

DIN EN 1993-1-6

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatzvermerk
siehe unten

**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen;
Deutsche Fassung EN 1993-1-6:2007 + AC:2009**

Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-6: Strength and stability of shell structures;
German version EN 1993-1-6:2007 + AC:2009

Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-6: Résistance et stabilité des structures en coque;
Version allemande EN 1993-1-6:2007 + AC:2009

Ersatzvermerk

Ersatz für DIN EN 1993-1-6:2007-07;
mit DIN EN 1993-1-6/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18800-4:2008-11;
Ersatz für DIN EN 1993-1-6 Berichtigung 1:2009-11

Gesamtumfang 107 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN



Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-1-6:2007 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Die Arbeiten auf nationaler Ebene wurden durch die Experten des NABau-Spiegelausschusses NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ begleitet.

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 12. Juni 2006 angenommen.

Die Norm ist Bestandteil einer Reihe von Einwirkungs- und Bemessungsnormen, deren Anwendung nur im Paket sinnvoll ist. Dieser Tatsache wird durch das Leitpapier L der Kommission der Europäischen Gemeinschaft für die Anwendung der Eurocodes Rechnung getragen, indem Übergangsfristen für die verbindliche Umsetzung der Eurocodes in den Mitgliedsstaaten vorgesehen sind. Die Übergangsfristen sind im Vorwort dieser Norm angegeben.

Die Anwendung dieser Norm gilt in Deutschland in Verbindung mit dem Nationalen Anhang.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Der Beginn und das Ende des hinzugefügten oder geänderten Textes wird im Text durch die Textmarkierungen AC AC angezeigt.

Änderungen

Gegenüber DIN V ENV 1993-1-6:2002-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die Stellungnahmen der nationalen Normungsinstitute wurden eingearbeitet;
- b) der Vornormcharakter wurde aufgehoben;
- c) der Text wurde vollständig überarbeitet.

Gegenüber DIN EN 1993-1-6:2007-07, DIN EN 1993-1-6 Berichtigung 1:2009-11 und DIN 18800-4:2008-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) auf europäisches Bemessungskonzept umgestellt;
- b) Ersatzvermerke korrigiert;
- c) Vorgänger-Norm mit der Berichtigung 1 konsolidiert;
- d) redaktionelle Änderungen durchgeführt.

Frühere Ausgaben

DIN 18800-4: 1990-11, 2008-11
DIN V ENV 1993-1-6: 2002-05
DIN EN 1993-1-6: 2007-07
DIN EN 1993-1-6 Berichtigung 1: 2009-11

Deutsche Fassung

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

Eurocode 3: Design of steel structures —
Part 1-6: Strength and stability of shell structures

Eurocode 3: Calcul des structures en acier —
Partie 1-6: Résistance et stabilité des structures en coque

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 12. Juni 2006 angenommen.

Die Berichtigung tritt am 29. April 2009 in Kraft und wurde in EN 1993-1-6:2007 eingearbeitet.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



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

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

© 2009 CEN Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den nationalen Mitgliedern von CEN vorbehalten.

Ref. Nr. EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 D

Inhalt

Seite

Vorwort	6
1 Allgemeines	7
1.1 Anwendungsbereich	7
1.2 Normative Verweisungen	8
1.3 Begriffe	9
1.3.1 Tragwerksformen, Geometrie	9
1.3.2 Grenzzustände	10
1.3.3 Einwirkungen	11
1.3.4 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen	12
1.3.5 Berechnungskonzepte	12
1.3.6 Bei der spannungsbasierten Bemessung verwendete Spannungskategorien	14
1.3.7 Spezielle Definitionen für Beulberechnungen	14
1.4 Formelzeichen	15
1.5 Vorzeichenvereinbarungen	19
2 Grundlagen der Bemessung und Modellierung	19
2.1 Allgemeines	19
2.2 Berechnungskonzepte	20
2.2.1 Allgemeines	20
2.2.2 Globale Berechnung	20
2.2.3 Membrantheorietische Berechnung	20
2.2.4 Lineare elastische Berechnung (LA)	20
2.2.5 Lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA)	21
2.2.6 Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA)	21
2.2.7 Materiell nichtlineare Berechnung (MNA)	21
2.2.8 Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)	21
2.2.9 Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)	21
2.2.10 Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)	22
2.3 Schalenrandbedingungen	22
3 Werkstoffe und Geometrie	22
3.1 Werkstoffeigenschaften	22
3.2 Bemessungswerte der Abmessungen	23
3.3 Geometrische Toleranzen und geometrische Imperfektionen	23
4 Grenzzustände der Tragfähigkeit in stählernen Schalen	24
4.1 Zu beachtende Grenzzustände	24
4.1.1 LS1: Plastische Grenze oder Zugbruch	24
4.1.2 LS2: Zyklisches Plastizieren	24
4.1.3 LS3: Beulen	25
4.1.4 LS4: Ermüdung	26
4.2 Konzepte für den Tragsicherheitsnachweis von Schalen	26
4.2.1 Allgemeines	26
4.2.2 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis	27
4.2.3 Direkter Tragsicherheitsnachweis	28
4.2.4 Numerisch gestützter Tragsicherheitsnachweis	28
5 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen	29
5.1 Schnittgrößen in Schalen	29
5.2 Modellierung der Schale für die Berechnung	29
5.2.1 Geometrie	29
5.2.2 Randbedingungen	30
5.2.3 Einwirkungen und Umwelteinflüsse	31
5.2.4 Schnittgrößen und Spannungen	32
5.3 Berechnungskonzepte	32

6	Grenzzustand Plastische Grenze oder Zugbruch (LS1)	32
6.1	Bemessungswerte der Einwirkungen	32
6.2	Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis	32
6.2.1	Bemessungswerte der Spannungen	32
6.2.2	Bemessungswerte des Widerstandes	33
6.2.3	Begrenzung der Spannungen	34
6.3	Numerisch gestützter Tragsicherheitsnachweis mittels globaler MNA- oder GMNA-Berechnung	34
6.4	Direkter Tragsicherheitsnachweis	35
7	Grenzzustand Zyklisches Plastizieren (LS2)	35
7.1	Bemessungswerte der Einwirkungen	35
7.2	Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis	35
7.2.1	Bemessungswerte der Spannungsschwingbreite	35
7.2.2	Bemessungswerte des Widerstandes	36
7.2.3	Begrenzung der Spannungsschwingbreite	36
7.3	Numerisch gestützter Tragsicherheitsnachweis mittels globaler MNA- oder GMNA-Berechnung	36
7.3.1	Bemessungswerte der gesamten akkumulierten plastischen Dehnung	36
7.3.2	Begrenzung der gesamten akkumulierten plastischen Dehnung	37
7.4	Direkter Tragsicherheitsnachweis	37
8	Grenzzustand Beulen (LS3)	37
8.1	Bemessungswerte der Einwirkungen	37
8.2	Spezielle Definitionen und Formelzeichen	37
8.3	Beulrelevante Randbedingungen	38
8.4	Beulrelevante geometrische Toleranzen	38
8.4.1	Allgemeines	38
8.4.2	Toleranz für Unrundheit	40
8.4.3	Toleranz für unplanmäßige Exzentrizität	41
8.4.4	Toleranz für Vorbeulen	42
8.4.5	Toleranz für Auflager-Unebenheit	45
8.5	Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis	45
8.5.1	Bemessungswerte der Spannungen	45
8.5.2	Bemessungswert des Widerstandes (Beultragfähigkeit)	45
8.5.3	Begrenzung der Spannungen (Beulsicherheitsnachweis)	46
8.6	Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis mittels globaler MNA- und LBA-Berechnung	47
8.6.1	Bemessungswerte der Einwirkungen	47
8.6.2	Bemessungswert des Widerstandes	47
8.6.3	Beulsicherheitsnachweis	50
8.7	Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis mittels globaler GMNIA-Berechnung	50
8.7.1	Bemessungswerte der Einwirkungen	50
8.7.2	Bemessungswert des Widerstandes	50
8.7.3	Beulsicherheitsnachweis	55
9	Grenzzustand Ermüdung (LS4)	55
9.1	Bemessungswerte der Einwirkungen	55
9.2	Spannungsbasierter Ermüdungssicherheitsnachweis	55
9.2.1	Allgemeines	55
9.2.2	Bemessungswerte der Spannungsschwingbreite	55
9.2.3	Bemessungswerte des Widerstandes (Ermüdungsfestigkeit)	56
9.2.4	Begrenzung der Spannungsschwingbreite (Ermüdungssicherheitsnachweis)	56
9.3	Numerisch gestützter Ermüdungssicherheitsnachweis mittels globaler LA- oder GNA-Berechnung	57
Anhang A (normativ)	Membrantheorietische Spannungen in Schalen	58
A.1	Allgemeines	58

A.1.1	Beanspruchungen und Widerstände	58
A.1.2	Formelzeichen	58
A.1.3	Randbedingungen	59
A.1.4	Vorzeichenvereinbarung	59
A.2	Unversteifte Kreiszylinderschalen	59
A.2.1	Konstante Axiallast	59
A.2.2	Axiallast aus globaler Biegung	59
A.2.3	Reibungslast	59
A.2.4	Konstanter Innendruck	59
A.2.5	Veränderlicher Innendruck	59
A.2.6	Konstanter Schub aus Torsion	60
A.2.7	Sinusförmig veränderlicher Schub aus Querkraft	60
A.3	Unversteifte Kegelschalen	60
A.3.1	Konstante Axiallast	60
A.3.2	Axiallast aus globaler Biegung	60
A.3.3	Reibungslast	60
A.3.4	Konstanter Innendruck	61
A.3.5	Linear veränderlicher Innendruck	61
A.3.6	Konstanter Schub aus Torsion	61
A.3.7	Sinusförmig veränderlicher Schub aus Querkraft	61
A.4	Unversteifte Kugelschalen	62
A.4.1	Konstanter Innendruck	62
A.4.2	Konstante Eigengewichtslast	62
Anhang B (normativ)	Zusätzliche Gleichungen für plastische Kollaps-Widerstände	63
B.1	Allgemeines	63
B.1.1	Widerstände	63
B.1.2	Formelzeichen	63
B.1.3	Randbedingungen	63
B.2	Unversteifte Kreiszylinderschalen	64
B.2.1	Zylinder: Radiale Linienlast	64
B.2.2	Zylinder: Radiale Linienlast und Axiallast	64
B.2.3	Zylinder: Radiale Linienlast, konstanter Innendruck und Axiallast	65
B.3	Ringversteifte Kreiszylinderschalen	66
B.3.1	Ringversteifter Zylinder: Radiale Linienlast	66
B.3.2	Ringversteifter Zylinder: Radiale Linienlast und Axiallast	67
B.3.3	Ringversteifter Zylinder: Radiale Linienlast, konstanter Innendruck und Axiallast	68
B.4	Knotenlinien zwischen Schalen	69
B.4.1	Knotenlinie unter ausschließlich meridionaler Belastung (vereinfacht)	69
B.4.2	Knotenlinie unter Innendruck und Axiallast	70
B.5	Kreisplatten mit axialsymmetrischen Randbedingungen	71
B.5.1	Gleichmäßig verteilte Last, gelenkig gelagerter Rand	71
B.5.2	Örtliche Teilflächenlast, gelenkig gelagerter Rand	71
B.5.3	Gleichmäßig verteilte Last, eingespannter Rand	72
B.5.4	Örtliche Teilflächenlast, eingespannter Rand	72
Anhang C (normativ)	Formeln für lineare elastische Membran- und Biegespannungen	73
C.1	Allgemeines	73
C.1.1	Beanspruchungen	73
C.1.2	Formelzeichen	73
C.1.3	Randbedingungen	74
C.2	Am Fuß eingespannte unversteifte Kreiszylinderschalen	74
C.2.1	Zylinder, eingespannt: Konstanter Innendruck	74
C.2.2	Zylinder, eingespannt: Axiallast	74
C.2.3	Zylinder, eingespannt: Konstanter Innendruck und Axiallast	75
C.2.4	Zylinder, eingespannt: Hydrostatischer Innendruck	75
C.2.5	Zylinder, eingespannt: Radiale Verschiebung nach außen	76
C.2.6	Zylinder, eingespannt: Gleichmäßige Erwärmung	76

C.3	Am Fuß gelenkig gelagerte unversteifte Kreiszyinderschalen.....	76
C.3.1	Zylinder, gelenkig gelagert: Konstanter Innendruck	76
C.3.2	Zylinder, gelenkig gelagert: Axiallast.....	77
C.3.3	Zylinder, gelenkig gelagert: Konstanter Innendruck und Axiallast	77
C.3.4	Zylinder, gelenkig gelagert: Hydrostatischer Innendruck.....	78
C.3.5	Zylinder, gelenkig gelagert: Radiale Verschiebung nach außen.....	78
C.3.6	Zylinder, gelenkig gelagert: Gleichmäßige Erwärmung	79
C.3.7	Zylinder, gelenkig gelagert: Randverdrehung.....	79
C.4	Innendruck in unversteiften Kreiszyinderschalen	80
C.4.1	Zylinder: Endender konstanter Innendruck.....	80
C.4.2	Zylinder: Endender hydrostatischer Innendruck	80
C.4.3	Zylinder: Dickensprung	81
C.5	Ringsteife an einer Kreiszyinderschale	81
C.5.1	Ringversteifter Zylinder: Radialkraft am Ring	81
C.5.2	Ringversteifter Zylinder: Axiallast	82
C.5.3	Ringversteifter Zylinder: Konstanter Innendruck	82
C.6	Kreisplatten mit axialsymmetrischen Randbedingungen	83
C.6.1	Gelenkig gelagerte Platte: Gleichmäßige Flächenlast.....	83
C.6.2	Gelenkig gelagerte Platte: Örtliche Teilflächenlast	83
C.6.3	Eingespannte Platte: Gleichmäßige Flächenlast	83
C.6.4	Eingespannte Platte: Örtliche Teilflächenlast	84
Anhang D (normativ)	Formeln für den Beulsicherheitsnachweis.....	85
D.1	Unversteifte Kreiszyinderschalen mit konstanter Wanddicke	85
D.1.1	Formelzeichen und Randbedingungen.....	85
D.1.2	Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung)	85
D.1.3	Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung	88
D.1.4	Schubbeanspruchung.....	91
D.1.5	Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung) mit gleichzeitig wirkendem Innendruck	92
D.1.6	Kombinationen der Beanspruchung durch Druck in Meridianrichtung (Axialrichtung), Druck in Umfangsrichtung und Schub.....	94
D.2	Unversteifte Kreiszyinderschalen mit abgestufter Wanddicke	95
D.2.1	Allgemeines	95
D.2.2	Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung)	96
D.2.3	Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung	96
D.2.4	Schubbeanspruchung.....	100
D.3	Unversteifte Kreiszyinderschalen mit Überlappstößen.....	100
D.3.1	Allgemeines	100
D.3.2	Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung)	101
D.3.3	Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung	101
D.3.4	Schubbeanspruchung.....	101
D.4	Unversteifte Kegelschalen (vollständige Kegel und Kegelstümpfe)	102
D.4.1	Allgemeines	102
D.4.2	Bemessungsbeulspannungen	103
D.4.3	Beulsicherheitsnachweis	105

Vorwort

Dieses Dokument EN 1993-1-6:2007, „Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen“ wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist verantwortlich für alle Eurocodes.

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

Dieser Eurocode ersetzt ENV 1993-1-6:1999.

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

Nationaler Anhang für EN 1993-1-6

Diese Norm enthält alternative Verfahren, Werte und Empfehlungen zusammen mit Hinweisen, an welchen Stellen möglicherweise nationale Festlegungen getroffen werden müssen. Deshalb sollte die jeweilige nationale Ausgabe von EN 1993-1-6 einen Nationalen Anhang mit allen national festzulegenden Parametern enthalten, die für die Bemessung und Konstruktion von Stahltragwerken, die in dem Ausgabeland gebaut werden sollen, erforderlich sind.

Nationale Festlegungen sind in den folgenden Abschnitten von EN 1993-1-6 vorgesehen:

- | | |
|-------------|------------------------|
| — 3.1 (4) | — 8.4.4 (4) |
| — 4.1.4 (3) | — 8.4.5 (1) |
| — 5.2.4 (1) | — 8.5.2 (2) |
| — 6.3 (5) | — 8.5.2 (4) |
| — 7.3.1 (1) | — 8.7.2 (7) |
| — 7.3.2 (1) | — 8.7.2 (16) |
| — 8.4.2 (3) | — 8.7.2 (18) (zweimal) |
| — 8.4.3 (2) | — 9.2.1 (2)P |
| — 8.4.3 (4) | |

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

(1) EN1993-1-6 enthält Grundregeln für die Bemessung von Stahlkonstruktionen, die die Form von Rotationsschalen haben.

(2) Diese Norm ist zusammen mit EN1993-1-1, EN1993-1-3, EN1993-1-4, EN1993-1-9 sowie den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 anzuwenden. Dies sind:

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

(3) Diese Norm definiert die charakteristischen Werte und die Bemessungswerte des Tragwerkswiderstandes.

(4) Diese Norm regelt die Anforderungen an die Bemessung gegen folgende Grenzzustände der Tragfähigkeit:

- plastische Grenze oder Zugbruch;
- zyklisches Plastizieren;
- Beulen;
- Ermüdung.

(5) Das Gesamtgleichgewicht des Tragwerkes (Gleiten, Abheben, Umkippen) ist durch diese Norm nicht abgedeckt, wird aber in EN1993-1-1 behandelt. Besondere Überlegungen für spezielle Anwendungsgebiete werden in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 behandelt.

(6) Die in dieser Norm angegebenen Regeln gelten für Rotationsschalen und damit verbundene Kreis- und Kreisringplatten sowie stabförmige Ring- und Längssteifen, soweit sie Teile des vollständigen Tragwerkes sind. Es werden allgemeine Verfahren für computergestützte Berechnungen aller Schalenformen behandelt. In den Anhängen sind detaillierte FormelAusdrücke für die Handberechnung von unversteiften Zylindern und Kegeln angegeben.

(7) Zylindrische und kegelförmige Schalenteile, -felder und -abschnitte werden in dieser Norm nicht explizit behandelt. Die angegebenen Regeln können jedoch anwendbar sein, wenn die zutreffenden Randbedingungen ausreichend berücksichtigt werden.

(8) Diese Norm gilt für stählerne Schalenkonstruktionen des konstruktiven Ingenieurbaus. Wenn keine Normen zu Schalenkonstruktionen aus anderen Metallen existieren, gelten die Festlegungen dieser Norm, vorausgesetzt, die jeweiligen Materialeigenschaften werden berücksichtigt.

(9) Die in dieser Norm angegebenen Regeln gelten für die in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 definierten Temperaturbereiche. Der Temperaturhöchstwert ist so festgelegt, dass Kriecheinflüsse vernachlässigt werden können, sofern sie nicht im einschlägigen Anwendungsteil abgedeckt sind.

(10) Die in dieser Norm angegebenen Regeln gelten für Konstruktionen, die die in EN1993-1-10 angegebenen Sprödbbruchanforderungen erfüllen.

(11) Die in dieser Norm angegebenen Regeln gelten für die Bemessung unter Einwirkungen, die ihrer Natur nach als quasi-statisch behandelt werden dürfen.

(12) Im Rahmen dieser Norm wird vorausgesetzt, dass Windlast und Schüttgutfluss in der Regel als quasi-statisch behandelt werden dürfen.

(13) Dynamische Effekte, einschließlich ihrer Folgen für die Ermüdung, sollten nach den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 berücksichtigt werden. In diesem Teil 1-6 werden die Schnittgrößen aus dynamischem Verhalten jedoch als quasi-statisch behandelt.

(14) Die in dieser Norm angegebenen Regeln gelten für Tragwerke, die in Übereinstimmung mit EN 1090-2 gefertigt und errichtet werden.

(15) Diese Norm behandelt keine Dichtigkeitsaspekte.

(16) Diese Norm gilt für Konstruktionen innerhalb der folgenden Grenzen:

— Bemessungs-Metalltemperaturen innerhalb des Bereiches -50 °C bis $+300\text{ °C}$,

— Radius/Dicken-Verhältnisse innerhalb des Bereiches 20 bis 5 000.

ANMERKUNG Es ist zu beachten, dass die Regeln zum spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweis in dieser Norm bei einigen Geometrien eher dickwandiger Schalen und einigen für diese geltenden Belastungsbedingungen recht konservativ sein können.

1.2 Normative Verweisungen

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

EN1090-2, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 2: Technische Anforderungen an die Ausführung von Tragwerken aus Stahl*

EN 1990, *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN1991, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke*

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

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

EN 1993-1-4, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln – Ergänzende Regeln zur Anwendung nichtrostender Stähle*

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

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 1993-1-12, *T Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S 700*

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

EN 1993-3-1, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 3-1: Türme und Maste*

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

EN 1993-4-1, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-1: Silos*

EN 1993-4-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-2: Tankbauwerke*

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

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

1.3 Begriffe

Die in EN 1990 für den allgemeinen Gebrauch in den Eurocodes für den konstruktive Ingenieurbau definierten Begriffe gelten auch für die vorliegende Norm. Falls nicht anders festgelegt, gelten für die vorliegende Norm auch die Begriffe von ISO 8930. Ergänzend zu EN 1993-1-1 gelten für die Anwendung der vorliegenden Norm folgende Begriffe.

1.3.1 Tragwerksformen, Geometrie

1.3.1.1

Schale

Tragwerk oder Tragwerkselement, das aus einer gekrümmten dünnen Wandung besteht

1.3.1.2

Rotationsschale

Schale, deren geometrische Form durch eine Mittelfläche definiert ist, welche durch Rotation einer meridionalen Linie (Erzeugenden) um eine einzige Achse über ein Bogenmaß von 2π erzeugt wird. Die Schale kann beliebig lang sein.

1.3.1.3

vollständige Rotationsschale

Schale, die aus mehreren Teilen zusammengesetzt ist, von denen jeder eine Rotationsschale darstellt

1.3.1.4

Schalensegment

Rotationsschale mit definierter Geometrie und konstanter Wanddicke: Kreiszylinder, Kegelstumpf, Kugelstumpf, Kreisringplatte, Toroidkrempe oder andere Formen

1.3.1.5

Schalenfeld

unvollständige Rotationsschale: Die Schale wird durch eine Erzeugende definiert, die mit einem Bogenmaß von weniger als 2π um die Achse rotiert wird

1.3.1.6

Schalenmittelfläche

Gekrümmte Fläche, die an jedem Punkt der Schale mittig zwischen ihrer inneren und äußeren Oberfläche liegt. Falls die Schale an entweder einer oder beiden Oberflächen versteift ist, wird trotzdem die Mittelfläche der gekrümmten Wandung als Referenz-Schalenmittelfläche verwendet. Die Schalenmittelfläche dient als Referenzfläche für die Berechnung und kann an Wanddickensprüngen oder an Knotenlinien diskontinuierlich sein, was zu Exzentrizitäten führt, die für das Tragwerksverhalten der Schale wichtig sein können.

1.3.1.7

Knotenlinie

Linie, an der zwei oder mehr Schalensegmente zusammentreffen: Sie kann auch eine Steife einschließen. Die Anschlusslinie einer Ringsteife an eine Schale kann als Knotenlinie behandelt werden.

1.3.1.8

Längssteife

Örtliches Versteifungsbauteil, das einem Schalenmeridian folgt, welcher eine Erzeugende der Rotationsschale darstellt. Eine Längssteife soll entweder die Stabilität verbessern oder bei der Einleitung örtlicher Lasten mitwirken. Sie dient nicht primär dazu, den Widerstand gegen Biegeeffekte zu erhöhen, die durch Querlasten verursacht werden.

1.3.1.9

Rippe

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

1.3.1.10

Ringsteife

Örtliches Versteifungsbauteil, das der Umfangslinie der Rotationsschale an einem bestimmten Punkt des Schalenmeridians folgt. Es wird in der Regel angenommen, 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 Ringebe steif ist. Sie wird entweder vorgesehen, um die Stabilität zu verbessern oder in Ringebe angreifende örtliche Lasten einzuleiten.

1.3.1.11

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. Der Basisring wird auch benötigt, um die angenommenen Randbedingungen praktisch sicherzustellen.

1.3.1.12

Ringträger oder Ringbalken

Versteifungsbauteil in Umfangsrichtung, das sowohl in Ringebe als auch rechtwinklig dazu eine Biegesteifigkeit- und Festigkeit aufweist. Ein Ringträger oder -balken ist ein lasttragendes Tragwerksbauteil zur Weiterleitung örtlicher Lasten in die Schale.

1.3.2 Grenzzustände

1.3.2.1

plastische Grenze

LS1

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem das Tragwerk Fließzonen in einer solchen Anordnung entwickelt, dass seine Fähigkeit, weiter steigenden Lasten zu widerstehen, als erschöpft betrachtet werden muss. Die plastische Grenze ist nahe verwandt mit einer plastischen Grenzl last nach der Theorie kleiner Verschiebungen oder einem plastischen Kollapsmechanismus.

1.3.2.2

Zugbruch

LS1

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem die Schalenwandung infolge Zugbeanspruchung reißt

1.3.2.3

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

1.3.2.4

Beulen

LS3

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

1.3.2.5

Ermüdung

LS4

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem wiederholte Belastungen Risse in der Schalenwandung verursachen, welche nach weiteren Lastzyklen zum Bruch führen können.

1.3.3 Einwirkungen

1.3.3.1

Axiallast

extern aufgebrachte Belastung in axialer Richtung

1.3.3.2

Radiallast

extern aufgebrachte Belastung normal zur Oberfläche einer Kreiszylinderschale

1.3.3.3

Innendruck

Anteil der Flächenbelastung, der normal zur Schalenoberfläche, nach außen gerichtet, wirkt. Seine Größe kann sowohl in Umfangs- als auch in Meridianrichtung veränderlich sein (z. B. bei Belastung durch Schüttgut in einem Silo).

1.3.3.4

Außendruck

Anteil der Flächenbelastung, der normal zur Schalenoberfläche, nach innen gerichtet, wirkt. Seine Größe kann sowohl in Meridian- als auch in Umfangsrichtung veränderlich sein (z. B. bei Windlast)

1.3.3.5

hydrostatischer Druck

linear mit der Axialkoordinate der Rotationsschale veränderlicher Druck

1.3.3.6

Wandreibungslast

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

1.3.3.7

örtliche Last

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

1.3.3.8

Teilflächenlast

örtlich Flächenlast normal zur Schalenoberfläche

1.3.3.9

Soglast

gleichförmiger Außendruck (Unterdruck) infolge des niedrigeren Innendrucks in einer mit betrieblichen oder Belüftungsöffnungen versehenen Schale unter Windeinwirkung

1.3.3.10

Teilvakuum

gleichförmiger Außendruck (Unterdruck) infolge Entnahme gespeicherter Flüssigkeiten oder Schüttgüter aus einem unzureichend belüfteten Behälter

1.3.3.11

thermische Einwirkung

veränderliche Temperaturen entweder in Längs- oder in Umfangs- oder in Dickenrichtung der Schale

1.3.4 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen

1.3.4.1

Membranschnittgrößen

Membranschnittgrößen sind die Kräfte je Längeneinheit der Schale, welche sich aus dem Integral des Verlaufs der Normalspannungen und der Schubspannungen parallel zur Schalenmittelfläche über die Schalendicke ergeben. Unter elastischen Bedingungen erzeugt jede dieser Schnittgrößen einen Spannungszustand, der gleichförmig über die Schalendicke verläuft. Es gibt drei Membranschnittgrößen an jedem Punkt (siehe Bild 1.1e)).

1.3.4.2

Biegeschnittgrößen

Biegeschnittgrößen sind die Biege- und Drehmomente 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. Unter elastischen Bedingungen erzeugt jede dieser Schnittgrößen einen Spannungszustand, der über die Schalendicke linear verläuft mit dem Wert Null an der Schalenmittelfläche. Es gibt zwei Biegemomente und ein Drehmoment an jedem Punkt.

1.3.4.3

Querschubschnittgrößen

Querschubschnittgrößen sind die Kräfte je Längeneinheit der Schale, welche sich aus dem Integral des Verlaufes des Querschubes senkrecht zur Schalenmittelfläche über die Schalendicke ergeben. Unter elastischen Bedingungen erzeugt jede dieser Schnittgrößen einen Spannungszustand, der parabelförmig über die Schalendicke verläuft. Es gibt zwei Querschubschnittgrößen an jedem Punkt (siehe Bild 1.1f)).

1.3.4.4

Membranspannungen

Membranspannungen sind wie folgt definiert: Membranschnittgrößen geteilt durch die Schalendicke (siehe Bild 1.1e))

1.3.4.5

Biegespannungen

Biegespannungen im elastischen Bereich sind wie folgt definiert: Biegeschnittgrößen multipliziert mit 6 und dividiert durch das Quadrat der Schalendicke.

1.3.5 Berechnungskonzepte

1.3.5.1

globale Berechnung

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

1.3.5.2

membrantheorietische 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

1.3.5.3

lineare elastische Schalenberechnung

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

1.3.5.4

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. Es ist zu beachten, dass sich die Bezeichnung Eigenwert hier nicht auf Schwingungszustände bezieht.

1.3.5.5

geometrisch nichtlineare elastische Berechnung

GNA

Berechnung auf der Grundlage der auf die perfekte Struktur angewendeten Schalenbiegetheorie und eines linear-elastischen Werkstoffgesetzes, jedoch unter Zuhilfenahme 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. Diese Berechnung schließt eine Verzweigungseigenwert-Überprüfung auf jedem Belastungsniveau ein.

1.3.5.6

materiell nichtlineare Berechnung

MNA

Berechnung auf der Grundlage der Schalenbiegetheorie kleiner Verformungen, angewendet auf die perfekte Struktur (wie in [1.3.5.3](#)), aber unter Zuhilfenahme eines nichtlinearen elasto-plastischen Werkstoffgesetzes

1.3.5.7

geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung

GMNA

Berechnung auf der Grundlage der auf die perfekte Struktur angewendeten Schalenbiegetheorie und unter Zuhilfenahme einer nichtlinearen Theorie großer Verformungen für die Verschiebungen und eines nichtlinearen elasto-plastischen Werkstoffgesetzes. Diese Berechnung schließt eine Verzweigungseigenwert-Überprüfung auf jedem Belastungsniveau ein.

1.3.5.8

geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen

GNIA

Berechnung ähnlich der in [1.3.5.5](#) definierten GNA-Berechnung, aber mit ausdrücklich eingeschlossenen Imperfektionen, d.h. angewendet auf ein Modell für die Strukturgeometrie, das die imperfekte Form einschließt (z. B. unvermeidbare Abweichungen der Schalenmittelfläche von der idealen Form). Mit den Imperfektionen wird der Einfluss der Abweichungen von den angesetzten Randbedingungen und/oder der Einfluss von Eigenspannungen berücksichtigt. Diese Berechnung schließt eine Überprüfung der Verzweigungslast auf jedem Belastungsniveau ein.

1.3.5.9

geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen

GMNIA

Berechnung, bei der Imperfektionen ausdrücklich eingeschlossen sind und die auf der Grundlage der auf die imperfekte Struktur (z. B. unvermeidbare Abweichungen der Schalenmittelfläche von der idealen Form) angewendeten Schalenbiegetheorie erfolgt unter Zuhilfenahme eines nichtlinearen elasto-plastischen 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. Zu den Imperfektionen können auch Imperfektionen in den Randbedingungen und Eigenspannungen gehören. Diese Berechnung schließt eine Verzweigungseigenwert-Überprüfung auf jedem Belastungsniveau ein.

1.3.6 Bei der spannungsbasierten Bemessung verwendete Spannungskategorien

1.3.6.1

Primärspannungen

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

1.3.6.2

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). Diese Spannungen sind nicht erforderlich, um Gleichgewicht zwischen einem internen Spannungszustand und den externen Lasten herzustellen.

1.3.7 Spezielle Definitionen für Beulberechnungen

1.3.7.1

idealer Beulwiderstand

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

1.3.7.2

ideale Beulspannung

zum idealen Beulwiderstand gehörende Membranspannung

1.3.7.3

plastischer Referenzwiderstand

plastische Grenzlaster, berechnet unter den idealisierenden Annahmen starr-plastischen Werkstoffverhaltens, perfekter Geometrie, perfekter Lasteinleitung, perfekter Auflagerung und isotropen Werkstoffes (durch MNA-Berechnung modelliert)

1.3.7.4

charakteristischer Beulwiderstand

Beullast unter Berücksichtigung des inelastischen Werkstoffverhaltens, der in praktischen Stahlbauten unvermeidbaren geometrischen und strukturellen Imperfektionen und gegebenenfalls vorhandener Folgelasteffekte

1.3.7.5

charakteristische Beulspannung

zum charakteristischen Beulwiderstand gehörende Membranspannung

1.3.7.6

Bemessungsbeulwiderstand

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

1.3.7.7

Bemessungsbeulspannung

zum Bemessungsbeulwiderstand gehörende Membranspannung

1.3.7.8

maßgebende Spannung

festgelegter Wert in einem veränderlichen Spannungsfeld, der zur Charakterisierung der Beanspruchung beim Beulsicherheitsnachweis verwendet wird

1.3.7.9

Herstelltoleranz-Qualitätsklasse

für die Bemessung angenommene Kategorie der Anforderungen an die Herstellgenauigkeit, siehe 8.4

1.4 Formelzeichen

(1) In dieser Norm werden über die in EN 1990 und EN 1993-1-1 angegebenen Formelzeichen hinaus die Folgenden verwendet.

(2) Koordinatensystem, siehe Bild 1.1:

- r Radialkoordinate, normal zur Rotationsachse;
- x Meridiankoordinate;
- z Axialkoordinate;
- θ Umfangskoordinate;
- ϕ Meridianneigung: Winkel zwischen der Rotationsachse und der Normalen auf dem Schalenmeridian;

(3) Drücke:

- p_n normal zur Schalenmittelfläche;
- p_x in Schalenmittelfläche tangential in Meridianrichtung;
- p_θ in Schalenmittelfläche tangential in Umfangsrichtung;

(4) Linienlasten:

- P_n je Umfangslängeneinheit, normal zur Schalenmittelfläche;
- P_x je Umfangslängeneinheit, in Meridianrichtung;
- P_θ je Umfangslängeneinheit, in Umfangsrichtung;

(5) Membranschnittgrößen:

- n_x Membrannormalkraft in Meridianrichtung;
- n_θ Membrannormalkraft in Umfangsrichtung;
- $n_{x\theta}$ Membranschubkraft;

(6) Biegeschnittgrößen (je Längeneinheit):

- m_x Biegemoment, das Spannungen in Meridianrichtung erzeugt;
 m_θ Biegemoment, das Spannungen in Umfangsrichtung erzeugt;
 $m_{x\theta}$ Drillmoment;
 q_{xn} zur Meridianbiegung gehörende Querkraft;
 $q_{\theta n}$ zur Umfangsbiegung gehörende Querkraft;

(7) Spannungen:

- σ_x Meridianspannung;
 σ_θ Umfangsspannung;
 σ_{eq} von Mises-Vergleichsspannung (kann bei zyklischer Belastung auch negative Werte annehmen);
 $\tau, \tau_{x\theta}$ Membranschubspannung;
 $\tau_{xn}, \tau_{\theta n}$ Querkraftschubspannung – zur Meridianbiegung gehörend, zur Umfangsbiegung gehörend;

(8) Verschiebungen:

- u Verschiebung in Meridianrichtung;
 v Verschiebung in Umfangsrichtung;
 w Verschiebung normal zur Schalenmittelfläche;
 β_ϕ Verdrehung in Meridianrichtung, siehe 5.2.2;

(9) Schalenabmessungen:

- d Innendurchmesser der Schale;
 L Gesamtlänge der Schale;
 ℓ Länge eines Schalensegmentes;
 ℓ_g Messlänge für die Messung von Imperfektionen;
 $\ell_{g\theta}$ Messlänge für die Messung von Imperfektionen in Umfangsrichtung;
 ℓ_{gw} Messlänge für die Messung von Imperfektionen über Schweißnähte hinweg;
 ℓ_{gx} Messlänge für die Messung von Imperfektionen in Meridianrichtung;
 ℓ_R Grenzlänge einer Schale für den Beulsicherheitsnachweis;
 r Radius der Schalenmittelfläche, rechtwinklig zur Rotationsachse;
 t Dicke der Schalenwandung;
 t_{max} maximale Dicke der Schalenwandung an einem Stoß;
 t_{min} Mindestdicke der Schalenwandung an einem Stoß;
 t_{ave} mittlere Dicke der Schalenwandung an einem Stoß;
 β halber Öffnungswinkel eines Kegels;

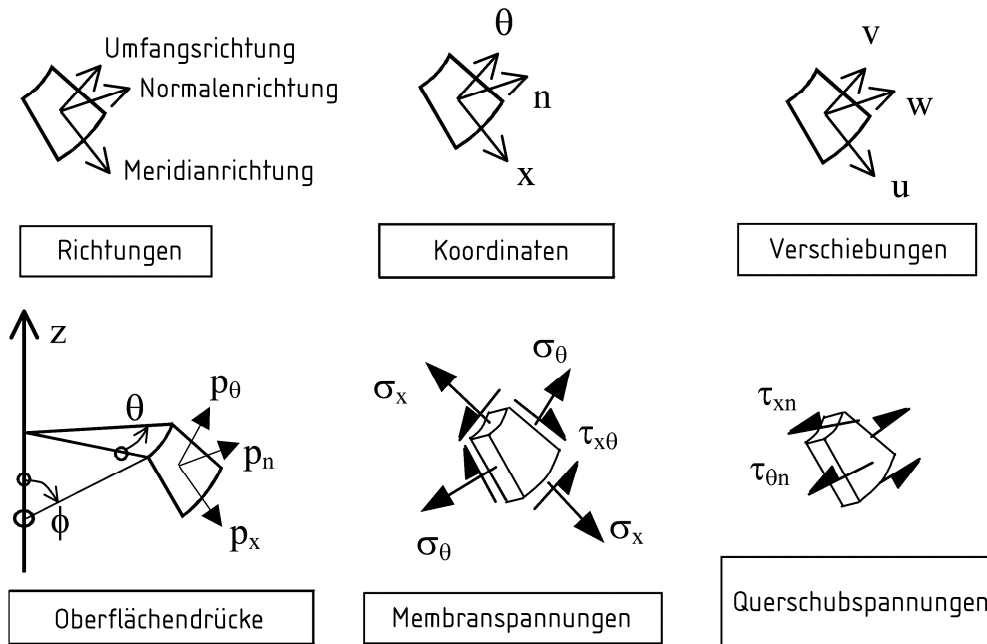


Bild 1.1 — Bezeichnungen in Rotationsschalen

(10) Herstelltoleranzen, siehe 8.4:

- e unplanmäßige Exzentrizität zwischen den Schalenmittelflächen miteinander verbundener Bleche;
- U_e Toleranzparameter für unplanmäßige Exzentrizität;
- U_r Toleranzparameter für Unrundheit;
- U_n Parameter für Imperfektionsamplitude bei numerischen Berechnungen;
- U_0 Toleranzparameter für Vorbeule;
- Δw_0 Amplitude einer Vorbeule rechtwinklig zur Schalenmittelfläche;

(11) Werkstoffeigenschaften:

- E Elastizitätsmodul;
- f_{eq} von Mises-Vergleichsfließspannung;
- f_y Streckgrenze;
- f_u Zugfestigkeit;
- ν Querkontraktionszahl (Poissonzahl);

(12) Parameter bei Tragsicherheitsnachweisen:

- C Koeffizient beim Beulsicherheitsnachweis;
- D Schädigungssumme beim Ermüdungssicherheitsnachweis;
- F allgemeine Einwirkung;
- F_{Ed} einer Bemessungssituation entsprechende Einwirkung auf ein komplettes Tragwerk (Bemessungswerte);
- F_{Rd} Rechenwerte der Einwirkung im Zustand des höchsten Tragwerkswiderstandes (Bemessungswerte);

- r_{Rk} bezogener charakteristischer Beulwiderstand (mit Indizes zur Identifizierung der Grundlage):
definiert als Verhältnis (F_{Rk}/F_{Ed});
- r_{Rpl} bezogener plastischer Referenzwiderstand (definiert als Lastfaktor auf die Bemessungslasten,
ermittelt mit einer MNA-Berechnung);
- r_{Rcr} bezogener idealer Beulwiderstand (definiert als Lastfaktor auf die Bemessungslasten, ermittelt mit
einer LBA-Berechnung);

ANMERKUNG Um die Konsistenz der Formelzeichen in der gesamten Normenreihe EN 1993 sicherzustellen, wird hier anstelle von R_{Ri} das Formelzeichen für den bezogenen Referenzwiderstand r_{Ri} verwendet. Zur Vermeidung von Missverständnissen ist zu beachten, dass in Fachkreisen der Schalentragswerksbemessung weithin das Formelzeichen R_{Ri} verwendet wird.

- k Kalibrierungsfaktor für nichtlineare Berechnungen;
- k Parameter in den Gleichungen zur Beulinteraktion;
- n Anzahl von Lastspielen;
- α Faktor für elastische Imperfektionsabminderung beim Beulsicherheitsnachweis;
- β Faktor für plastischen Bereich beim Beulsicherheitsnachweis;
- γ Teilsicherheitsbeiwert;
- Δ Schwingbreite bei alternierenden oder zyklischen Lasten;
- ε_p plastische Dehnung;
- η Exponent in der Gleichung für die Beulkurvenform;
- $\bar{\lambda}$ bezogener Schalenschlankheitsgrad;
- $\bar{\lambda}_{ov}$ bezogener Schlankheitsgrad der gesamten Schale (mehrere Segmente);
- $\bar{\lambda}_o$ 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);
- ω bezogener Längenparameter einer Kreiszylinderschale;
- χ Beulabminderungsfaktor für elastisch-plastische Effekte beim Beulsicherheitsnachweis;
- χ_{ov} Beulabminderungsfaktor für die gesamte Schale;

(13) Indizes:

- E Spannungs- oder Verschiebungswert (als Folge von Bemessungseinwirkungen);
- F Einwirkungen;
- M Werkstoff/Material;
- R Widerstand;
- cr idealer Beulwert;
- d Bemessungswert;
- int innen;
- k charakteristischer Wert;

max	Maximalwert;
min	Mindestwert;
nom	Nennwert;
pl	plastischer Wert;
u	Traglastwert;
y	Fließwert.

(14) Weitere Formelzeichen werden bei erstmaligem Auftreten definiert.

1.5 Vorzeichenvereinbarungen

- (1) Nach außen gerichtet positiv: Innendruck positiv, Verschiebung nach außen positiv, Ausnahme: siehe (4).
- (2) Zugspannungen positiv, Ausnahme: siehe (4).

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

- (3) Schubspannungen positiv wie in Bildern 1.1 und D.1 dargestellt.
- (4) Zur Vereinfachung werden in Abschnitt 8 und in Anhang D Druckspannungen als positiv betrachtet. Dort werden außerdem sowohl Außendrucke als auch Innendrucke als positiv behandelt.

2 Grundlagen der Bemessung und Modellierung

2.1 Allgemeines

- (1) Für die Grundlagen der Bemessung gilt EN 1990, ergänzt durch die folgenden Regeln.
- (2) Die Schale sollte vor allem so bemessen werden, dass sie alle Einwirkungen trägt und die folgenden Anforderungen erfüllt:
 - Gesamtgleichgewicht;
 - Gleichgewicht zwischen Einwirkungen und inneren Schnittgrößen, siehe Abschnitte 6 und 8;
 - Vermeidung von Rissen infolge zyklischen Plastizierens, siehe Abschnitt 7;
 - Begrenzung von Rissen infolge Ermüdung, siehe Abschnitt 9.
- (3) Die Bemessung der Schale sollte die Gebrauchstauglichkeitsanforderungen erfüllen, die in der jeweils maßgebenden Anwendungsnorm (EN 1993 Teil 3-1, Teil 3-2, Teil 4-1, Teil 4-2, Teil 4-3) festgelegt sind.
- (4) Die Schale darf auch aufgrund einer versuchsgestützten Bemessung dimensioniert werden. Wo angebracht, sind die entsprechenden Anforderungen in der maßgebenden Anwendungsnorm (EN 1993 Teil 3-1, Teil 3-2, Teil 4-1, Teil 4-2, Teil 4-3) festgelegt.
- (5) Alle Einwirkungen sollten mit ihren Bemessungswerten nach EN 1991 bzw. EN 1993 Teil 3-1, Teil 3-2, Teil 4-1, Teil 4-2 oder Teil 4-3 eingeführt werden.

2.2 Berechnungskonzepte

2.2.1 Allgemeines

(1) In Abhängigkeit vom Grenzzustand und von anderen Überlegungen sollte(n) eines oder mehrere der nachfolgend genannten Berechnungskonzepte, wie in Abschnitt 4 näher ausgeführt, angewendet werden:

- globale Berechnung, siehe 2.2.2;
- membrantheoretische Berechnung, siehe 2.2.3;
- lineare elastische Berechnung, siehe 2.2.4;
- lineare elastische Verzweigungsberechnung, siehe 2.2.5;
- geometrisch nichtlineare elastische Berechnung, siehe 2.2.6;
- materiell nichtlineare Berechnung, siehe 2.2.7;
- geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung, siehe 2.2.8;
- geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen, siehe 2.2.9;
- geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen, siehe 2.2.10.

2.2.2 Globale Berechnung

(1) Für eine globale Berechnung dürfen vereinfachte Ansätze zur Erfassung einzelner Tragwerksteile angewendet werden.

2.2.3 Membrantheoretische Berechnung

(1) Eine membrantheoretische Berechnung sollte nur angewendet werden, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- die Randbedingungen sind geeignet, um die Beanspruchungen der Schale ohne wesentliche Biegeeffekte in Auflagerreaktionen zu überführen;
- die Schalengeometrie ist stetig veränderlich (ohne Diskontinuitäten);
- die Lasten sind stetig verteilt (ohne örtliche Konzentrationen oder Punktlasten).

(2) Eine membrantheoretische Berechnung muss nicht notwendigerweise Verformungskompatibilität an Rändern oder zwischen Schalensegmenten unterschiedlicher Form oder zwischen unterschiedlich belasteten Schalensegmenten liefern. Die ermittelten Membranschnittkräfte erfüllen jedoch die Anforderungen in Bezug auf die Primärspannungen (LS1).

2.2.4 Lineare elastische Berechnung (LA)

(1) Die Linearität der Theorie folgt aus den Annahmen linear-elastischen Werkstoffverhaltens und linearer kleiner Verformungen. Die Theorie kleiner Verformungen impliziert, dass die Geometrie identisch mit derjenigen der unverformten Struktur bleibt.

(2) Eine LA-Berechnung erfüllt sowohl die Bedingungen der Verformungskompatibilität als auch des Gleichgewichtes. Die ermittelten Membran- und Biegeschnittkräfte erfüllen die Bedingungen für Primär- und Sekundärspannungen (AC) LS1 bis LS4 (AC).

2.2.5 Lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA)

(1) Die Bedingungen von 2.2.4 in Bezug auf die Annahmen zum Werkstoffverhalten und zur Geometrie werden erfüllt. Diese lineare Verzweigungsberechnung liefert jedoch unter der Annahme, dass sich weder die Geometrie noch die Belastungsrichtung oder das Werkstoffverhalten ändert, den kleinsten Eigenwert, bei dem die Schale in einen anderen Verformungszustand beulen kann. Imperfektionen aller Art werden außer Acht gelassen. Dieses Berechnungskonzept liefert den bezogenen idealen elastischen Beulwiderstand r_{Rcr} , siehe 8.6 und 8.7 (LS3).

2.2.6 Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA)

(1) Eine GNA-Berechnung erfüllt sowohl die Bedingungen des Gleichgewichtes als auch der Verformungskompatibilität, und zwar unter Einschluss der Geometrieveränderung, die von der Belastung verursacht wird. Das ermittelte Spannungsfeld erfüllt die Bedingungen für Primär- und Sekundärspannungen ($\square_{AC}$ LS2 und LS4 $\square_{AC}$).

(2) Wenn Druck- oder Schubspannungen in gewissen Teilen der Schale dominieren, liefert eine GNA-Berechnung die elastische Beullast der perfekten Struktur – einschließlich Änderungen der Geometrie –, die beim Beulsicherheitsnachweis (LS3) hilfreich sein kann.

(3) Falls dieses Berechnungskonzept für eine Beullastberechnung verwendet wird, müssen die Eigenwerte des Systems überprüft werden, um sicherzustellen, dass der numerische Prozess tatsächlich eine Verzweigung im Lastpfad erkennt.

2.2.7 Materiell nichtlineare Berechnung (MNA)

(1) Das Ergebnis einer MNA-Berechnung ist die plastische Grenzlast, die als Lasterhöhungsfaktor r_{Rpl} bezüglich des Bemessungswertes der Einwirkungen F_{Ed} formuliert werden kann. Dieses Berechnungskonzept liefert den in 8.6 und 8.7 zu verwendenden bezogenen plastischen Referenzwiderstand r_{Rpl} .

(2) Eine MNA-Berechnung kann für den Tragsicherheitsnachweis gegen $\square_{AC}$ die Grenzzustände LS1 und LS3 $\square_{AC}$ verwendet werden.

(3) Eine MNA-Berechnung kann auch durchgeführt werden, um das plastische Dehnungsinkrement $\Delta\varepsilon$ während eines Lastspiels zyklischer Belastung zu ermitteln, das für den Nachweis gegen zyklisches Plastizieren (LS2) verwendet werden kann.

2.2.8 Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)

(1) Die Ergebnisse einer GMNA-Berechnung sind, analog zu 2.2.7, die geometrisch nichtlineare plastische Grenzlast der perfekten Struktur und das plastische Dehnungsinkrement, die für die Nachweise gegen die Grenzzustände LS1 und LS2 verwendet werden können.

(2) Wenn Druck- oder Schubspannungen in gewissen Teilen der Schale dominieren, liefert eine GMNA-Berechnung die elasto-plastische Beullast der perfekten Struktur, die beim Beulsicherheitsnachweis (LS3) hilfreich sein kann, siehe 8.7.

(3) Falls dieses Berechnungskonzept für eine Beullastberechnung verwendet wird, sollten die Eigenwerte des Systems überprüft werden, um sicherzustellen, dass der numerische Prozess tatsächlich eine Verzweigung im Lastpfad erkennt.

2.2.9 Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)

(1) Eine GNIA-Berechnung wird in Fällen verwendet, in denen Druck- oder Schubspannungen in der Schale dominieren. Sie liefert elastische Beullasten der imperfekten Struktur, die beim Beulsicherheitsnachweis (LS3) hilfreich sein können.

(2) Falls dieses Berechnungskonzept für eine Beullastberechnung (LS3) verwendet wird, sollten die Eigenwerte des Systems überprüft werden, um sicherzustellen, dass der numerische Prozess tatsächlich eine Verzweigung im Lastpfad erkennt. Es muss sorgfältig darauf geachtet werden, sicherzustellen, dass die örtlichen Spannungen nicht Werte überschreiten, bei denen die Werkstoffnichtlinearität das Tragverhalten beeinflussen kann.

2.2.10 Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)

(1) Eine GMNIA-Berechnung wird in Fällen verwendet, in denen Druck- oder Schubspannungen in der Schale dominieren. Sie liefert elasto-plastische Beullasten der „realen“ imperfekten Struktur, die für den Beulsicherheitsnachweis (LS3) verwendet werden können, siehe 8.7.

(2) Falls dieses Berechnungskonzept für eine Beullastberechnung verwendet wird, sollten die Eigenwerte des Systems überprüft werden, um sicherzustellen, dass der numerische Prozess tatsächlich eine Verzweigung im Lastpfad erkennt.

(3) Falls dieses Berechnungskonzept für eine Beullastberechnung verwendet wird, sollte zusätzlich immer auch eine GMNA-Berechnung der perfekten Schale durchgeführt werden, um die Imperfektionsempfindlichkeit des Tragwerks erkennen zu können.

2.3 Schalenrandbedingungen

(1) Die für die Bemessungsberechnung angenommenen Randbedingungen sollten so gewählt werden, dass sie zuverlässig ein realistisches oder konservatives Modell der realen Konstruktion darstellen. Besondere Beachtung sollte nicht nur der Behinderung von Verschiebungen rechtwinklig zur Schalenwandung (Durchbiegungen) gewidmet werden, sondern auch der Behinderung von Verschiebungen in der Ebene der Schalenwandung (in Meridian- und in Umfangsrichtung), weil sie signifikante Auswirkungen auf die Festigkeit und den Beulwiderstand der Schale haben.

(2) In Schalenbeulberechnungen (Eigenwertanalysen) für den Grenzzustand LS3 sollte sich die Definition der Randbedingungen auf die inkrementellen Verschiebungen während des Beulprozesses beziehen und nicht auf die Gesamtverschiebungen, die vor dem Beulen von den einwirkenden Lasten erzeugt wurden.

(3) Die Randbedingungen am kontinuierlich unterstützten unteren Rand einer Schale sollten berücksichtigen, ob örtliches Anheben der Schale verhindert wird oder nicht.

(4) Die Verdrehung des Schalenrandes β_ϕ sollte besonders in kurzen Schalen und bei der Berechnung von Sekundärspannungen in längeren Schalen (nach den Grenzzuständen LS2 und LS4) beachtet werden.

(5) Die in 5.2.2 beschriebenen Randbedingungen sollten für Computerberechnungen und zur Auswahl der zutreffenden Formelausdrücke in den Anhängen A bis D verwendet werden.

(6) Die konstruktiven Verbindungen zwischen Schalensegmenten an einer Knotenlinie sollten so beschaffen sein, dass die für die Berechnung der einzelnen Schalensegmente angenommenen Randbedingungen praktisch sichergestellt sind.

3 Werkstoffe und Geometrie

3.1 Werkstoffeigenschaften

(1) Die Werkstoffeigenschaften der Stähle sind der einschlägigen Anwendungsnorm zu entnehmen.

(2) Wenn Werkstoffe mit nichtlinearer Spannungsdehnungslinie eingesetzt werden und ein spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis (siehe 8.5) geführt wird, sollte anstelle des Anfangstangentenmoduls E ein reduzierter Wert für den E -Modul eingesetzt werden. Falls kein besseres Verfahren zur Verfügung steht, sollte bei der Berechnung des idealen Beulwiderstandes oder der idealen Beulspannung der zur 0,2 %-Dehngrenze gehörende Sekantenmodul verwendet werden.

(3) Für eine globale numerische Berechnung unter Einschluss der Werkstoffnichtlinearität sollte in allen relevanten Gleichungen als Fließspannung f_y die 0,2 %-Dehngrenze verwendet werden. Die Spannungsdehnungslinie sollte für unlegierte Stähle aus EN 1993-1-5, Anhang C, und für nichtrostende Stähle aus EN 1993-1-4, Anhang C entnommen werden.

(4) Die Werkstoffeigenschaften gelten für Temperaturen bis 150 °C.

ANMERKUNG Im Nationalen Anhang dürfen Informationen zu den Werkstoffeigenschaften bei Temperaturen über 150 °C angegeben werden.

3.2 Bemessungswerte der Abmessungen

(1) Die Wanddicke t der Schale sollte wie in der einschlägigen Anwendungsnorm festgelegt angesetzt werden. Falls keine der vorhandenen Anwendungsnormen auf den gegebenen Fall zutrifft, ist die Nennwandungsdicke, reduziert um den vorgeschriebenen Korrosionsabschlag, zu verwenden.

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

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

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

(5) Die Regeln der vorliegenden Norm für den Beulsicherheitsnachweis sollten nicht außerhalb der Gültigkeitsbereiche für das Verhältnis r/t angewendet werden, die in Abschnitt 8 oder Anhang D oder in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 angegeben sind.

3.3 Geometrische Toleranzen und geometrische Imperfektionen

(1) Toleranzwerte für die Abweichungen der Schalengeometrie von den Nennwerten sind, soweit sie Gebrauchstauglichkeitsanforderungen betreffen, in den Ausführungsnormen angegeben. Zu beachtende Abweichungen sind:

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

ANMERKUNG Die Ausführungsanforderungen sind in EN 1090 festgelegt, an dieser Stelle wird jedoch wegen der kritischen Beziehung zwischen der Form der Toleranzen, der Größe des Toleranzmaßes und dem zu bestimmenden Widerstand der Schalenstruktur eine genauere Beschreibung dieser Toleranzen gegeben.

(2) Wenn der Grenzzustand Beulen (LS3, siehe 4.1.3) einer der zu beachtenden Grenzzustände der Tragfähigkeit ist, sind zusätzliche beulrelevante geometrische Toleranzwerte einzuhalten, um die geometrischen Imperfektionen innerhalb festgelegter Grenzen zu halten. Diese beulrelevanten geometrischen Toleranzwerte sind in Abschnitt 8 oder in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 quantifiziert.

(3) Rechenwerte für die Abweichungen der Schalenmittelfläche von der Nenngeometrie, wie sie als Annahmen für geometrische Ersatzimperfektionen (Gesamtimperfektionen oder örtliche Imperfektionen) für den numerisch gestützten Beulsicherheitsnachweis mittels globaler GMNIA-Berechnung (siehe 8.7) benötigt werden, sollten aus den festgelegten geometrischen Toleranzen abgeleitet werden. Entsprechende Regeln sind in 8.7 oder in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 angegeben.

4 Grenzzustände der Tragfähigkeit in stählernen Schalen

4.1 Zu beachtende Grenzzustände

4.1.1 LS1: Plastische Grenze oder Zugbruch

(1) Als Grenzzustand „Plastische Grenze“ sollte derjenige Zustand betrachtet werden, in dem die Fähigkeit der Struktur, ihren Einwirkungen zu widerstehen, infolge Werkstofffließens erschöpft ist. Der in diesem Grenzzustand von der Struktur geleistete Widerstand darf aus einem plastischen Kollapsmechanismus hergeleitet werden, der auf einer Theorie kleiner Verformungen beruht.

(2) Im Rahmen von LS1 sollte auch derjenige Zustand betrachtet werden, in dem die Schalenwandung durch ihre gesamte Dicke hindurch infolge von Zugbeanspruchung reißt, so dass die beiden Teile der Schale getrennt werden. Er wird „Zugbruch“ genannt.

(3) Bei Abwesenheit von Löchern für Verbindungsmittel darf der Grenzzustand Zugbruch als durch den Grenzzustand Plastische Grenze abgedeckt betrachtet werden. Sind jedoch Löcher für Verbindungsmittel vorhanden, so sollte ein zusätzlicher Tragsicherheitsnachweis nach EN 1993-1-1, 6.2, geführt werden.

(4) Beim Tragsicherheitsnachweis gegen den Grenzzustand LS1 darf plastisches oder teilplastisches Verhalten der Struktur angenommen werden (d. h. elastische Kompatibilität darf vernachlässigt werden).

ANMERKUNG Der grundlegende Charakter dieses Grenzzustandes ist, dass die getragenen Lasten oder Einwirkungen (der Widerstand) nicht erhöht werden können, ohne eine erhebliche Veränderung der Strukturgeometrie in Kauf zu nehmen oder die Verfestigungsreserven des Werkstoffes auszunutzen.

(5) Beim Nachweis von Grenzzustand LS1 sollten alle relevanten Lastkombinationen beachtet werden.

(6) Bei der Berechnung der Bemessungsspannungen und -schnittgrößen für den Nachweis von Grenzzustand LS1 sollte(n) eines oder mehrere der folgenden Berechnungskonzepte (siehe 2.2) angewendet werden:

- Membrantheorie;
- Gleichungen in den Anhängen A und B;
- lineare elastische Berechnung (LA);
- materiell nichtlineare Berechnung (MNA);
- geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA).

4.1.2 LS2: Zyklisches Plastizieren

(1) Als Grenzzustand „Zyklisches Plastizieren“ sollte derjenige Zustand betrachtet werden, in dem wiederholte Belastungs- und Entlastungszyklen Zug- und Druckfließen an derselben Stelle erzeugen, so dass im Tragwerk wiederholt plastische Arbeit geleistet wird, was schließlich zu örtlichen Rissen infolge Erschöpfung der Kapazität des Werkstoffes zur Energieabsorption führt.

ANMERKUNG Zu den Spannungen, die diesen Grenzzustand beschreiben, tragen alle Einwirkungen und Kompatibilitätsbedingungen des Tragwerks bei.

(2) Alle veränderlichen Einwirkungen (z. B. Nutzlasten und Temperaturgradienten), die zum Fließen führen und mit mehr als drei Lastspielen während der Lebensdauer der Struktur auftreten können, sollten beim Nachweis des Grenzzustandes LS2 berücksichtigt werden.

(3) Bei der Verifizierung dieses Grenzzustandes sollte die Verträglichkeit der Verformungen unter elastischen oder elastisch-plastischen Bedingungen berücksichtigt werden.

(4) Bei der Berechnung der Bemessungsspannungen und -schnittgrößen für den Nachweis von Grenzzustand LS2 sollte(n) eines oder mehrere der folgenden Berechnungskonzepte (siehe 2.2) angewendet werden:

- Formeln in Anhang C;
- elastische Berechnung (LA oder GNA);
- MNA- oder GMNA-Berechnung zur Bestimmung der plastischen Dehnungsscheingbreite.

(5) Versagen durch Kurzzeitermüdung (en: Low cycle fatigue) darf als ausgeschlossen gelten, wenn die in dieser Norm spezifizierten Nachweise geführt wurden.

4.1.3 LS3: Beulen

(1) Als Grenzzustand „Beulen“ sollte derjenige Zustand betrachtet werden, in dem das gesamte Tragwerk oder Teile davon plötzlich große Verformungen rechtwinklig zur Schalenmittelfläche entwickeln, verursacht durch Stabilitätsverlust unter Druck- oder Schub-Membranspannungen in der Schalenwandung, was zur Unfähigkeit, jegliche Erhöhung der Schnittgrößen zu ertragen, und daher möglicherweise zum Versagen des gesamten Tragwerks führt.

(2) Bei der Berechnung der Bemessungsspannungen und -schnittgrößen für den Nachweis von Grenzzustand LS3 sollte(n) eines oder mehrere der folgenden Berechnungskonzepte (siehe 2.2) angewendet werden:

- Membrantheorie, nur für axialsymmetrische Bedingungen (zu Ausnahmen siehe einschlägige Anwendungsteile von EN 1993);
- Formeln in Anhang A;
- lineare elastische Berechnung (LA), die für Spannungsberechnungen unter allgemeinen Belastungsbedingungen als Mindestforderung anzusehen ist (es sei denn, der betreffende Lastfall ist in Anhang A angegeben);
- lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA), die für Schalen unter allgemeinen Belastungsbedingungen gefordert ist, falls der ideale Beulwiderstand verwendet werden soll;
- materiell nichtlineare Berechnung (MNA), die für Schalen unter allgemeinen Belastungsbedingungen gefordert ist, falls der plastische Referenzwiderstand verwendet werden soll;
- GMNIA-Berechnung in Kombination mit MNA-, LBA- und GMNA-Berechnung und unter Anwendung geeigneter Ersatzimperfectionen und zu ermittelnder Kalibrierungsfaktoren.

(3) Beim Nachweis des Grenzzustandes LS3 sollten alle relevanten Lastkombinationen, die Druck- oder Schub-Membranspannungen in der Schale erzeugen, berücksichtigt werden.

(4) Da die Tragfähigkeit im Grenzzustand LS3 stark von der Qualität der Herstellung abhängt, sollten beim Nachweis die entsprechenden Anforderungen an die Ausführungstoleranzen beachtet werden.

ANMERKUNG Zu diesem Zweck werden drei Klassen für die geometrischen Toleranzen festgelegt, so genannte Herstelltoleranz-Qualitätsklassen sind in Abschnitt 8 angegeben.

4.1.4 LS4: Ermüdung

(1) Als Grenzzustand „Ermüdung“ sollte derjenige Zustand betrachtet werden, in dem wiederholte Zyklen von zu- und abnehmenden Spannungen zur Entstehung von Ermüdungsrissen führen.

(2) Bei der Berechnung der Bemessungsspannungen und -schnittgrößen für den Nachweis von Grenzzustand LS4 sollten folgende Berechnungskonzepte (siehe 2.2) angewendet werden:

- Formeln in Anhang C, zusammen mit Spannungskonzentrationsfaktoren;
- elastische Berechnung (LA oder GNA), zusammen mit Spannungskonzentrationsfaktoren.

(3) Alle veränderlichen Einwirkungen, die nach dem relevanten Einwirkungsspektrum in EN 1991 in Übereinstimmung mit dem entsprechenden Anwendungsteil von EN 1993-3 oder EN 1993-4 mit mehr als N_f -Zyklen während der Bemessungslebensdauer des Tragwerks auftreten, sollten beim Nachweis des Grenzzustandes LS4 berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Der Wert von N_f darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $N_f = 10\,000$ empfohlen.

4.2 Konzepte für den Tragsicherheitsnachweis von Schalen

4.2.1 Allgemeines

(1) Der Tragsicherheitsnachweis gegen die Grenzzustände der Tragfähigkeit sollte nach einem der folgenden Konzepte geführt werden:

- spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis;
- direkter Tragsicherheitsnachweis mit Hilfe von Bemessungsformeln;
- numerisch gestützter Tragsicherheitsnachweis durch globale Berechnung (z. B. mit Hilfe von Computerprogrammen auf der Grundlage der Finite-Elemente-Methode).

(2) Es sollte beachtet werden, dass die von verschiedenen Spannungskomponenten in der Schale verursachten elasto-plastischen Werkstoffbeanspruchungen unterschiedliche Auswirkungen auf die Versagensarten und die Grenzzustände der Tragfähigkeit haben. Die Spannungskomponenten sollten daher Spannungskategorien mit unterschiedlichen Grenzen zugeordnet werden. Spannungen, die von der Schale aufgebaut werden, um Gleichgewichtsbedingungen einzuhalten, sind als signifikanter anzusehen als Spannungen, die aus Verformungszwängen rechtwinklig zur Schale entstehen. Örtliche Spannungsspitzen aus Kerbwirkungen an konstruktiven Details dürfen als vernachlässigbar in ihrem Einfluss auf den Widerstand gegen statische Belastung angesehen werden.

(3) Als Spannungskategorien für den spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweis werden Primärspannungen, Sekundärspannungen und Lokalspannungen eingeführt. Primär- und Sekundärspannungen dürfen, falls sinnvoll, durch Schnittgrößen ersetzt werden.

(4) In einer globalen Berechnung tritt an die Stelle der Primär- und Sekundärspannungen die rechnerische Grenzlast und bei zyklischer Belastung die Dehnungsschwingbreite.

(5) Im Allgemeinen darf angenommen werden, dass Primärspannungen den Grenzzustand LS1 kontrollieren, dass LS3 in hohem Maße von den Primärspannungen abhängig ist, von den Sekundärspannungen jedoch beeinflusst werden kann, dass LS2 von der Kombination der Primär- und Sekundärspannungen abhängt und dass Lokalspannungen den Grenzzustand LS4 dominieren.

4.2.2 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis

4.2.2.1 Allgemeines

(1) Wenn das Konzept des spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweises angewendet wird, sollten die Grenzzustände mit Hilfe der drei Spannungskategorien Primär-, Sekundär- und Lokalspannungen formuliert werden. Die Kategorisierung erfolgt in der Regel auf der Basis der von Mises-Vergleichsspannung in einem Punkt, allerdings nicht bei den Beulspannungen.

4.2.2.2 Primärspannungen

(1) Als Primärspannungen gelten die Spannungen, die für das Gleichgewicht mit den aufgetragenen Belastungen erforderlich sind. Sie dürfen an jedem realistischen, statisch zulässigen System berechnet werden. Der Grenzzustand Plastische Grenze (LS1) sollte als erreicht betrachtet werden, wenn die Primärspannungen an einer ausreichenden Anzahl von Punkten durch die Wanddicke hindurch die Streckgrenze erreicht haben, so dass nur die Verfestigungsreserve des Werkstoffes oder eine Veränderung der Schalengeometrie eine weitere Vergrößerung des Schalenwiderstandes liefern würde.

(2) Der Ermittlung der Primärspannungen darf ein beliebiges System von Schnittgrößen zu Grunde gelegt werden, sofern es nur konsistent mit den Gleichgewichtsbedingungen des Tragwerks ist. Dabei dürfen auch die Vorteile der Plastizitätstheorie genutzt werden. Die Primärspannungen dürfen auch einer linearen elastischen Berechnung (LA) entnommen werden, da diese die Gleichgewichtsbedingungen a priori erfüllt. Im Übrigen darf auch jedes der in 5.3 genannten Berechnungskonzepte zu Grunde gelegt werden.

(3) Da eine Grenzlastermittlung für LS1 volles Durchplastizieren des Querschnitts erlaubt, dürfen die Primärspannungen aus Biegemomenten näherungsweise mit Hilfe des plastischen Widerstandsmomentes berechnet werden, siehe 6.2.1. Falls Interaktionen zwischen Schnittgrößen in einem Querschnitt auftreten, dürfen entsprechende Regeln, die auf der von Mises-Fließhypothese basieren, angewendet werden.

(4) Die Primärspannungen sollten auf den Bemessungswert der Streckgrenze begrenzt werden, siehe Abschnitt 6 (LS1).

4.2.2.3 Sekundärspannungen

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

ANMERKUNG Bei Annäherung an den von Mises-Fließzustand wachsen die Strukturverformungen ohne weitere Vergrößerung der Spannungen.

(2) Wenn eine zyklische Belastung Plastizieren verursacht und mehrere Lastzyklen auftreten, sollte eine mögliche Widerstandsabminderung durch die Sekundärspannungen in Betracht gezogen werden. Wenn die zyklische Belastung groß genug ist, um sowohl unter Maximallast als auch nach Entlastung Fließen zu verursachen, sollte ein mögliches Versagen durch zyklisches Plastizieren infolge der Sekundärspannungen in Betracht gezogen werden.

(3) Wenn zur Spannungsermittlung eine lineare elastische Berechnung durchgeführt wird, die alle Kompatibilitätsbedingungen beachtet (Randeffekte, Knotenlinien, veränderliche Wanddicken usw.), dürfen die linear durch die Dicke veränderlichen Spannungen als Summe der Primär- und Sekundärspannungen in einen Nachweis eingeführt werden, dem die von Mises-Fließhypothese zu Grunde liegt, siehe 6.2.

ANMERKUNG Die Sekundärspannungen werden niemals getrennt von den Primärspannungen benötigt.

(4) Die Sekundärspannungen sollten wie folgt begrenzt werden:

- Die Summe der Primär- und Sekundärspannungen (einschließlich Biegespannungen) sollte für den Grenzzustand des zyklischen Plastizierens (LS2, siehe Abschnitt 7) auf $2f_{yd}$ begrenzt werden.
- Die Membrankomponente der Summe der Primär- und Sekundärspannungen sollte durch den Bemessungsbeulwiderstand (LS3, siehe Abschnitt 8) begrenzt werden.
- Die Summe der Primär- und Sekundärspannungen (einschließlich Biegespannungen) sollte für den Grenzzustand der Ermüdung (LS4, siehe Abschnitt 9) auf die Ermüdungsfestigkeit begrenzt werden.

4.2.2.4 Lokalspannungen

(1) Örtliche Spannungsspitzen in der Schalenwandung infolge von Kerbwirkungen (Löcher, Schweißnähte, Dickensprünge, Befestigungen, Anschlüsse) sollten beim Nachweis des Grenzzustandes Ermüdung (LS4) berücksichtigt werden.

(2) Für die in EN 1993-1-9 aufgelisteten konstruktiven Details dürfen dem Ermüdungssicherheitsnachweis die linearen elastischen Nennspannungen (Summe der Primär- und Sekundärspannungen) an der entsprechenden Stelle zu Grunde gelegt werden. Für alle anderen konstruktiven Details dürfen die Lokalspannungen auch mit Hilfe von Spannungskonzentrationsfaktoren (Kerbfaktoren) aus den Spannungen einer LA-Berechnung ermittelt werden.

(3) Die Lokalspannungen sollten entsprechend den in Abschnitt 9 angegebenen Anforderungen des Ermüdungssicherheitsnachweises (LS4) begrenzt werden.

4.2.3 Direkter Tragsicherheitsnachweis

(1) Wenn das Konzept des direkten Tragsicherheitsnachweises angewendet wird, dürfen die Grenzzustände mit Hilfe von Bemessungsformeln formuliert werden, die entweder aus der Membrantheorie oder aus der Theorie plastischer Mechanismen oder aus der linearen elastischen Schalentheorie hergeleitet wurden.

(2) Die membrantheoretischen Formeln in Anhang A dürfen zur Ermittlung der Primärspannungen für die Grenzzustände LS1 und LS3 verwendet werden.

(3) Die plastizitätstheoretischen Formeln in Anhang B dürfen zur Ermittlung der plastischen Grenzlaster für den Grenzzustand LS1 verwendet werden.

(4) Die schalentheoretischen Formeln (LA) in Anhang C dürfen zur Ermittlung der Summen aus Primär- und Sekundärspannungen für die Grenzzustände LS2 und LS4 verwendet werden. Ein Beulsicherheitsnachweis (Grenzzustand LS3) darf auf den Membrananteilen dieser Formeln beruhen.

4.2.4 Numerisch gestützter Tragsicherheitsnachweis

(1) Wenn das Konzept des numerisch gestützten Tragsicherheitsnachweises mittels globaler Berechnung angewendet werden soll, sollten die Grenzzustände mit Hilfe eines der in 2.2 festgelegten alternativen Berechnungskonzepte, angesetzt auf die vollständige Struktur, formuliert werden (Ausnahme: Membrantheorie).

(2) Eine lineare elastische Berechnung (LA) darf zur Ermittlung von Spannungen oder Schnittgrößen für die Grenzzustände LS2 und LS4 verwendet werden. Der Membrananteil der LA-Spannungen darf für den Grenzzustand LS3 verwendet werden. Eine LA-Berechnung darf auch für den Grenzzustand LS1 verwendet werden, sie liefert jedoch nur einen angenäherten Schätzwert, und ihre Ergebnisse sollten nach den in Abschnitt 6 angegebenen Regeln interpretiert werden.

(3) Eine lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA) darf zur Ermittlung des idealen Beulwiderstandes des Tragwerks für den Grenzzustand LS3 verwendet werden.

(4) Eine materiell nichtlineare Berechnung (MNA) darf zur Ermittlung des plastischen Referenzwiderstandes für den Grenzzustand LS1 verwendet werden. Unter zyklischen Belastungsbedingungen darf eine MNA-Berechnung zur Ermittlung des plastischen Dehnungsinkrements für den Grenzzustand LS2 verwendet werden. Der plastische Referenzwiderstand wird außerdem im Rahmen des Beulsicherheitsnachweises Grenzzustand LS3 benötigt und darf mit Hilfe einer MNA-Berechnung ermittelt werden.

(5) Geometrisch nichtlineare elastische Berechnungen (GNA und GNIA) umfassen zwar die Berücksichtigung der Schalenverformungen, jedoch lässt keine der in Abschnitt 8 festgelegten Nachweismethoden zu, diese ohne eine GMNIA-Berechnung anzuwenden. Zur Ermittlung der elastischen Beullast der perfekten Schale darf eine GNA-Berechnung verwendet werden. Zur Ermittlung der elastischen Beullast der imperfekten Schale darf eine GNIA-Berechnung verwendet werden.

(6) Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnungen (GMNA, GMNIA) dürfen zur Ermittlung von Kollapslasten der perfekten Schale (GMNA) bzw. der imperfekten Schale (GMNIA) verwendet werden. Die GMNA-Berechnung darf, wie in 6.3 näher beschrieben, für den Nachweis des Grenzzustandes LS1 verwendet werden. Die GMNIA-Kollapslast darf unter zusätzlicher Berücksichtigung der GMNA-Kollapslast, wie in 8.7 näher beschrieben, für den Nachweis des Grenzzustandes LS3 verwendet werden. Unter zyklischen Belastungsbedingungen darf das plastische Dehnungsinkrement aus einer GMNA-Berechnung für den Grenzzustand LS2 verwendet werden.

5 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen

5.1 Schnittgrößen in Schalen

(1) Grundsätzlich sollten alle acht Schnittgrößen an jedem Punkt der Schalenwandung berechnet werden, und die Formulierung jedes Grenzzustandes sollte sie alle berücksichtigen. Jedoch sind die Schubspannungen τ_{xn} , τ_{0n} infolge der Querkräfte q_{xn} , q_{0n} in fast allen praktischen Fällen so klein im Vergleich zu den anderen Spannungskomponenten, dass sie in der Regel bei der Bemessung vernachlässigt werden können.

(2) Demzufolge darf für Bemessungszwecke die Formulierung der Grenzzustände nur auf den sechs Schalenschnittgrößen n_x , n_θ , $n_{x\theta}$, m_x , m_θ , $m_{x\theta}$ basiert werden. Für Rotationsschalen mit ausschließlich axialsymmetrischer Belastung und Auflagerung werden nur n_x , n_θ , m_x und m_θ benötigt.

(3) Bei Zweifeln hinsichtlich des Spannungswertes, der in einen der Tragsicherheitsnachweise einzuführen ist, sollte die von Mises-Vergleichsspannung an der Schalenoberfläche verwendet werden.

5.2 Modellierung der Schale für die Berechnung

5.2.1 Geometrie

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

(2) Als Krümmungsradius sollte dessen Nennwert verwendet werden. Imperfektionen dürfen vernachlässigt werden, mit Ausnahme der in Abschnitt 8 angegebenen Regeln für den Grenzzustand Beulen (LS3).

(3) Eine aus Schalensegmenten zusammengesetzte Schale sollte nicht für die Berechnung in die einzelnen Segmente zerlegt werden, es sei denn, die Randbedingungen jedes Segmentes werden so gewählt, dass ihre gegenseitige Beeinflussung auf der sicheren Seite wiedergegeben wird.

(4) Ein Basisring, der dafür gedacht ist, örtliche Auflagerkräfte in die Schale einzuleiten, sollte beim Beulsicherheitsnachweis (LS3) nicht von ihr getrennt werden.

(5) Exzentrizitäten und Sprünge in der Schalenmittelfläche sollten im Berechnungsmodell berücksichtigt werden, wenn sie als Folge der exzentrisch weitergeleiteten Membrankräfte signifikante Biegeeffekte erzeugen.

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

(7) Ringsteifen sollten als diskrete Tragelemente der Schale behandelt werden, es sei denn, ihr Abstand ist kleiner als $1,5\sqrt{rt}$.

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

(9) Eine Schale mit profilierter Wandung (Wellen vertikal oder horizontal) darf als orthotrope Schale behandelt werden, wenn die Wellenlänge kleiner als $0,5\sqrt{rt}$ ist.

(10) Eine Öffnung in der Schalenwandung darf bei der Modellierung vernachlässigt werden, wenn ihre größte Abmessung kleiner als $0,5\sqrt{rt}$ ist.

(11) Die Gesamtstabilität des vollständigen Tragwerks sollte nach den im zutreffenden Teil 3-1, Teil 3-2, Teil 4-1, Teil 4-2 oder Teil 4-3 von EN 1993 angegebenen Regeln nachgewiesen werden.

5.2.2 Randbedingungen

(1) Bei den Berechnungen für die Formulierung von Grenzzuständen sollten die zutreffenden Randbedingungen aus Tabelle 5.1 verwendet werden. Hinsichtlich spezieller Bedingungen für Beulberechnungen wird auf 8.3 verwiesen.

(2) Biegeeinspannungen an Schalenrändern dürfen bei einer Modellierung für den Grenzzustand LS1 vernachlässigt, sollten dagegen bei der Modellierung für die Grenzzustände LS2 und LS4 berücksichtigt werden. Für den Grenzzustand LS3 brauchen sie nur bei kurzen Schalen (siehe Anhang D) berücksichtigt zu werden.

(3) Auflager-Randbedingungen sollten darauf überprüft werden, ob sichergestellt ist, dass sie nicht größere Ungleichmäßigkeiten der übertragenen oder eingeleiteten Kräfte verursachen, insbesondere wenn diese exzentrisch zur Schalenmittelfläche angreifen. In Bezug auf genaue Angaben zur Anwendung dieser Regel auf Silos und Tankbauwerke wird auf die einschlägigen Anwendungsteile von EN 1993 verwiesen.

(4) Wenn eine globale numerische Berechnung durchgeführt wird, sollte für die Verschiebung v in Umfangsrichtung dieselbe Randbedingung angesetzt werden wie für die Verschiebung w in Normalenrichtung, es sei denn, es liegen besondere Umstände vor, aufgrund derer dies nicht angemessen ist.

Tabelle 5.1 — Randbedingungen für Schalen

Randbedingung Typ	Einfache Bezeichnung	Beschreibung	Verschiebung in Normalenrichtung	Verschiebung in Meridianrichtung	Verdrehung in Meridianrichtung
BC1r	eingespannter Rand	radial unverschieblich meridional unverschieblich biegeeingespannt	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_\phi = 0$
BC1f		radial unverschieblich meridional unverschieblich biegegeleitet	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_\phi \neq 0$
BC2r		radial unverschieblich meridional verschieblich biegeeingespannt	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi = 0$
BC2f	geleitet Rand	radial unverschieblich meridional verschieblich biegegeleitet	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi \neq 0$
BC3	freier Rand	radial frei meridional frei biegegeleitet	$w \neq 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi \neq 0$

ANMERKUNG Die Verschiebung v in Umfangsrichtung ist mit der Verschiebung w in Normalenrichtung eng verbunden, daher werden keine separaten Bedingungen für diese beiden Parameter unterschieden (siehe (4)), allerdings sollten die Werte in Spalte (4) für die Verschiebung v angenommen werden.

5.2.3 Einwirkungen und Umwelteinflüsse

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

(2) Örtliche und kleinflächige Einwirkungen sollten nicht durch äquivalente gleichförmige Lasten ersetzt werden, ausgenommen beim Beulsicherheitsnachweis (LS3) nach Abschnitt 8.

(3) Die Modellierung sollte, sofern relevant, folgende Effekte erfassen:

- örtliche Setzungen unter Schalenwandungen;
- örtliche Setzungen unter Einzelstützen;
- Gleichmäßigkeit/Ungleichmäßigkeit der Auflagerung;
- thermische Differenzen zwischen zwei Seiten einer Schale;
- thermische Differenzen zwischen Innen- und Außenoberfläche einer Schale;
- Windeffekte an Öffnungen und Durchdringungen;
- Windinteraktionseffekte bei Gruppen von Schalentragsystemen;
- Verbindungen mit anderen Tragsystemen;
- Bedingungen während der Montage.