt ist.

4.4 Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten

(1) Werden Tragwerkeigenschaften durch Prüfung bestimmt, sollten die Anforderungen und Verfahren nach EN 1990 angewendet werden.

(2) Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mi} für verschiedene Grenzzustände sollten Tabelle 4.1 entnommen werden.

Tabelle 4.1 — Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand

Widerstand gegen Versagensart	Maßgebender Wert von γ
Widerstand geschweißter oder verschraubter Schalenwandung bezüglich Grenzzustand des plastischen Versagens	γ_{M0}
Widerstand der Schale gegen Stabilitätsverlust	γ_{M1}
Bruchwiderstand geschweißter oder verschraubter Schalenwandung	γ_{M2}
Widerstand der Schale gegen zyklisches Plastizieren	γ_{M4}
Ermüdungswiderstand der Schale	γ_{Ff}

(3) Die numerischen Werte nach Tabelle 4.2 werden für Schalenkonstruktionen empfohlen, die nicht Gegenstand der Bestimmungen nach EN 1993-4-1 oder EN 1993-4-2 sind.

Tabelle 4.2 (NDP) — Numerische Werte für Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand von Schalenkonstruktionen außerhalb des Anwendungsbereichs von EN 1993-3, EN 1993-4-1 und EN 1993-4-2

$\gamma_{M0} = 1,00$	$\gamma_{M1} = 1,10$	$\gamma_{M2} = 1,25$
$\gamma_{M4} = 1,00$		siehe EN 1993-1-9

ANMERKUNG 1 Die Werte der Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mi} sind in Tabelle 4.2 (NDP) angegeben, sofern der Nationale Anhang keine abweichenden Werte angibt.

ANMERKUNG 2 Bei der Verwendung einer Zuverlässigkeitsberechnung zur Bestimmung des geeigneten Teilsicherheitsbeiwertes für Schalenbeulen γ_{M1} hat sich eine starke Abhängigkeit von der Tragwerksform, dem Schlankheitsgrad der Schale, dem Lastfall und der Beulform gezeigt, da die Imperfektionsempfindlichkeit und die daraus resultierende Variabilität des Beulwiderstands erheblich mit diesen Faktoren schwanken. In Ermangelung zuverlässiger, für die praktische Konstruktion maßgebender Daten entschied sich das Entwurfskomitee für die Beibehaltung des bereits früher zugelassenen Wertes von γ_{M1} .

5 Baustoffe und Geometrie

5.1 Baustoffeigenschaften

(1) Die maßgebenden Baustoffeigenschaften von Kohlenstoffstählen sollten der einschlägigen Anwendungsnorm entnommen werden.

(2) Zu den mechanischen Eigenschaften der Kohlenstoffbaustähle S235, S275, S355, S420 und S460 sowie für wetterfeste Baustähle S235, S275 und S355 siehe EN 1993-1-1, mit der in (3) festgelegten Ausnahme.

(3) Für alle durch dieses Dokument abgedeckten Stahlsorten sollte der Bemessungswert der Poissonzahl als $\nu = 0,3$ angesetzt werden. Der charakteristische Wert des Elastizitätsmoduls für Baustahl sollte als $E = 200\,000\text{ N/mm}^2$ in Übereinstimmung mit dem in EN 1993-1-14 für Stabilitätsberechnungen definierten Wert angesetzt werden.

ANMERKUNG Die meisten Bemessungsregeln in diesem Dokument wurden aus GMNIA-Berechnungen und nicht aus Versuchen abgeleitet. Der in EN 1993-1-14 definierte Wert des Elastizitätsmoduls stellt eine sichere Wahl dar, wenn es erforderlich ist, den elastischen Beulwiderstand zu definieren, welcher der für die meisten dünnwandigen Schalen maßgebende Widerstand ist. Dieser Wert ist niedriger als der in EN 1993-1-1 angegebene Wert, bei dem die Gebrauchstauglichkeit im Vordergrund steht. Die Diskrepanz zwischen diesen beiden Werten ist unerheblich, da der hier verwendete Wert eine konservative Wahl ist. Dieselbe Wahl ist auch für nichtrostende Stähle maßgebend.

(4) Für durch dieses Dokument abgedeckte nichtrostende Stähle sollte der charakteristische Wert des Elastizitätsmoduls als $E = 191\,000\text{ N/mm}^2$ in Übereinstimmung mit dem in EN 1993-1-14 für Stabilitätsberechnungen definierten Wert angesetzt werden.

(5) Weitere maßgebende Baustoffeigenschaften von nichtrostenden Stählen sollten EN 1993-1-4 entnommen werden.

(6) Für eine rechnergestützte Berechnung mit Baustoffen mit nichtlinearem Spannungs-Dehnungs-Verhältnis sollte die 0,2 %-Dehngrenze in allen maßgebenden Gleichungen als Fließspannung f_y verwendet werden. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve sollte entsprechend den Anforderungen nach prEN 1993-1-14:—, 5.3, modelliert werden.

(7) Wenn ein Baustoff mit nichtlinearer Spannungs-Dehnungs-Kurve eingesetzt und ein spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis (siehe 9.5) geführt wird und die speziellen Bestimmungen für nichtrostenden Stahl nicht gelten, sollte der Anfangstangentenwert des Elastizitätsmoduls E durch einen abgeminderten Wert E_{red} ersetzt werden. Steht kein besseres Verfahren zur Verfügung, sollte der lineare elastische Spannungszustand untersucht werden. Der Spitzenwert der Von-Mises-Vergleichsspannung, der sich allein aus den Membranspannungskomponenten ergibt, sollte an jedem Punkt des Tragwerks ermittelt werden, der weiter als x_e von einem Rand entfernt ist. Der Tangentenmodul (aus einem Zugversuch), der dieser Spannung entspricht, sollte dann als E_{red} angesetzt werden, um den Elastizitätsmodul E zu ersetzen und so einen Schätzwert der quasi-elastischen idealen Last bzw. der quasi-elastischen idealen Spannung zu erhalten.

(8) Der Ausschlussabstand x_e darf mit dem in D.4.3 definierten Randzonenabstand ℓ_R gleichgesetzt werden.

(9) Die Bestimmungen dieser Norm sind maßgebend für Baustoffeigenschaften bei Temperaturen bis einschließlich 100 °C, mit der in (10) festgelegten Ausnahme.

(10) Die Variation der Eigenschaften von Stählen bei Temperaturen über 100 °C ist in EN 1993-1-2 angegeben. Wenn diese übernommen werden, darf die reduzierte Fließspannung konservativ als die darin definierte temperaturabhängige Proportionalitätsgrenze $f_{p,0}$ angesetzt werden. Die mechanischen Eigenschaften von Stahlsorten, die nicht in EN 1993-1-2 aufgeführt sind, sollten auf zuverlässigen Informationen beruhen.

(11) Hochfeste Stähle, wie sie in EN 1993-1-12 definiert sind, sollten nur mit einer GMNA- oder GMNIA-Berechnung für den Nachweis von LS1, LS2 und LS3 verwendet werden.

5.2 Bemessungswerte geometrischer Daten

(1) Die Wanddicke t der Schale sollte wie in der einschlägigen Anwendungsnorm festgelegt angesetzt werden. Falls keine Anwendungsnorm maßgebend ist, sollte die Nennwanddicke, abzüglich des vorgeschriebenen Korrosionsabschlags und unter Vernachlässigung jeglicher Beschichtungen, verwendet werden.

(2) Die Dickenbereiche, innerhalb derer die Regeln dieser Norm angewendet werden dürfen, sind in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 festgelegt.

(3) Als Referenzfläche für Lasten sollte die Schalenmittelfläche verwendet werden.

(4) Als einfacher Radius r sollte der rechtwinklig zur Rotationsachse gemessene Nennradius der Schalenmittelfläche verwendet werden.

ANMERKUNG Bei allen Schalen, die nicht einfach zylindrisch sind, verändert sich dieser Radius mit der Lage auf der Achse.

(5) Die Regeln dieser Norm für den Beulsicherheitsnachweis sollten nicht außerhalb der Gültigkeitsbereiche für das Verhältnis r/t nach 1.1 (12) oder, wenn engere Grenzen gelten, nach Abschnitt 9, Abschnitt 10, Anhang D bzw. Anhang E oder nach den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 angewendet werden.

5.3 Geometrische Toleranzen und geometrische Imperfektionen

(1) Toleranzwerte für die Abweichungen der Schalengeometrie von den Nennwerten sind in der Ausführungsnorm EN 1090-2 angegeben. Maßgebende Kategorien für die Bemessung von Schalen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit bezüglich Beulen (LS3) (siehe 9.4) sind wie folgt:

— örtliche Vorbeulen (örtliche senkrechte Abweichungen von der Nennmittelfläche der Schale);

- Unrundheit (Abweichung von der Kreisform);
- Exzentrizitäten (Abweichungen von der Stetigkeit der Schalenmittelfläche an Knotenlinien zwischen Blechen, rechtwinklig zur Schale);
- Abweichungen des Bodens einer Schale vom vollständigen Kontakt mit dem Auflager.

ANMERKUNG Die Ausführungsanforderungen sind in EN 1090-2 festgelegt, an dieser Stelle wird jedoch im Hinblick auf die kritische Beziehung zwischen der Form des Toleranzmaßes, der zugehörigen Amplitude und dem zu bewertenden Beulwiderstand einer Schale eine eingehendere Beschreibung dieser Toleranzen gegeben. Die hier festgelegten beulrelevanten Toleranzen können von den in EN 1090-2 festgelegten Werten abweichen.

(2) Wenn der Grenzzustand des Beulens (LS3, wie in 6.3.3 beschrieben) einer der zu betrachtenden Grenzzustände der Tragfähigkeit ist, sollten beulrelevante geometrische Toleranzen genau eingehalten werden, um die geometrischen Imperfektionen innerhalb festgelegter Grenzen zu halten. Diese beulrelevanten Toleranzen und die Bedingungen, für die sie maßgebend sind, sind in Abschnitt 9 oder in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 angegeben und quantifiziert.

(3) Rechenwerte für die Abweichungen der Schalengeometrie von der Nenngeometrie, wie sie als Annahmen für geometrische Imperfektionen (Imperfektionen der gesamten Schale oder örtliche Imperfektionen) für den Beulsicherheitsnachweis mittels rechnergestützter GMNIA-Berechnung erforderlich sind, sollten aus den festgelegten geometrischen Toleranzen abgeleitet werden (siehe 9.4). Maßgebende Regeln sind in 9.8 oder in einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 angegeben.

(4) Wenn der Grenzzustand der Ermüdung (LS4, wie in 6.3.4 beschrieben) einer der zu betrachtenden Grenzzustände der Tragfähigkeit ist, sollte eine angemessene Wahl der beulrelevanten geometrischen Toleranzen als aufgebrachte Imperfektionen in Betracht gezogen werden, die möglicherweise das Ermüdungsversagen an einer bestimmten Stelle verschlimmern können (siehe 9.4).

6 Ermittlung der Schnittgrößen

6.1 Bemessungskonzepte

6.1.1 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis

6.1.1.1 Allgemeines

(1) Wenn der Ansatz des spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweises angewendet wird, sollten die Grenzzustände anhand der drei Spannungskategorien Primär-, Sekundär- und Lokalspannungen beurteilt werden. Die Kategorisierung erfolgt im Allgemeinen auf der Grundlage der Von-Mises-Vergleichsspannung an einem Punkt, allerdings können Beulspannungen mit diesem Wert nicht zuverlässig beurteilt werden.

6.1.1.2 Primärspannungen

(1) Die Primärspannungen sollten als das Spannungssystem angesetzt werden, das für das Gleichgewicht mit den aufgebrachten Beanspruchungen erforderlich ist. Sie dürfen aus jedem realistischen, statisch zulässigen bestimmten System berechnet werden. Der Grenzzustand des plastischen Versagens (LS1) sollte als erreicht betrachtet werden, wenn die Primärspannung an einer ausreichenden Anzahl von Punkten durch die gesamte Wanddicke die Streckgrenze erreicht hat, so dass nur die Kaltverfestigungsreserve oder eine Änderung der Geometrie zu einer Erhöhung des Tragwerkswiderstands führen würde.

(2) Die Berechnung von Primärspannungen sollte auf einem System von Schnittgrößen beruhen, das den Gleichgewichtsanforderungen des Tragwerks entspricht. Dabei dürfen auch die Vorteile der Plastizitätstheorie genutzt werden. Da die lineare elastische Berechnung die Gleichgewichtsanforderungen erfüllt, dürfen deren Vorhersagen alternativ auch als konservative Darstellung des Grenzzustands des

plastischen Versagens (LS1) angewendet werden. Jedes der in 4.2.3, 4.2.5 und 6.2.3 angegebenen Berechnungsverfahren darf angewendet werden.

(3) Da eine Bemessung nach Grenzzuständen für LS1 vollständiges Plastizieren des Querschnitts zulässt, dürfen die Primärspannungen infolge Biegemomenten anhand des plastischen Widerstandsmomentes berechnet werden, siehe 7.2.1. Falls Interaktion zwischen Schnittgrößen im Querschnitt auftritt, dürfen Interaktionsregeln auf der Grundlage der Fließbedingung nach Ilyushin angewendet werden.

(4) Die Primärspannungen sollten auf den Bemessungswert der Streckgrenze begrenzt werden, siehe Abschnitt 7 (LS1).

6.1.1.3 Sekundärspannungen

(1) In statisch unbestimmten Tragwerken sollten die durch innere Kompatibilität und Kompatibilität mit den Randbedingungen verursachten Sekundärspannungen berücksichtigt werden, welche infolge aufgebrachtter Lasten oder Verschiebungen (Temperatur, Vorspannung, Setzung, Schrumpfung) entstehen.

ANMERKUNG Bei Annäherung an die Von-Mises-Fließbedingung steigen die lokalen Dehnungen im Tragwerk ohne weitere Erhöhung des Spannungszustands an.

(2) Wenn zyklische Beanspruchung Plastizieren verursacht und mehrere Lastspiele auftreten, sollte eine mögliche Widerstandsabminderung durch die Sekundärspannungen in Betracht gezogen werden. Tritt bei der Größenordnung der zyklischen Beanspruchung sowohl unter Höchstlast als auch nach Entlastung Fließen auf, sollte ein mögliches Versagen durch zyklisches Plastizieren in Zusammenhang mit den Sekundärspannungen (LS2) in Betracht gezogen werden.

(3) Wenn zur Spannungsberechnung eine lineare elastische Berechnung durchgeführt wird, die allen maßgebenden Kompatibilitätsbedingungen Rechnung trägt (Auswirkungen an Rändern, Knotenlinien, veränderliche Wanddicken, Versatz der Schalenmittelfläche usw.), dürfen die linear durch die Dicke veränderlichen Spannungen als die Summe der Primär- und Sekundärspannungen in einer Beurteilung unter Verwendung der Von-Mises-Fließbedingung angesetzt werden, siehe 7.2.

ANMERKUNG Die Sekundärspannungen werden in einer Bewertung niemals getrennt von den Primärspannungen benötigt.

(4) Die Sekundärspannungen sollten wie folgt begrenzt werden:

- die Summe der zyklischen Änderung der Von-Mises-Vergleichsoberflächenspannung, die sich aus der Summe der der Primär- und Sekundärspannungen (einschließlich Biegespannungen) ergibt, sollte für den Zustand des zyklischen Plastizierens auf $2f_{yd}$ begrenzt werden, siehe Abschnitt 8 (LS2);
- Die Membrankomponente der Summe der Primär- und Sekundärspannungen sollte durch den Bemessungsbeulwiderstand begrenzt werden, siehe Abschnitt 9 (LS3).
- die Summe der zyklischen Änderung des Höchstwertes der Hautoberflächenspannung, die sich aus der Summe der der Primär- und Sekundärspannungen (einschließlich Biegespannungen) ergibt, sollte auf den Nennwert des Ermüdungswiderstands begrenzt werden, siehe Abschnitt 10 (LS4) sowie EN 1993-1-9.

6.1.1.4 Lokalspannungen

(1) Die örtlich stark begrenzten Spannungen in Zusammenhang mit Spannungsspitzen in der Schalenwandung infolge von Kerbwirkungen (Löcher, Schweißnähte, abgestufte Schalenwandungen, Befestigungen, Versteifungsenden, Knotenlinien und Stöße von Schalen) sollten beim Nachweis des Grenzzustands der Ermüdung (LS4) entsprechend den Bestimmungen für korrigierte Nennspannungen nach EN 1993-1-9 berücksichtigt werden.

(2) Für die in EN 1993-1-9 aufgeführten Konstruktionsdetails dürfen dem Ermüdungssicherheitsnachweis die linearen elastischen Nennspannungen (Summe der Primär- und Sekundärspannungen) an der entsprechenden Stelle zugrunde gelegt werden. Für alle anderen Konstruktionsdetails dürfen die Lokalspannungen durch Anwendung von Spannungskonzentrationsfaktoren (Kerbfaktoren) nach EN 1993-1-9 auf die mittels linearer elastischer Berechnung ermittelten Spannungen bestimmt werden.

(3) Die Lokalspannungen sollten entsprechend den Anforderungen bezüglich Ermüdung (LS4) nach Abschnitt 10 und EN 1993-1-9 begrenzt werden.

6.1.2 Bemessung anhand von Standardgleichungen

(1) Bei Anwendung dieses Konzepts dürfen die Grenzzustände mit Standardgleichungen ausgedrückt werden, die entweder aus der Membrantheorie oder aus der Theorie plastischer Mechanismen oder aus der linearen elastischen Berechnung oder der geometrisch und materiell nichtlinearen Berechnung unter ausdrücklicher Einbeziehung von Imperfektionen abgeleitet wurden.

(2) Die in Anhang A angegebenen membrantheoretischen Gleichungen dürfen zur Ermittlung der für die Beurteilung von LS1 und LS3 erforderlichen Primärspannungen verwendet werden.

(3) Die in Anhang B angegebenen plastizitätstheoretischen Gleichungen dürfen zur Ermittlung der für die Beurteilung von LS1 erforderlichen plastischen Referenzwiderstände verwendet werden.

(4) Die in Anhang C angegebenen Gleichungen für die lineare elastische Berechnung dürfen zur Ermittlung der für die Beurteilung von LS2 und LS4 erforderlichen Summen aus Primär- und Sekundärspannungen verwendet werden. Eine Beurteilung von LS3 darf auf den Membrananteilen dieser Gleichungen beruhen.

(5) Die in Anhang D angegebenen Gleichungen dürfen zur direkten Beurteilung des Bemessungsbeulwiderstands von Zylinderschalen unter konstanten Lasten nach LS3 verwendet werden.

(6) Die in Anhang E angegebenen Gleichungen für die Bemessung des Referenzwiderstands dürfen zur direkten Beurteilung des Bemessungsbeulwiderstands bei der Beurteilung von LS3 verwendet werden. Werden die Gleichungen nach Anhang E mit der Imperfektionsamplitude δ_0 gleich null verwendet, darf Anhang E auch zur Beurteilung von LS1 verwendet werden.

6.1.3 Bemessung mittels rechnergestützter Berechnung

(1) Wird rechnergestützte Berechnung eingesetzt, sollte die Beurteilung der Grenzzustände unter Verwendung eines der in 4.2 festgelegten alternativen Berechnungskonzepte (jedoch nicht durch membran- oder semi-membrantheoretische Berechnung) für das gesamte Tragwerk durchgeführt werden.

(2) Eine lineare elastische Berechnung (LA) darf zur Ermittlung von Spannungen oder Schnittgrößen für die Beurteilung von LS2 und LS4 verwendet werden. Die Membrananteile der mittels LA bestimmten Spannungen dürfen für die Beurteilung von LS3 verwendet werden. Die Beurteilung von LS1 darf mittels LA erfolgen, die jedoch lediglich einen angenäherten und sicheren Schätzwert ergibt, und ihre Ergebnisse sollten nach Abschnitt 7 ausgewertet werden.

(3) Eine lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA) darf zur Ermittlung des idealen elastischen Referenzbeulwiderstands des Tragwerks für die Beurteilung von LS3 verwendet werden.

(4) Eine materiell nichtlineare Berechnung (MNA) darf zur Ermittlung des plastischen Referenzwiderstands und dieser darf wiederum für die Beurteilung von LS1 verwendet werden. Unter zyklischem Belastungsverlauf darf eine MNA-Berechnung zur Ermittlung von Änderungen plastischer Dehnungsinkremente für die Beurteilung von LS2 verwendet werden. Der plastische Referenzwiderstand ist auch für die Beurteilung von LS3 erforderlich und darf mit Hilfe einer MNA-Berechnung ermittelt werden.

(5) Geometrisch nichtlineare elastische Berechnungen (GNA und GNIA) umfassen zwar die Berücksichtigung der Tragwerksverformungen, aber ihre Anwendung ohne GMNIA-Berechnung ist in keinem der in Abschnitt 9 festgelegten Bemessungsverfahren zulässig. Zur Ermittlung der elastischen Beullast des perfekten Tragwerks darf eine GNA-Berechnung verwendet werden. Zur Ermittlung der elastischen Beullast des imperfekten Tragwerks darf eine GNIA-Berechnung verwendet werden. Eine GNIA-Berechnung darf bei geeigneter Wahl geometrischer Imperfektionen auch zur Bestimmung der für eine Ermüdungsbeurteilung (LS4) maßgebenden Spannungen verwendet werden.

(6) Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnungen (GMNA und GMNIA) dürfen zur Ermittlung von Versagenslasten des perfekten Tragwerks (GMNA) bzw. des imperfekten Tragwerks (GMNIA) verwendet werden. Die GMNA-Berechnung darf entsprechend 7.3 für die Beurteilung von LS1 verwendet werden. Die GMNIA-Versagenslast darf entsprechend 9.8 unter zusätzlicher Berücksichtigung der Ergebnisse von LBA-, MNA- und GMNA-Berechnungen für die Beurteilung von LS3 verwendet werden. Unter zyklischem Belastungsverlauf dürfen entsprechend 8.3 die Änderungen des plastischen Dehnungsincrements aus einer GMNA-Berechnung für die Beurteilung von LS2 verwendet werden.

6.2 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen

6.2.1 Schnittgrößen in der Schale

(1) Grundsätzlich sollten die acht Schnittgrößen an jedem Punkt der Schalenwandung berechnet und sämtlich bei der Beurteilung der Schale im Hinblick auf jeden Grenzzustand berücksichtigt werden. Jedoch sind die Querschubspannungen τ_{xn} , $\tau_{\theta n}$ in Dickenrichtung infolge der Querschubkräfte q_{xn} , $q_{\theta n}$ in fast allen praktischen Fällen unerheblich im Vergleich zu den anderen Spannungskomponenten, so dass sie gewöhnlich vernachlässigt werden können.

(2) Demzufolge darf für die meisten Zwecke die Bewertung der Grenzzustände nur anhand der sechs Schnittgrößen in der Schalenwandung n_x , n_θ , $n_{x\theta}$, m_x , m_θ , $m_{x\theta}$ erfolgen. Für rotationssymmetrische Tragwerke mit ausschließlich rotationssymmetrischer Beanspruchung und Auflagerung brauchen nur n_x , n_θ , m_x und m_θ verwendet werden.

(3) Bei jeglichen Zweifeln hinsichtlich des Spannungswertes, der in einem beliebigen Grenzzustandsnachweis zu verwenden ist, darf die Von-Mises-Vergleichsspannung an der Schalenoberfläche als sicherer Schätzwert verwendet werden.

6.2.2 Modellierung der Schale für die Berechnung

6.2.2.1 Geometrie

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

(2) Als Krümmungsradius sollte dessen Nennwert verwendet werden. Imperfektionen sollten mit den Ausnahmen nach Abschnitt 9 (LS3, Grenzzustand des Beulens) und Abschnitt 10 (LS4, Grenzzustand der Ermüdung) vernachlässigt werden.

(3) Eine Baugruppe aus Schalensegmenten sollte nicht für die Berechnung in die einzelnen Segmente zerlegt werden, sofern nicht die Randbedingungen jedes Segments so gewählt werden, dass Interaktionen dazwischen konservativ wiedergegeben werden.

(4) Ein Basisring, der für die Übertragung örtlicher Auflagerkräfte in die Schale vorgesehen ist, sollte bei der Beurteilung des Grenzzustands LS3 nicht von der Schale getrennt werden.

(5) Exzentrizitäten und Sprünge in der Schalenmittelfläche sollten im Berechnungsmodell berücksichtigt werden, wenn sie signifikante Biegeauswirkungen infolge der exzentrisch weitergeleiteten Membranschnittkräfte erzeugen.

(6) An Knotenlinien zwischen Schalensegmenten sollten jegliche Exzentrizitäten zwischen den Mittelflächen der Schalensegmente bei der Modellierung berücksichtigt werden.

(7) Ringsteifen sollten als diskrete tragende Einzelbauteile der Schale behandelt werden, sofern nicht ihr Abstand kleiner als $1,5\sqrt{rt}$ ist; in diesem Fall darf ein verschmiertes orthotropes Schalenmodell verwendet werden.

(8) Eine mit diskreten Längssteifen versehene Schale darf als orthotrope gleichförmige Schale behandelt werden, sofern der Abstand der Längssteifen nicht größer als $5\sqrt{rt}$ ist.

ANMERKUNG Zu einer umfassenderen Behandlung von diskreten Längssteifen siehe EN 1993-4-1.

(9) Eine Schale mit (vertikal oder horizontal) profilierter Wandung darf als orthotrope gleichförmige Schale behandelt werden, sofern die vollständige Profilierungswellenlänge kleiner als $0,5\sqrt{rt}$ ist, wobei t die örtliche Blechdicke ist.

ANMERKUNG Zu einer umfassenderen Behandlung von Schalen mit profilierter Wandung siehe EN 1993-4-1.

(10) Eine Öffnung in der Schale darf bei der Modellierung vernachlässigt werden, sofern ihr größtes Maß kleiner als $0,6\sqrt{rt}$ ist.

(11) Die Gesamtstabilität des vollständigen Tragwerks sollte nach Teil 3, Teil 4-1 und Teil 4-2 von EN 1993, sofern zutreffend, nachgewiesen werden.

6.2.2.2 Randbedingungen

(1) Bei den Berechnungen für die Beurteilung von Grenzzuständen in Schalensegmenten sollten die zutreffenden Randbedingungen nach Tabelle 6.1 verwendet werden. Zu den speziellen Bedingungen für Beulberechnungen siehe 9.3.

(2) Verdrehungsbehinderungen an Schalenrändern dürfen bei einer Modellierung für den Grenzzustand LS1 vernachlässigt werden, sollten jedoch bei der Modellierung für die Grenzzustände LS2 und LS4 berücksichtigt werden. Bei kurzen Schalen entsprechend der Klassifizierung nach Anhang D und Anhang E sollten jegliche Verdrehungsbehinderungen an Rändern für den Grenzzustand LS3 berücksichtigt werden.

(3) Auflager-Randbedingungen sollten überprüft werden, um sicherzustellen, dass sie keine übermäßigen Ungleichmäßigkeiten der übertragenen oder eingeleiteten Kräfte verursachen, wenn diese exzentrisch zur Schalenmittelfläche angreifen. Die Bestimmungen der einschlägigen Anwendungsteile von EN 1993 sollten angewendet werden, wenn diese Regel für Silos, Tankbauwerke, Schornsteine und Türme angewendet wird.

(4) Bei rechnergestützter Berechnung sollte die Randbedingung für die senkrechte Verschiebung w auch für die Verschiebung in Umfangsrichtung v angesetzt werden, sofern dies nicht aufgrund besonderer Umstände unangemessen ist.

Tabelle 6.1 — Randbedingungen für Schalensegmente

Rand- bedingung Typ	Einfache Bezeichnung	Verschiebungen	Verschiebungen senkrecht zur Schalen- oberfläche	Verschiebungen in Meridian- oder Axialrichtung	Verdrehung in Meridian- richtung
BC1r	Eingespannter Rand	radial eingespannt meridional eingespannt biegeeingespannt	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_{\phi} = 0$

Rand- bedingung Typ	Einfache Bezeichnung	Verschiebungen	Verschiebungen senkrecht zur Schalen- oberfläche	Verschiebungen in Meridian- oder Axialrichtung	Verdrehung in Meridian- richtung
BC1f		radial eingespannt meridional eingespannt biegegelenkig	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$
BC2r		radial eingespannt meridional verschieblich biegeeingespannt	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} = 0$
BC2f	Gelenkiger Rand	radial eingespannt meridional verschieblich biegegelenkig	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$
BC2s		radial elastisch eingespannt meridional verschieblich biegegelenkig	w elastisch eingespannt durch „starres Bauteil“ oder „Feder“	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$
BC2u		radial eingespannt meridional elastisch eingespannt biegegelenkig	$w = 0$	u elastisch eingespannt durch „starres Auflager“ oder „Feder“	$\beta_{\phi} \neq 0$
BC3r		radial verschieblich meridional verschieblich biegeeingespannt	$w \neq 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} = 0$
BC3f	Freier Rand	radial frei meridional frei biegegelenkig	$w \neq 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$
Die Verschiebung v in Umfangsrichtung steht in engem Zusammenhang mit der Verschiebung w senkrecht zur Oberfläche, daher werden für diese beiden Parameter keine separaten Bedingungen unterschieden. Stattdessen sollten die Werte in der Spalte „Verschiebungen senkrecht zur Schalenoberfläche“ für die Verschiebung v angenommen werden.					
ANMERKUNG Die erforderliche Steifigkeit des Randrings für das Erreichen eines BC2f-Zustands (statt eines erweiterten BC3) unter Außendruck ist in D.5.3.4 definiert.					

6.2.2.3 Einwirkungen und Umgebungseinflüsse

(1) Sämtliche Einwirkungen sollten als in der Schalenmittelfläche einwirkend angenommen werden. Lastexzentrizitäten sollten in Form statisch äquivalenter Kräfte und Momente in der Schalenmittelfläche erfasst werden.

(2) Örtliche Einwirkungen und Teilflächeneinwirkungen sollten nicht durch konstante Vergleichslasten dargestellt werden.

(3) Bei der Modellierung sollten die folgenden Punkte berücksichtigt werden, sofern maßgebend:

- Eigenspannungen oder Verformungen aufgrund des Bauausführungsprozesses;
- örtliche Setzung unter Schalenwandungen;

- örtliche Setzung unter Einzelstützen;
- Gleichmäßigkeit/Ungleichmäßigkeit der Auflagerung des Tragwerks;
- thermische Differenzen zwischen zwei Seiten eines Tragwerks;
- thermische Differenzen zwischen Innen- und Außenoberfläche eines Tragwerks;
- Windauswirkungen an Öffnungen und Durchdringungen;
- Windinteraktionsauswirkungen bei Gruppen von Tragwerken;
- Verbindungen mit anderen Tragwerken;
- Bedingungen während der Errichtung.

ANMERKUNG Durch fortschreitende Bauausführungsprozesse können erhebliche Eigenkräfte entstehen (z. B. bei gewalzten Blechpaketen bei Baustellenausführung).

6.2.3 Berechnungskonzepte

(1) Die Bemessung sollte auf einem oder mehreren der in Tabelle 6.2 angegebenen Berechnungskonzepte beruhen. Die in 4.2 definierten Bedingungen sollten bei der Anwendung jedes Berechnungskonzeptes angewendet werden.

Tabelle 6.2 — Berechnungskonzepte für Schalen

Berechnungskonzept	Schalentheorie	Werkstoffgesetz	Schalen-geometrie
Membrantheorietische Berechnung	Membrangleichgewicht	nicht anwendbar	perfekt
Semi-membrantheorietische Berechnung	lineare Biegebeanspruchung in Umfangsrichtung, Membranschubbeanspruchung und Axialverzerrung	linear	perfekt
Lineare elastische Berechnung (LA)	lineare Biegebeanspruchung und Verzerrung	linear	perfekt
Lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA)	lineare Biegebeanspruchung und Verzerrung	linear	perfekt
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA)	nichtlinear	linear	perfekt
Materiell nichtlineare Berechnung (MNA)	linear	ideal elastisch-plastisch ($E_{sh} < 10^{-3}E$)	perfekt
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)	nichtlinear	nichtlinear	perfekt
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)	nichtlinear	linear	imperfekt

Berechnungskonzept	Schalentheorie	Werkstoffgesetz	Schalen-geometrie
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)	nichtlinear	nichtlinear	imperfekt

6.3 Zu beachtende Grenzzustände der Tragfähigkeit

6.3.1 LS1: Plastisches Versagen

(1) Als Grenzzustand des plastischen Versagens sollte der Zustand angenommen werden, in dem die Fähigkeit des Tragwerks, den darauf aufgetragenen Einwirkungen zu widerstehen, infolge der Plastizität im Baustoff erschöpft ist.

ANMERKUNG Der Widerstand gegen plastisches Versagen weicht vom plastischen Referenzwiderstand ab. Der plastische Referenzwiderstand wird streng genommen als die plastische Versagenslast des perfekten Tragwerks ermittelt, die sich aus einem Mechanismus ergibt, der auf der Theorie kleiner Verformungen unter Verwendung eines idealen elastisch-plastischen Werkstoffgesetzes (MNA) beruht.

(2) Der Grenzzustand des Zugbruchs sollte als der Zustand angesehen werden, in dem die Schalenwandung ein Zugversagen des Brutto-Querschnitts erfährt, das zur Trennung der beiden Teile der Schale führt.

(3) In Abwesenheit von Löchern für Verbindungsmittel darf der Nachweis im Grenzzustand des Zugbruchs als durch den Nachweis des Grenzzustands des plastischen Versagens abgedeckt angenommen werden. Sind jedoch Löcher für Verbindungsmittel vorhanden, sollte ein zusätzlicher Nachweis nach EN 1993-1-1 oder EN 1993-1-8 geführt werden.

(4) Beim Nachweis des Grenzzustands des plastischen Versagens darf plastisches oder teilplastisches Verhalten des Tragwerks angenommen werden (d. h. Überlegungen zur elastischen Kompatibilität dürfen vernachlässigt werden).

ANMERKUNG 1 Da der Grenzzustand des plastischen Versagens eine Veränderung der Geometrie einschließt, kann er auch ein Durchschlagbeulen umfassen, das im elastischen Zustand auftreten kann. Der plastische Referenzwiderstand schließt keine Änderung der Geometrie ein, so dass diese scheinbare Anomalie nicht auftritt.

ANMERKUNG 2 Der Grenzzustand des plastischen Versagens schließt keine Überlegungen bezüglich Verzweigung ein, so dass keine Nachweise zur Verzweigung erforderlich sind, wenn eine GMNA-Berechnung zur Beurteilung des Grenzzustands des plastischen Versagens LS1 verwendet wird.

(5) Beim Nachweis von LS1 sollten alle maßgebenden Lastkombinationen berücksichtigt werden.

(6) Bei der Berechnung der Bemessungsspannungen und -schnittgrößen für den Nachweis von LS1 sollte(n) eines oder mehrere der folgenden Berechnungsverfahren (siehe 4.2) angewendet werden:

- Membrantheorie;
- Gleichungen nach Anhang A und Anhang B;
- lineare elastische Berechnung (LA);
- materiell nichtlineare Berechnung (MNA);
- geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA).

6.3.2 LS2: Zyklisches Plastizieren

(1) Als Grenzzustand des zyklischen Plastizierens sollte der Zustand betrachtet werden, in dem wiederholte Belastungs- und Entlastungszyklen wiederholtes Zug- und Druckfließen an derselben Stelle erzeugen, infolgedessen im Tragwerk wiederholt plastische Arbeit auftritt, was schließlich zu örtlicher Rissbildung infolge Erschöpfung der Kapazität des Baustoffs zur Energieabsorption führt.

ANMERKUNG Die zu diesem Grenzzustand zugehörigen Spannungen entwickeln sich unter einer Kombination aller Einwirkungen und den Kompatibilitätsbedingungen des Tragwerks.

(2) Alle veränderlichen Einwirkungen (wie z. B. Nutzlasten und Temperaturschwankungen), die zu Fließen führen können sowie mit mehr als drei Lastspielen während der Lebensdauer des Tragwerks auftreten könnten, sollten beim Nachweis von LS2 berücksichtigt werden.

(3) Ist die Anzahl der Lastspiele mit zyklischem Plastizieren höher als N_{cp} , sollten die Bestimmungen für LS2 angewendet werden.

ANMERKUNG Der Wert von N_{cp} wird mit $N_{cp} = 20$ angesetzt, sofern der Nationale Anhang keinen abweichenden Wert angibt.

(4) Beim Nachweis dieses Grenzzustands sollte die Kompatibilität der Verformungen unter elastischen oder elastisch-plastischen Bedingungen berücksichtigt werden.

(5) Bei der Berechnung der Bemessungsspannungen und -schnittgrößen für den Nachweis von LS2 sollte(n) eines oder mehrere der folgenden Berechnungsverfahren (siehe 4.2) angewendet werden:

- Gleichungen nach Anhang C;
- elastische Berechnung (LA oder GNA);
- MNA oder GMNA zur Bestimmung der plastischen Dehnungsschwingbreite.

(6) Versagen durch Kurzzeitermüdung (en: low cycle fatigue) darf als ausgeschlossen gelten, wenn die in dieser Norm festgelegten Verfahren angewendet werden.

6.3.3 LS3: Beulen

(1) Als Grenzzustand des Beulens sollte der Zustand betrachtet werden, in dem das gesamte Tragwerk oder ein Teiltragwerk plötzlich große Verschiebungen rechtwinklig zur Schalenmittelfläche entwickelt, verursacht durch Stabilitätsverlust unter Druck- oder Schubmembranspannungen in der Schalenwandung, was zur Unfähigkeit, jegliche Erhöhung der Schnittgrößen aufzunehmen, und somit möglicherweise zum Versagen des gesamten Tragwerks führt.

(2) Eines oder mehrere der folgenden Verfahren zur Berechnung (siehe 4.2) und zur Beurteilung des Beulwiderstands sollte(n) bei der Berechnung der Bemessungsspannungen und -schnittgrößen für den Nachweis von LS3 angewendet werden:

- Membrantheorie ausschließlich für rotationssymmetrische Beanspruchung und globale Biegebedingungen (Ausnahmen sind den einschlägigen Anwendungsteilen EN 1993-3, EN 1993-4-1 und EN 1993-4-2 zu entnehmen);
- Gleichungen nach Anhang A, Anhang D und Anhang E;
- Bemessung des Referenzwiderstands, wobei sich die Gleichungen nach Anhang E auf die jeweilige(n) Geometrie, Beanspruchung und Randbedingungen des Tragwerks beziehen;

- lineare elastische Berechnung (LA), die eine Mindestanforderung für die Spannungsberechnung unter allgemeinen Beanspruchungsbedingungen mit den Gleichungen nach Anhang D ist (sofern nicht die Spannungsberechnung des Lastfalls in Anhang A angegeben ist oder der Beulzustand als Sonderfall in Anhang D behandelt wird);
- lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA), die für Schalen unter allgemeinen Beanspruchungsbedingungen erforderlich ist, falls der ideale Beulwiderstand in einer LBA-MNA- oder GMNIA-Beurteilung zu verwenden ist;
- materiell nichtlineare Berechnung (MNA), die für Schalen unter allgemeinen Beanspruchungsbedingungen erforderlich ist, falls der tatsächliche plastische Referenzwiderstand (statt eines unteren Schätzwertes aus einer LA-Berechnung) in einer LBA-MNA-Beurteilung zu verwenden ist;
- GMNIA-Berechnung in Kombination mit unterstützenden MNA-, LBA- und GMNA-Berechnungen und unter Anwendung geeigneter Imperfektionen und berechneter Kalibrierfaktoren.

(3) Beim Nachweis von LS3 sollten alle maßgebenden Lastkombinationen, die Druck- oder Schubmembranspannungen in der Schale erzeugen, berücksichtigt werden.

(4) Da die Tragfähigkeit im Grenzzustand LS3 stark von der Qualität der Bauausführung abhängig ist, sollten bei der Tragfähigkeitsbeurteilung die zugehörigen Anforderungen an die Ausführungstoleranzen berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck sind drei Klassen für die geometrischen Toleranzen, als „Herstellqualitätsklassen“ bezeichnet, in Abschnitt 9 angegeben.

6.3.4 LS4: Ermüdung

(1) Als Grenzzustand der Schwerlastwechselermüdung sollte der Zustand betrachtet werden, in dem wiederholte Zyklen von zu- und abnehmenden Spannungen aufgrund veränderlicher Einwirkungen zur Entstehung und Fortpflanzung eines Ermüdungsrissses führen.

(2) Ein Ermüdungsnachweis nach Abschnitt 10 und EN 1993-1-9 sollte für Schalenkonstruktionen unter veränderlichen Schwerlastwechseleinwirkungen durchgeführt werden. Dieser Nachweis darf jedoch entfallen, sofern während der geplanten Lebensdauer des Tragwerks entsprechend dem maßgebenden Einwirkungsspektrum nach EN 1991 und den zutreffenden Anwendungsteilen von EN 1993-3 beide der folgenden zwei Kriterien erfüllt sind:

- der Bemessungsspitzenwert der Von-Mises-Vergleichsoberflächenspannung an allen Punkten des Tragwerks, der mit einer LA-Berechnung ermittelt wurde, ist kleiner als f_{lim} ;
- keine veränderliche Last wird mit mehr als N_f Zyklen aufgebracht.

ANMERKUNG Der Wert der Spitzenspannung f_{lim} wird mit 150 N/mm^2 und N_f wird mit 10 000 angesetzt, sofern der Nationale Anhang keine abweichenden Werte angibt.

(3) Bei der Berechnung der Bemessungsspannungen und -schnittgrößen zur Anwendung mit den Bestimmungen nach EN 1993-1-9 für den Nachweis von LS4 sollte das zutreffende der folgenden Berechnungsverfahren (siehe 4.2) angewendet werden:

- Berechnung mittels Membrantheorie (Balkentheorie) für lange dickwandige Zylinderschalen;
- Gleichungen nach Anhang C;
- lineare elastische Berechnung (LA);
- nichtlineare elastische Berechnung (GNA);
- nichtlineare imperfekte elastische Berechnung (GNIA).

(4) Die zusätzlichen Spannungskonzentrationsfaktoren k_f und $k_{f,imp}$ können erforderlich sein zur Berücksichtigung von Exzentrizitäten, Imperfektionen und anderen globalen spannungserhöhenden Auswirkungen, die nicht in der Berechnung eingeschlossen sind und von den Ermüdungsklassen nach EN 1993-1-9 nicht speziell berücksichtigt werden. Weitere Angaben zum Zusammenhang zwischen der Wahl des Berechnungsverfahrens, den anwendbaren Spannungskonzentrationsfaktoren k_f und $k_{f,imp}$ sowie dem Nachweisverfahren nach EN 1993-1-9 sind in Abschnitt 10 enthalten.

(5) Ist die in der Beurteilung eingeschlossene Lastspielzahl höher als N_f , sollten die Bestimmungen für LS2 (Abschnitt 8) angewendet werden.

6.4 Konzepte für den Grenzzustandsnachweis

6.4.1 Allgemeines

(1) Der Grenzzustandsnachweis sollte nach einem der folgenden Konzepte geführt werden:

- spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis;
- Standardgleichungen;
- rechnergestützte Berechnung.

(2) Es sollte beachtet werden, dass die durch verschiedene Spannungskomponenten in der Schale verursachten elastisch-plastischen Baustoffreaktionen unterschiedliche Auswirkungen auf die Versagensarten und die Grenzzustände der Tragfähigkeit haben. Die Spannungskomponenten sollten daher Spannungskategorien mit unterschiedlichen Grenzen zugeordnet werden. Spannungen, die aufgebaut werden, um Gleichgewichtsbedingungen einzuhalten, sollten als signifikanter angesehen werden als Spannungen, die aus Verformungszwängen rechtwinklig zur Schale entstehen. Lokalspannungen infolge Kerbauswirkungen in Konstruktionsdetails dürfen als vernachlässigbar in ihrem Einfluss auf den Widerstand gegen statische Beanspruchung angesehen werden.

(3) Als Kategorien für den spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweis sollte zwischen Primärspannungen, Sekundärspannungen und Lokalspannungen unterschieden werden. Primär- und Sekundärspannungen dürfen, sofern angemessen, durch Schnittgrößen ersetzt werden.

(4) In einer rechnergestützten Berechnung sollten Primär- und Sekundärspannungszustände durch die Grenzlast und die Dehnungsschwingbreite bei zyklischer Beanspruchung ersetzt werden.

(5) Im Allgemeinen darf angenommen werden, dass Primärspannungszustände LS1 beherrschen, dass LS3 stark von den Primärspannungszuständen abhängig ist, von den Sekundärspannungszuständen jedoch beeinflusst werden kann, dass LS2 von der Kombination der Primär- und Sekundärspannungszustände abhängig ist und dass lokale Oberflächenspannungen den LS4 beherrschen.

7 Grenzzustand des plastischen Versagens (LS1)

7.1 Bemessungswerte der Einwirkungen

(1) Die Bemessungswerte der Einwirkungen müssen auf der ungünstigsten maßgebenden Lastkombination beruhen (einschließlich der maßgebenden Faktoren γ_F und ψ).

(2) Nur die Einwirkungen, die Lasten mit Einfluss auf das Tragwerksgleichgewicht repräsentieren, brauchen berücksichtigt zu werden.

7.2 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis

7.2.1 Bemessungswerte von Spannungen

(1) Obwohl der spannungsbasierte Tragsicherheitsnachweis auf einer elastischen Berechnung beruht und daher den Grenzzustand des plastischen Versagens nicht präzise vorhersagen kann, darf er im Sinne des ersten Plastizitätstheoretischen Traglasttheorems (Statischer Satz — untere Schranke) verwendet werden, um eine konservative Beurteilung des plastischen Versagenswiderstands zu erhalten, der den Grenzzustand des plastischen Versagens beschreibt, siehe 6.1.1.

(2) Wie in (6) näher ausgeführt, darf die Fließbedingung nach Ilyushin angewendet werden, da sie dem tatsächlichen plastischen Versagenszustand näherkommt als eine einfache Bewertung der elastischen Oberflächenspannung.

(3) Als Bemessungswert der Von-Mises-Vergleichsspannung $\sigma_{eq,Ed}$ der Spannung sollte an jedem Punkt des Tragwerks die größte Primärspannung aus einer statischen Berechnung unter Berücksichtigung der Gleichgewichtsgesetze zwischen Bemessungsnutzlast und inneren Schnittgrößen verwendet werden.

(4) Als Primärspannung darf der Höchstwert der für das Gleichgewicht mit den aufgebrachten Lasten erforderlichen Spannungen an einem bestimmten Punkt oder entlang einer rotationssymmetrischen Linie in der Schalenkonstruktion angesetzt werden.

(5) Wird eine membrantheoretische Berechnung oder eine Berechnung nach der linearen Biegetheorie (LA) unter den in (6) festgelegten Bedingungen verwendet, darf das resultierende zweidimensionale Feld der Schnittgrößen $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$ und $n_{x\theta,Ed}$ durch den Bemessungswert der Von-Mises-Vergleichsspannung $\sigma_{eq,Ed}$ dargestellt werden, welcher wie folgt ermittelt wird:

$$\sigma_{eq,Ed} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{x,Ed}^2 + n_{\theta,Ed}^2 - n_{x,Ed} \times n_{\theta,Ed} + 3n_{x\theta,Ed}^2} \quad (7.1)$$

ANMERKUNG Bei Verwendung einer LA- oder GNA-Berechnung ist es möglich, dass das Berechnungsprogramm nur Oberflächenspannungen liefert. Für jede Membranspannungskomponente kann die entsprechende Membranschnittgröße n ermittelt werden, indem der Mittelwert der Werte an den beiden Oberflächen mit der Dicke an dieser Stelle multipliziert wird. Die Biegemomentkomponente kann in ähnlicher Weise aus der Differenz zwischen den beiden Oberflächenwerten ermittelt werden (siehe 3.1.4.1 bis 3.1.4.4).

(6) Bei Verwendung einer LA- oder GNA-Berechnung sollte die mittels Gleichung (7.2) bis Gleichung (7.5) ermittelte Größenordnung der größten von Mises-Vergleichsoberflächenspannung beurteilt und mit der nach Gleichung (7.1) an gleicher Stelle und mit gleicher Berechnung bestimmten Von-Mises-Vergleichsmembranspannung verglichen werden.

(7) Übersteigt die größte Von-Mises-Vergleichsoberflächenspannung das k_{eq} -Fache des Wertes aus Gleichung (7.1), sollte die Von-Mises-Vergleichsspannung als der nach Gleichung (7.2) bis Gleichung (7.5) ermittelte Wert angesetzt werden.

(8) Der Wert von k_{eq} sollte als $k_{eq} = 3$ angesetzt werden, sofern kein besserer Wert durch rationale Berechnung entsprechend der jeweiligen Bedingung ermittelt werden kann.

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \times \sigma_{\theta,Ed} + 3\tau_{x\theta,Ed}^2} \quad (7.2)$$