

DIN 18800-4

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatz für
DIN 18800-4:1990-11**Stahlbauten –
Teil 4: Stabilitätsfälle –
Schalenbeulen**

Steel structure –
Part 4: Stability –
Analysis of safety against buckling of shells

Constructions métalliques –
Partie 4: Stabilité –
Voilement des coques

Gesamtumfang 51 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

Inhalt

Seite

Vorwort	3
1 Allgemeine Angaben	4
1.1 Anwendungsbereich	4
1.2 Normative Verweisungen	4
1.3 Begriffe	5
1.4 Häufig verwendete Formelzeichen	6
1.5 Grundsätzliches zum Beulsicherheitsnachweis	8
2 Vorgehen beim Beulsicherheitsnachweis	8
3 Herstellungsungenauigkeiten	12
4 Kreiszylinderschalen mit konstanter Wanddicke	15
4.1 Formelzeichen, Randbedingungen	15
4.2 Ideale Beulspannung	19
4.2.1 Druckbeanspruchung in Axialrichtung	19
4.2.2 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung	22
4.2.3 Schubbeanspruchung	23
4.3 Reale Beulspannung	24
4.4 Spannungen infolge Einwirkungen	25
4.5 Kombinierte Beanspruchung	27
4.5.1 Druck in Axialrichtung, Druck in Umfangsrichtung und Schub	27
4.5.2 Druck in Axialrichtung und Zug in Umfangsrichtung aus innerem Manteldruck	29
5 Kreiszylinderschalen mit abgestufter Wanddicke	30
5.1 Formelzeichen, Randbedingungen	30
5.2 Planmäßiger Versatz	31
5.3 Ideale Beulspannung	32
5.3.1 Druckbeanspruchung in Axialrichtung	32
5.3.2 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung	32
5.4 Reale Beulspannung	35
5.5 Spannungen infolge Einwirkungen	36
5.6 Kombinierte Beanspruchung	37
5.6.1 Druck in Axialrichtung und Druck in Umfangsrichtung	37
5.6.2 Druck in Axialrichtung und Zug in Umfangsrichtung aus innerem Manteldruck	38
6 Kegelschalen mit konstanter Wanddicke	38
6.1 Formelzeichen, Randbedingungen	38
6.2 Ideale Beulspannung	41
6.2.1 Ersatz-Kreiszylinder	41
6.2.2 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung	42
6.2.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung	42
6.2.4 Schubbeanspruchung	43
6.3 Reale Beulspannung	43
6.4 Spannungen infolge Einwirkungen	44
6.5 Kombinierte Beanspruchung	46
6.5.1 Druck in Meridianrichtung, Druck in Umfangsrichtung und Schub	46
6.5.2 Druck in Meridianrichtung und Zug in Umfangsrichtung aus innerem Manteldruck	47
7 Kugelschalen mit konstanter Wanddicke	47
7.1 Formelzeichen, Randbedingungen	47
7.2 Ideale Beulspannung	49
7.3 Reale Beulspannung	50
7.4 Spannungen infolge Einwirkungen	50
7.5 Kombinierte Beanspruchung	50
Literaturhinweise	51

Vorwort

Diese Norm wurde vom Normenausschuss Bauwesen (NABau), NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ erarbeitet. Sie enthält die vom Arbeitsausschuss verabschiedeten Änderungen aus dem Entwurf der DIN 18800-4/A1:2007-06. Die Änderungen zu DIN 18800-4:1990-11 sind mit einem senkrechten Strich am linken Seitenrand gekennzeichnet.

In DIN 18800-4:1990-11 wurde neben der üblichen, allgemein bekannten Gliederung in Abschnitte und Unterabschnitte der gesamte Text in überschaubare, (abschnittsweise) durchgehend benummerte, so genannte „Elemente“ gegliedert, deren jedes eine in sich geschlossene Aussage enthält und damit auch bei Übernahme in eine andere Norm verständlich bleibt. Durch die Anpassung der Norm an die derzeit gültigen Gestaltungsregeln nach DIN 820-2 musste die Reihenfolge einiger Abschnitte verändert werden. Zum Beispiel befinden sich die Normativen Verweisungen jetzt in Abschnitt 2 und nicht mehr am Ende der Norm. Dadurch passen die Elementnummerierungen nicht mehr zu den Abschnittsnummern. Da sich die Fachwelt an die Elementnummern gewöhnt hat, wurden diese beibehalten und nicht an die neue Abschnittsnummerierung angepasst.

Änderungen

Gegenüber DIN 18800-4:1990-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Anpassung an Nachfolgenormen von zurückgezogenen Normen und Aktualisierung der in der Norm zitierten normativen Verweisungen;
- b) Übernahme der Regelungen der 3. Auflage der Anpassungsrichtlinie Stahlbau (Oktober 1998) und der Änderungen und Ergänzungen der Anpassungsrichtlinie Stahlbau (Dezember 2001);
- c) Aktualisierung der Stahlsorten.

Frühere Ausgaben

DIN 18800-4: 1990-11

1 Allgemeine Angaben

1.1 Anwendungsbereich

(101) Geltungsbereich

Diese Norm gilt für Schalenkonstruktionen aus Stahl. Sie ist stets zusammen mit DIN 18800-1 anzuwenden.

ANMERKUNG Bei Berücksichtigung der entsprechenden Zahlenwerte für die Werkstoffkenngrößen können die Regelungen dieser Norm auch für Stahl bei anderen als in DIN 18800-1 angegebenen Temperaturen und für Schalen aus anderen Metallen verwendet werden. Dabei ist gegebenenfalls zu berücksichtigen, dass in dieser Norm in den Gleichungen für die ideale Beulspannung die Querkontraktionszahl mit $\mu = 0,3$ eingesetzt wurde.

(102) Tragsicherheitsnachweis

Diese Norm regelt den Tragsicherheitsnachweis für den Grenzzustand Instabilität von unverteiften Kreiszylinder-, Kegel- und Kugelschalen bei vorwiegend ruhender Belastung. Dieser Nachweis wird als Beulsicherheitsnachweis bezeichnet.

Diese Norm darf bei entsprechender Berücksichtigung der Randbedingungen auch für kreiszylindrische, kegelförmige oder kugelförmige Schalenteile, Teilfelder versteifter Schalen und Abschnitte zusammengesetzter Schalen angewendet werden.

ANMERKUNG 1 Unter „entsprechender Berücksichtigung der Randbedingungen“ ist beispielsweise für kreiszylindrische Schalenteile, Teilfelder oder Schalenabschnitte bei Verwendung der in dieser Norm angegebenen Gleichungen für die ideale Beulspannung zu verstehen, dass ihre in Umfangsrichtung verlaufenden Ränder (Querränder) hinreichend genau als radial unverschieblich eingestuft werden können.

ANMERKUNG 2 Für den Beulsicherheitsnachweis versteifter Schalen gegen globales Beulen, d. h. für den Tragsicherheitsnachweis ihrer Steifen, werden z. B. in [1] Hinweise gegeben.

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).

DIN 18800-1:2008-11, *Stahlbauten — Teil 1: Bemessung und Konstruktion*

DIN 18800-2, *Stahlbauten — Teil 2: Stabilitätsfälle — Knicken von Stäben und Stabwerken*

DIN 18800-3, *Stahlbauten — Teil 3: Stabilitätsfälle — Plattenbeulen*

DIN EN 10204, *Metallische Erzeugnisse — Arten von Prüfbescheinigungen*

KTA 3401.2¹⁾, *Reaktorsicherheitsbehälter aus Stahl — Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung*

1) Zu beziehen bei: Carl Heymanns Verlag KG, Luxemburger Straße 440, 50939 Köln.

1.3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

1.3.1

(103) Ideale Beullast

Die ideale Beullast ist die unter den idealisierenden Voraussetzungen

- perfekte Geometrie,
- perfekte Lasteinbringung und Lagerung,
- unbeschränkte Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes,
- ideal isotroper Werkstoff,
- keine Eigenspannungen,

nach der Elastizitätstheorie ermittelte kleinste Verzweigungslast.

1.3.2

(104) Ideale Beulspannung

Die ideale Beulspannung ist die zur idealen Beullast gehörende Membranspannung.

1.3.3

(105) Reale Beulspannung

Die reale Beulspannung ist die zur Erfassung der baupraktisch unvermeidbaren Einflüsse

- geometrische Imperfektionen,
- strukturelle Imperfektionen, sowie des
- nichtelastischen Werkstoffverhaltens

gegenüber der idealen Beulspannung abgeminderte Membranspannung. Sie entspricht dem charakteristischen Wert des Widerstandes im Grenzzustand Instabilität im Sinne von DIN 18800-1.

ANMERKUNG 1 Geometrische Imperfektionen sind herstellungsbedingte Abweichungen von der geometrischen Sollform (z. B. Vorbeulen, Unrundheiten, Schrumpfknicke an Schweißnähten, Exzentrizitäten an Stoßstellen).

ANMERKUNG 2 Strukturelle Imperfektionen sind z. B. Walz- und Schweiß Eigenspannungen sowie die Inhomogenität und Anisotropie von Werkstoffeigenschaften.

ANMERKUNG 3 Nichtelastisches Werkstoffverhalten kann entweder ähnlich einer ideal-plastischen Spannungsdehnungslinie (ausgeprägte Streckgrenze vorhanden) oder einer verfestigend-plastischen Spannungsdehnungslinie (0,2 %-Dehngrenze als Streckgrenze) vorliegen. Es hat in der Regel keinen signifikanten Einfluss auf die reale Beulspannung, wenn diese kleiner als 40 % der Streckgrenze ist.

1.3.4

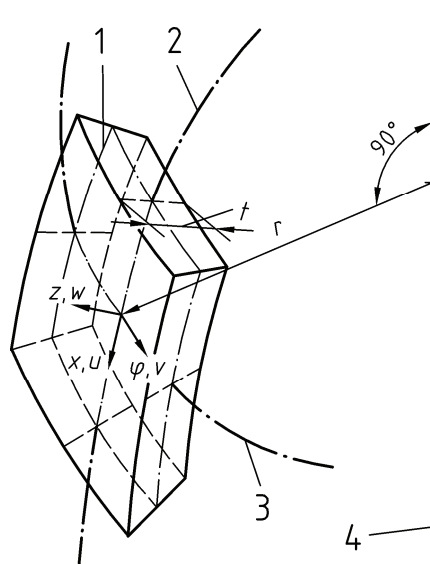
(106) Grenzbeulspannung

Die Grenzbeulspannung ist der Bemessungswert der realen Beulspannung. Man erhält sie durch Abminderung der realen Beulspannung mit dem Teilsicherheitsbeiwert des Widerstandes.

1.4 Häufig verwendete Formelzeichen

(107) Geometrische Größen

t	Wanddicke;
r	Breitenkreisradius der Schalenmittelfläche;
$d = 2 r$	Breitenkreisdurchmesser der Schalenmittelfläche;
R	Radius der Kugelmittelfläche;
e_V	planmäßiger Versatz der Schalenmittelflächen;
$l_{mK}, l_{mx}, l_{m\varphi}$	Messlängen zur Ermittlung von Herstellungsungenauigkeiten;
t_V	Tiefe von Vorbeulen (Vorbeultiefe);
U	Unrundheit;
e	unplanmäßige Exzentrizität;
x, φ	Koordinaten in der Schalenmittelfläche in Meridianrichtung (Richtung der Erzeugenden, bei Kreiszylindern identisch mit Axialrichtung) und in Umfangsrichtung;
z	Koordinate rechtwinklig zur Schalenmittelfläche;
u, v, w	Verschiebungen in den Koordinatenrichtungen x, φ, z .



Legende

- 1 Schalenmittelfläche
- 2 Meridian
- 3 Breitenkreis
- 4 Rotationsachse

Bild 1 — Geometrische Größen

ANMERKUNG Weitere Formelzeichen, die jeweils den speziellen Schalentyp betreffen, stehen am Beginn der Abschnitte 4 bis 7.

(108) Physikalische Kenngrößen, Festigkeiten

E Elastizitätsmodul;

f_y Streckgrenze.

ANMERKUNG Für die Zahlenwerte von E und $f_{y,k}$ siehe DIN 18800-1:2008-11, Tabelle 1.

(109) Nebenzeichen

Index R Widerstandsgröße;

Index k charakteristischer Wert einer Größe;

Index d Bemessungswert einer Größe.

ANMERKUNG Die Begriffe „Widerstand“, „charakteristischer Wert“ und „Bemessungswert“ sind in DIN 18800-1:2008-11, 3.1, definiert.

(110) Lastgrößen, Beanspruchungsgrößen

q Flächenlast rechtwinklig zur Schalenmittelfläche, als Druck von außen oder Sog von innen positiv;

p Linienlast oder Flächenlast in Schalenmittelfläche in Axial- oder Meridianrichtung;

s Linienlast in Schalenmittelfläche in Umfangsrichtung;

$n_x, n_\varphi, n_{x\varphi}$ Membranschnittkräfte;

σ_x, σ_φ Membrannormalspannungen, als Druck positiv;

τ Membranschubspannungen.

(111) Systemwerte

$\sigma_{xSi}, \sigma_{\varphi Si}, \tau_{Si}$ ideale Beulspannungen;

$\sigma_{xS,R,k}, \sigma_{\varphi S,R,k}, \tau_{S,R,k}$ reale Beulspannungen;

$\bar{\lambda}_S$ bezogener Schalenschlankheitsgrad;

κ Abminderungsfaktor (bezogene reale Beulspannung) = $\frac{\text{reale Beulspannung}}{\text{Streckgrenze}}$.

ANMERKUNG Der Index S kennzeichnet hier (im Gegensatz zu DIN 18800-1) das Schalenbeulen.

(112) Teilsicherheitsbeiwerte

γ_M Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand;

γ_F Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen.

ANMERKUNG 1 Die Zahlenwerte von γ_M sind Abschnitt 2, Element 206, zu entnehmen.

ANMERKUNG 2 Die Zahlenwerte für γ_F sind DIN 18800-1 zu entnehmen.

1.5 Grundsätzliches zum Beulsicherheitsnachweis

(113) Erforderlicher Nachweis

Für Schalenkonstruktionen aus Stahl ist außer den Nachweisen nach DIN 18800-1 ein Beulsicherheitsnachweis nach dieser Norm zu führen. Es ist nachzuweisen, dass die mit den Bemessungswerten der Einwirkungen ermittelte maßgebende Membranspannung die entsprechende Grenzbeulspannung nicht überschreitet.

ANMERKUNG 1 Die Regeln zur Berechnung der Bemessungswerte der Einwirkungen stehen in DIN 18800-1:2008-11, Abschnitte 7.2.1 und 7.2.2.

ANMERKUNG 2 DIN 18800-1 enthält keine speziellen Angaben für den Tragsicherheitsnachweis in Schalenkonstruktionen. Inwieweit im Vergleichsspannungsnachweis nach DIN 18800-1:2008-11, 7.5.2, Element 747, neben den in jedem Falle zu berücksichtigenden Membranspannungen auch Biegespannungen berücksichtigt werden müssen, hängt davon ab, ob sie für das Gleichgewicht erforderlich oder nicht erforderlich sind und ob sie einmalig oder wiederholt auftreten. Die einschlägigen Fachnormen enthalten zum Teil Hinweise hierzu. Hinweise zu sogenannten „Spannungskategorien“ werden z. B. in der KTA-Regel 3401.2, Fassung 6/85, gegeben.

(114) Ermittlung der realen Beulspannung

Die reale Beulspannung ist nach den Regeln der folgenden Abschnitte zu ermitteln. Dies setzt voraus, dass die für die einzelnen Schalenformen angegebenen Randbedingungen vorliegen und die Toleranzwerte für die Herstellungsungenauigkeiten nach Abschnitt 3 eingehalten werden. Der beullastabmindernde Einfluss von baupraktisch unvermeidlichen Unebenheiten der Auflagerung ist erfasst, der von ungleichmäßigen Nachgiebigkeiten der Auflagerung oder Bodensetzungen dagegen im Allgemeinen noch nicht.

(115) Ebene Platten als Näherung

Der Beulsicherheitsnachweis für Schalenkonstruktionen darf vereinfachend wie für ebene Platten unter Vernachlässigung der Krümmung, aber mit Beibehaltung der Lagerungsbedingungen und der für die Schale berechneten Membranschnittkräfte, geführt werden.

Die entsprechenden Nachweise enthält DIN 18800-3.

2 Vorgehen beim Beulsicherheitsnachweis

(201) Ideale Beulspannungen

Es sind die idealen Beulspannungen σ_{xSi} , $\sigma_{\varphi Si}$ und τ_{Si} mit den in den Abschnitten 4 bis 7 angegebenen Gleichungen zu ermitteln.

Die idealen Beulspannungen dürfen auch durch geeignete Berechnungsverfahren (z. B. Finite-Element-Methode) ermittelt werden, sofern sichergestellt ist, dass diese die kritischen Beulmuster (d. h. die zum niedrigsten Eigenwert führenden Eigenformen) zuverlässig auffinden.

ANMERKUNG Die in den Abschnitten 4 bis 7 angegebenen Gleichungen für die idealen Beulspannungen wurden überwiegend mit der klassischen linearen Beultheorie ermittelt. Berechnungen, die den zur Gleichgewichtsverzweigung führenden Beanspruchungszustand der perfekten Schale (Vorbeulzustand) genauer erfassen, können auch kleinere ideale Beulspannungen liefern. Diese brauchen nicht angesetzt zu werden, da die Differenz zu den mit den Gleichungen der Norm ermittelten idealen Beulspannungen mit den Abminderungsfaktoren nach Element 204 abgedeckt ist.

(202) Bezogene Schalenschlankheitsgrade

Mit den idealen Beulspannungen sind die bezogenen Schalenschlankheitsgrade $\bar{\lambda}_S$ mit den Gleichungen (1) bis (3) zu bestimmen.

$$\bar{\lambda}_{Sx} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{xSi}}} \quad (1)$$

$$\bar{\lambda}_{S\varphi} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\varphi Si}}} \quad (2)$$

$$\bar{\lambda}_{S\tau} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{Si}}} \quad (3)$$

ANMERKUNG Der bezogene Schalenschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_S$ in dieser Norm entspricht stabilitätstheoretisch den bezogenen Stabschlankheitsgraden $\bar{\lambda}_K$ und $\bar{\lambda}_M$ in DIN 18800-2 und dem bezogenen Plattenschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_P$ in DIN 18800-3. Er ist nicht identisch mit dem bezogenen Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_S$ in der früheren DASt-Richtlinie 013.

(203) Reale Beulspannungen

In Abhängigkeit von den bezogenen Schalenschlankheitsgraden $\bar{\lambda}_S$ sind Abminderungsfaktoren κ zu bestimmen. Die realen Beulspannungen $\sigma_{xS,R,k}$, $\sigma_{\varphi S,R,k}$ und $\tau_{S,R,k}$ ergeben sich durch Multiplikation der Abminderungsfaktoren mit dem charakteristischen Wert der Streckgrenze nach den Gleichungen (4) bis (6).

$$\sigma_{xS,R,k} = \kappa \cdot f_{y,k} \quad \text{mit } \kappa = f(\bar{\lambda}_{Sx}) \quad (4)$$

$$\sigma_{\varphi S,R,k} = \kappa \cdot f_{y,k} \quad \text{mit } \kappa = f(\bar{\lambda}_{S\varphi}) \quad (5)$$

$$\tau_{S,R,k} = \kappa \cdot \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3}} \quad \text{mit } \kappa = f(\bar{\lambda}_{S\tau}) \quad (6)$$

ANMERKUNG Die Vorgehensweise mit Abminderungsfaktoren, die auf die Streckgrenze bezogen sind und in Abhängigkeit von bezogenen Schlankheitsgraden bestimmt werden, stimmt mit der Vorgehensweise bei anderen Stabilitätsfällen in Stahlbauten überein (siehe DIN 18800-2 und DIN 18800-3).

(204) Abminderungsfaktoren

Die Abminderungsfaktoren κ ergeben sich je nach Schalenart und Beanspruchungsfall aus den Gleichungen (7) oder (8). Die Zuordnung erfolgt in den Abschnitten 4.3, 5.4, 6.3 und 7.3.

Normal imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle:

$$\bar{\lambda}_S \leq 0,4 : \quad \kappa_1 = 1 \quad (7a)$$

$$0,4 < \bar{\lambda}_S < 1,2 : \quad \kappa_1 = 1,274 - 0,686 \bar{\lambda}_S \quad (7b)$$

$$1,2 \leq \bar{\lambda}_S : \quad \kappa_1 = 0,65 / \bar{\lambda}_S^2 \quad (7c)$$

Bei Schalen mit

$$l^2/(r \cdot t) \geq 600 \quad (7d)$$

$$\text{und } (r/t)(f_y/E)^{0,5} \geq 1,75 \quad (7e)$$

darf in (7c) der Wert 0,65 durch α^* nach (7f) ersetzt werden

$$\alpha^* = 0,65 + (\alpha_{\text{col}} - 0,65)\{1 - 600 (r/t)/l^2\} \quad (7f)$$

mit $\alpha_{\text{col}} = 1/\{1 + 0,257 (t/r) (E/f_y)^{0,5}\}$ (7g)

Bei Kegelschalen ist l durch l^* und r durch r^* zu ersetzen.

Sehr imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle:

$$\bar{\lambda}_S \leq 0,25 : \quad \kappa_2 = 1 \quad (8a)$$

$$0,25 < \bar{\lambda}_S \leq 1,0 : \quad \kappa_2 = 1,233 - 0,933 \bar{\lambda}_S \quad (8b)$$

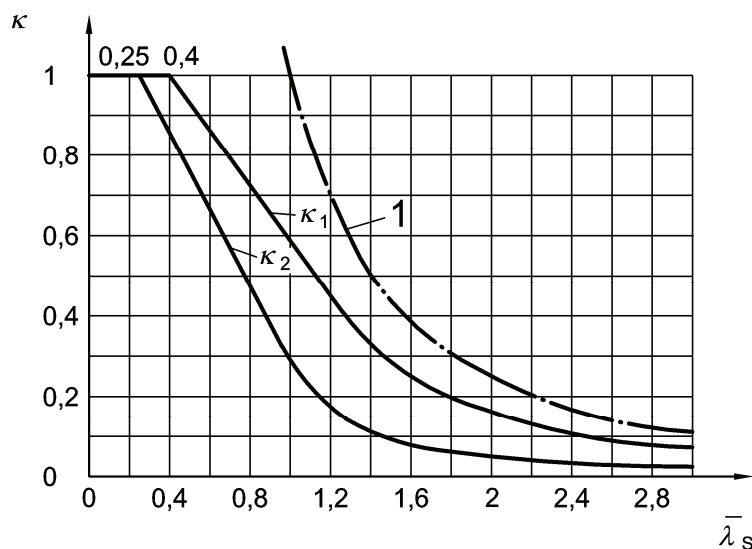
$$1,0 < \bar{\lambda}_S \leq 1,5 : \quad \kappa_2 = 0,3 / \bar{\lambda}_S^3 \quad (8c)$$

$$1,5 < \lambda \leq 64 (f_y/E)^{0,5} : \quad \kappa_2 = 0,2 / \lambda^2 \quad (8d)$$

$$2\,500 < r/t \leq 5\,000 : \quad \kappa_2 = 0,82 / \{[1 + (r/t)^{0,72}/91] \bar{\lambda}^2\} \quad (8e)$$

Die Gleichungen (7a) bis (8e) gelten nur für $r/t \leq 5\,000$ bei Kreiszylinderschalen und Kugelschalen und $r_2/t \leq 5\,000$ bei Kegelschalen.

ANMERKUNG Für $r/t > 5\,000$ und $r_2/t > 5\,000$ wird der Erfahrungsbereich verlassen.



1 Euler-Hyperbel

Bild 2 — Abminderungsfaktoren κ (bezogene reale Beulspannungen) für Schalenbeulen (Grundbeulkurven)

ANMERKUNG Die Abminderungsfaktoren κ erfassen den Einfluss der geometrischen und strukturellen Imperfektionen sowie des nichtelastischen Werkstoffverhaltens (vergleiche hierzu Anmerkungen zu 1.3, Element 105). Dabei wird die unterschiedliche Imperfektionsempfindlichkeit verschiedener Schalenarten und Beanspruchungsfälle durch die beiden unterschiedlich großen Abminderungsfaktoren κ_1 und κ_2 (Grundbeulkurven) berücksichtigt.

(205) Grenzbeulspannungen

Die Grenzbeulspannungen sind nach den Gleichungen (9) bis (11) zu ermitteln:

$$\sigma_{xS,R,d} = \sigma_{xS,R,k} / \gamma_M \quad (9)$$

$$\sigma_{\varphi S,R,d} = \sigma_{\varphi S,R,k} / \gamma_M \quad (10)$$

$$\tau_{S,R,d} = \tau_{S,R,k} / \gamma_M \quad (11)$$

mit γ_M nach Element 206.

(206) Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand

Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_M ergeben sich je nach Schalenart und Beanspruchungsfall aus den Gleichungen (12) oder (13).

Normal imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle, bei denen die reale Beulspannung mit κ_1 ermittelt wurde:

$$\gamma_{M1} = 1,1 \quad (12)$$

Sehr imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle, bei denen die reale Beulspannung mit κ_2 ermittelt wurde:

$$\bar{\lambda}_S \leq 0,25: \quad \gamma_{M2} = 1,1 \quad (13a)$$

$$0,25 < \bar{\lambda}_S < 2,00: \quad \gamma_{M2} = 1,1 \left(1 + 0,318 \frac{\bar{\lambda}_S - 0,25}{1,75} \right) \quad (13b)$$

$$2,00 \leq \bar{\lambda}_S: \quad \gamma_{M2} = 1,45 \quad (13c)$$

ANMERKUNG Der erhöhte Teilsicherheitsbeiwert γ_{M2} berücksichtigt die besonders große Streuung der experimentellen Beullasten von mittellangen dünnwandigen Kreiszylinder- und Kegelschalen unter konstanter Druckbeanspruchung in Axial- bzw. Meridianrichtung und von dünnwandigen Kugelschalen unter konstantem Außendruck, die der Festlegung der Grundbeulkurve κ_2 zugrunde gelegt wurden. Die besonders große Streuung der experimentellen Beullasten hat ihre Ursache im ungünstigen Nachbeulverhalten dieser Schalentypen und ihrer daraus resultierenden extremen Imperfektionsanfälligkeit.

Für Sonderfälle, bei denen sich das ungünstige Nachbeulverhalten und die extreme Imperfektionsanfälligkeit nicht einstellen können (z. B. schmale Teilfelder längsversteifter Kreiszylinder oder kurze Kreiszylinder unter Axialdruckbeanspruchung), kann auch ein geringerer γ_M -Wert gerechtfertigt sein.

(207) Einzelnachweise

Es sind je nach Beanspruchungsfall einer oder mehrere der folgenden Einzelnachweise zu führen:

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_{xS,R,d}} \leq 1 \quad (14)$$

$$\frac{\sigma_{\varphi}}{\sigma_{\varphi S,R,d}} \leq 1 \quad (15)$$

$$\frac{\tau}{\tau_{S,R,d}} \leq 1 \quad (16)$$

Dabei sind

$\sigma_x, \sigma_\varphi, \tau$ maßgebende Membrandruck- und -schubspannungen infolge der Bemessungswerte der Einwirkungen, berechnet nach der Elastizitätstheorie.

(208) Nachweis bei kombinierter Beanspruchung

Bei Vorhandensein von mehr als einer der drei beulauslösenden Membranspannungen (Druck in Axial- bzw. Meridianrichtung, Druck in Umfangsrichtung, Schub) ist außer den Einzelnachweisen ein Nachweis unter kombinierter Beanspruchung mit den jeweils angegebenen maßgebenden Membranspannungen und Interaktionsbedingungen zu führen (siehe 4.5, 5.6, 6.5, 7.5).

3 Herstellungsgenauigkeiten

(301) Toleranzwerte

Die in dieser Norm angegebenen realen Beulspannungen gelten nur, wenn die unvermeidbaren Herstellungsgenauigkeiten die in den Elementen 302 bis 304 angegebenen Toleranzwerte nicht überschreiten. Sie sind durch Stichproben zu überprüfen.

ANMERKUNG 1 Angaben zum Vorgehen bei Überschreitung der Toleranzwerte sind in Element 305 gemacht.

ANMERKUNG 2 Die Toleranzwerte sind im Allgemeinen nicht geeignet, als Grundlage für Imperfektions-Rechenannahmen zu dienen.

(302) Vorbeulen

Die Tiefe t_v von Vorbeulen (Vorbeultiefe) soll den Wert von 1 % der Messlänge nicht überschreiten. Die Messlänge (siehe Bild 3) beträgt

— bei Kugelschalen in beliebiger Richtung

$$l_{mK} = 4\sqrt{R \cdot t} \quad (17)$$

— bei Kreiszylinder- und Kegelschalen in Meridianrichtung

$$l_{mx} = 4\sqrt{r \cdot t} \quad (18)$$

— bei Kreiszylinder- und Kegelschalen in Umfangsrichtung

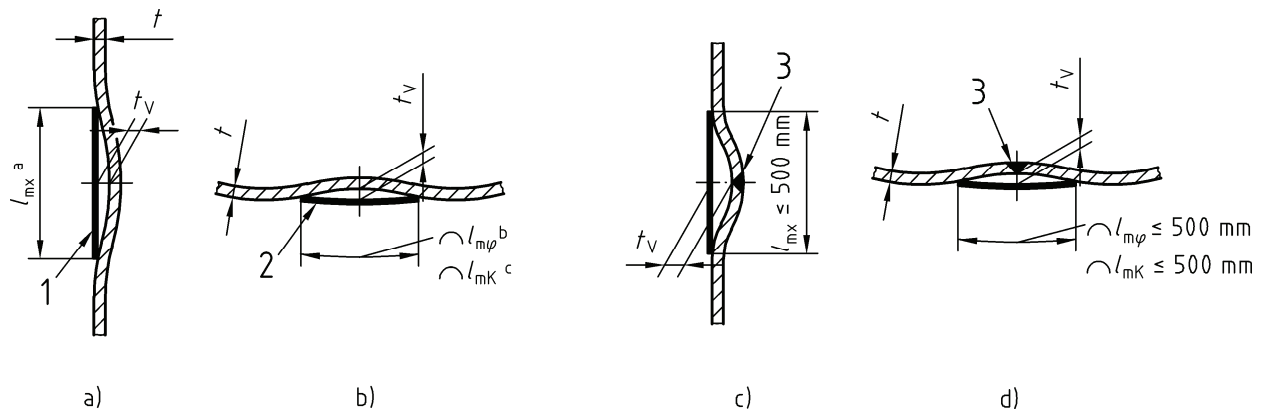
$$l_{m\varphi} = \frac{2,3 r}{\sqrt{\frac{r}{l}} \sqrt{\frac{r}{t}}} \quad (19a)$$

jedoch

$$l_{m\varphi} \leq r \quad (19b)$$

Die Messlänge darf in allen drei Fällen auf 2 000 mm begrenzt werden.

Im Bereich von Schweißnähten beträgt die Messlänge höchstens 500 mm.



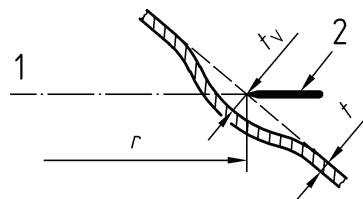
Legende

- | | | | |
|---|-------------|---|---------------|
| 1 | Messlatte | a | nach Gl. (18) |
| 2 | Messlehre | b | nach Gl. (19) |
| 3 | Schweißnaht | c | nach Gl. (17) |

Bild 3 — Messlängen und Vorbeultiefen

ANMERKUNG 1 Die Messlängen entsprechen in ihrer Größenordnung den Abmessungen einer Beule des kritischen Nachbeulmusters der Kugel unter Außendruck (l_{mk}), des Kreiszyinders unter Axialdruck (l_{mx}) bzw. des Kreiszyinders unter Außendruck ($l_{m\phi}$).

ANMERKUNG 2 Bei Kegelschalen wird für die Messung in Umfangsrichtung die Messlehre in der Ebene des Breitenkreises angesetzt. Die Messung der Vorbeultiefe t_v darf aber normal zum Meridian erfolgen (siehe Bild 4):



Legende

- | | |
|---|---|
| 1 | Breitenkreis |
| 2 | Querschnitt durch Messlehre mit Messlänge $l_{m\phi}$ |

Bild 4 — Messung der Vorbeulen in Umfangsrichtung bei Kegelschalen

(303) Unrundheit

Die Unrundheit U soll Bedingung (20) einhalten.

$$U = 2 \cdot \frac{\max d - \min d}{\max d + \min d} \cdot 100 \leq \text{zul } U \quad (20)$$

Hierin sind $\max d$ und $\min d$ der jeweils größte und kleinste gemessene Durchmesser (siehe Bild 5) und $\text{zul } U$ die zulässige Unrundheit nach Gleichung (21).

$$\text{zul } U = 2,0 \% \quad \text{für } d \leq 500 \text{ mm} \quad (21a)$$

$$\text{zul } U = 0,5 \% \quad \text{für } d \geq 1\,250 \text{ mm} \quad (21b)$$

Zwischen $d = 500 \text{ mm}$ und $d = 1\,250 \text{ mm}$ ist linear zu interpolieren.

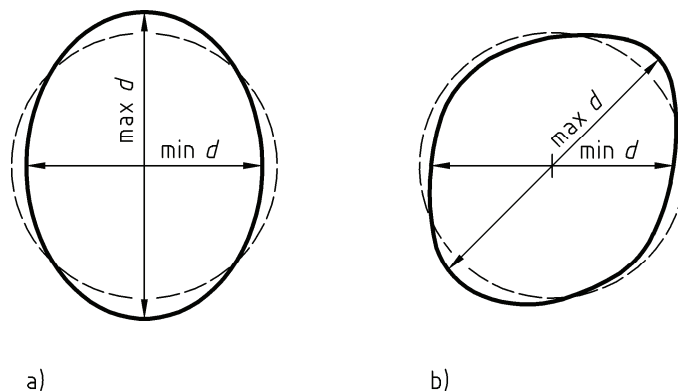


Bild 5 — Unrundheit

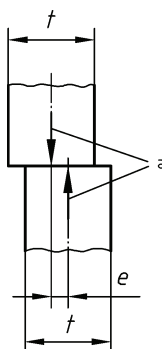
(304) Exzentrizitäten

Unplanmäßige Exzentrizitäten e an Stoßstellen der Schalenwand rechtwinklig zur Druckbeanspruchungsrichtung sollen Bedingung (22) einhalten.

$$e \leq 0,2 t \quad (22a)$$

jedoch

$$e \leq 3 \text{ mm} \quad (22b)$$

**Legende**

^a Druckbeanspruchung

Bild 6 — Exzentrizität

(305) Überschreitung der Toleranzwerte

Werden die Toleranzwerte nach den Elementen 302 bis 304 überschritten, so ist im Einzelfall zu entscheiden, ob Richtarbeiten oder andere Maßnahmen erforderlich sind.

Der Zustand darf ohne besondere Maßnahmen belassen werden, wenn die Toleranzwerte nicht mehr als bis zu ihrem doppelten Wert überschritten werden und der Beulsicherheitsnachweis mit einem reduzierten Abminderungsfaktor nach Gleichung (23) geführt wird.

$$\text{red } \kappa = \kappa \left[1 - \frac{\bar{\lambda}_S}{3} \left(\frac{\text{vorh } a}{\text{zul } a} - 1 \right) \right] \quad \text{für } \bar{\lambda}_S < 1,5 \quad (23a)$$

bzw.

$$\text{red } \kappa = \kappa \left(1,5 - 0,5 \frac{\text{vorh } a}{\text{zul } a} \right) \quad \text{für } \bar{\lambda}_S \geq 1,5 \quad (23b)$$

Dabei ist

- κ Abminderungsfaktor nach den Gleichungen (7) bzw. (8);
- zul a zulässige Vorbeultiefe zul t_v nach Element 302 oder zulässige Unrundheit zul U nach Element 303 oder zulässige Exzentrizität zul e nach Element 304;
- vorh a vorhandene Vorbeultiefe vorh t_v oder vorhandene Unrundheit vorh U oder vorhandene Exzentrizität vorh e (zul $a \leq$ vorh $a \leq 2$ zul a).

Werden die Toleranzwerte mehrerer Arten von Herstellungsungenauigkeiten gleichzeitig überschritten, so genügt es, die ungünstigste Einzelüberschreitung vorh a / zul a in Gleichung (23) einzusetzen.

ANMERKUNG 1 Vor der Entscheidung für Richtarbeiten sollte stets bedacht werden, dass dabei zusätzliche Eigenspannungen entstehen können. Es sollte auch der Ausnutzungsgrad in Betracht gezogen werden. In Zweifelsfällen ist es empfehlenswert, den Aufsteller der statischen Berechnung hinzuzuziehen.

ANMERKUNG 2 Gleichung (23) stellt eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung des von den zu großen geometrischen Imperfektionen zusätzlich verursachten Abfalls der realen Beulspannungen dar.

(306) Unterschreitung der Nenndicke

Bei Wanddicken $t < 5$ mm ist der Beulsicherheitsnachweis statt mit t mit der effektiven Wanddicke t_{eff} nach Gleichung (24) zu führen.

$$t_{\text{eff}} = t - 0,5 \Delta t \quad (24)$$

Dabei ist

- Δt zulässige Unterschreitung der Nenndicke nach jeweiliger Liefernorm.

Bei Blechen mit bestellter Mindestwanddicke und entsprechenden Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 oder 3.2 nach DIN EN 10204 darf der Beulsicherheitsnachweis mit der bescheinigten Mindestwanddicke geführt werden.

4 Kreiszylinderschalen mit konstanter Wanddicke

4.1 Formelzeichen, Randbedingungen

(401) Geometrische Größen

- l Zylinderlänge
- r Radius der Zylindermittelfläche

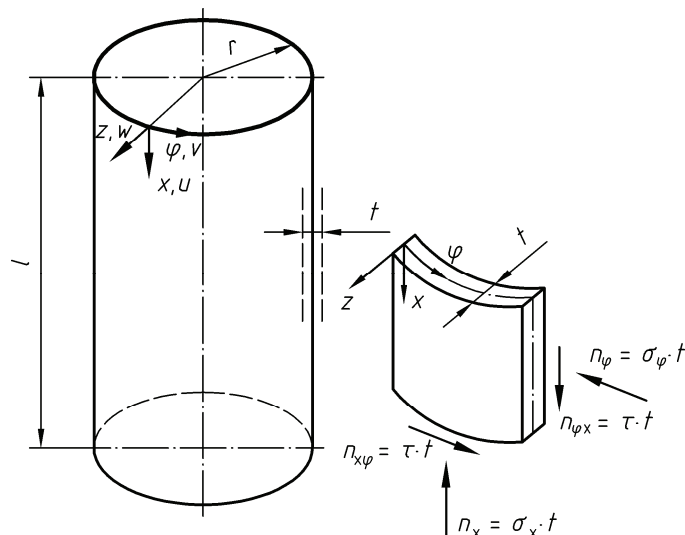


Bild 7 — Geometrie und Membranschnittkräfte des Kreiszylinders

ANMERKUNG Zusätzlich zur Konstanz der Wanddicke wird in diesem Abschnitt vorausgesetzt, dass an keiner Stelle (beispielsweise an Stößen) ein planmäßiger Versatz vorhanden ist. Angaben zur näherungsweisen Behandlung „überlappter“ Kreiszylinderschalen sind in 5.4, Element 514 gemacht.

(402) Beanspruchungsgrößen, Beulspannungen

a) Druckbeanspruchung in Axialrichtung

σ_x Axialdruckspannung

σ_{xSi} ideale Axialbeulspannung

$\sigma_{xS,R,k}$ reale Axialbeulspannung

b) Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung

σ_φ Umfangsdruckspannung

$\sigma_{\varphi Si}$ ideale Umfangsbeulspannung

$\sigma_{\varphi S,R,k}$ reale Umfangsbeulspannung

c) Schubbeanspruchung

τ Schubspannung

τ_{Si} ideale Schubbeulspannung

$\tau_{S,R,k}$ reale Schubbeulspannung

ANMERKUNG Beispiele für die verschiedenen Beanspruchungen sind in den Bildern 8 bis 10 angegeben.