

AD 2000-Merkblatt

ICS 23.020.30

Ausgabe Februar 2010

| | | |
|--------------------|--|---|
| Sonderfälle | Allgemeiner Standsicherheitsnachweis für Druckbehälter Behälter mit Ringlagerung | AD 2000-Merkblatt S 3/5 |
|--------------------|--|---|

Die AD 2000-Merkblätter werden von den in der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter“ (AD) zusammenarbeitenden, nachstehend genannten sieben Verbänden aufgestellt. Aufbau und Anwendung des AD 2000-Regelwerkes sowie die Verfahrensrichtlinien regelt das AD 2000-Merkblatt G1.

Die AD 2000-Merkblätter enthalten sicherheitstechnische Anforderungen, die für normale Betriebsverhältnisse zu stellen sind. Sind über das normale Maß hinausgehende Beanspruchungen beim Betrieb der Druckbehälter zu erwarten, so ist diesen durch Erfüllung besonderer Anforderungen Rechnung zu tragen.

Wird von den Forderungen dieses AD 2000-Merkblattes abgewichen, muss nachweisbar sein, dass der sicherheitstechnische Maßstab dieses Regelwerkes auf andere Weise eingehalten ist, z. B. durch Werkstoffprüfungen, Versuche, Spannungsanalyse, Betriebserfahrungen.

Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e. V. (FDBR), Düsseldorf

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI), Frankfurt/Main

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), Fachgemeinschaft Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate, Frankfurt/Main

Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

VGB PowerTech e. V., Essen

Verband der TÜV e. V. (VdTÜV), Berlin

Die AD 2000-Merkblätter werden durch die Verbände laufend dem Fortschritt der Technik angepasst. Anregungen hierzu sind zu richten an den Herausgeber:

Verband der TÜV e. V., Friedrichstraße 136, 10117 Berlin.

Inhalt

| | Seite |
|--|-------|
| 0 Präambel | 2 |
| 1 Geltungsbereich..... | 2 |
| 2 Allgemeines | 2 |
| 3 Formelzeichen und Einheiten | 2 |
| 4 Berechnung | 3 |
| 5 Vorhandene Gesamtkraft..... | 3 |
| 6 Zulässige Schnittgrößen des Ringes | 3 |
| 7 Globaler Tragfähigkeitsnachweis des Ringes | 4 |
| 8 Lokaler Tragfähigkeitsnachweis..... | 5 |
| 9 Schrifttum..... | 7 |
| Anhang 1 zum AD 2000-Merkblatt S 3/5..... | 8 |

Ersatz für Ausgabe Januar 2003; | = Änderungen gegenüber der vorangehenden Ausgabe

Die AD 2000-Merkblätter sind urheberrechtlich geschützt. Die Nutzungsrechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, die Wiedergabe auf fotomechanischem Wege und die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei auszugsweiser Verwertung, dem Urheber vorbehalten.

0 Präambel

Zur Erfüllung der grundlegenden Sicherheitsanforderungen der Druckgeräte-Richtlinie kann das AD 2000-Regelwerk angewandt werden, vornehmlich für die Konformitätsbewertung nach den Modulen „G“ und „B + F“.

Das AD 2000-Regelwerk folgt einem in sich geschlossenen Auslegungskonzept. Die Anwendung anderer technischer Regeln nach dem Stand der Technik zur Lösung von Teilproblemen setzt die Beachtung des Gesamtkonzeptes voraus.

Bei anderen Modulen der Druckgeräte-Richtlinie oder für andere Rechtsgebiete kann das AD 2000-Regelwerk sinngemäß angewandt werden. Die Prüfständigkeit richtet sich nach den Vorgaben des jeweiligen Rechtsgebietes.

1 Geltungsbereich

Dieses AD 2000-Merkblatt dient der Berechnung von Tragringen und Ringträgern. Tragringe sind mit dem Behälter fest verschweißt, die Behälterwand übernimmt einen Teil der Belastung. Ringträger sind selbsttragende, mit dem Behälter nicht verbundene Ringe. Die Lagerung erfolgt auf einer Anzahl gleichmäßig verteilter Stützen oder auf dem gesamten Ringumfang.

2 Allgemeines

Dieses AD 2000-Merkblatt ist nur in Zusammenhang mit AD 2000-Merkblatt S 3/0 anzuwenden.

Das in diesem AD 2000-Merkblatt dargestellte Berechnungsverfahren ist ein Auszug aus [1]. Es werden globale und lokale Berechnungsmöglichkeiten für den Ring angegeben. Wegen der verschiedenartigen Gestaltungsmöglichkeiten der Segmentenden und Verschraubungen bei Ringträgern werden für diese nur die Momenten- und Querkraftverläufe angegeben.

Für die Berechnung nach diesem AD 2000-Merkblatt gelten folgende Voraussetzungen:

- das Profil ist konstant über den Umfang;
- bei offenen Profilen sind Rippen eingesetzt, um die Querschnittsform zu erhalten (siehe Abschnitt 8.3);
- die Profile sind dünnwandig mit Ausnahme des rechteckigen Vollprofils, d. h. $b/e > 5$ und $h/e > 5$;
- die Belastung über den Umfang des Ringes ist nicht erzwungenmaßen konstant, z. B. durch eine weiche Lagerung des Behälters;
- die Stützen sind gleichmäßig verteilt und tragen gleichmäßig;
- die Konstruktionstypen entsprechen Bild 2;
- die Werkstoffe sind zäh;
- der Betrag der bezogenen Hebelarme β, δ (Formeln (4), (5)) ist $\leq |0,2|$.

3 Formelzeichen und Einheiten

Über die Festlegungen des AD 2000-Merkblattes B 0 hinaus gilt:

| | | |
|-----------------|---|-------------------|
| d_1, d_2 | Innen-, Außendurchmesser des Behälters | mm |
| d_3, d_4 | Innen-, Außendurchmesser des Ringes | mm |
| d_5 | Durchmesser zum Querkraftmittelpunkt | mm |
| d_6 | Durchmesser zur Streckenlast | mm |
| d_7 | Durchmesser zur Stützkraft | mm |
| e_1 | Wanddicke des Behälters | mm |
| e_3, e_4, e_5 | Wanddicken des Ringes | mm |
| e_6 | Wanddicke der Versteifungsrippe | mm |
| f | zulässige Beanspruchung (siehe AD 2000-Merkblatt S 3/0) | N/mm ² |
| f_B | zulässige Beanspruchung des Behälterwerkstoffes | N/mm ² |
| f_R | zulässige Beanspruchung des Rippenwerkstoffes | N/mm ² |
| f_T | zulässige Beanspruchung des Ringwerkstoffes | N/mm ² |
| f_T^* | reduzierte zulässige Beanspruchung des Ringwerkstoffes | N/mm ² |
| g | Schweißnahtdicke | mm |
| m_b | zulässiges Einheitsbiegemoment (Tafel 1) | N mm |
| m_t | zulässiges Einheits-torsionsmoment (Tafel 1) | N mm |
| n_s | Stützzahl | – |
| q | vorhandene Linienlast | N |
| q_t | zulässige Einheitsquerkraft (Tafel 1) | N |
| t_0 | Abstand | mm |

| | | |
|---------------|--|-----------------|
| u | Rippenbreite | mm |
| w | Rippenhöhe | mm |
| y | Verhältnis Rippenhöhe zu -breite | – |
| A_T | Querschnittsfläche des Ringes (Bild 2) | mm ² |
| F | vorhandene Gesamtkraft, je nach Lastfall | N |
| zul F_s | zul. Kraft pro Stütze, je nach Lastfall | N |
| G | Eigenlast des Behälters, je nach Lastfall | N |
| M | Biegemoment im Behälter aus äußeren Lasten auf Ringhöhe, je nach Lastfall | N mm |
| M_t | Torsionsmoment im Ringquerschnitt, je nach Lastfall | N mm |
| zul M_t | zulässiges Torsionsmoment (für Ringquerschnitt nur durch Torsion belastet) | N mm |
| M_b | Biegemoment im Ringquerschnitt | N mm |
| zul M_b | zulässiges Biegemoment (für Ringquerschnitt nur durch Biegung belastet) | N mm |
| Q | Querkraft im Ringquerschnitt | N |
| zul Q | zulässige Querkraft (für Ringquerschnitt nur durch Querkraft belastet) | N |
| W_b | Widerstandsmoment gegen Biegung | mm ³ |
| W_t | Torsionswiderstandsmoment | mm ³ |
| Z_0, Z_1 | Beiwerte, Parameter | – |
| α | Öffnungswinkel zwischen zwei Stützen | ° |
| β | bezogener Hebelarm der Stützenkraft | – |
| δ | bezogener Hebelarm der Streckenlast | – |
| ε | Dehnungszahl für Beulnachweis | – |
| τ | Winkelkoordinate (Bild 1) | ° |

4 Berechnung

4.1 Festigkeitsnachweise des Ringes

Für das gewählte Profil ist für alle relevanten Lastfälle nachzuweisen, dass die vorhandene fiktive Gesamtkraft F gemäß Abschnitt 5 kleiner ist als die zulässige Kraft gemäß Formel (3).

4.2 Lokale Nachweise

Gemäß Abschnitt 8 sind die Schweißnähte, Rippen und eventuelle Schraubverbindungen nachzuweisen. Die Formeln (6) bis (9) geben den Schnittgrößenverlauf zwischen den Stützen an. Der Nachweis kann mit diesen Größen geführt werden. Bei einem Verzicht auf eine detaillierte Schnittgrößenmittlung sind die lokalen Nachweise mit den zulässigen Schnittgrößen nach Formel (2) zu führen.

5 Vorhandene Gesamtkraft

Die vorhandene fiktive Gesamtkraft F ergibt sich gemäß AD 2000-Merkblatt S 3/0 Abschnitt 4.4 zu

$$F = N_{Fd}$$

Bei gleichmäßiger Lagerung ist

$$F = G + \frac{4 \cdot M}{d_7}$$

6 Zulässige Schnittgrößen des Ringes

Für Ringträger und Tragringe vom Typ I ist die zulässige Ringspannung f_T und für Tragringe vom Typ II die zulässige reduzierte Ringspannung

$$f_T^* = f_T \cdot \left(1 - \frac{p \cdot h \cdot d_1}{20 \cdot A_T \cdot f_T} \right) \quad (1)$$

maßgebend.

Die zulässigen Schnittgrößen im Ring ergeben sich durch Multiplikation der zulässigen Einheitsgrößen gemäß Tafel 1 mit der zulässigen bzw. reduzierten zulässigen Spannung:

$$\begin{aligned} \text{zul } M_t &= f_T^* \cdot m_t \quad \text{bzw.} \quad f_T^* \cdot m_t \\ \text{zul } M_b &= f_T^* \cdot m_b \quad \text{bzw.} \quad f_T^* \cdot m_b \\ \text{zul } Q &= f_T^* \cdot q_t \quad \text{bzw.} \quad f_T^* \cdot q_t \end{aligned} \quad (2)$$

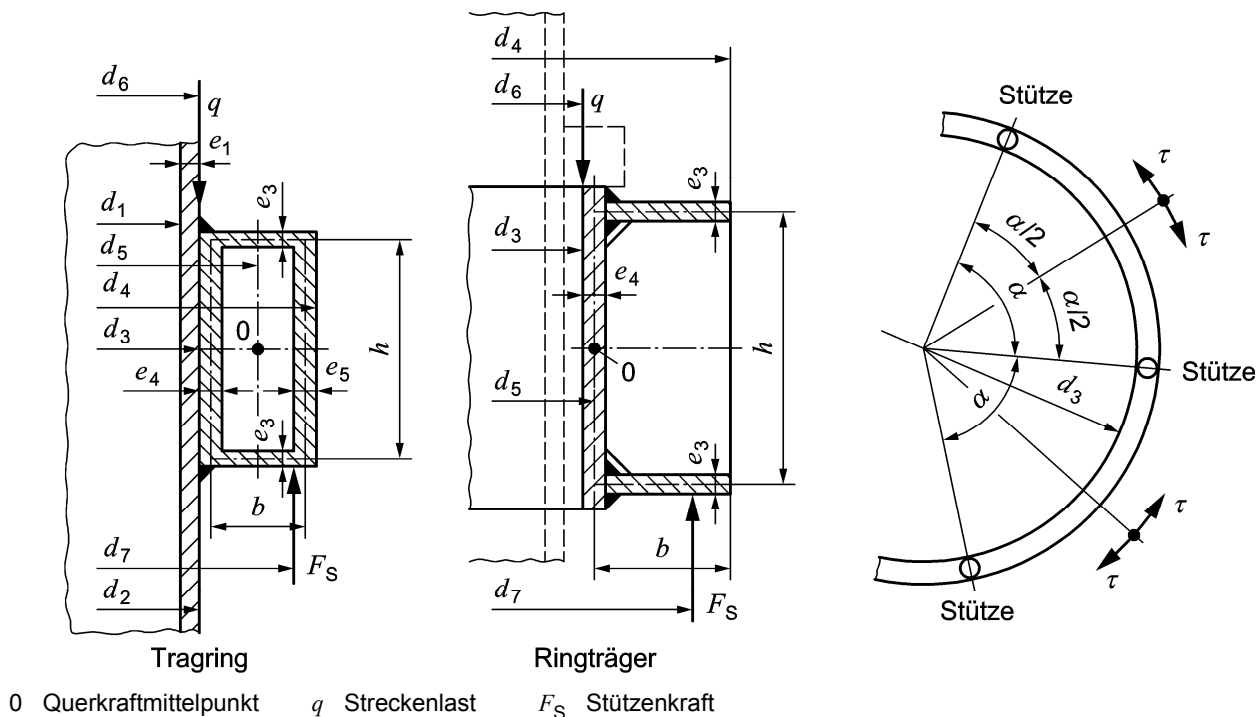


Bild 1 — Prinzipbild

| | I | II |
|-------------------------|---|----|
| Rechteckiges Vollprofil | | |
| Kastenprofil | | |
| U-Profil | | |
| L-Profil | | |

(Die schraffierte Fläche entspricht der Querschnittsfläche A_T des Ringes)

Bild 2 — Konstruktionstypen für Tragringe

7 Globaler Tragfähigkeitsnachweis des Ringes

Die zulässige Kraft als Einzellast auf die Stütze ergibt sich als das Minimum aus der zulässigen Biegemomentenbelastung und der zulässigen Querkraftbelastung zu

$$\text{zul } F_S = \min \left\{ \frac{4 \cdot \pi \cdot \text{zul } M_b}{d_4 \cdot \sqrt{Z_0^2 + Z_1^2 \cdot (\text{zul } M_b / \text{zul } M_t)^2}}, 2 \cdot \text{zul } Q \right\} \quad (3)$$

Bei gleichmäßiger Lagerung ist

$$\text{zul } F = \frac{4 \cdot \pi \cdot \text{zul } M_b}{|\beta - \delta| \cdot d_4} \quad (3a)$$

Die Werte für Z_0 und Z_1 können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden. Die Anwendung dieser Werte führt zu konservativen Ergebnissen. Genauer können die zulässigen Kräfte mit den Z_0 - und Z_1 -Werten aus Anhang 1 ermittelt werden.

| n_s | Z_0 | Z_1 |
|-------|-------|-------|
| 2 | 1,8 | 1,1 |
| 3 | 1,9 | 0,7 |
| 4 | 2,1 | 0,7 |
| 6 | 2,7 | 0,7 |
| 8 | 3,5 | 0,7 |

Die bezogenen Hebelarme β und δ errechnen sich nach den Formeln (4) und (5) mit den Durchmessern nach Bild 1 zu

$$-0,2 \leq \beta = \frac{d_7 - d_5}{d_4} \leq 0,2 \quad (4)$$

$$-0,2 \leq \delta = \frac{d_6 - d_5}{d_4} \leq 0,2, \quad (5)$$

wobei für außenliegende Ringe

$$d_5 = d_3 + e_4 + 2 \cdot t_0$$

und für innenliegende Ringe

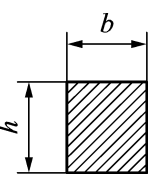
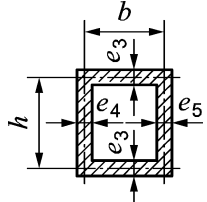
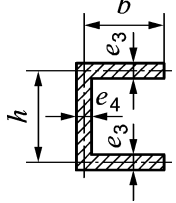
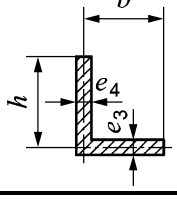
$$d_5 = d_4 - e_4 - 2 \cdot t_0$$

ist. Für geschlossene Querschnitte ist t_0 Tafel 1 zu entnehmen. Für offene Ringquerschnitte ist $t_0 = 0$.

8 Lokaler Tragfähigkeitsnachweis

Für die Tragfähigkeitsnachweise an einzelnen Stellen des Ringes bzw. des Ringquerschnittes sind z. B. die Schweißnähte und eventuell vorhandene Schraubverbindungen nachzuweisen.

Tafel 1 — Zulässige Einheitsschnittgrößen

| | m_t | m_b | q_t | t_0 |
|---|---|--|---------------------------------|---------------------------------|
|  | <p>Für $h \geq b$:</p> $\left(\frac{h \cdot b^2}{4} - \frac{b^3}{12} \right)$ <p>für $h \leq b$:</p> $\left(\frac{b \cdot h^2}{4} - \frac{h^3}{12} \right)$ | $\frac{b \cdot h^2}{4}$ | $\frac{b \cdot h}{2}$ | $\frac{b}{2}$ |
|  | $b \cdot h \cdot \min \{e_3; e_4; e_5\}$ $e_3 \cdot e_4 \cdot e_5 \neq 0$ | $\left[e_3 \cdot b \cdot h + (e_4 + e_5) \cdot \frac{h^2}{4} \right]$ | $(e_4 + e_5) \cdot \frac{h}{2}$ | $\frac{b \cdot e_5}{e_4 + e_5}$ |
|  | $\left(\frac{e_3^2 \cdot b}{2} + \frac{e_4^2 \cdot h}{4} \right)$ | $\left(e_3 \cdot b \cdot h + \frac{e_4 \cdot h^2}{4} \right)$ | $\frac{e_4 \cdot h}{2}$ | 0 |
|  | $\left(\frac{e_3^2 \cdot b}{4} + \frac{e_4^2 \cdot h}{4} \right)$ | $\frac{e_4 \cdot h^2}{4} \cdot$ $\left[\frac{4e_3 \cdot b \cdot (e_3 \cdot b + e_4 \cdot h) + e_4^2 \cdot h^2}{(e_3 \cdot b + e_4 \cdot h)^2} \right]$ | $\frac{e_4 \cdot h}{2}$ | 0 |

8.1 Schnittgrößenverteilung

Der Schnittgrößenverlauf zwischen den Auflagerpunkten lässt sich für eine endliche Zahl von Stützen mit Hilfe der Formeln (6) bis (8) ermitteln. In Abhängigkeit vom Winkel τ (siehe Bild 1) ergeben sich mit $\tilde{g} = \pi/n_s$ folgende Schnittgrößen

$$M_b = \left[\frac{\tilde{g}}{\sin(\tilde{g})} (1 + \beta) \cdot \cos(\tau) - (1 + \delta) \cdot \left(1 \pm \frac{\cos(n_s \cdot \tau)}{n_s^2 - 1} \right) \right] \cdot F \cdot \frac{d_4}{4\pi} \quad (6)$$

$$M_t = \left[-\frac{\tilde{g}}{\sin(\tilde{g})} (1 + \beta) \cdot \sin(\tau) + \tau \pm (1 + n_s^2 \cdot \delta) \cdot \frac{\sin(n_s \cdot \tau)}{n_s (n_s^2 - 1)} \right] \cdot F \cdot \frac{d_4}{4\pi} \quad (7)$$

$$Q = \left(\tau \pm \frac{\sin(n_s \cdot \tau)}{n_s} \right) \cdot F \cdot \frac{1}{2\pi} \quad (8)$$

Die Schnittgrößen nach den Formeln (6) bis (8) sind jeweils für das positive und das negative Vorzeichen in den Klammerausdrücken zu berechnen und mit dem jeweils größeren Wert der weiteren Berechnung zugrunde zu legen.

Für eine gleichmäßige Lagerung sind die Größen nach den Formeln (9) und (10) zu ermitteln.

$$M_b = (\beta - \delta) \cdot F \cdot \frac{d_4}{4\pi} \quad (9)$$

$$M_t = Q = 0 \quad (10)$$

Vereinfacht können die zulässigen Größen nach Formel (2) der Berechnung zugrunde gelegt werden.

8.2 Schweißnähte

8.2.1 Schweißnähte zur Verbindung Behälter — Ring

Mit dem Festigkeitsnachweis nach Abschnitt 7 sind die Verbindungsnahte zwischen Behälter und Ring nachgewiesen, wenn der Ring beidseitig verschweißt ist und das g -Maß jeweils mindestens dem 0,7-Fachen der dünnsten anschließenden Wanddicke (Ringwandung bzw. Behälterwandung) entspricht. Anderenfalls ist ein detaillierter Nachweis erforderlich.

8.2.2 Radiale Schweißnähte im Ring

An Stoßstellen der Ringsegmente sind die erforderlichen Nähte für Schweißnahtfaktoren < 1 wie folgt nachzuweisen:

$$f_T^* \geq \frac{1}{v} \left[\left[\frac{M_b}{W_b} \right]^2 + 3 \left[\frac{|M_t|}{W_t} + \frac{|Q|}{A_T} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

mit v = Schweißnahtfaktor.

8.2.3 Umlaufende Nähte im Ring

Für umlaufende Schweißnähte in Ringen mit Kastenprofilquerschnitt (Bild 3) auf Einzelstützen ist für die Nähte 1, 2 und 3 nachzuweisen, dass

$$f_T^* \geq \frac{|M_t|}{g \cdot b \cdot h} \quad (12)$$

ist.

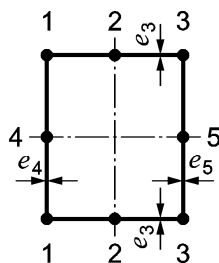


Bild 3 — Schweißnähte

Für die Schweißnähte 4 und 5 muss

$$f_T^* \geq \frac{1}{g_i \cdot v} \cdot \left(\frac{|M_t|}{b \cdot h} + \frac{2 \cdot |Q| \cdot e_i}{h \cdot (e_4 + e_5)} \right) \quad (13)$$

sein, mit $i = 4, 5$.

Bei offenen Profilen und gleichmäßig aufliegenden Ringen wird als Mindestwert $g \geq 0,5 \cdot e_{\min}$ empfohlen.

8.3 Beulnachweise

Zur Erhaltung der Formstabilität und zur Einleitung der Stützenlasten werden Rippen vorgesehen. Diese werden gleichmäßig über den Umfang verteilt. Falls in Ausnahmefällen über den Stützen keine Rippen angeordnet werden können, muss der Lasteinleitungsbereich analog AD 2000-Merkblatt S 3/1 nachgewiesen werden.

8.3.1 Nachweis der Rippen

Die Rippen sind gegen Beulen infolge der Auflagerkraft nachzuweisen. Ist Formel (14) erfüllt, so besteht keine Beulgefahr.

$$Q \leq f_R \cdot u \cdot e_6 \cdot \Phi \quad (14)$$

mit

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\varepsilon}{C_2} \cdot \left(\frac{u}{10 \cdot e_6} \right)^2 \right]^2}} \quad (15)$$

und Q aus Formel (8) sowie e_6 und u aus Bild 4. Bei Rippen über den Stützen ist $Q = F/n_s$.

Die Dehnungszahl ε ist gleich

$$\varepsilon = 10^3 \cdot \frac{f_R}{E} \quad (16)$$

Hierbei ist ε für Raumtemperatur zu ermitteln.

$$\text{Mit } y = \frac{w}{u} \quad (17)$$

ergibt sich der Faktor C_2

für Kastenprofile

$$\begin{aligned} y \leq 1 & \quad C_2 = 6 \cdot (y + 1/y)^2 \\ y > 1 & \quad C_2 = 24 \end{aligned}$$

für offene Profile

$$\begin{aligned} y \leq 1,64 & \quad C_2 = 6 \cdot (0,56 + (1/y)^2 + 0,13 \cdot y^2) \\ y > 1,64 & \quad C_2 = 7,7 \end{aligned}$$

mit u = Rippenbreite und w = Rippenhöhe (Bild 4). Rippen über den Stützen sind mit $Q = F/n_s$ nachzuweisen.

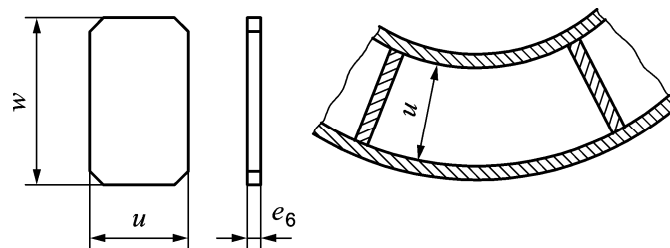


Bild 4 — Rippen

Die im L-förmigen Tragring über den Lagerstellen angeordneten Rippen müssen noch hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit z. B. sinngemäß mit Hilfe von AD 2000-Merkblatt S 3/4 Abschnitt 7.3 nachgewiesen werden.

8.3.2 Nachweis der Gurtbleche

Die Ober- und Untergurtbleche des Ringes sind gegen Beulen aus Biegung nachzuweisen. Wenn Formel (18) erfüllt ist, besteht keine Beulgefahr.

$$\frac{u}{e_3} \leq 10 \cdot \sqrt{\frac{D}{\varepsilon}} \quad (18)$$

$D = 24,0$ für Kastenprofile,

$D = 7,7$ für offene Profile.

9 Schrifttum

- [1] Richtlinienkatalog Festigkeit RKF, Teil 2, BR-A65 (Ringträger und Tragringe), 3. Aufl. 1979. VEB Komplette Chemieanlagen Dresden (jetzt Linde-KCA-Dresden GmbH).

Anhang 1 zum AD 2000-Merkblatt S 3/5

Erläuterung zum AD 2000-Merkblatt S 3/5

Zu Abschnitt 7:

Beim globalen Tragfähigkeitsnachweis wurden gegenüber [1] folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- Ein evtl. vorhandenes Mittragen der Behälterwand wurde bei der Tragringberechnung nicht berücksichtigt. (Mit der Bezeichnung nach [1]: $K_2 = 1$.)
- Die Z_0 - und Z_1 -Werte sind nicht nur von n_s , sondern auch von β und δ abhängig. In der Tabelle sind nur die im Parameterbereich $-0,2 \leq \beta \leq 0,2$ und $-0,2 \leq \delta \leq 0,20$ vorkommenden Maximalwerte genannt. Das mit diesen Werten ermittelte Ergebnis ist in der Regel sehr konservativ. Die genauen Z_0 - und Z_1 -Werte können aus den Bildern A.1 bis A.4, die von [1] übernommen wurden, ermittelt werden.

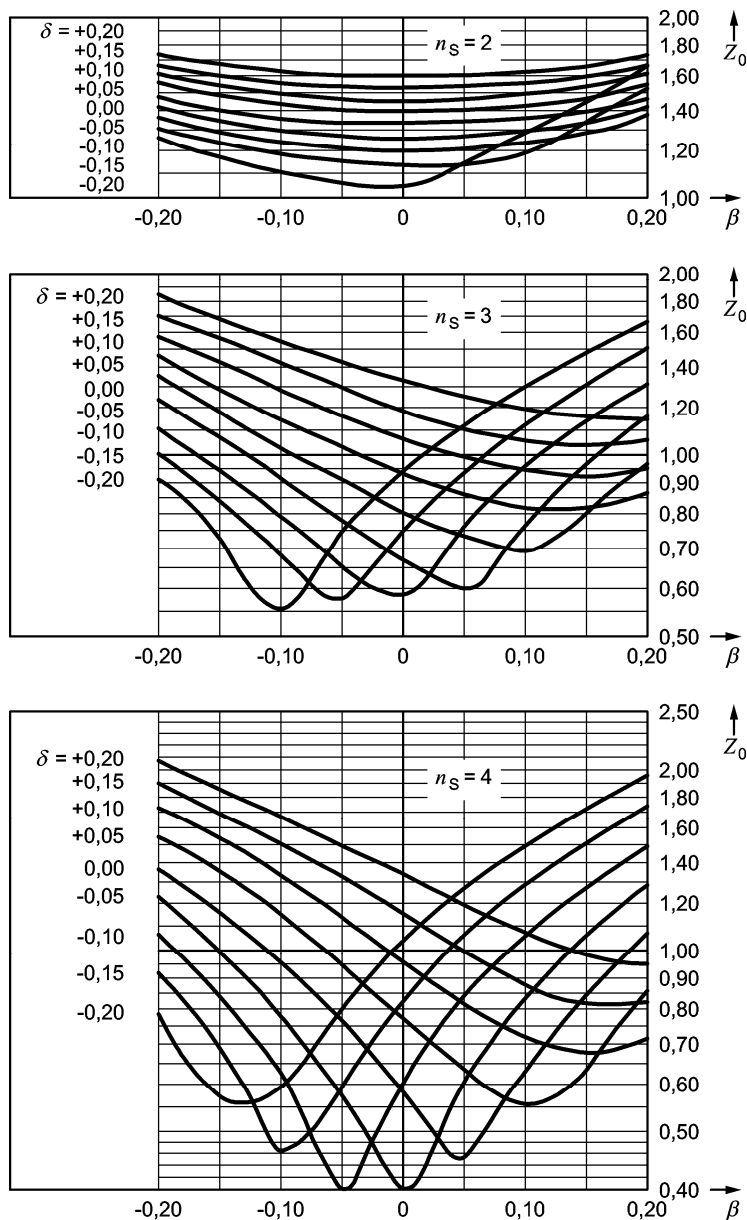


Bild A.1 — Parameter Z_0 für $n_s = 2, 3$ und 4

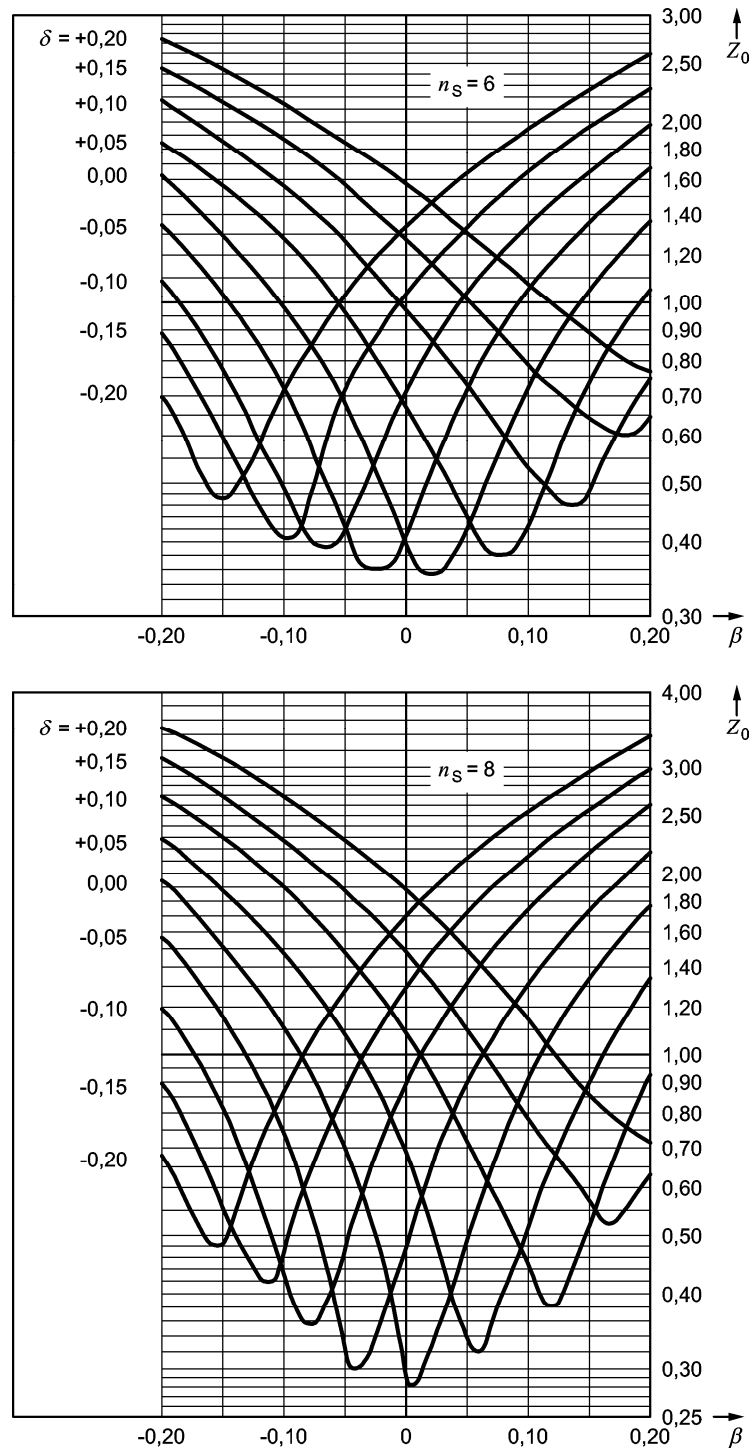


Bild A.2 — Parameter Z_0 für $n_s = 6$ und 8

AD 2000-Merkblatt

Seite 10 AD 2000-Merkblatt S 3/5, Ausg. 02.2010

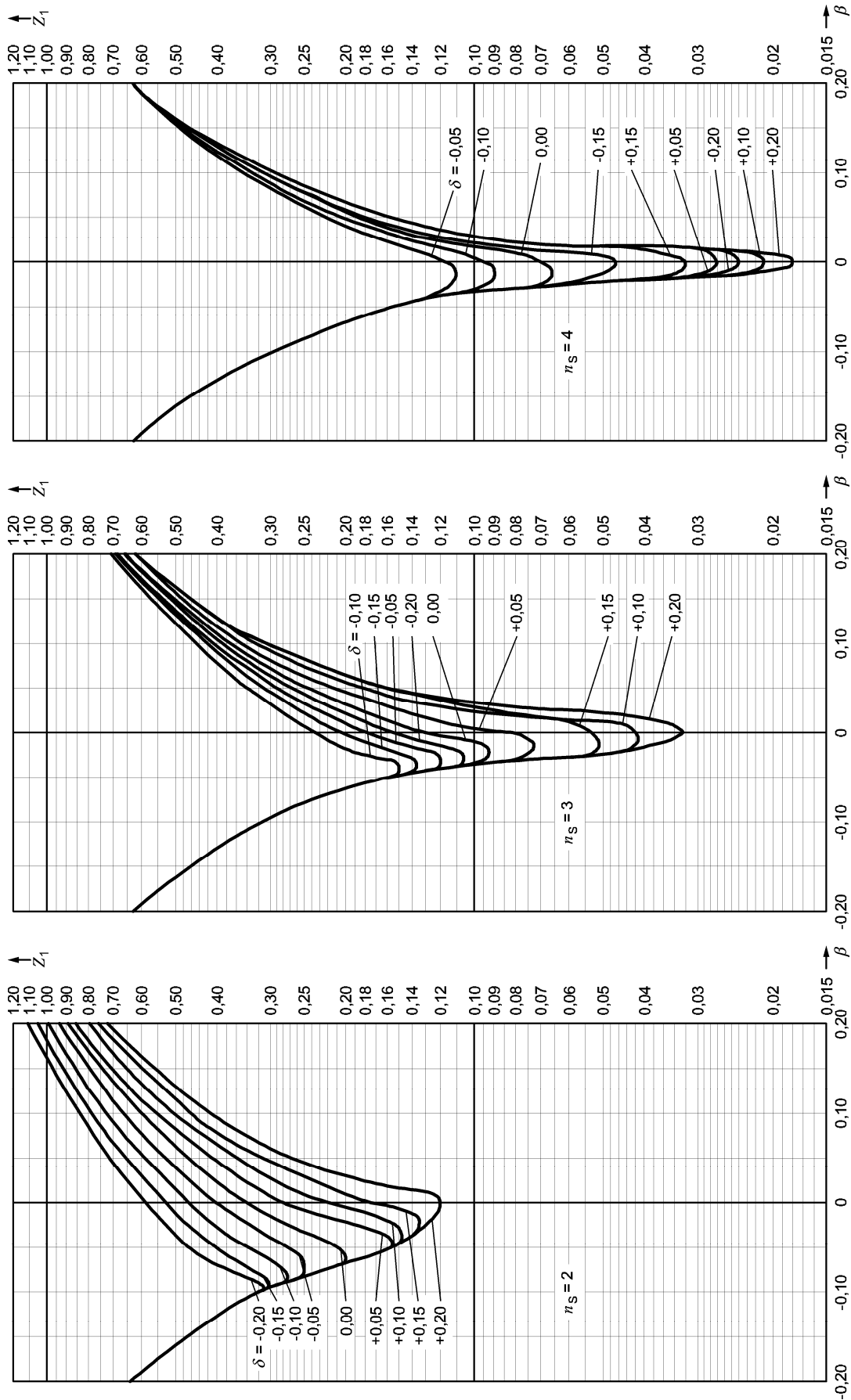


Bild A.3 — Parameter Z_1 für $n_s = 2, 3$ und 4

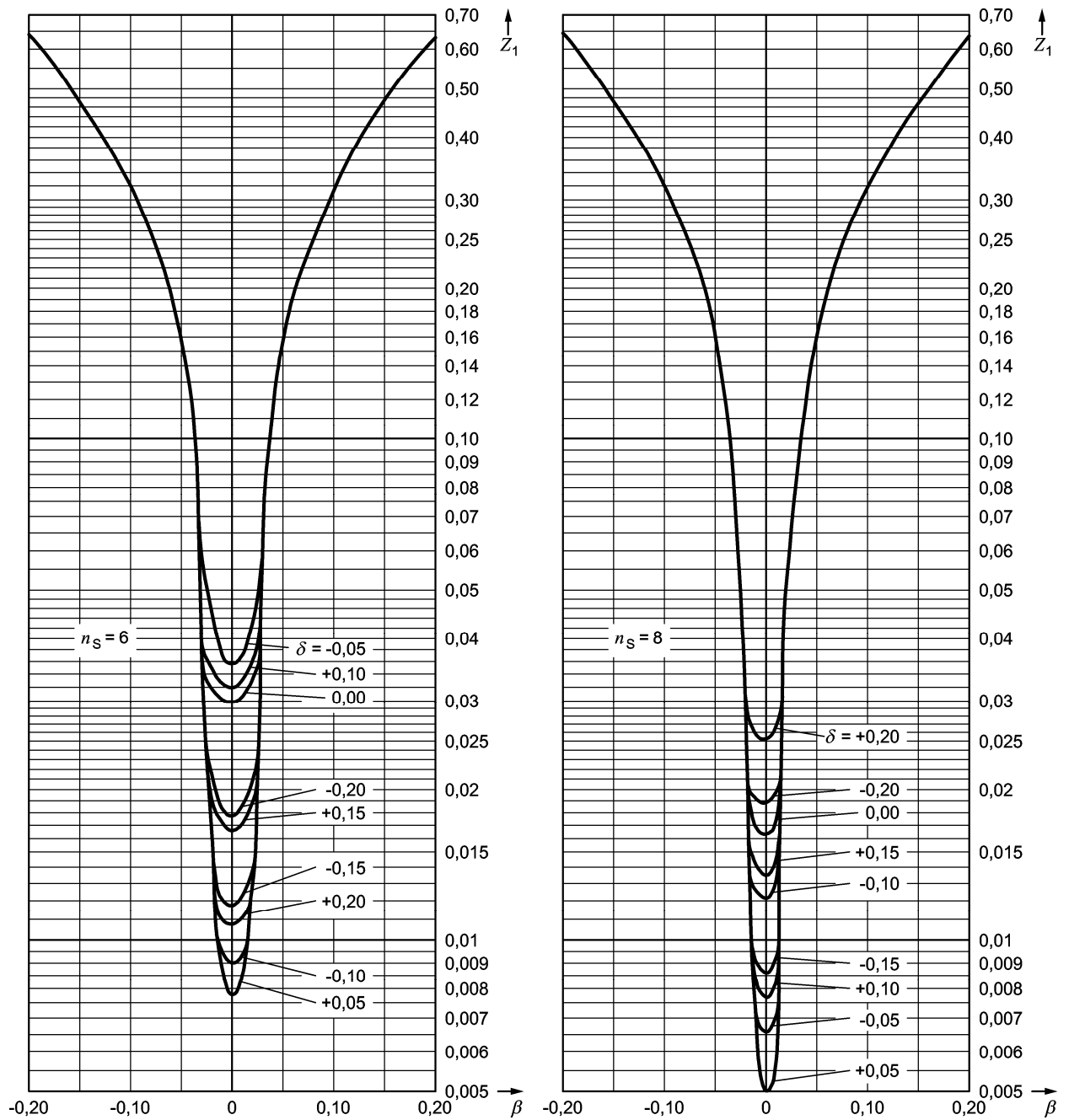


Bild A.4 — Parameter Z_1 für $n_s = 6$ und 8

Herausgeber:



Verband der TÜV e.V.

E-Mail: berlin@vdtuev.de
<http://www.vdtuev.de>

Bezugsquelle:

Beuth

Beuth Verlag GmbH
10772 Berlin
Tel. 030 / 26 01-22 60
Fax 030 / 26 01-12 60
info@beuth.de
www.beuth.de