

# AD 2000-Merkblatt

ICS 23.020.30

Ausgabe Dezember 2021

<b>Berechnung von Druckbehältern</b>	<b>Ebene Böden und Platten nebst Verankerungen</b>	<b>AD 2000-Merkblatt B 5</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 G 1.

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.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin

Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

TÜV-Verband e. V., 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

Verband für Anlagentechnik und IndustrieService e. V. (VAIS), Düsseldorf

VGBe Energy e. V., Essen

Die AD 2000-Merkblätter werden laufend dem Fortschritt der Technik angepasst.

## Inhalt

	Seite
0 Präambel .....	2
1 Geltungsbereich.....	2
2 Allgemeines .....	2
3 Formelzeichen und Einheiten .....	2
4 Verschwächungen .....	3
5 Zusätze .....	3
6 Berechnung von unverankerten Böden und Platten .....	3
7 Berechnung von verankerten Böden und Platten .....	6
8 Berechnung ebener Platten an Wärmeaustauschern .....	7
9 Nachweis der Verankerungs- und Versteifungselemente und deren Verbindung zur Platte .....	14
10 Schrifttum.....	17
Anhang 1 zum AD 2000-Merkblatt B 5.....	33

Ersatz für Ausgabe September 2016; vollständig überarbeitet

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 wesentlichen Sicherheitsanforderungen der Druckgeräte-richtlinie kann das AD 2000-Regelwerk angewandt werden, vornehmlich für die Konformitätsbewertung nach den Modulen „G“ und „B (Baumuster) + 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 die Bemessung von ebenen Böden und Platten und sofern vorhanden deren Versteifungen/Verankerungen. Als Sonderfall wird der Nachweis für Rohrplatten von Wärmeaustauschern geregelt.

Die Berechnungsregeln beruhen auf den Kirchhoffschen Gleichungen für die Platte unter näherungsweise Berücksichtigung der Einspannbedingungen und der Lochfelder. Außerdem enthalten die C-Werte auch den Einfluss einer Querkontraktionszahl von 0,3.

Bei Werkstoffen mit wesentlich anderen Querkontraktionszahlen sowie dort, wo die Abmessungen die Grenzen

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D} \geq 4 \sqrt{0,0087 \frac{p}{E}}; \frac{s}{D} \leq \frac{1}{3}$$

überschreiten, ist eine gesonderte Spannungs- und Verformungsanalyse erforderlich.

Für  $D$  ist der jeweilige Berechnungsdurchmesser einzusetzen. Diese Abgrenzung gilt nicht für Rohrplatten, bei denen eine gegenseitige Abstützung durch die Rohre vorliegt.

## 2 Allgemeines

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

**2.2** Blindflansche nach DIN EN 1092-1 können ohne weitere Berechnung für Druckbehälter und Rohrleitungen verwendet werden, wenn sie sämtliche nachstehenden Bedingungen nach EN 13445-3, Abschnitt 11.4.2 erfüllen:

- Unter normalen Betriebsbedingungen liegt der Berechnungsdruck unter dem in den Tabellen der DIN EN 1092-1 angegebenen Nenndruck für Flansch und Werkstoff bei Berechnungstemperatur.
- Unter Prüfbedingungen oder außergewöhnlichen Bedingungen überschreitet der Berechnungsdruck nicht das 1,5-Fache des in den genannten Tabellen angegebenen Nenndrucks bei der entsprechenden Temperatur.
- Die Dichtung ist nach Tafel 1 aus AD 2000-Merkblatt B 8 für den Flansch der betreffenden PN-Reihe oder Class zugelassen.
- Die Schrauben gehören mindestens zu der Festigkeitskategorie (siehe Tafel 2 aus AD 2000-Merkblatt B 8), die als Mindestanforderung nach Tafel 1 aus AD 2000-Merkblatt B 8 für den in der Flanschverbindung verwendeten Dichtungstyp festgelegt ist.
- Der Behälter ist überwiegend nichtzyklischen Belastungen ausgesetzt.
- Die Differenz zwischen mittlerer Temperatur von Schrauben und Flansch überschreitet unter keinen Bedingungen 50 °C.
- Bei unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Schrauben- und Flanschwerkstoff (z. B. Flansche aus austenitischem und Schrauben aus ferritischem Stahl) beträgt die maximale Betriebstemperatur 120 °C. Bei Betriebstemperaturen > 120 °C darf die Differenz der Wärmeausdehnungskoeffizienten von Schrauben- und Flanschwerkstoff 10 % nicht überschreiten.

## 3 Formelzeichen und Einheiten

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

$d_1, d_2$	Berechnungsdurchmesser	mm
$h$	Bordhöhe	mm
$l_K$	Knicklänge	mm
$l_W$	Walzlänge	mm
$l_W^*$	Länge der Verbindung zwischen Rohr und Rohrboden	mm
$p_i, p_u$	Berechnungsdruck in den Rohren bzw. um die Rohre	bar
$D_1, D_2, D_3, D_4$	Berechnungsdurchmesser	mm
$F_A$	Axialkraft	N
$F_K$	Knickkraft	N
$F_R$	Rohrkraft	N



$s_1$	Anschlusswanddicke	mm
$t$	hier: Teilung	mm
$\lambda$	Schlankheitsgrad	–
$l$	Berechnungshilfsgröße	mm
$f_{\text{Bord}}, f_{\text{Mantel}}$	zulässige Bemessungsspannungen	N/mm <sup>2</sup>
$f$	kurze Seite der rechteckigen/elliptischen Platte	mm
$e$	lange Seite der rechteckigen/elliptischen Platte	mm
$\delta$	Verhältnis erforderliche Schraubenkraft zu Innendruckkraft	–

## 4 Verschwächungen

### 4.1 Ausschnitte in unverankerten, ebenen Böden und Platten

**4.1.1** Zentrale Ausschnitte mit dem Durchmesser  $d_i$  können für Ausführungen nach Abschnitt 6.1 über Bild 23 und für Ausführungen nach Abschnitt 6.2 über Bild 24 berücksichtigt werden.

**4.1.2** Die erforderliche Wanddicke der Platte mit Ausschnitt ergibt sich aus den Formeln (4), (5) oder (6), in denen der C- bzw.  $C_1$ -Wert nach Tafel 4 bzw. Bild 19 mit dem Ausschnittsbeiwert  $C_A$  bzw.  $C_{A1}$  multipliziert wird.

**4.1.3** Je nachdem, ob ein Ausschnitt ohne anschließenden Stutzen (Ausführung A der Bilder 23 und 24) oder mit Stutzen (Ausführung B der Bilder 23 und 24) vorliegt, sind die Werte  $C_A$  bzw.  $C_{A1}$  der Kurve A oder B zu entnehmen. Bei Durchmesserverhältnissen  $d_i/d_D \geq 0,8$  ist die Flanschberechnung nach AD 2000-Merkblatt B 8 anzuwenden.

**4.1.4** Nichtmittige Ausschnitte können wie mittige Ausschnitte behandelt werden.

**4.1.5** Für runde, unverankerte Platten mit gleichsinnigem zusätzlichem Randmoment, bei denen das Verhältnis  $(s_g - c_1 - c_2)/d_t \geq 0,1$  ist, kann bei mehreren Ausschnitten der Ausschnittsbeiwert  $C_{A1}$  wie folgt bestimmt werden:

$$C_{A1} = \sqrt{\frac{A}{A - A_A}} \quad \checkmark \quad (1)$$

Als  $A$  ist der unverschwächte Plattenquerschnitt und als  $A_A$  die Summe der Querschnitte der in der am stärksten geschwächten Schnittebene liegenden Ausschnitte einzusetzen.

### 4.2 Ausschnitte in Platten an Wärmeaustauschern

Der Verschwächungsbeiwert wird wie folgt bestimmt

$$v = \frac{t - d_a^*}{t} \quad \checkmark \quad 12 \quad (2)$$

mit

$$d_a^* = \max \left\{ d_a - 2 \cdot s_t \cdot \left( \frac{E_t}{E} \right) \cdot \left( \frac{K_t}{K} \right) \cdot \left( \frac{l_W^*}{s} \right); \frac{d_a}{1,2} \right\} \quad 18 \quad (3)$$

In Formel (3) steht der Index „t“ für die Rohrparameter und  $l_W^*$  für die Länge der Verbindung zwischen Rohr und Rohrboden ( $l_W^* = g + \sqrt{d_a \cdot s_t}$  bei eingeschweißten Rohren;  $l_W^* = l_W$  bei eingewalzten Rohren;  $l_W^* = g + l_W$  bei eingeschweißten und eingewalzten Rohren).  $E_t/E$  und  $K_t/K$  sowie  $l_W^*/s$  dürfen mit maximal 1 eingesetzt werden.

## 5 Zuschläge

Siehe AD 2000-Merkblatt B 0, Abschnitt 9. Abweichend davon entfällt jedoch der Zuschlag  $c_1$  bei Wanddicken über 25 mm.

## 6 Berechnung von unverankerten Böden und Platten

### 6.1 Unverankerte, ebene Böden und Platten ohne zusätzliches Randmoment

**6.1.1** Die erforderliche Wanddicke  $s$  unverankerter, ebener Böden und Platten ohne zusätzliches Randmoment beträgt

$$s = C \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K}} + c_1 + c_2 \quad 2 \checkmark \quad (4)$$

Die Berechnungsbeiwerte  $C$  und die Berechnungsdurchmesser  $D_1$  sind entsprechend Tafel 4 einzusetzen.

Bei den Ausführungsformen a) und b) nach Tafel 4 sind folgende Bedingungen zu beachten:

- 1) Das Verhältnis der Bemessungsspannungen  $f_{\text{Bord}}/f_{\text{Mantel}}$  soll mindestens 0,75 sein.  
Wird dieses Verhältnis unterschritten, ist die ausreichende Wanddicke des zylindrischen Bords unabhängig von seiner Höhe  $h$  nach AD 2000-Merkblatt B 1 nachzuweisen.
- 2) Bei einem Verhältnis  $1 > f_{\text{Bord}}/f_{\text{Mantel}} \geq 0,75$  ist die ausreichende Wanddicke des zylindrischen Bords nach AD 2000-Merkblatt B 1 nachzuweisen, wenn die Höhe  $h$  des zylindrischen Bords den Wert

$$\frac{f_{\text{Bord}}}{f_{\text{Mantel}}} \sqrt{D_1 \cdot s_1} \text{ überschreitet.}$$

Die Wanddicke der Krempe darf die rechnerische Wanddicke des zylindrischen Bords nicht unterschreiten.

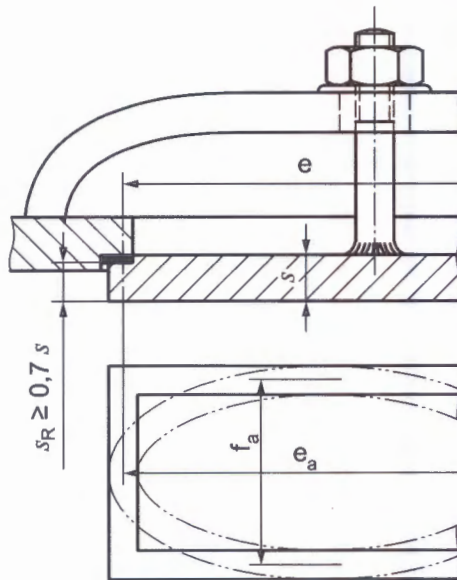
Ist bei der Ausführungsform e) abweichend von der Darstellung in Tafel 4 ein zylindrischer Bord vorhanden, gelten die genannten Bedingungen ebenfalls.

**6.1.2** Die erforderliche Wanddicke  $s$  unverankerter, rechteckiger oder elliptischer Platten ohne zusätzliches Randmoment nach Bild 1 beträgt

$$s = C \cdot C_E \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K}} + c_1 + c_2 \quad \text{3} \quad (5)$$

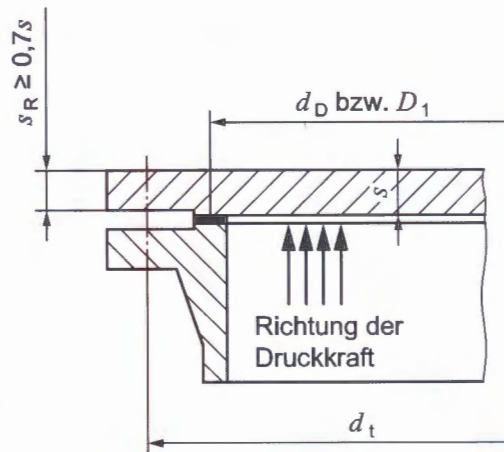
Der aus Bild 18 zu entnehmende Beiwert  $C_E$  berücksichtigt die besonderen Verhältnisse rechteckiger oder elliptischer Platten. Der  $C$ -Wert ist entsprechend den vorliegenden Randbedingungen, bezogen auf die kurze Seite, Tafel 4 zu entnehmen.

**6.1.3** Bei Deckeln nach Bild 1 mit einer zusätzlichen Belastung durch Bügelschrauben muss die der Innendruckbeanspruchung gleichgerichtete zulässige Schraubenbelastung berücksichtigt werden. In der Regel genügt es, in Formel (5) anstelle von  $p$  den Wert  $1,5 p$  einzusetzen.

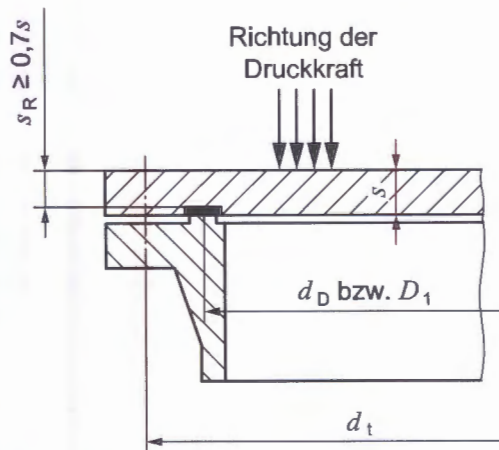


**Bild 1 — Von innen vorgelegte, unverankerte, rechteckige oder elliptische Platte ohne zusätzliches Randmoment**

## 6.2 Unverankerte Platten mit zusätzlichem Randmoment



**Bild 2 — Unverankerte, runde Platte mit zusätzlichem gleichsinnigem Randmoment**



**Bild 3 — Unverankerte, runde Platte mit zusätzlichem gegensinnigem Randmoment**

**6.2.1** Die erforderliche Wanddicke  $s$  unverankerter, runder Platten mit zusätzlichem gleichsinnigem Randmoment beträgt

$$s = C_1 \cdot d_D \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K}} + c_1 + c_2 \quad (6)$$

Der  $C_1$ -Wert kann in Abhängigkeit vom Verhältnis  $d_t/d_D$  und dem Wert  $\delta$  aus Bild 19 entnommen werden. Hierbei beträgt das Verhältnis der erforderlichen Schraubenkraft zur Innendruckkraft

$$\delta = 1 + 4 \frac{k_1 \cdot S_D}{d_D} \quad (7)$$

wobei in der Regel  $S_D = 1,2$  eingesetzt und der Dichtungskennwert  $k_1$  dem AD 2000-Merkblatt B 7 entnommen werden kann. Bei gegensinnigem Randmoment kann  $C_1 = 0,35$  gesetzt werden.

**6.2.2** Die erforderliche Wanddicke  $s$  unverankerter, rechteckiger oder elliptischer Platten mit zusätzlichem gleichsinnigem Randmoment wird sinngemäß nach Formel (5) aus Abschnitt 6.1.2 berechnet, wobei statt  $C$  der auf die kurze Seite der Platte bezogene  $C_1$ -Wert nach Abschnitt 6.2.1 aus Bild 19 eingesetzt wird.

**6.2.3** Platten, die entsprechend den vorstehenden Formeln ausgelegt sind, genügen den Festigkeitsanforderungen. Es können jedoch z. B. bei Platten aus hochfesten Stählen sowie bei Platten aus Nichteisenmetallen oder bei Platten größeren Durchmessers Schwierigkeiten bezüglich Abdichtung und zulässiger Schraubenbiegung wegen zu großer Schrägstellung der Platten auftreten. Es wird deshalb empfohlen, bei Weichstoffdichtungen und Metallweichstoffdichtungen die Plattenneigung  $\varphi$  in der Größenordnung von etwa  $0,5^\circ$  bis  $1^\circ$  zu begrenzen [17]. Die Platte muss dann unter Umständen dicker ausgeführt sein, als es aufgrund der Festigkeitsanforderung notwendig wäre.



## 7 Berechnung von verankerten Böden und Platten

### 7.1 Runde, ebene Böden und Platten mit einer zentralen Verankerung durch ein Rohr oder einen Vollanker

7.1.1 Die erforderliche Wanddicke  $s$  beträgt

$$s = C_2 \cdot (D_1 - d_1) \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 \cdot K}} + c_1 + c_2 \quad (8)$$

wobei der Berechnungsbeiwert  $C_2$  und die Berechnungsdurchmesser  $D_1$  und  $d_1$  entsprechend Tafel 5 einzusetzen sind.

Bei den Ausführungsformen a) und b) nach Tafel 5 sind folgende Bedingungen zu beachten:

1) Das Verhältnis der Bemessungsspannungen  $f_{\text{Bord}}/f_{\text{Mantel}}$  soll mindestens 0,75 sein

$$\Rightarrow \frac{K_{\text{Bord}}}{S_{\text{Bord}}} \geq 0,75 \cdot \frac{K_{\text{Mantel}}}{S_{\text{Mantel}}}$$

Wird dieses Verhältnis unterschritten, ist die ausreichende Wanddicke des zylindrischen Bords unabhängig von seiner Höhe  $h$  nach AD 2000-Merkblatt B 1 nachzuweisen.

2) Bei einem Verhältnis  $1 > f_{\text{Bord}}/f_{\text{Mantel}} \geq 0,75$  ist die ausreichende Wanddicke des zylindrischen Bords nach AD 2000-Merkblatt B 1 nachzuweisen, wenn die Höhe  $h$  des zylindrischen Bords den Wert

$$\frac{f_{\text{Bord}}}{f_{\text{Mantel}}} \sqrt{D_1 \cdot s_1} \text{ überschreitet.}$$

Die Wanddicke der Krempe darf die rechnerische Wanddicke des zylindrischen Bords nicht unterschreiten.

7.1.2 Die zentralen Anker oder Ankerrohre müssen die auf sie entfallende Axialkraft (Zug- oder Druckkraft) mit einer Sicherheit  $S = 1,5$  aufnehmen können. Die Axialkraft beträgt

$$F_A = C_Z \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2 \cdot p}{40} \quad (9)$$

wobei  $C_Z$  in Abhängigkeit von  $D_1/d_1$  Bild 20 entnommen werden kann. Die Formel (8) berücksichtigt nicht die Wirkung unterschiedlicher Wärmedehnung von Mantel und Rohren sowie in den Platten selbst. Wenn die Wirkung unterschiedlicher Wärmedehnung berücksichtigt werden muss, sind entsprechende Vereinbarungen zwischen Hersteller und Besteller/Betreiber zu treffen.

7.1.3 Die zentrale Verankerung ist gemäß Abschnitt 9 nachzuweisen.

### 7.2 Ebene, durch Ankerrohre, Stehbolzen oder Blechanker versteifte Platten

Für jede Konstruktion ist sowohl die gleichmäßig verteilte Verankerung (rechteckige Ersatzfläche) als auch die ungleichmäßige Verankerung (eingeschriebene Kreisfläche) zu bewerten. Die gesamte Konstruktion ist hinsichtlich dieser beiden Kriterien unter Berücksichtigung der Randauflagerung zu überprüfen.

Der nachfolgend genannte Berechnungsbeiwert  $C_3$  ist der Tafel 1 zu entnehmen. Gelten für die Stützstellen verschiedene Bedingungen nach Tafel 1, ist für die Auslegung der Mittelwert von  $C_3$  zu bilden.

7.2.1 Die erforderliche Wanddicke  $s$  ebener, durch Ankerrohre, Stehbolzen oder Blechanker versteifter Platten beträgt bei gleichmäßig über die druckbelastete Fläche verteilter Verankerung nach Bild 4:

$$s = C_3 \cdot C_E \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 \cdot K}} + c_1 + c_2 \quad (10)$$

Der Berechnungsbeiwert  $C_3$  und die Abmessungen  $f_a$  (Rechteckbreite) und  $e_a$  (Länge) zur Ermittlung von  $C_E$  sind Bild 18 und Bild 4 zu entnehmen.

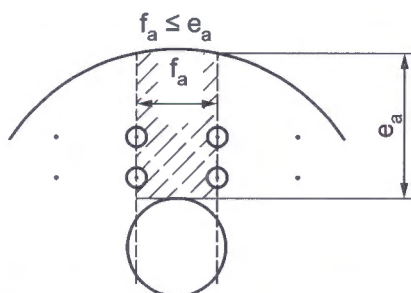


Bild 4 — Gleichmäßig verteilte Verankerung

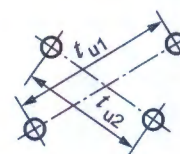


Bild 5 — Ungleichmäßig verteilte Verankerung

**7.2.2** Die erforderliche Wanddicke  $s$  ebener, durch Ankerrohre, Stehbolzen oder Blechanker versteifter Platten beträgt bei ungleichmäßig verteilter Verankerung nach Bild 5

$$s = C_3 \cdot \frac{t_{u1} + t_{u2}}{2} \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K}} + c_1 + c_2 \quad (11)$$

Mit  $d_2 = (t_{u1} + t_{u2})/2$  dem Durchmesser des eingeschriebenen Kreises in der Verankerungsfläche.

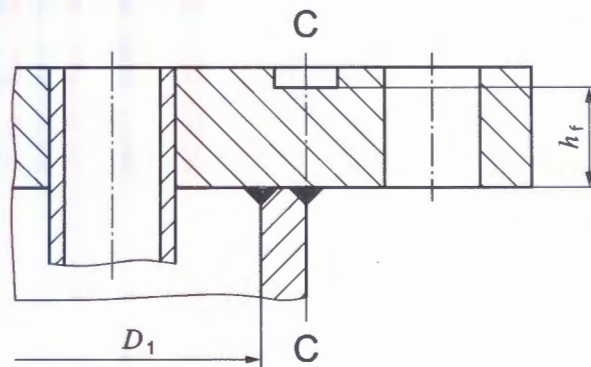
**Tafel 1 — Berechnungsbeiwert ebener, durch Rohranker, Stehbolzen oder Blechanker versteifter Platten**

Stützstellendefinition	Berechnungsbeiwert $C_3$
Bolzen eingeschraubt und vernietet oder eingeschraubt und aufgedornt	0,47
Bolzen eingeschraubt und beidseits mit Muttern versehen	0,44
Stehbolzen, Rohranker oder Blechanker eingeschweißt als Einzelstützstelle	0,45
Stehbolzen, Rohranker eingeschweißt als Stehbolzenfeld bzw. Ankerrohrfeld $t_1, t_2 \leq 200$ mm	0,39
Blechanker eingeschweißt Höhe/Dicke $> 10$	0,40
Rohrfeld (Rohre eingewalzt) oder Randauflage Boden (einseitig geschweißt)	0,40
Rohrfeld (Rohre eingeschweißt) oder Randauflage Boden (beidseitig geschweißt)	0,35

**7.2.3** Die Verankerung ist gemäß Abschnitt 9 nachzuweisen.

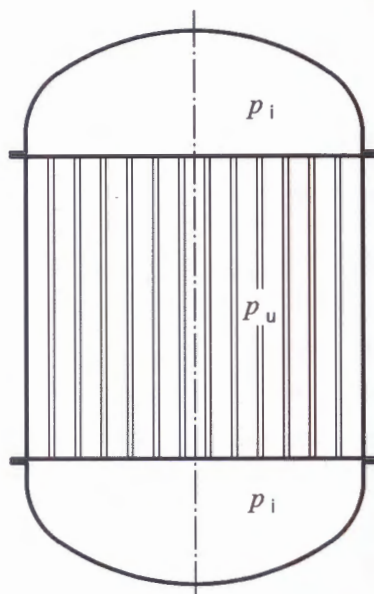
## 8 Berechnung ebener Platten an Wärmeaustauschern

- Die erforderliche Wanddicke  $s$  im Bereich des Berechnungsdurchmessers  $D_1$  runder, ebener Rohrplatten wird nach den Abschnitten 8.1 bis 8.5 berechnet.
- Rechteckige, berohrte Platten werden in Abhängigkeit von ihrer konstruktiven Form sinngemäß nach den Abschnitten 8.1 bis 8.5 unter Einbeziehung des Berechnungsbeiwertes  $C_E$  nach Bild 18 behandelt; das heißt, in den jeweils anzuwendenden Formeln ist der  $C$ -Wert mit  $C_E$  zu multiplizieren. Die  $C$ -Werte werden nach Abschnitt 6.2.2 aus den auf die kurze Seite der Platte bezogenen geometrischen Verhältnissen bestimmt. In den maßgebenden Gleichungen wird der Berechnungsdurchmesser  $D_1$  durch die Länge der schmalen Plattenseite  $f_a$  ersetzt.
- Für Platten ohne zusätzliches Randmoment sind die Berechnungsbeiwerte  $C$  Tafel 4 zu entnehmen.
- Für Platten mit zusätzlichem Randmoment sind die Berechnungsbeiwerte  $C_1$  Bild 19 zu entnehmen. Der Abschnitt 6.2.1 gilt sinngemäß.
- Bei durchgehenden Rohrplatten nach Bild 6 ist der Querschnitt C-C nachzurechnen. Die Beurteilung der Axialbeanspruchung im Mantel ist sinngemäß nach Abschnitt 8.1.4 vorzunehmen.



**Bild 6 — Runde, ebene Rohrplatten mit überstehendem Flanschrand**

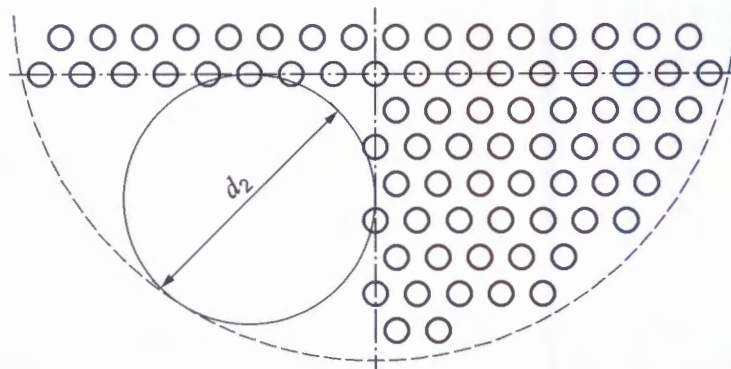
## 8.1 Runde, ebene Platten, die durch die Rohre und den Mantel gegenseitig verankert sind



**Bild 7 — Runde, ebene Platten, die durch Rohre und Mantel gegenseitig verankert sind**

**8.1.1** Die erforderliche Wanddicke  $s$  runder, ebener Platten nach Bild 7, die durch die Rohre und den Mantel gegenseitig verankert sind, ist abhängig von der Form des unberohrten Bereiches unter Verwendung der Formeln (12a) bis (12c) zu bestimmen.

Kreisförmige Fläche



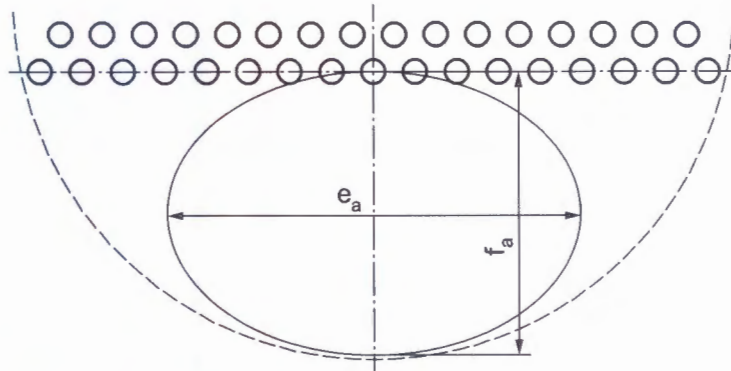
**Bild 8a — Bestimmung der Berechnungsfläche (kreisförmige Fläche)**

$$s = 0,40 d_2 \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K}} + c_1 + c_2 \quad (12a)$$

mit  $d_2$  als dem Durchmesser des größten im unberohrten Teil eingeschriebenen Kreises (siehe Bild 8a).



## Elliptische Fläche



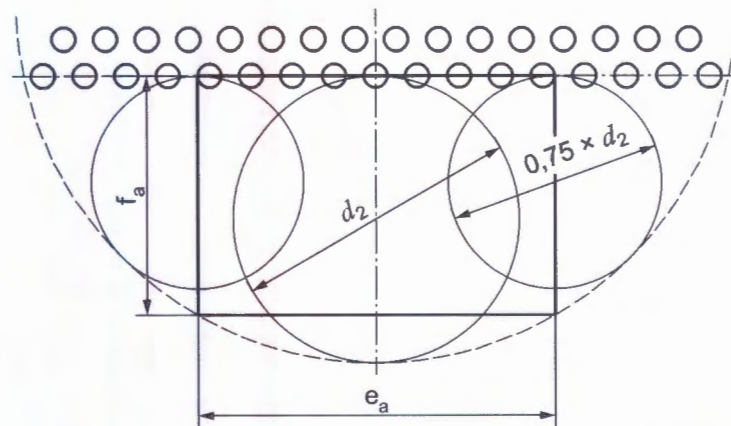
**Bild 8b — Bestimmung der Berechnungsfläche (elliptische Fläche)**

$$s = 0,40 C_E \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 \cdot K}} + c_1 + c_2$$

(12b)

mit  $f_a$ ,  $e_a$  als den Abmessungen der größten im unberohrten Teil eingeschriebenen Ellipse (Def. Bild 18).

## Rechteckige Fläche



**Bild 8c — Bestimmung der Berechnungsfläche (rechteckige Fläche)**

$$s = 0,40 C_E \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 \cdot K}} + c_1 + c_2$$

(12c)

mit  $f_a$ ,  $e_a$  als den Seitenlängen des größten im unberohrten Teil eingeschriebenen Rechteckes (Def. Bild 18).

Dabei ist  $p$  in allen Fällen als der größte Differenzdruck einzusetzen. Der aus Bild 18 zu entnehmende Beiwert  $C_E$  berücksichtigt die besonderen Verhältnisse rechteckiger oder elliptischer Platten.

**8.1.2** Die Rohre sind gemäß Abschnitt 9 nachzuweisen. Liegt die Knickkraft über der nach Formel (30) zulässigen Knickkraft, so beträgt die erforderliche Wanddicke  $s$  der Platten

$$s = C \cdot \sqrt{\frac{D_1^2 - n \cdot d_1^2}{v} \cdot \frac{p_i \cdot S}{10 \cdot K}} + c_1 + c_2$$

(13)

Die Berechnungsbeiwerte  $C$  sind Tafel 4 bzw. Bild 19 zu entnehmen. Für den Verschwächungsbeiwert gelten die Formeln (2) und (3).

**8.1.3** Die Formeln (12a) bis (12c) berücksichtigen nicht die Wirkung unterschiedlicher Wärmedehnung von Mantel und Rohren sowie in den Platten selbst. Wenn die Wirkung unterschiedlicher Wärmedehnung berücksichtigt werden muss, sind entsprechende Vereinbarungen zwischen Hersteller und Besteller/Betreiber zu treffen.

**8.1.4** Sofern der Druck in den Rohren größer ist als der doppelte Wert des Druckes um die Rohre ( $p_i > 2 \cdot p_u$ ), muss nachgewiesen werden, dass der Mantel die aus  $p$  resultierende Axialkraft zusätzlich aufnehmen kann.

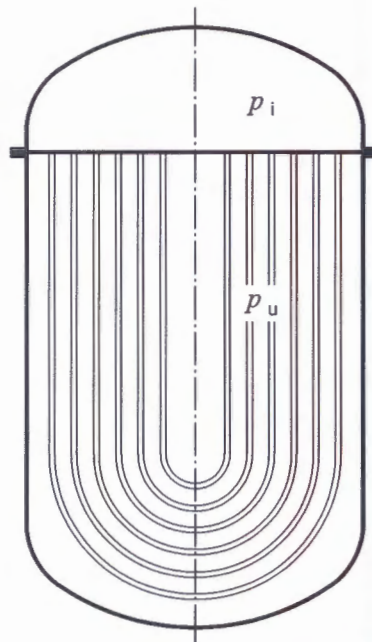
## 8.2 Runde, ebene Platten mit rückkehrenden Rohren

**8.2.1** Die erforderliche Wanddicke  $s$  runder, ebener, vollbohrter Platten mit rückkehrenden Rohren nach Bild 9 beträgt

$$s = C \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p_i \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (14)$$

bzw.

$$s = C \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p_u \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (15)$$



**Bild 9 — Runde, ebene, vollbohrte Platten mit rückkehrenden Rohren**

Der größere Wert aus den Formeln (15) und (16) ist für die Bemessung maßgebend. Die dem jeweiligen Druckraum zugeordneten Berechnungsdurchmesser und Berechnungsbeiwerte sind Tafel 4 bzw. Bild 19 zu entnehmen. Für den Verschwächungsbeiwert gelten die Formeln (2) und (3).

**8.2.2** Die erforderliche Wanddicke  $s$  runder, ebener, teilweise oder ungleichmäßig bohrter Platten mit rückkehrenden Rohren beträgt

$$s = C_4 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p_i \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (16)$$

bzw.

$$s = C_4 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p_u \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (17)$$

Entsprechend Abschnitt 8.2.1 ist die Wanddicke nach den Formeln (16) und (17) mit den zugehörigen  $C_4$ -Werten zu bestimmen, wobei die größere Wanddicke für die Bemessung maßgebend ist. Die erforderliche Wanddicke der unbohrten Platte darf jedoch nicht unterschritten werden.

Die Berechnungsbeiwerte  $C_4$  sind dem Bild 21 zu entnehmen. Für den Verschwächungsbeiwert gelten die Formeln (2) und (3).

Bei Platten mit Rohrgassen (z. B. mehrflutige Wärmeaustauscher), bei Platten, deren Rohrfeld sich nicht bis zum Plattenrand erstreckt (z. B. rechteckiges Rohrfeld) oder bei ungleichen Teilungen in den einzelnen Durchmessern konzentrischer Rohrreihen ist die Berechnung für jeden Abstand  $l$  (mittlerer Abstand der Mitten der Rohre der betrachteten Rohrreihe vom Plattenmittelpunkt) gesondert durchzuführen, wobei der größte Wert  $C_4/\sqrt{v}$  für die Bemessung maßgebend ist. Außerhalb des Rohrfeldes liegende Einzelrohre dürfen hierbei nicht berücksichtigt werden.

**8.2.3** Bei eingewalzten Rohren ist außerdem Abschnitt 9.1.1 sinngemäß zu beachten. Dabei ist

$$F_R = \frac{d_i^2 \cdot \pi \cdot p_i}{40} \quad (18)$$



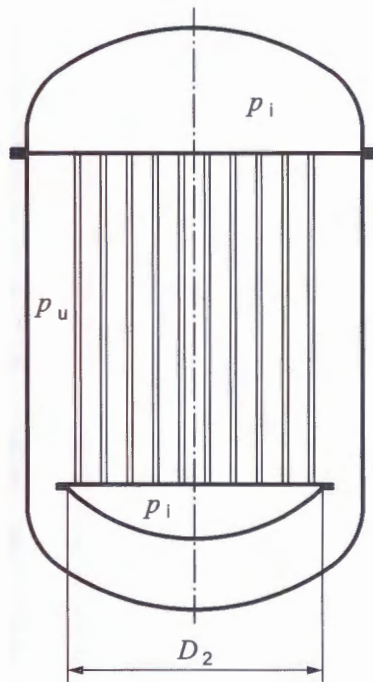
## 8.3 Runde, ebene Rohrplatten mit einer frei beweglichen Gegenplatte eines Schwimmkopfes

**8.3.1** Die erforderliche Wanddicke  $s$  runder, ebener Rohrplatten mit einer frei beweglichen Gegenplatte nach Bild 10 beträgt

$$s = C_5 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p_i \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (19)$$

bzw.

$$s = C_5 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p_u \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (20)$$



**Bild 10 — Runde, ebene Platten an Wärmeaustauschern, deren Rohrbündel mit einem Schwimmkopf versehen ist**

Die dem jeweiligen Druckraum zugeordneten Berechnungsdurchmesser sind Tafel 4 bzw. Bild 2 oder Bild 3 zu entnehmen. Der größte Wert  $s$  nach den Formeln (19) und (20) ist für die Bemessung maßgebend. Für den Verschwächungsbeiwert  $v$  gelten die Formeln (2) und (3). Für die Berechnung der erforderlichen Wanddicke  $s$  für die frei bewegliche Rohrplatte ist statt  $D_1$  nach Bild 10  $D_2$  in die Formeln (19) und (20) einzusetzen.

**8.3.2** Die dem jeweiligen Druckraum zugeordneten Berechnungsbeiwerte  $C_5$  sind Bild 22 zu entnehmen. Die für die Ausführungsform maßgebende Kurve ergibt sich aus den Randbedingungen. Die für zusätzliche Randmomente maßgebenden Kurven gelten für  $\delta = 1,5$  (siehe Formel (7)). Bei Dichtungen mit anderen  $\delta$ -Werten muss  $C_5$  mit dem Faktor

$\sqrt{\frac{\delta}{1,5}}$  multipliziert werden. Der Wert  $C_5$  muss mindestens mit 0,15 in die Rechnung eingesetzt werden.

**8.3.3** Der Rohrfeldhalbmesser  $l$  ist der mittlere Abstand der Mitten der außen liegenden Rohre vom Plattenmittelpunkt zuzüglich eines halben Rohrdurchmessers. Erläuterungen zur Bestimmung von  $l$  finden sich im Anhang 1.

Außerhalb des Rohrfeldes liegende Einzelrohre dürfen nicht berücksichtigt werden.

**8.3.4** Es ist außerdem zu prüfen, ob die Randrohre (ungefähr die beiden äußeren Rohrreihen) mit ihren Verbindungen zum Rohrboden die Belastung  $p_u \cdot D_2^2 \cdot \frac{\pi}{40}$  als Knick- und Druckbelastung und  $p_i \cdot D_2^2 \cdot \frac{\pi}{40}$  als Zugbelastung ertragen.

Hierbei bezieht sich  $D_2$  auf die bewegliche Rohrplatte. Ist die Beanspruchung der Randrohre zu groß, so ist die erforderliche Anzahl der tragenden Rohre zu bestimmen. Nach Abzug dieser tragenden Rohre vom vorhandenen Rohrfeld ergibt sich ein kleinerer Rohrfeldhalbmesser  $l'$  und aus Bild 22 ein größerer Wert für  $C_5$ , mit dem die Plattendicke zu dimensionieren ist. Für die Belastung der Randrohre gilt dann als Drucklast

$$p_u / 40 \cdot (4 \cdot l'^2 + n \cdot d_a^2) \cdot \pi \text{ und als Zuglast}$$

$$p_i / 40 \cdot (4 \cdot l'^2 + n \cdot d_i^2) \cdot \pi. \text{ Dabei ist } n \text{ die Anzahl der tragenden Randrohre. Wenn } \frac{l'}{D_1} < 0,1 \text{ ist, gilt für } C_5 \text{ der jeweilige Maximalwert.}$$

**8.3.5** Für die Knickbelastung der Rohre des inneren Rohrfeldes ist der Druck  $p_i$  maßgebend. Als Belastungsfläche eines Rohres ist die in Abschnitt 9.1.3 angegebene und um den Rohrquerschnitt erweiterte Belastungsfläche anzunehmen.

**8.3.6** Durch Wegdrehen der Leitbleche und der beweglichen Rohrböden in Umfangsrichtung des Wärmetauschers können sich wesentlich größere Knicklängen für die druckbeanspruchten Rohre ergeben. Dies ist bei der Auslegung der Rohre auf axialen Druck nach Abschnitt 9.3 zu berücksichtigen, es sei denn, durch geeignete Maßnahmen wird eine Umfangsverdrehung der Umlenkbleche und der beweglichen Rohrplatten verhindert.

## 8.4 Runde, ebene Rohrplatten an Wärmeaustauschern mit einem Ausgleichselement im Mantel

**8.4.1** Die erforderliche Wanddicke  $s$  runder, ebener Rohrplatten an Wärmeaustauschern mit einem Ausgleichselement im Mantel nach den Bildern 11 und 12 beträgt:

$$p = p_i + p_u \cdot \frac{D_3^2 - 4l^2}{D_1^2} \quad (21)$$

$$s = C_5 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (22)$$

Der Durchmesser  $D_1$  ist Tafel 4 bzw. Bild 2 oder Bild 3 entsprechend den Randbedingungen im Rohrraum zu entnehmen.

Für die Bestimmung von  $l$  in Formel (21) ist Abschnitt 8.3.3 sinngemäß anzuwenden. Der  $C_5$ -Wert muss aus Bild 22 entsprechend den Randbedingungen im Rohrraum entnommen werden. Abschnitt 8.3.2 ist zu beachten. Für den Verschwächungsbeiwert gelten die Formeln (2) und (3).

**8.4.2** Es ist außerdem zu prüfen, ob die Randrohre (ungefähr die beiden äußeren Rohrreihen) mit ihren Verbindungen zum Rohrboden die Belastung  $p \cdot D_1^2 \cdot \frac{\pi}{40}$  als Zugbelastung ertragen. Hierbei ist  $p$  nach Formel (21) einzusetzen. Sind  $p_i$  oder  $p_u$  Unterdrücke, so müssen die Randrohre außerdem die Knick- und Druckbelastung  $p_i \cdot D_1^2 \cdot \frac{\pi}{40}$  bzw.  $p_u \cdot (D_3^2 - 4l^2) \cdot \frac{\pi}{40}$  ertragen können.

Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so ist die Anzahl der tragenden Randrohre zu erhöhen. Nach Abzug dieser tragenden Rohre vom Rohrfeld ergibt sich ein kleinerer Rohrfeldhalbmesser  $l'$  und aus Bild 22 ein größerer Wert für  $C_5$  zur Plattendimensionierung. Die Zugbelastung der Randrohre ist dann

$$\left[ p_i \cdot (4 \cdot l'^2 + n \cdot d_i^2) + p_u \cdot (D_3^2 - 4 \cdot l'^2 - n \cdot d_a^2) \right] \cdot \pi / 40.$$

Sind  $p_i$  oder  $p_u$  Unterdrücke, so beträgt die Drucklast

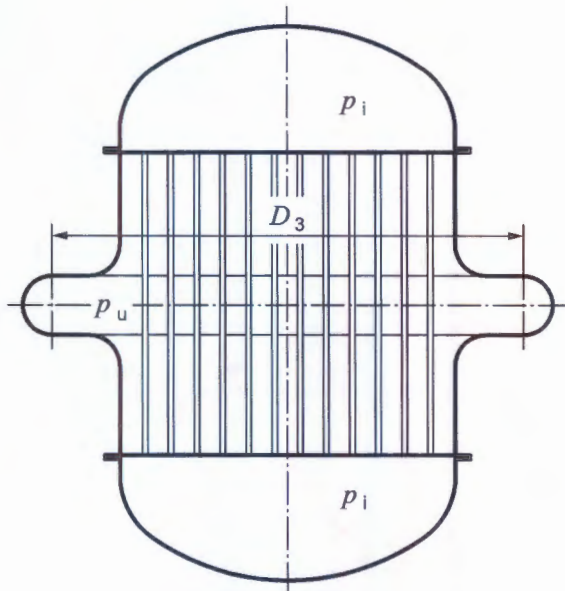
$$p_u \cdot (D_3^2 - 4 \cdot l'^2 - n \cdot d_a^2) \cdot \pi / 40 \text{ bzw.}$$

$$p_i \cdot (4 \cdot l'^2 - n \cdot d_i^2) \cdot \pi / 40.$$

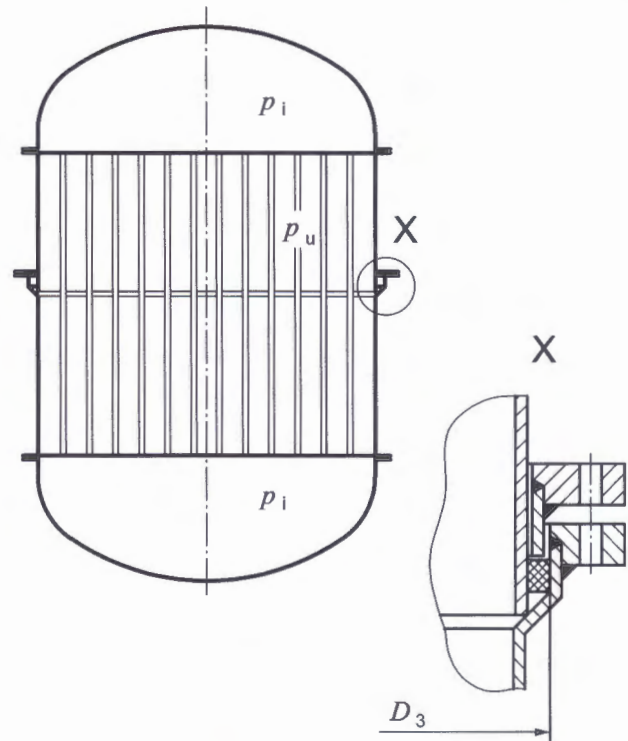
Dabei ist  $n$  die Anzahl der tragenden Randrohre. Sofern der Mantelraumdruck größer ist als der Rohrraumdruck ( $p_u > p_i$ ), ist über die Bildung einer Gesamtspannung  $\sigma = |\sigma_a| + |\sigma_t|$  nachzuweisen, dass die Randrohre die Belastung ertragen. Zur Zugspannung  $\sigma_a$  der Randrohre ist folgende Tangentialspannung  $\sigma_t = [p_i(d_a - 2s_R) - p_u d_a] / 20 s_R$  zu addieren. Es gilt  $\sigma \leq K_R / S$ .

**8.4.3** Für die Knickbelastung der Rohre des inneren Rohrfeldes ist der Druck  $p_i$  maßgebend. Als Belastungsfläche eines Rohres ist die in Abschnitt 9.1.3 angegebene und um den Rohrquerschnitt erweiterte Belastungsfläche anzunehmen.





**Bild 11 — Runde, ebene Platten an Wärmeaustauschern mit einem Kompensator im Mantel**



**Bild 12 — Runde, ebene Platten an Wärmeaustauschern mit einer Stopfbüchse im Mantel**

## 8.5 Runde, ebene Rohrplatten an Wärmeaustauschern mit einer die bewegliche Rohrplatte abdichtenden Stopfbüchse

**8.5.1** Die erforderliche Wanddicke  $s$  runder, ebener Rohrplatten an Wärmeaustauschern mit einer die bewegliche Rohrplatte abdichtenden Stopfbüchse nach Bild 13 wird nach Formel (22) berechnet, wobei für die feststehende Rohrplatte

$$p = p_i \cdot \frac{D_1^2 - D_4^2}{D_1^2} \quad (23)$$

bzw.

$$p = p_u \cdot \frac{D_1^2 - D_4^2}{D_1^2} \quad (24)$$

und für die bewegliche Rohrplatte

$$p = p_i \cdot \frac{D_4^2 - 4l^2}{D_1^2} \quad (25)$$

bzw.

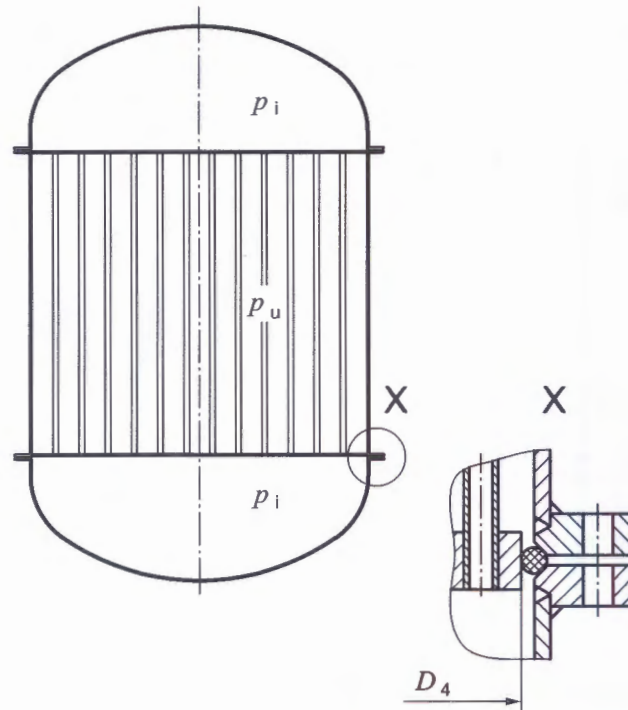
$$p = p_u \cdot \frac{D_4^2 - 4l^2}{D_1^2} \quad (26)$$

einzusetzen ist. Maßgebend für die Berechnung ist jeweils der größere Wert nach der Rechnung entsprechend den Formeln (23) und (24) bzw. (25) und (26). Für die Bestimmung von  $l$  in den Formeln (25) und (26) ist Abschnitt 8.3.3 bei der festen Platte sinngemäß anzuwenden.

Bei der beweglichen Rohrplatte ist im Fall gleichmäßiger, vollständiger Berohrung statt  $C_5$  der Wert 0,45 einzusetzen. Im Fall von Teilberohrung sind gesonderte Nachweise erforderlich unter der Berücksichtigung, dass der Plattenrand nicht gehalten ist.

**8.5.2** Die Beurteilung der Zug- und Druckbeanspruchung der Rohre sowie der Knicksteifigkeit ist sinngemäß nach Abschnitt 8.4 für die mittlere Belastung der Rohre durchzuführen.

**8.5.3** Durch Wegdrehen der Leitbleche und der beweglichen Rohrböden in Umfangsrichtung des Wärmetauschers können sich wesentlich größere Knicklängen für die druckbeanspruchten Rohre ergeben. Dies ist bei der Auslegung der Rohre auf axialen Druck nach Abschnitt 9.2 zu berücksichtigen, es sei denn, durch geeignete Maßnahmen wird eine Umfangsverdrehung der Umlenkleche und der beweglichen Rohrplatten verhindert.



**Bild 13 — Runde, ebene Platten an Wärmeaustauschern mit einer am beweglichen Boden abdichtenden Stopfbüchse**

## 9 Nachweis der Verankerungs- und Versteifungselemente und deren Verbindung zur Platte

### 9.1 Verbindung mit der Platte

**9.1.1** Bei eingewalzten Rohren muss eine ausreichende Sicherheit gegen Herausziehen der Rohre vorhanden sein, damit sie als Verankerung eingesetzt werden können. Diese ist anzunehmen, wenn die Beanspruchung der Walzverbindung, die sich aus der Rohrkraft  $F_R$  (siehe Abschnitte 8.2.3 bzw. 9.1.3) und der wirksamen Stützfläche  $A_W$  ergibt, die nachstehenden Werte der Tafel 2 nicht überschreitet.

Als wirksame Stützfläche ist anzusehen

$$A_W = (d_a - d_i) \cdot l_W \quad (27)$$

jedoch höchstens

$$A_W = 0,1 \cdot d_a \cdot l_W \quad (28)$$

**Tafel 2 — Zulässige Beanspruchung der Walzverbindung**

Art der Walzverbindung	Zulässige Beanspruchung der Walzverbindung $F_R / A_W$ in N/mm <sup>2</sup>
glatt	150
mit Rille	300
mit Bördel	400

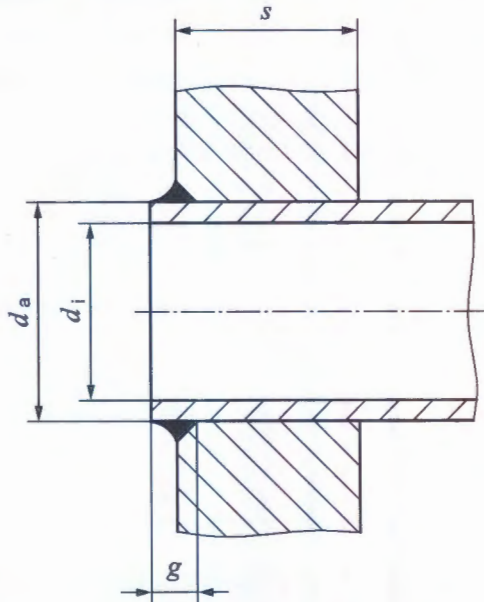
Die Walzlänge  $l_W$  muss mindestens 12 mm betragen und darf höchstens mit 40 mm in die Berechnung der Stützfläche eingeführt werden.

**9.1.2** Bei eingeschweißten Rohren nach Bild 14 müssen die Schweißnähte in der Lage sein, die gesamte ins Rohr zu übertragende Kraft aufzunehmen. Die Nahtdicke im Abscherquerschnitt muss mindestens betragen

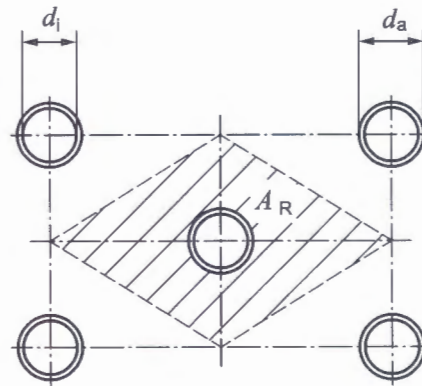
$$g = 0,4 \frac{F_R \cdot S}{d_a \cdot K} \quad (29)$$



**9.1.3** Der Berechnung der Rohrkraft  $F_R$  ist die auf ein Rohr entfallende Belastungsfläche  $A_R$  zugrunde zu legen. Sie ist für ein vollberohrtes Feld durch die schraffierte Fläche in Bild 15 dargestellt. Bei teilweise berohrten Feldern muss der Anteil des Randfeldes berücksichtigt werden. Bei Randfeldern in ebenen Böden ist die Bodenfläche bis zum Ansatz der Bodenkrempe in Betracht zu ziehen. Bei Randfeldern in ebenen Platten kann die Belastung des Randfeldes bis zur Hälfte durch die unmittelbar angrenzende Behälterwand als aufgenommen angesehen werden.



**Bild 14 — Schweißnahtdicke eingesetzter Rohre**



**Bild 15 — Belastungsfläche  $A_R$**

## 9.2 Ankerrohre, Stehbolzen, Blechanker und Versteifungsrippen

Mit Rücksicht auf eine generelle Lastwechselleistung der Verankerung ist für den Anker, Bolzen und die Schweißverbindung eine zul. Spannung von  $K/2$  bei der Auslegung einzuhalten. Eine Überprüfung der Tragfähigkeit ist für alle Lastzustände (z. B. Temperaturprofile, Geometrien, Werkstoffe) erforderlich.

### 9.2.1 Ankerrohre

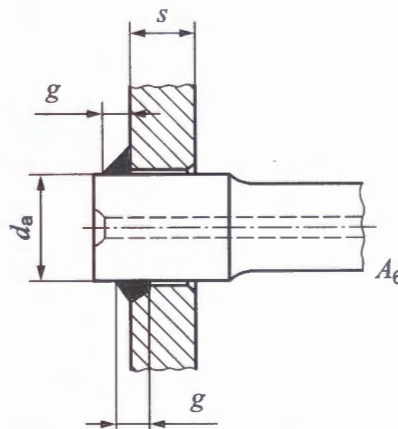
Der Anschluss von Ankerrohren soll mind. mit einem g-Mass von 1,25-mal Rohrwanddicke erfolgen (vgl. Ausführung Bild 14).

### 9.2.2 Stehbolzen

Die Verbindung von Stehbolzen soll die nachfolgende Bedingung erfüllen:

$$d_a \cdot g \cdot \pi > 1,25 \cdot \left( d_a^2 \frac{\pi}{4} \right); \quad g = \text{Nahtdicke (s. Bild 16)}$$

Ist die Überprüfung der Stehbolzenverbindung im Betrieb erforderlich, sind die Bolzen mit einer Kontrollbohrung zu versehen (s. Bild 16).



**Bild 16 — Eingeschweißter Stehbolzen mit Kontrollbohrung**

## 9.2.3 Blechanker

Die Verbindung von Blechankern soll die nachfolgende Bedingung erfüllen:

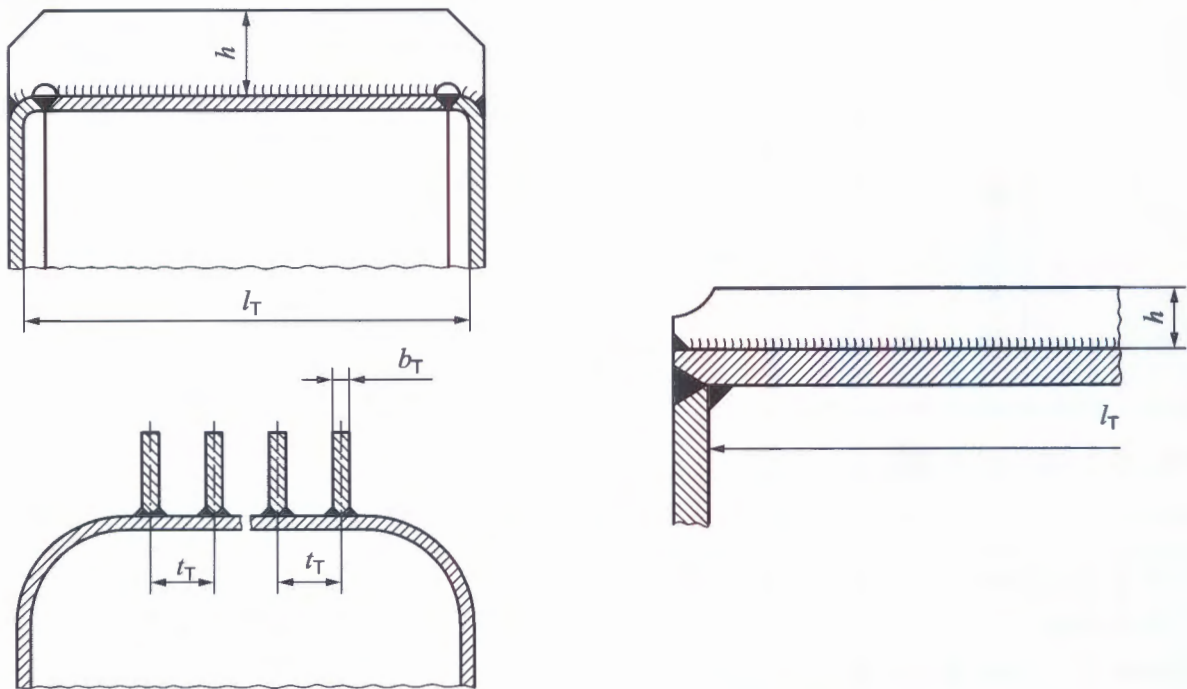
$$2 \cdot (h + s) \cdot g > 1,25 \cdot h \cdot s; \quad g = \text{Nahtdicke}$$

Längsanker ohne Verstärkungsscheiben sind auf beiden Seiten der zu verankernden Wandung zu verschweißen.

## 9.2.4 Versteifungsträger und -rippen

Versteifungsträger oder Rippen dienen der Aussteifung von ebenen Blechbereichen. Die Tragfähigkeit und die Festigkeit der Schweißverbindung sind nachzuweisen. Gegebenenfalls ist ein Biegeknicknachweis zu führen.

Der freitragende Versteifungsträger nach Bild 17 ist wie ein im Abstand  $l_T$  frei aufliegender Balken zu berechnen. Die Tragfähigkeit des Deckenbleches kann dabei mit berücksichtigt werden.



**Bild 17 — Verschweißte Versteifungsträger**

Die Bemessung des Versteifungsträgers ergibt sich aus dem größten aufzunehmenden Biegemoment  $M_b$  und dem erforderlichen Widerstandsmoment  $W_{\text{erf}}$  des Versteifungsträgers

$$W_{\text{erf}} = \frac{M_b}{1,3 \cdot f \cdot z}$$

Der Beiwert  $z$  berücksichtigt die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Konstruktion durch das Deckenblech. Er kann im Allgemeinen mit  $z = 5/3$  eingesetzt werden.

Das größte aufzunehmende Biegemoment beträgt  $M_b = F_T \cdot l_T / 8$  mit  $F_T = p \cdot l_T \cdot t_T$ . Das Widerstandsmoment des Versteifungsträgers beträgt  $W = \frac{b_T \cdot h^2}{6}$ . Hierbei darf  $h$  nicht größer als  $8 b_T$  in die Rechnung eingesetzt werden.

## 9.3 Knicken

Wird der Anker durch axialen Druck beansprucht, so ist zusätzlich die Knicksteifigkeit nach Euler nachzuweisen. Die zulässige Knickkraft beträgt

$$F_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_K^2 \cdot S_K} \quad \text{Pa} \quad (30)$$

wobei  $S_K = 3,0$  für den Betriebszustand gilt. Anstelle von  $S_K$  ist im Prüfzustand  $S'_K = 2,2$  einzusetzen. Die Länge  $l_K$  ist je nach Belastungsfall aus Tafel 3 in Abhängigkeit von  $l_0$  zu bestimmen. Dabei ist  $l_0$  die Länge zwischen den Punkten, in denen der Anker in seiner ursprünglichen Richtung geführt wird.



Schlankheitsgrade  $\lambda$  bei Ankerrohren, Stehbolzen, Blechankern über 200 sollen vermieden werden.

$$\lambda = \frac{4 \cdot l_K}{\sqrt{d_a^2 + d_i^2}} \text{ bzw. } \lambda = \frac{l_K}{i} \text{ mit dem Trägheitsradius } i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (31)$$

*ga*

$I$  kleinstes Flächenträgheitsmoment des jeweiligen Querschnittes

$A$  Querschnittsfläche

In Formel (31) bedeuten  $d_a$  Außendurchmesser und  $d_i$  Innendurchmesser der Ankerrohre.

Formel (30) gilt nur im Schlankheitsbereich

$$\lambda > \lambda_0 \approx \pi \sqrt{\frac{E}{K}} \quad (32)$$

*gb*

Bei kleineren Schlankheitsgraden beträgt die zulässige Knickkraft von:

$$\text{Rohrankern} \quad F_K = \frac{K}{S} \cdot \pi \cdot \frac{d_a^2 - d_i^2}{4} \left[ 1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} \left( 1 - \frac{S}{S_K} \right) \right] \quad (33)$$

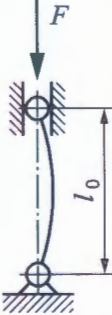


*gb*

$$\text{Stehbolzen} \quad F_K = \frac{K}{S} \cdot \pi \cdot \frac{d_a^2}{4} \cdot \left[ 1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} \left( 1 - \frac{S}{S_K} \right) \right] \quad (34)$$

$$\text{Blechankern} \quad F_K = \frac{K}{S} \cdot h \cdot s \cdot \left[ 1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} \left( 1 - \frac{S}{S_K} \right) \right] \quad (35)$$

Dabei gilt  $S_K = 3,0$  für den Betriebszustand. Anstelle von  $S_K$  ist im Prüfzustand  $S'_K = 2,2$  einzusetzen.

Tafel 3 —  $l_K$  für verschiedene Belastungsfälle

	Freie, in der Achse geführte Stabenden (Rohr oder Anker zwischen 2 Stützblechen)	Ein Stabende eingespannt, das andere frei in der Achse geführt (Rohr oder Anker zwischen Rohrboden oder Stützblech)	Eingespannte, in der Achse geführte Stabenden (Rohr oder Anker zwischen 2 Rohrböden)
Darstellung des Belastungsfalles			
Freie Knicklänge $l_K =$	$l_0$	$0,7 l_0$	$0,5 l_0$

## 10 Schrifttum

- [1] Föppl, A.: Vorlesungen über Techn. Mechanik; Bd. III, Festigkeitslehre. Teubner Verlag, Berlin (1922).
- [2] Timoshenko, S.: Theory of plates and shells. McGRAW Hill Book Company, Inc., New York/London (1940).
- [3] Filonenko-Boroditsch: Festigkeitslehre. VEB Verlag Technik, Berlin (1954).
- [4] Hampe, E.: Statik rotationssymmetrischer Flächentragwerke; Bd. 1. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin (1966).
- [5] Föppl, L. u. Sonntag, G.: Tafeln und Tabellen zur Festigkeitslehre. Oldenbourg-Verlag, München (1951).
- [6] Miller, K. A. G.: The Design of Tube Plates in Heat-Exchangers. Proc. Inst. Mech. Engineers Series B, Vol. 1 (1952), S. 215/31.
- [7] Sterr, G.: Berechnungsfragen von Rohrböden im Druckbehälterbau. Verlag Ernst & Sohn, München (1967).
- [8] Sterr, G.: Die genaue Ermittlung des C-Wertes für die am Rande mit einem Schuß verschweißte Kreisvollplatte unter Berücksichtigung der im Schuß auftretenden Spannungen. Techn. Überwach. 4 (1963) Nr. 4, S. 140/43.
- [9] Wellinger, K. u. Dietmann, H.: Bestimmung von Formdehngrenzen. Materialprüfung 4 (1962) Nr. 2, S. 41/47.