

# AD 2000-Merkblatt

ICS 23.020.30

Ausgabe Oktober 2006

<b>Berechnung von Druckbehältern</b>	<b>Zylinderschalen unter äußerem Überdruck</b>	<b>AD 2000-Merkblatt B 6</b>
--	--	----------------------------------

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

Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V., Sankt Augustin

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

- |   |                         |
|---|-------------------------|
| 0 Präambel  | 6 Verschwächungen       |
| 1 Geltungsbereich   | 7 Berechnung            |
| 2 Allgemeines   | 8 Kleinste Wanddicke    |
| 3 Formelzeichen und Einheiten   | 9 Schrifttum            |
| 4 Sicherheitsbeiwert  |                         |
| 5 Ausnutzung der zulässigen<br>Berechnungsspannung<br>in Fügeverbindungen | Anhang 1: Erläuterungen |

## 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

Die nachstehenden Berechnungsregeln gelten für glatte Zylinderschalen als Druckbehältermäntel und für Rohre unter äußerem Überdruck, bei denen das Verhältnis  $D_a/D_i \leq 1,2$  beträgt. Bei Rohren mit  $D_a \leq 200$  mm gelten sie darüber hinausgehend bis zu einem Verhältnis  $D_a/D_i = 1,7$ . Die Zylinderschalen können ohne oder mit Versteifungen ausgeführt sein.

Der Druck muss auf den gesamten Umfang wirken. Größere als vom äußeren Überdruck herrührende Axialbelastungen müssen zusätzlich z. B. nach [10] berücksichtigt werden.

## 2 Allgemeines

**2.1** Dieses AD 2000-Merkblatt ist nur im Zusammenhang mit dem AD 2000-Merkblatt B 0 anzuwenden.

Ersatz für Ausgabe Februar 2005; | = 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.

**Tafel 1. Sicherheitsbeiwerte**

Werkstoff	Sicherheitsbeiwert gegen Streck-, Dehngrenze oder Zeitstandfestigkeit	
	Sicherheitsbeiwert $S$ für den Werkstoff bei Berechnungstemperatur	Sicherheitsbeiwert $S'$ beim Prüfdruck
1. Walz- und Schmiedestähle	1,6	1,1
2. Stahlguss	2,0	1,5
3. Gusseisen mit Kugelgraphit nach DIN EN 1563		
3.1 EN-GJS-700-2/2U EN-GJS-600-3/3U	5,0	2,5
3.2 EN-GJS-500-7/7U	4,0	2,0
3.3 EN-GJS-400-15/15U	3,5	1,7
3.4 EN-GJS-400-18/18U-LT EN-GJS-350-22/22U-LT	2,4	1,2
4. Aluminium und Aluminiumlegierungen - Knetwerkstoffe	1,6	1,1
Sicherheitsbeiwert gegen Zugfestigkeit		
5. Gusseisen mit Lamellengraphit (Grauguss) nach DIN EN 1561	6,0	3,5
6. Kupfer und dessen Legierungen einschließlich Walz- und Gussbronze	4,0	2,5

Bei Wärmeaustauscherrohren ist der Abnutzungszuschlag  $c_2 = 0$ , falls nicht besondere Vereinbarungen zwischen Hersteller und Besteller/Betreiber getroffen sind.

**2.2** Bei Druckbehältern aus Grauguss ist eine Berechnung auf Innendruck unter Verwendung der Sicherheitsbeiwerte nach Tafel 1 ausreichend, wobei für den Innendruck der äußere Überdruck einzusetzen ist.

## 3 Formelzeichen und Einheiten

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

$b_m$	zweifache Abklinglänge	mm
$l$	Zylinderlänge zwischen wirksamen Versteifungen	mm
$l_m$	mittragende Schalenlänge	mm
$p_e$	elastischer Beuldruck der Versteifung	bar
$q$	hier: Abflachung	mm
$u$	Unrundheit	%

## 4 Sicherheitsbeiwert

**4.1** Die Sicherheitsbeiwerte gegen plastisches Verformen sind für den Betriebs- und Prüfzustand der Tafel 1 zu entnehmen.

**4.2** Der Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen beträgt unabhängig vom Werkstoff  $S_K = 3,0$  und gilt für  $u \leq 1,5 \%$ , wobei  $u$  nach Abschnitt 7.3.4 zu ermitteln ist.

Bei  $u > 1,5 \%$  ist  $S_K = 2,25 + 0,5 u$ . Wird ein höherer Prüfdruck als  $1,3 p$  gefordert, so muss  $S'_K$  mindestens  $2,2 S_K/3$  betragen.

## 5 Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen

Unabhängig von dem Prüfumfang nach AD 2000-Merkblatt HP 0 Übersichtstafel 1 bleibt die Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen bei Berechnung auf Außendruck unberücksichtigt.

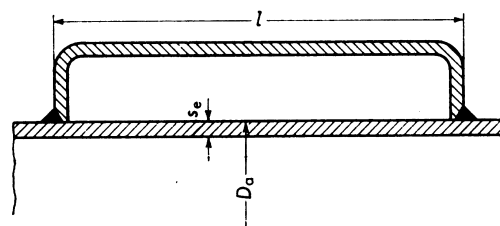
## 6 Verschwächungen

Ausschnitte sind nach AD 2000-Merkblatt B 9 mit  $p$  als Innendruck zu berechnen. Ausschnitte in Doppelmänteln, die durch Stutzen gegenseitig versteift sind, können bei der Berechnung der Wanddicke unberücksichtigt bleiben.

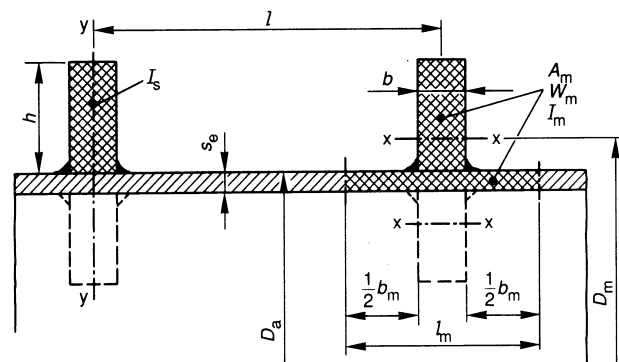
## 7 Berechnung

### 7.1 Allgemeines

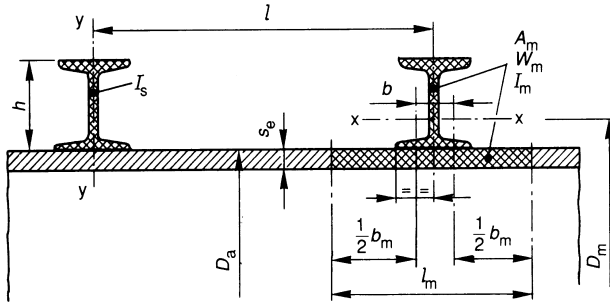
**7.1.1** Die Berechnung ist gegen elastisches Einbeulen nach Abschnitt 7.2 und gegen plastisches Verformen nach Abschnitt 7.3 durchzuführen. Der errechnete kleinste Wert von  $p_1$  und  $p_2$  ist maßgebend für die Bestimmung des zulässigen äußeren Überdruckes.



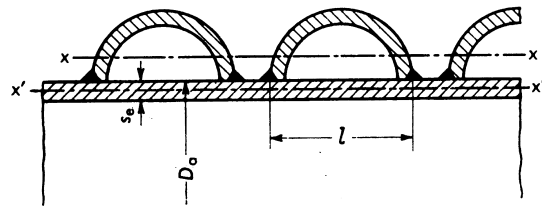
**Bild 1.** Doppelmantel



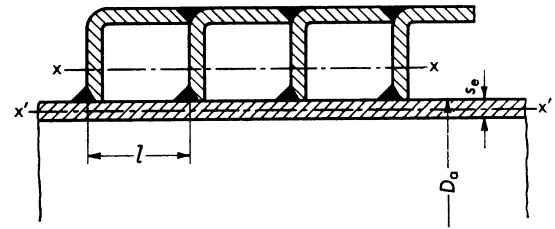
**Bild 2.** Ringe mit Rechteckquerschnitt als Versteifung



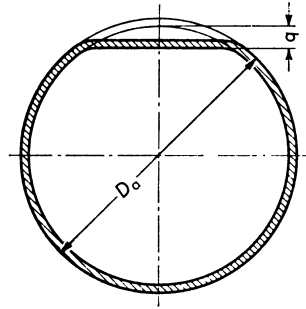
**Bild 3.** Profilringe als Versteifung



**Bild 4.** Halbrunde Heizkanäle als Versteifung



**Bild 5.** Eckige Heizkanäle als Versteifung



**Bild 9.** Abflachung q

$$p_1 = \frac{E}{S_K} \left\{ \frac{20}{(n^2 - 1) \left[ 1 + \left( \frac{n}{Z} \right)^2 \right]^2} \cdot \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} + \frac{80}{12(1 - \nu^2)} \cdot \left[ n^2 - 1 + \frac{2n^2 - 1 - \nu}{1 + \left( \frac{n}{Z} \right)^2} \right] \cdot \left[ \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \right]^3 \right\} \quad (1)$$

**7.1.2** Die Beullänge  $l$  ist die Länge des Doppelmantels (siehe Bild 1) oder die Entfernung zwischen zwei wirksamen Versteifungen (siehe Bilder 2 bis 5). Bei Behältern mit gewölbten Böden beginnt die Beullänge am Übergang vom zylindrischen Bord zur Krempe.

Rohrbögen gelten nicht als wirksame Versteifungen [9]. Desgleichen gelten Kompensatoren in der Regel nicht als wirksame Versteifungen. Wegen der fehlenden Stützung an dieser Seite der Zylinderschale gelten die Formeln (1), (4), (5) bzw. (6) nicht. Die Berechnung solcher Zylinderschalen kann konservativ nach Formel (3) erfolgen.

## 7.2 Berechnung gegen elastisches Einbeulen

**7.2.1** Die Berechnung erfolgt nach Formel (1), wobei  $Z = 0,5 \cdot \frac{\pi \cdot D_a}{l}$  und

- $n$  ganzzahlig
- $n \geq 2$
- $n > Z$

so zu wählen sind, dass  $p_1$  zum kleinsten Wert wird.  $n$  bedeutet die Anzahl der Einbeulwellen, die beim Versagen auf dem Umfang auftreten können. Die Anzahl der Einbeulwellen kann nach folgender Näherungsgleichung abgeschätzt werden [5]:

$$n = 1,63 \cdot \sqrt[4]{\frac{D_a^3}{l^2 (s_e - c_1 - c_2)}} \quad (2)$$

**7.2.2** Die erforderliche Wanddicke  $s$  kann auch nach Bild 6 für gebräuchliche Abmessungen bestimmt werden.

Dieses Bild gilt für eine Querkontraktionszahl  $\nu = 0,3$ . Bei wesentlich anderen Querkontraktionszahlen ist nach Formel (1) zu rechnen.

**7.2.3** Für Rohre kann die Berechnung auch nach Formel (3) erfolgen.

$$p_1 = \frac{E}{S_K} \cdot \frac{20}{1 - \nu^2} \cdot \left( \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \right)^3 \quad (3)$$

## 7.3 Berechnung gegen plastisches Verformen

**7.3.1** Bei  $\frac{D_a}{l} \leq 5$  gilt Formel (4)

$$p_2 = \frac{20 \cdot K}{S} \cdot \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \cdot \frac{1}{1,5u \cdot \left( 1 - 0,2 \frac{D_a}{l} \right) \cdot D_a + \frac{100 (s_e - c_1 - c_2)}{100 (s_e - c_1 - c_2)}}$$

**7.3.2** Die erforderliche Wanddicke  $s$  kann nach Bild 7 für gebräuchliche Abmessungen und mit einer Unrundheit  $u = 1,5\%$  unmittelbar bestimmt werden.

Für Rohre mit größeren Unrundheiten kann die erforderliche Wanddicke  $s$  vereinfachend auch nach Bild 8 bestimmt werden.

**7.3.3** Bei  $\frac{D_a}{l} > 5$  ist der größere der nach den Formeln (5) und (6) ermittelte Druck für die Festlegung des zulässigen äußeren Überdruckes maßgebend.

$$p_2 = \frac{20 K}{S} \cdot \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \quad (5)$$

$$p_2 = \frac{30 K}{S} \left( \frac{s_e - c_1 - c_2}{l} \right)^2 \quad (6)$$

Formel (6) ist vor allem bei kleinen Stützweiten (z. B. bei Heizkanälen nach den Bildern 4 und 5) maßgebend.

**7.3.4** Für die Unrundheit  $u$  in % gelten bei Ovalität

$$u = 2 \cdot \frac{D_{i \max} - D_{i \min}}{D_{i \max} + D_{i \min}} \cdot 100 \quad (7)$$

bei Abflachung (siehe Bild 9)

$$u = \frac{4}{D_a} \cdot q \cdot 100 \quad (8)$$

Die maximalen und minimalen Durchmesser  $D_{i \max}$  bzw.  $D_{i \min}$  ergeben sich aus den Herstellungsbedingungen (zulässige Unrundheiten siehe AD 2000-Merkblatt HP 1).

Bei Rohren kann die Unrundheit nach Formel (7) mit dem maximalen und minimalen Außendurchmesser ermittelt werden. Die Durchmesser ergeben sich aus den in den Normen festgelegten Technischen Lieferbedingungen.

## 7.4 Versteifungen

**7.4.1** Als wirksame Versteifungen können Abschlussböden wie z.B. nach außen gewölbte Böden oder Wärmeaustauscherböden, die durch die Rohre und den Mantel gegenseitig verankert sind, angesehen werden. Das gilt auch für die Ausführungen nach den Bildern 2 und 3, wenn die Bedingungen der Formeln (9) und (10) in Verbindung mit den Formeln (11) und (12) eingehalten sind.

Für die Ermittlung der geometrischen Größen  $A_m$ ,  $W_m$  und  $I_m$  (siehe Bilder 2 und 3) ist zunächst die mittragende Schalenbreite  $l_m$  nach Formel (12) zu bestimmen. Das Flächenträgheitsmoment  $I_m$  und das Widerstandsmoment  $W_m$  sind auf die zur Mantelachse parallele Schwerpunktschwerachse des Querschnittes zu beziehen (siehe Achse  $x - x$  in den Bildern 2 und 3), der sich aus dem Querschnitt der Versteifung und dem mittragenden Teil der Schale mit der Länge  $l_m$  zusammensetzt.  $D_m$  ist der dazugehörige Schwerpunktdurchmesser.

$$p \cdot S_K < p_e \quad (9)$$

$$\frac{p \cdot l_m \cdot D_a}{20 \cdot A_m} + \frac{p \cdot l \cdot D_a^2}{8000 \cdot W_m} \cdot \frac{u}{1 - S_K \cdot p/p_e} \leq \frac{K}{S} \quad (10)$$

$$\text{mit } p_e = \frac{240 \cdot E \cdot I_m}{(1 - \nu^2) \cdot (D_a - s_e + c_1 + c_2) \cdot D_m^2 \cdot l} \quad (11)$$

$$\text{und } l_m = b_m + b = 1,1 \cdot \sqrt{D_a \cdot (s_e - c_1 - c_2)} + b \quad (12)$$

wobei für die mittragende Länge  $l_m$  nicht mehr als die Länge  $l$  eingesetzt werden darf. Für  $K$  ist der Festigkeitskennwert des Versteifungsringes einzusetzen. Für den Sicherheitsbeiwert  $S$  wird auf AD 2000-Merkblatt B 0 verwiesen.

Schmale, hohe Versteifungen gemäß Bild 2 können ausknicken; deshalb sollte die Höhe der Versteifung die achtfache Breite nicht überschreiten. Bei Profilen nach Bild 3 ist das erforderliche, auf die Schwerpunktschwerachse  $y - y$  bezogene Flächenträgheitsmoment abhängig von der Profilhöhe  $h$  und beträgt  $I_s \geq \frac{h^4}{3000}$ .

**7.4.2** Die versteifende Wirkung von Heizkanälen (siehe Bilder 4 und 5) kann bei der Berechnung des ganzen Mantels berücksichtigt werden. In Formel (1) wird dann der zulässige Druck im Verhältnis der Flächenträgheitsmomente mit und ohne Heizkanäle (bezogen auf die jeweilige Schwerpunktschwerachse  $x - x$  bzw.  $x' - x'$ ) und in Formel (4) im Verhältnis der Querschnittsflächen des Behälters mit und ohne Heizkanäle größer.

**7.4.3** Werden Versteifungen durch unterbrochene Schweißnähte mit dem Mantel verbunden, müssen die Kehlnähte auf jeder Seite mindestens ein Drittel des Mantelumfanges erfassen. Die Teilung der Kehlnähte in Umfangsrichtung darf 300 mm, die Anzahl der Schweißnahtunterbrechungen darf  $2n$  nicht unterschreiten. Die Anzahl  $n$  der Einbeulwellen ergibt sich aus Abschnitt 7.2.1.

## 8 Kleinste Wanddicke

**8.1** Die kleinste Wanddicke nahtloser, geschweißter oder hartgelöteter Zylinderschalen wird mit 3 mm festgelegt.

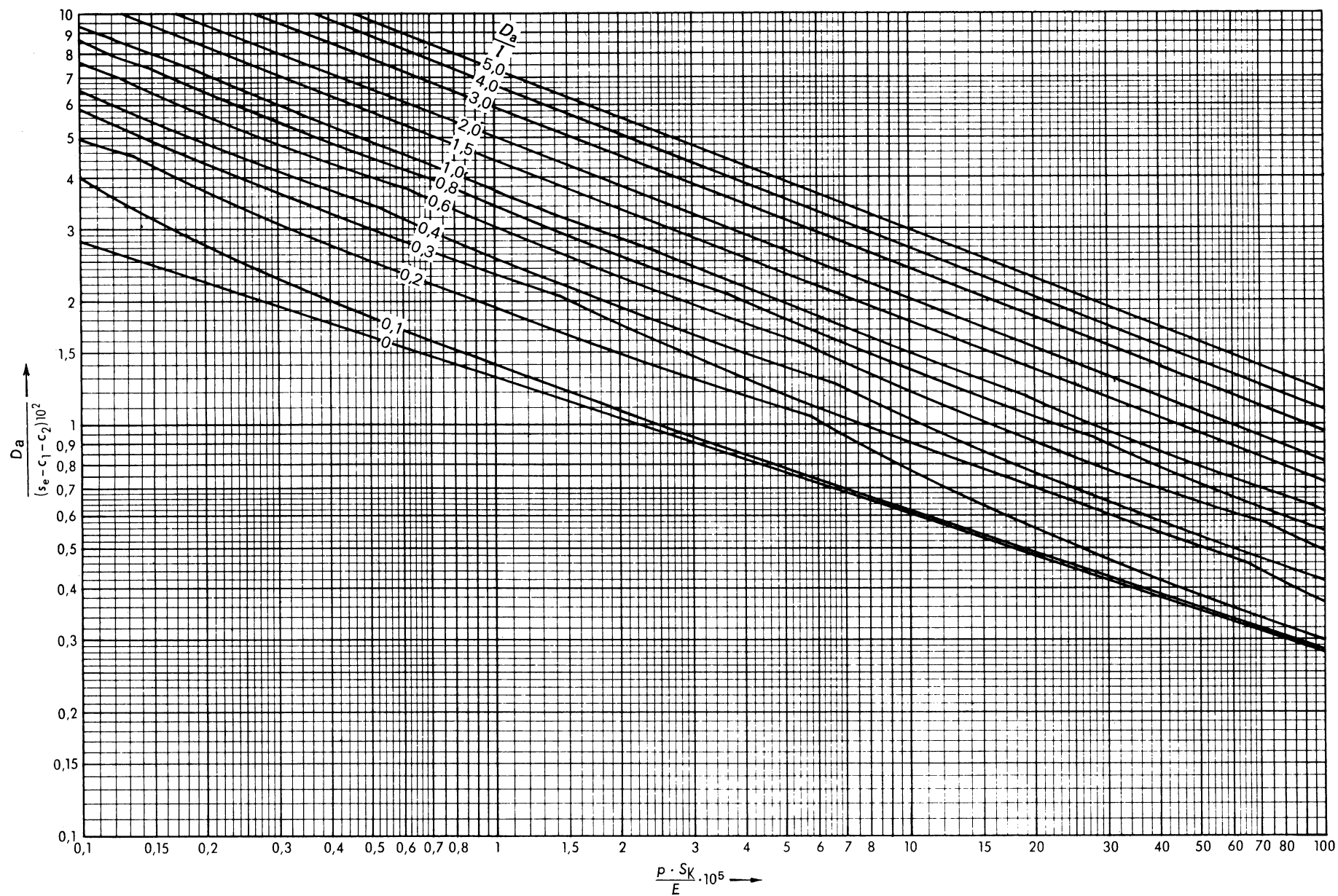
**8.2** Abweichend von Abschnitt 8.1 gilt für die kleinste Wanddicke bei Zylinderschalen aus Aluminium und dessen Legierungen 5 mm.

**8.3** Ausnahmen siehe AD 2000-Merkblatt B 0 Abschnitt 10.

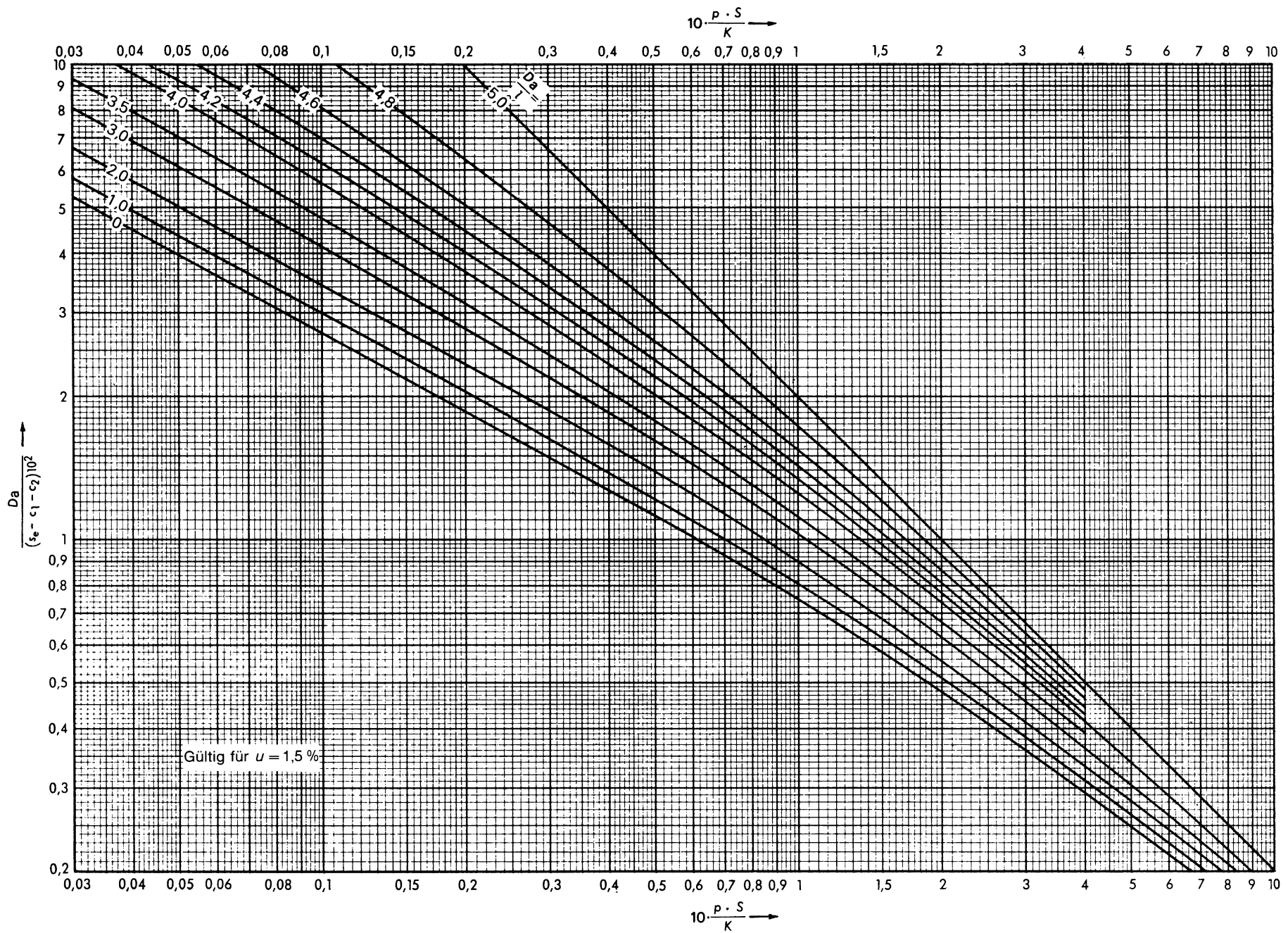
**8.4** Bei Wärmeaustauscherrohren darf die kleinste Wanddicke gemäß Abschnitt 8.1 und 8.2 unterschritten werden.

## 9 Schrifttum

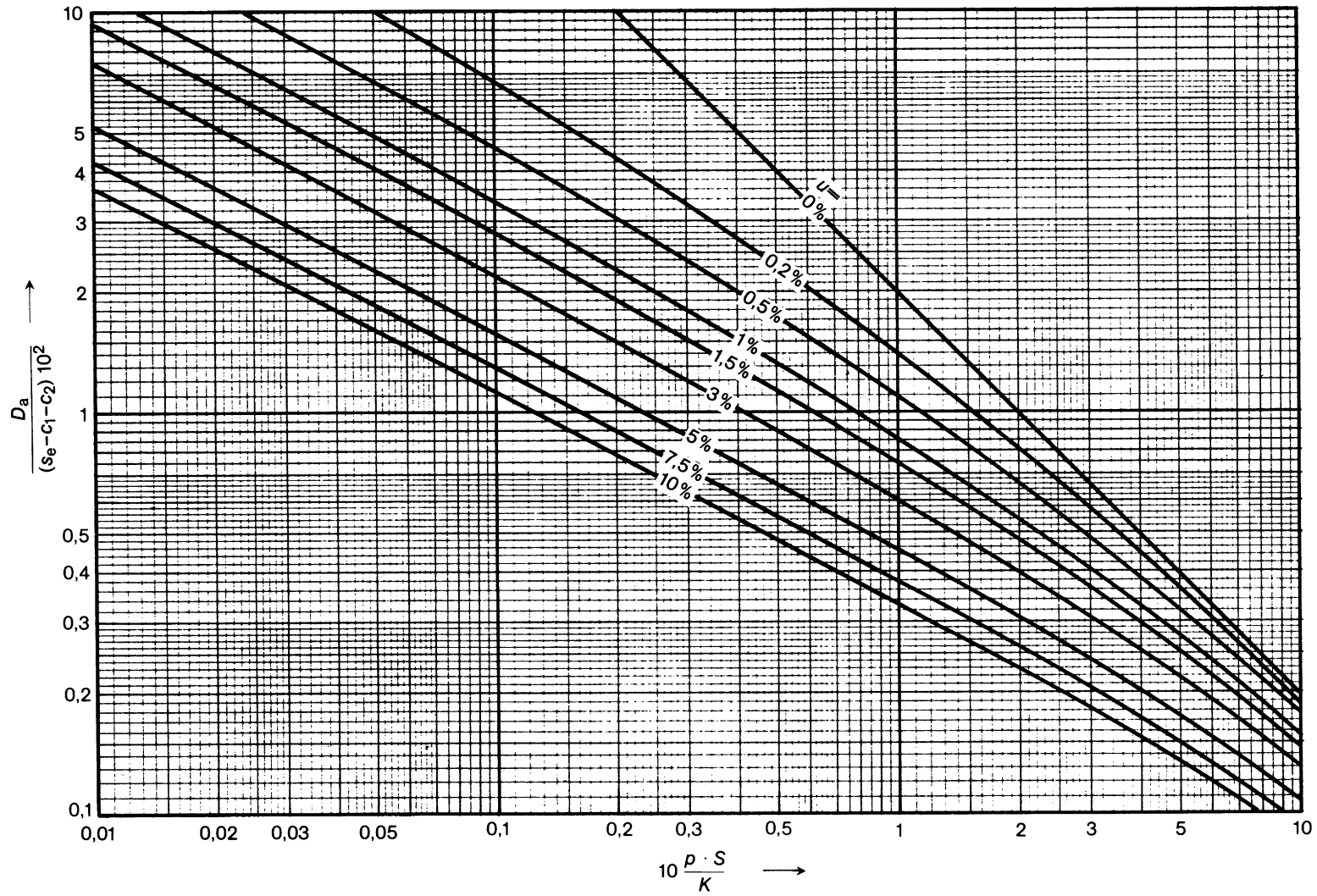
- [1] *Hütte I.*, 28. Auflage, S. 953. Verlag Ernst und Sohn, Berlin.
- [2] *Meincke, H.*: Berechnung und Konstruktion zylindrischer Behälter unter Außendruck. Konstruktion **11** (1959) Nr. 4, S. 131/38.
- [3] *v. Mises, R.*: Der kritische Außendruck zylindrischer Rohre. VDI-Z **58** (1914) Nr. 19, S. 750/55.
- [4] *Schwaigerer, S., u. A. Konejung*: Die Festigkeitsberechnung von Flammrohren. Konstruktion **2** (1950) Nr. 1, S. 17/23.
- [5] *v. Reth, Th.*: Unmittelbare Berechnung der Beulwellen in Gleichung (1) des AD-Merkblattes B 6. TÜ **12** (1971) Nr. 12, S. 362.
- [6] BS 5500 – Specification for unfired fusion welded pressure vessels, 1982; herausg. v. British Standards Institution.
- [7] *Link, H.*: Berechnung ringversteifter Bohrschachtverrohrungen aus Stahl in den USA. Der Stahlbau **9** (1981), S. 284/287.
- [8] *Ebner, H.*: Festigkeitsprobleme von U-Booten. Schiffstechnik, Forschungshefte für Schiffsbau und Schiffsmaschinenbau **14** (1967) H. 74, S. 95/113.
- [9] *Meincke, H.*: Rohre in Apparaten unter Außendruck. Chem.-Ing.-Technik **3** (1978), S. 215/17.
- [10] Deutscher Ausschuss für Stahlbau: Beulsicherheitsnachweise für Schalen, DAST-Richtlinie 013, Juli 1980.
- [11] *Feder, G.*: Zur Stabilität ringversteifter Rohre unter Außendruckbelastung. Schweizerische Bauzeitung, 89. Jahrgang, Heft 42 (21.10.1971), S. 1043/1051.



**Bild 6.** Erforderliche Wanddicke  $s$  bei Berechnung gegen elastisches Einbeulen



**Bild 7.** Erforderliche Wanddicke  $s$  bei Berechnung gegen plastisches Verformen



**Bild 8.** Erforderliche Wanddicke  $s$  von langen Zylinderschalen ( $D_a/l < 0,2$ ) bei Berechnung gegen plastisches Verformen in Abhängigkeit von der Unrundheit

## Anhang 1 zum AD 2000-Merkblatt B 6

### Erläuterungen zum AD 2000-Merkblatt B 6

#### Zu 4.2 und 7.3.4

Nach den bisherigen Erfahrungen ist  $S_K = 3,0$  bei Unrundheiten bis  $u = 1,5\%$  ausreichend. Der Einfluss der Unrundheit wurde nach dem Schrifttum [4] ermittelt, wobei von  $S_K = 3,0$  bei  $u = 1,5\%$  ausgegangen wurde.

Nach AD 2000-Merkblatt HP 1 Tafel 1 darf die Unrundheit bei Beanspruchung durch Außendruck bei  $s/D$ -Verhältnissen  $\leq 0,1$  in der Regel  $1,5\%$  nicht überschreiten.

Bei Rohren nach AD 2000-Merkblatt W 4 und Rohren aus austenitischen Stählen nach DIN EN ISO 1127 (für  $DN < 150$  in den Toleranzklassen D2, T3 und für  $DN \geq 150$  in den Toleranzklassen D1, T1) kann der Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen im Normalfall näherungsweise auch direkt in Abhängigkeit vom Rohr-Nennndurchmesser (DN in mm) bestimmt werden:

$$10 \leq DN \leq 50 : S_K = 8,25 - \frac{DN}{10}$$

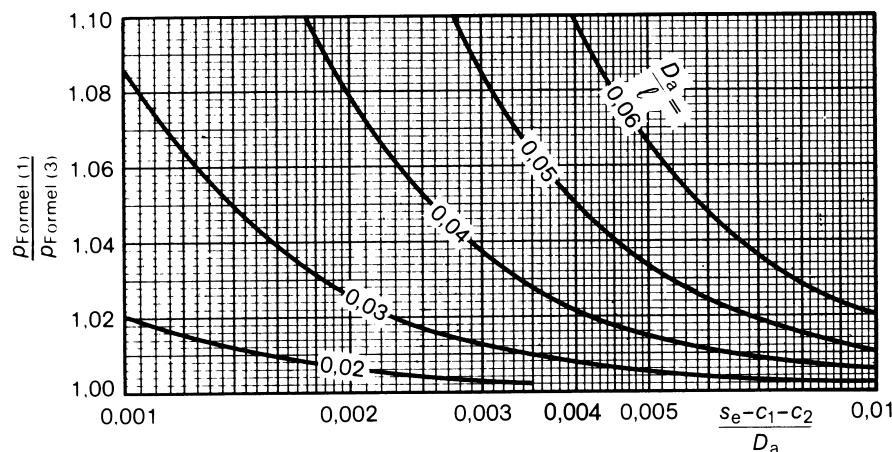
$$50 < DN : S_K = 3,25$$

#### Zu 7.2.3

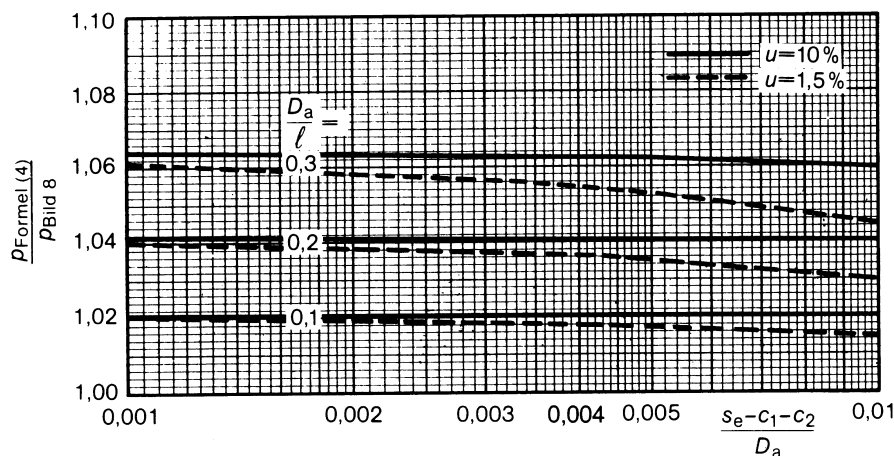
Formel (3) gilt exakt für die unendlich lange Zylinderschale ( $D_a/l = 0$ ) und kann aus Formel (1) abgeleitet werden. Nach Formel (3) ergeben sich geringere Drücke als nach Formel (1). Die Abweichungen sind für verschiedene  $D_a/l$ -Verhältnisse in Bild A1 dargestellt. Für die Verhältnisse  $s/D_a > 0,0025$  und  $D_a/l < 0,04$  sind die Abweichungen geringer als  $5\%$ .

#### Zu 7.3.2

Bild 8 gilt exakt für die unendlich lange Zylinderschale ( $D_a/l = 0$ ). Für Zylinderschalen unendlicher Länge ergeben sich geringere Drücke als nach Formel (4). Die Abweichungen sind für verschiedene  $D_a/l$ -Verhältnisse in Bild A2 dargestellt. Für Verhältnisse  $D_a/l \leq 0,2$  sind die Abweichungen geringer als  $5\%$ .



**Bild A1.** Berechnung gegen elastisches Einbeulen – Abweichungen der nach Formeln (1) und (3) ermittelten Drücke in Abhängigkeit von  $(s_e - c_1 - c_2)/D_a$  und  $D_a/l$



**Bild A2.** Berechnung gegen plastisches Verformen – Abweichungen der nach Formel (4) und Bild 8 ermittelten Drücke in Abhängigkeit von  $(s_e - c_1 - c_2)/D_a$ ,  $D_a/l$  und der Unrundheit  $u$



## Zu 7.4.1

Formel (10) entstand aus der im Schrifttum [4] und [7] abgeleiteten Formel

$$\sigma = \frac{p \cdot l_m \cdot D_a}{20 \cdot A_m} + \frac{p \cdot l \cdot D_a^2}{8000 \cdot W_m} \cdot \frac{u}{1 - p/p_e} \quad (\text{A1})$$

Formel (A1) wurde so modifiziert, dass im rein plastischen Bereich die Sicherheit  $S$  und im rein elastischen Bereich mindestens die Sicherheit  $S_K$  vorhanden ist. Die so modifizierte Formel (A1) führt unter Beachtung der vorgegebenen Dimensionen zu Formel (10). Wird diese unter Berücksichtigung der Formel (9) nach  $p$  aufgelöst, kann der für

die Festlegung des zulässigen Betriebsüberdruckes maßgebende Druck direkt ermittelt werden:

$$p = p_e \cdot \left[ \frac{1 + S_K \cdot G + H}{2 \cdot S_K} - \sqrt{\left[ \frac{1 + S_K \cdot G + H}{2 \cdot S_K} \right]^2 - \frac{G}{S_K}} \right] \quad (\text{A2})$$

$$\text{mit } G = \frac{K}{S} \cdot \frac{20 \cdot A_m}{p_e \cdot l_m \cdot D_a} \quad (\text{A3})$$

$$H = \frac{u \cdot D_a \cdot l \cdot A_m}{400 \cdot l_m \cdot W_m} \quad (\text{A4})$$

und den Werten für  $p_e$  und  $l_m$  nach den Formeln (11) und (12).





---

Herausgeber:



E-Mail: [berlin@vdtuev.de](mailto: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](mailto:info@beuth.de)  
[www.beuth.de](http://www.beuth.de)