

Stahlbauten

Stabilitätsfälle, Schalenbeulen

DIN
18 800
Teil 4

Steel structures; stability; buckling of shells
Constructions métalliques; stabilité; voilement des coques

Diese Norm wurde im NABau-Fachbereich 08 Stahlbau — Deutscher Ausschuß für Stahlbau e.V. — ausgearbeitet. Mit den vorliegenden neuen Normen der Reihe DIN 18 800 wurde erstmals das Sicherheits- und Bemessungskonzept der im Jahre 1981 vom NABau herausgegebenen „Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen an bauliche Anlagen“ (GruSiBau) verwirklicht. Darüber hinaus ist auch den laufenden Entwicklungen hinsichtlich der europäischen Vereinheitlichungsbemühungen (Stichwort: EUROCODES) Rechnung getragen worden. Alle Verweise auf die Normen DIN 18 800 Teil 1, Teil 2 und Teil 3 beziehen sich auf deren Ausgabe November 1990.

Inhalt

	Seite		Seite
1 Allgemeine Angaben	2	5.4 Reale Beulspannung	15
1.1 Anwendungsbereich	2	5.5 Spannungen infolge Einwirkungen	15
1.2 Begriffe	2	5.6 Kombinierte Beanspruchung	16
1.3 Häufig verwendete Formelzeichen	2	5.6.1 Druck in Axialrichtung und	
1.4 Grundsätzliches zum Beulsicherheitsnachweis	3	Druck in Umfangsrichtung	16
2 Vorgehen beim Beulsicherheitsnachweis	3	5.6.2 Druck in Axialrichtung und Zug in	
3 Herstellungsgenauigkeiten	5	Umfangsrichtung aus innerem Manteldruck	16
4 Kreiszylinderschalen mit konstanter Wanddicke	6	6 Kegelschalen mit konstanter Wanddicke	16
4.1 Formelzeichen, Randbedingungen	6	6.1 Formelzeichen, Randbedingungen	16
4.2 Ideale Beulspannung	8	6.2 Ideale Beulspannung	18
4.2.1 Druckbeanspruchung in Axialrichtung	8	6.2.1 Ersatz-Kreiszylinder	18
4.2.2 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung	9	6.2.2 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung	18
4.2.3 Schubbeanspruchung	10	6.2.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung	18
4.3 Reale Beulspannung	10	6.2.4 Schubbeanspruchung	19
4.4 Spannungen infolge Einwirkungen	10	6.3 Reale Beulspannung	19
4.5 Kombinierte Beanspruchung	11	6.4 Spannungen infolge Einwirkungen	19
4.5.1 Druck in Axialrichtung,		6.5 Kombinierte Beanspruchung	20
Druck in Umfangsrichtung und Schub	11	6.5.1 Druck in Meridianrichtung, Druck	
4.5.2 Druck in Axialrichtung und Zug in		in Umfangsrichtung und Schub	20
Umfangsrichtung aus innerem Manteldruck	12	6.5.2 Druck in Meridianrichtung und Zug	
5 Kreiszylinderschalen mit abgestufter Wanddicke	13	in Umfangsrichtung aus innerem Manteldruck	20
5.1 Formelzeichen, Randbedingungen	13	7 Kugelschalen mit konstanter Wanddicke	20
5.2 Planmäßiger Versatz	13	7.1 Formelzeichen, Randbedingungen	20
5.3 Ideale Beulspannung	13	7.2 Ideale Beulspannung	21
5.3.1 Druckbeanspruchung in Axialrichtung	13	7.3 Reale Beulspannung	22
5.3.2 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung	13	7.4 Spannungen infolge Einwirkungen	22
		7.5 Kombinierte Beanspruchung	22
		Zitierte Normen und andere Unterlagen	22
		Erläuterungen	23

Fortsetzung Seite 2 bis 23

Diese Neuauflage von DIN 18 800 Teil 4 enthält gegenüber der Erstauflage Druckfehlerberichtigungen, die an den entsprechenden Stellen durch einen Balken am Rand gekennzeichnet sind.

Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

1 Allgemeine Angaben

1.1 Anwendungsbereich

(101) Geltungsbereich

Diese Norm gilt für Schalenkonstruktionen aus Stahl. Sie ist stets zusammen mit DIN 18 800 Teil 1 anzuwenden.

Anmerkung: Bei Berücksichtigung der entsprechenden Zahlenwerte für die Werkstoffkenngrößen können die Regelungen dieser Norm auch für Stahl bei anderen als in DIN 18 800 Teil 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 unverstärkten 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 Begriffe

(103) Ideale Beullast

Die ideale Beullast ist die unter den idealisierenden Voraussetzungen

- perfekte Geometrie,
 - perfekte Lasteinbringung und Lagerung,
 - unbeschränkte Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes,
 - ideal isotroper Werkstoff,
 - keine Eigenspannungen,
- nach der Elastizitätstheorie ermittelte kleinste Verzweigungslast.

(104) Ideale Beulspannung

Die ideale Beulspannung ist die zur idealen Beullast gehörende Membranspannung.

(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 18 800 Teil 1.

Anmerkung 1: Geometrische Imperfektionen sind herstellungsbedingte Abweichungen von der geometrischen Sollform (z.B. Vorbeulen, Unrundheiten, Schrumpfnicke 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.

(106) Grenzbeulspannung

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

1.3 Häufig verwendete Formelzeichen

(107) Geometrische Größen

t	Wanddicke
r	Breitenkreisradius der Schalenmittelfläche
$d = 2r$	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

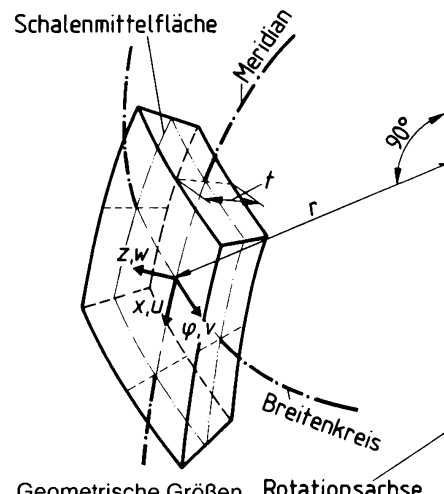


Bild 1. Geometrische Größen Rotationsachse

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 18 800 Teil 1, Tabelle 1.

(109) NebenzeichenIndex R WiderstandsgrößeIndex k charakteristischer Wert einer GrößeIndex d Bemessungswert einer Größe

Anmerkung: Die Begriffe „Widerstand“, „charakteristischer Wert“ und „Bemessungswert“ sind in DIN 18 800 Teil 1, Abschnitt 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
$$\kappa = \frac{\text{Abminderungsfaktor (bezogene reale Beulspannung)}}{\text{Streckgrenze}}$$

Anmerkung: Der Index S kennzeichnet hier (im Gegensatz zu DIN 18 800 Teil 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 18 800 Teil 1 zu entnehmen.

1.4 Grundsätzliches zum Beulsicherheitsnachweis

(113) Erforderlicher Nachweis

Für Schalenkonstruktionen aus Stahl ist außer den Nachweisen nach DIN 18 800 Teil 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 18 800 Teil 1, Abschnitte 7.2.1 und 7.2.2.

Anmerkung 2: DIN 18 800 Teil 1 enthält keine speziellen Angaben für den Tragsicherheitsnachweis in Schalenkonstruktionen. Inwieweit im Vergleichspannungsnachweis nach DIN 18 800 Teil 1, Abschnitt 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.

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 (das heißt 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.

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

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

$$\bar{\lambda}_{S\tau} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{1,3 \cdot \tau_{Si}}} \quad (3)$$

Anmerkung: Der bezogene Schalenschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_S$ in dieser Norm entspricht stabilitätstheoretisch den bezogenen Stabschlankheitsgraden $\bar{\lambda}_K$ und $\bar{\lambda}_M$ in DIN 18 800 Teil 2 und dem bezogenen Plattenschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_P$ in DIN 18 800 Teil 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).

$$\sigma_{xS,R,k} = \kappa \cdot f_{y,k} \quad (4)$$

mit $\kappa = f(\bar{\lambda}_{Sx})$

$$\sigma_{\varphi S,R,k} = \kappa \cdot f_{y,k} \quad (5)$$

mit $\kappa = f(\bar{\lambda}_{S\varphi})$

$$\tau_{S,R,k} = \kappa \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

mit $\kappa = f(\bar{\lambda}_{S\tau})$

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 18 800 Teile 2 und 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:

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

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

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

Sehr imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle:

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

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

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

$$1,5 < \bar{\lambda}_S: \kappa_2 = 0,2/\bar{\lambda}_S^2 \quad (8d)$$

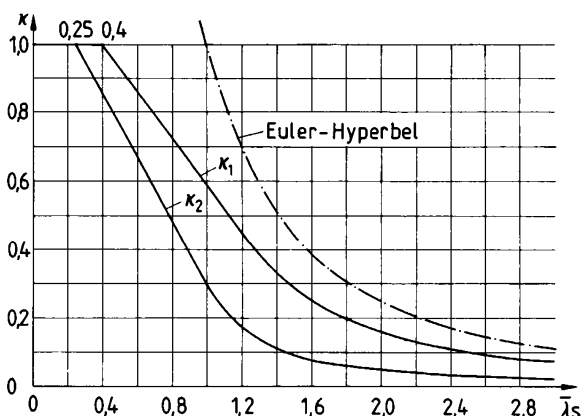


Bild 2. Abminderungsfaktoren κ (bezogene reale Beulspannungen) für Schalenbeulen (Grundbeulkurven)

Anmerkung: Die Abminderungsfaktoren κ erfassen den Einfluß der geometrischen und strukturellen Imperfektionen sowie des nichtelastischen Werkstoffverhaltens (vergleiche hierzu Anmerkungen zu Abschnitt 1, 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:

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

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

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

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 zugrundegelegt 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:

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

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

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

Hierin bedeuten:

$\sigma_x, \sigma_{\varphi}, \tau$ 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 beulauflösenden 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 Abschnitte 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

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

jedoch

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

Die Meßlänge darf in allen drei Fällen auf 2000 mm begrenzt werden.

Im Bereich von Schweißnähten beträgt die Meßlänge höchstens 500 mm.

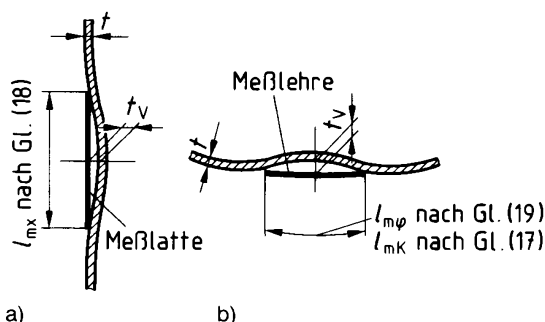


Bild 3. Meßlängen und Vorbeultiefen

Anmerkung 1: Die Meßlängen entsprechen in ihrer Größenordnung den Abmessungen einer Beule des kritischen Nachbeulmusters der Kugel unter Außendruck (l_{mk}), des Kreiszylinders unter Axialdruck (l_{mx}) bzw. des Kreiszylinders unter Außendruck ($l_{m\varphi}$).

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):

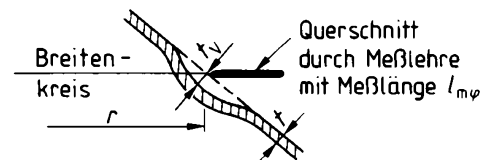


Bild 4. Messung der Vorbeulen in Umfangsrichtung bei Kegelschalen

(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).

$$\text{zul } U = 2,0 \% \quad (21 a)$$

für $d \leq 500 \text{ mm}$,

$$\text{zul } U = 0,5 \% \quad (21 b)$$

für $d \geq 1250 \text{ mm}$.

Zwischen $d = 500 \text{ mm}$ und $d = 1250 \text{ mm}$ ist linear zu interpolieren.

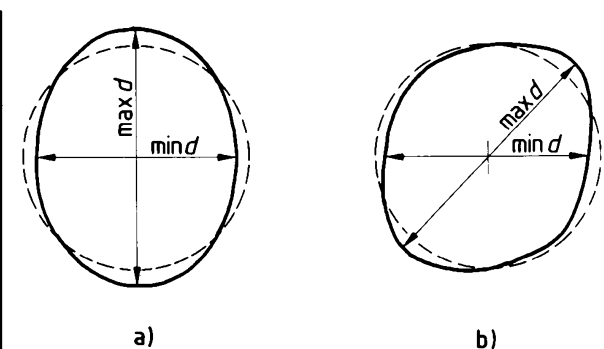
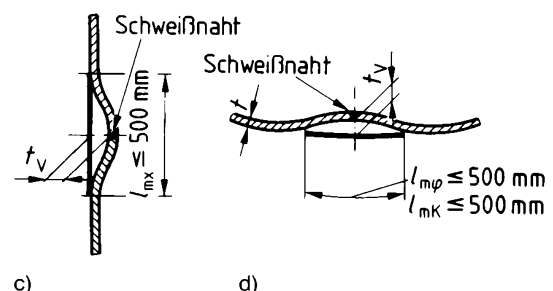


Bild 5. Unrundheit



c)

d)

(304) Exzentrizitäten

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

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

jedoch

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

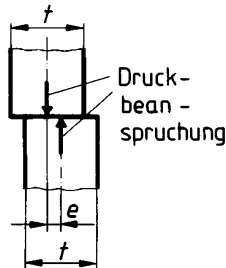


Bild 6. Exzentrizität

(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.

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

für $\bar{\lambda}_S < 1,5$

bzw.

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

für $\bar{\lambda}_S \geq 1,5$

Hierin bedeuten:

- 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 $a \leq \text{vorh } a \leq 2 \text{ zul } a$)

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

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

Hierin bedeutet:

Δt zulässige Unterschreitung der Nenndicke nach jeweiliger Liefornorm

Bei Blechen mit bestellter Mindestwanddicke und entsprechenden Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 A, B oder C oder Abnahmeprüfprotokollen 3.2 A oder C nach DIN 50049 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

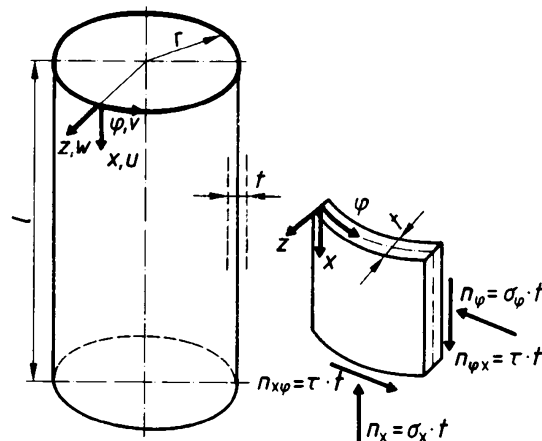


Bild 7. Geometrie und Membranschnittkräfte des Kreiszylinders

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 näherungsweise Behandlung „überlappter“ Kreiszylinderschalen sind in Abschnitt 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.

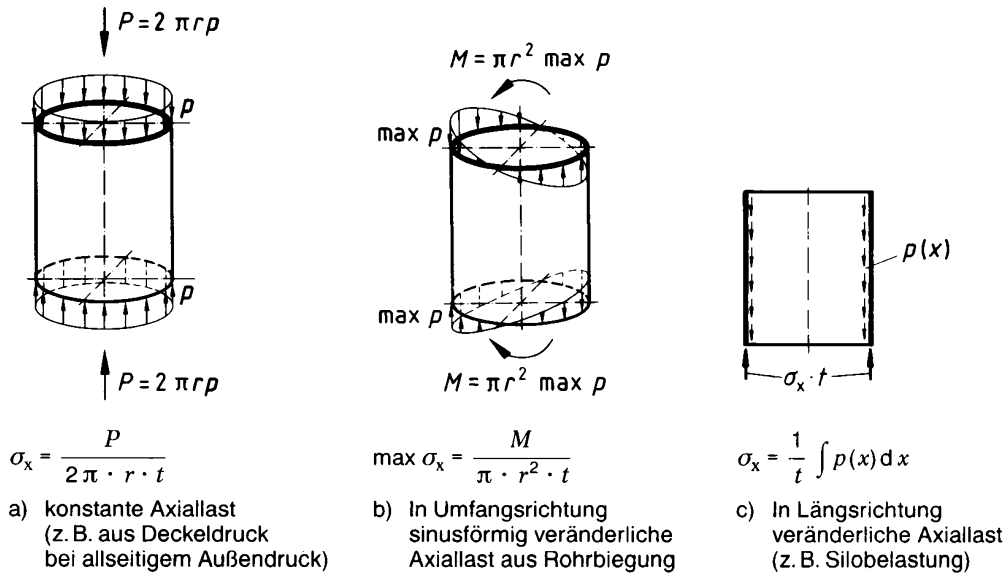


Bild 8. Beispiele für Druckbeanspruchung in Axialrichtung

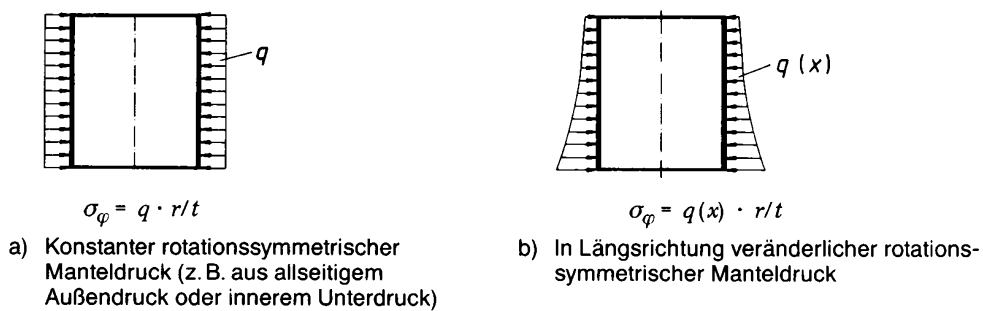


Bild 9. Beispiele für Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung

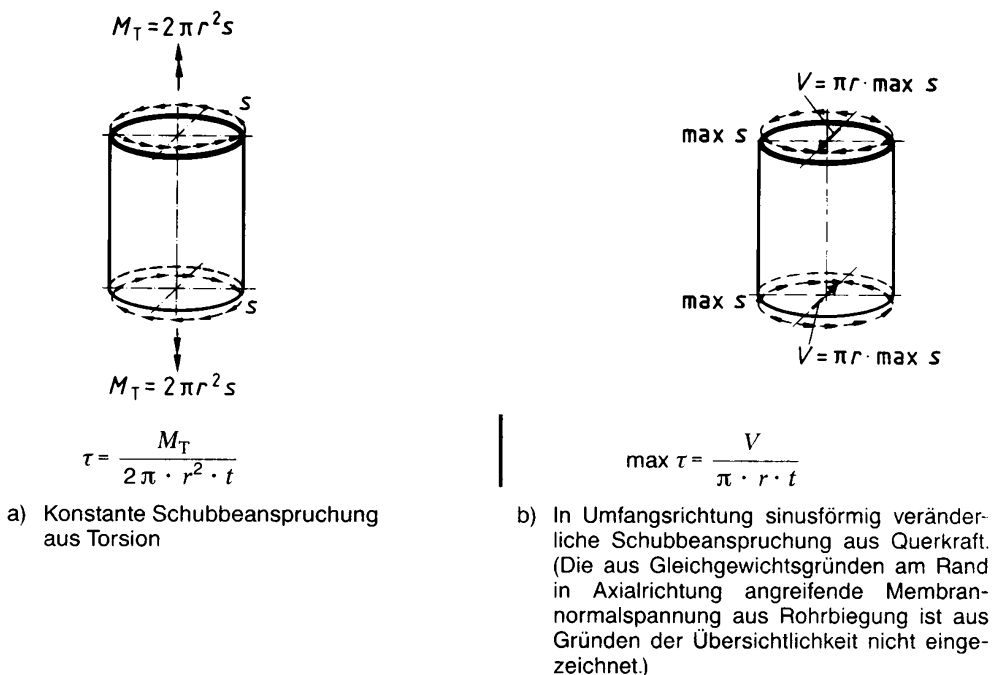


Bild 10. Beispiele für Schubbeanspruchung