

DIN EN 13445-3/A6

ICS 23.020.30

EntwurfEinsprüche bis 2016-11-23
Vorgesehen als Änderung von
DIN EN 13445-3:2015-12**Unbefeuerte Druckbehälter –
Teil 3: Konstruktion;
Deutsche und Englische Fassung EN 13445-3:2014/prA6:2016**

Unfired pressure vessels –
Part 3: Design;
German and English version EN 13445-3:2014/prA6:2016

Réipients sous pression non soumis à la flamme –
Partie 3: Conception;
Version allemande et anglaise EN 13445-3:2014/prA6:2016

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2016-09-23 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an fnca@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Chemischer Apparatebau (FNCA), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 103 Seiten

DIN-Normenausschuss Chemischer Apparatebau (FNCA)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 13445-3:2014/prA6:2016) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 54 „Unbefeuerte Druckbehälter“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird. Das zuständige deutsche Gremium ist der NA 012-00-05 AA im DIN-Normenausschuss Chemischer Apparatebau (FNCA).

Dieses Dokument enthält Änderungen zu DIN EN 13445-3:2015-12.

Es ist vorgesehen, den Inhalt dieses Dokumentes bei einer Folgeausgabe von DIN EN 13445-3:2015-12 einzuarbeiten.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung der EN 13445-3:2014/prA6 beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Unbefeuerte Druckbehälter — Teil 3: Konstruktion

Réipients sous pression non soumis à la flamme — Partie 3 : Conception

Unfired pressure vessels — Part 3: Design

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp: Änderung
Dokument-Stage: CEN-Umfrage
Dokument-Sprache: D

STD Version 2.8f

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	3
1 Änderungen des Anhangs J. Alternativverfahren zur Auslegung von Rohrböden für Wärmeaustauscher	4

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 13445-3:2014/prA6:2016) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 54 „Unbefeuerte Druckbehälter“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone dem CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinien.

Zum Zusammenhang mit EU-Richtlinien siehe informativen Anhang ZA, der EN 13445-3:2014.

1 Änderungen des Anhangs J. Alternativverfahren zur Auslegung von Rohrböden für Wärmeaustauscher

Bestehenden Anhang entfernen und mit Folgendem ersetzen.

Anhang J (normativ)

Alternativverfahren zur Auslegung von Rohrböden für Wärmeaustauscher

J.1 Zweck

Dieser Anhang bestimmt alternative Regeln, die von den Regeln in Abschnitt 13 zur Auslegung von Schalen und Rohrböden für Rohrwärmeaustauscher abweichen. Sie gelten für folgende Typen von Wärmeaustauschern:

- U-Rohr-Wärmeaustauscher, siehe Bild J.1; auch zu Wärmeaustauschern mit Rohren mit Verschlusskappen und nur einem Rohrboden, und Wärmeaustauschern mit gekrümmten Rohren und einer beliebigen Anzahl separater Rohrböden;
- Wärmeaustauscher mit eingetauchtem Schwimmkopf; siehe Bild J.2A und J.2B;
- Wärmeaustauscher mit außen abgedichtetem Schwimmkopf; siehe Bild J.3;
- Wärmeaustauscher mit innen abgedichtetem Schwimmkopf; siehe Bild J.4;
- Festkopf-Wärmeaustauscher mit Kompensator; siehe Bild J.5;
- Festkopf-Wärmeaustauscher ohne Kompensator; siehe Bild J.6.

J.2 Zusätzliche Definitionen

Die folgenden Definitionen gelten zusätzlich zu denen in Abschnitt 3.

J.2.1

äußerer Rohrbodenrand

Kreis, der alle Rohre umschließt

J.2.2

Auslastungsgrad

Quotient aus berechneter Last oder berechnetem Moment an einem Bauteil und zulässiger Last bzw. zulässigem Moment

J.3 Zusätzliche Symbole und Abkürzungen

J.3.1 Allgemeines

Die folgenden Symbole und Abkürzungen gelten zusätzlich zu denen in Abschnitt 4.

Die Bilder J.1 bis J.6 zeigen die sechs Haupttypen von Schale und Rohrwärmeaustauschern. Die Bilder J.7 bis J.13 decken spezifische Detaildarstellungen ab. Alle Bilder veranschaulichen allgemeine Eigenschaften. Sie sind nicht dazu gedacht, alle möglichen Kombinationen für welche das Verfahren anwendbar ist, abzudecken.

ANMERKUNG In den Bildern J.1 bis J.6 kann der äußere Teil des Festkopfrohrbodens entweder an die benachbarte(n) Schale(n) angeschraubt oder angeschweißt sein. Die Detaildarstellungen dieses oberen Teils des Rohrbodens mit den entsprechenden Flanschen (falls vorhanden) wurden mit einer dunklen Farbe skizziert, da diese für die Bestimmung der Axialkräfte (Berechnungsparameter PR) nicht erforderlich sind. Zur Vereinfachung wurden alle Enden flach dargestellt (obgleich diese in der Regel gewölbt sind). Leitbleche und Stützplatten werden in den Bildern nicht gezeigt.

Andere Typen, die nicht in den Bildern J.1 bis J.6 gezeigt werden, umfassen:

Bild J.1: Gerade Rohre mit Verschlusskappen; allgemein gekrümmte Rohre mit zwei oder mehr Rohrböden.

Bild J.2: Schwimmkopfboden, vollständig verschweißt.

Bild J.3: Andere Arten von Abdichtungen (z. B. O-Ring statt Stopfbuchse).

Bild J.4: Andere Arten von Abdichtungen (z. B. Stopfbuchse).

Bild J.5: Andere Arten von Kompensatoren.

Bild J.6: Rohrböden, welche sehr dünn sind.

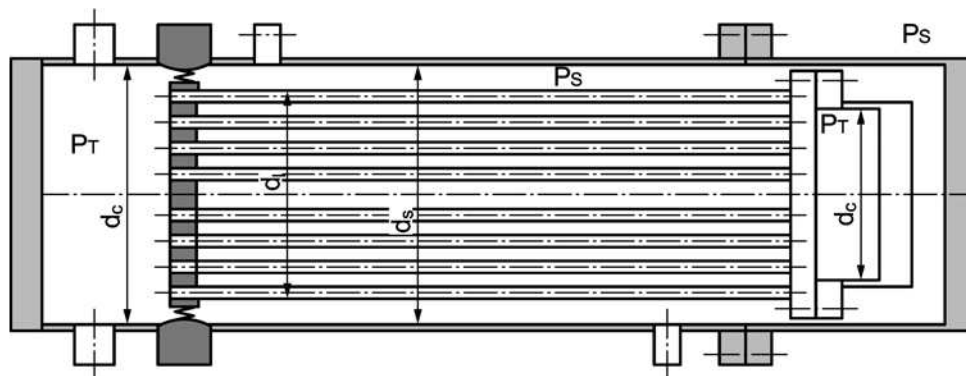


Bild J.1 — U-Rohr-Wärmeaustauscher

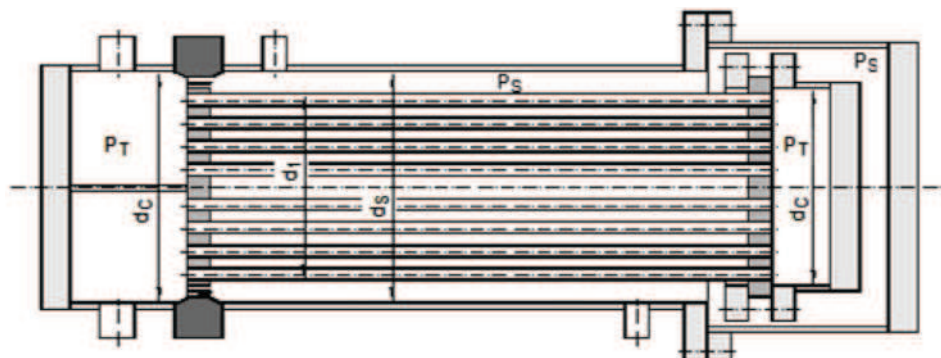


Bild J.2A — Schwimmkopf-Wärmeaustauscher mit eingetauchtem Schwimmkopf
(Schwimmkopf eingespannt zwischen zwei Flanschen)

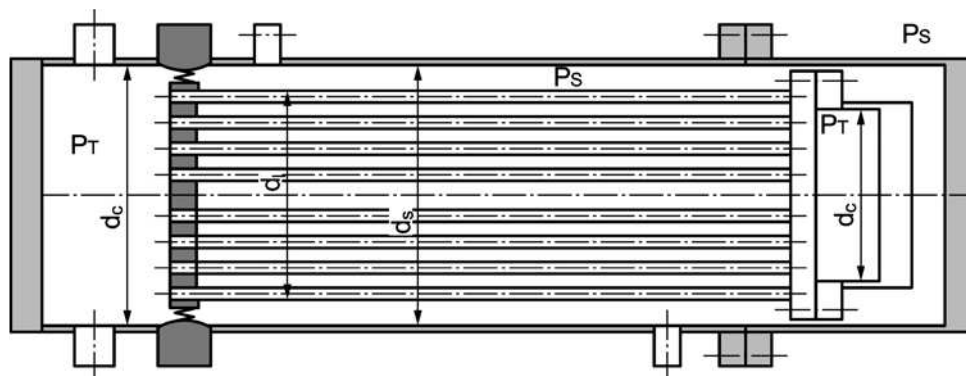


Bild J.2B — Schwimmkopf-Wärmeaustauscher mit eingetauchtem Schwimmkopf
(Schwimmkopf mit Flanschverlängerung)

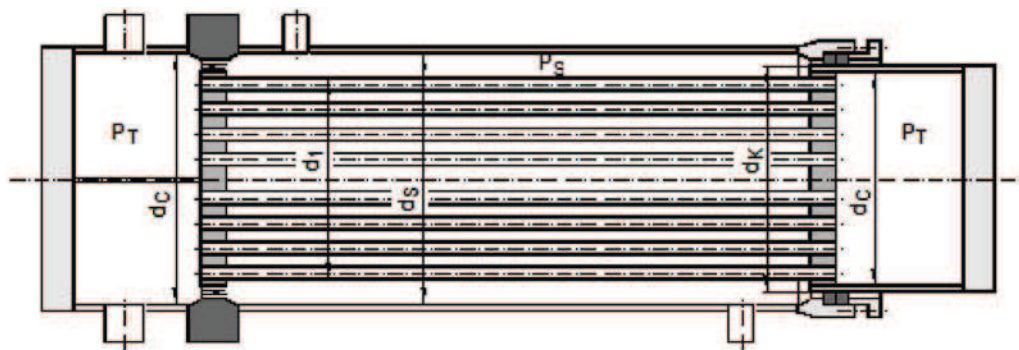


Bild J.3 — Schwimmkopf-Wärmeaustauscher mit außen abgedichtetem Schwimmkopf

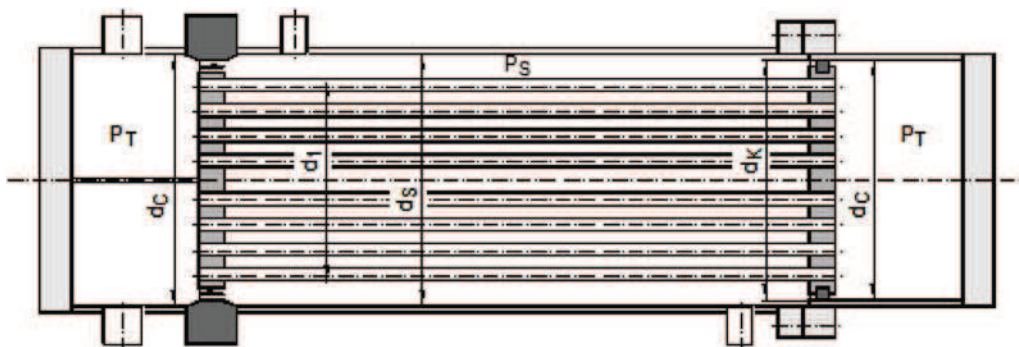


Bild J.4 — Schwimmkopf-Wärmeaustauscher mit innen abgedichtetem Schwimmkopfboden

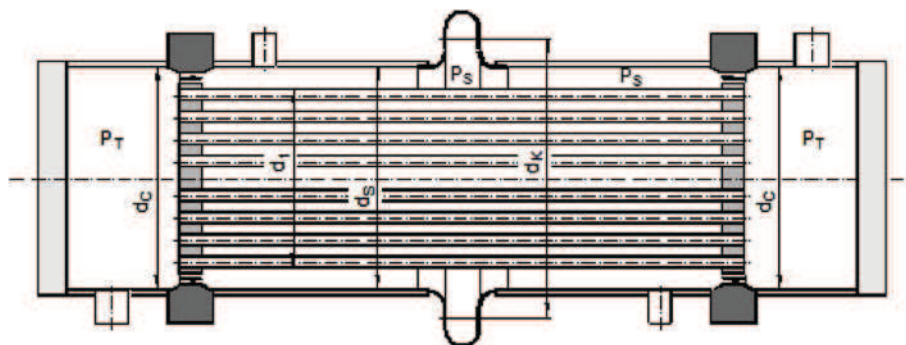


Bild J.5 — Festkopf-Wärmeaustauscher mit einem Kompensator

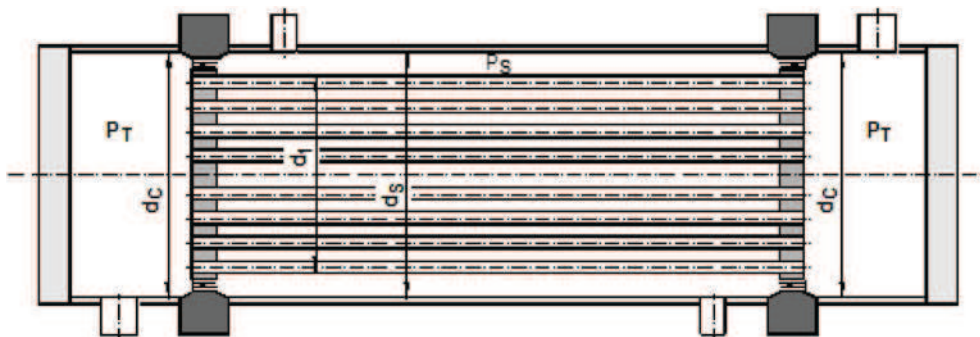


Bild J.6 — Festkopf-Wärmeaustauscher ohne Kompensator

J.3.2 Tiefgestellte Symbole

ANMERKUNG Lateinische Großbuchstaben beziehen sich auf Bauteile oder Bereiche von Bauteilen oder beschreiben Werte. Lateinische Kleinbuchstaben bezeichnen Eigenschaften oder Arten von Belastungen oder Arten von Reaktionen.

A	für	Außenbereich des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens;
B	für	Bolzen oder Leitblech;
C	für	Vorkammer;
D	für	Differenz zwischen zwei Werten;
E	für	effektive Werte;
F	für	Flansch;
G	für	Dichtung;
I	für	Innenbereich des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens;
J	für	Kompensator {C: Abschnitt 13};
K	für	Kompensation;
M	für	momentbezogene Werte;
P	für	Platte (Rohrboden); oder Druckbezogene Werte;
Q	für	lastbezogene Werte {C: ähnlich zu „P“ und „R“};
R	für	resultierende Last; oder Rohrbündel, mit Löchern versehener Bereich des Rohrbodens; oder beliebiger Wert zwischen „Q“ und „S“;
S	für	Schale;
T	für	Rohre oder Rohrseite (Vorkammer-Seite);
U	für	nicht mit Löchern versehener Bereich des Rohrbodens;
W	für	Gewicht; oder Schweißnaht;
X	für	Verbindung Rohr-Rohrboden;
av	für	Durchschnittswert;
b	für	Biegung;
c	für	zusammendrückend, Druck- (Beanspruchung oder Kraft);
e	für	Außen-, äußerer (Druck); oder effektiv;
i	für	Innen-, innerer (Druck);
l	für	Längs-;
min	für	minimaler Wert;
max	für	maximaler Wert;
opt	für	optimaler Wert;
red	für	reduzierter Wert;
t	für	Zug- (Beanspruchung oder Kraft); oder Gesamtmenge.

J.3.3 Symbole

ANMERKUNG Maßeinheiten sind in eckigen Klammern angegeben; [1] bezeichnet eine „dimensionslose“ Größe.

A_R	Querschnittsfläche des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens, [mm ²];
$A_{R(min)}$	Mindestfläche des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens, [mm ²], siehe J.5.1.1.3.2;
A_X	Querschnittsfläche der Verbindung zwischen Rohr und Rohrboden, [mm ²];
a_T	effektive Nahthöhe der Schweißnaht am Rohrende, [mm], wie folgt präzisiert: $a_{T,P}$ an der Platte (Rohrboden); $a_{T,T}$ am Rohr; $a_{T,R}$ zwischen Platte und Rohr;

B_0	der entstehende Faktor für das Rohrbündel, die Schale und die Vorkammer [1];
B_{R1}, B_{R2}, B_{R3}	Faktoren des Rohrbündels [1];
B_{S1}, B_{S2}, B_{S3}	Faktoren der Schale und Vorkammer [1];
b_F	die tatsächliche Breite der Flanschverlängerung des Rohrbündels [mm], siehe Bilder J-10 bis J-13;
b_R	mittlere Breite des unberohrten Randes, auf den beidseitig Druck einwirkt [mm], siehe J.5.1;
b_S	tatsächliche Breite des unberohrten Randes [mm], auf den einseitig Druck einwirkt, Wert kann positiv oder negativ sein; siehe J.5.1;
b_U	größte Breite des unberohrten Randes [mm], gemäß Konstruktionszeichnung des Rohrbodens; siehe Bild J-7 und J.9.3;
$C_0, C_A, C_C,$ C_{AA}, C_{AC}, C_{CC}	Beiwerte [1] zur Bestimmung der Knicklänge, siehe J.7.1.3;
C_1, C_2	Faktoren für die Berechnung auf Ermüdungslebensdauer [1], siehe Bild J-15;
D_J	Innendurchmesser des Kompensators, [mm]; siehe Unterabschnitt 13.5;
d_C, d_S	Innendurchmesser des Vorkammerzylinders (C) bzw. des Schalenzylinders (S), [mm];
$d_0, d_{0,e}$	Rohrlochdurchmesser [mm], d_0 ist der tatsächliche Wert, $d_{0,e}$ ist der effektive Wert;
d_F	Durchmesser an welchem sich die Dicke der Rohrbodens von e_P zu e_F ändert;
d_1	Durchmesser des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens, der bei der Berechnung verwendet wird [mm], siehe J.5.1;
$d_{1(av)}$	Mittelwert von $d_{1(min)}$ und $d_{1(max)}$, [mm], siehe J.5.1.1.4;
$d_{1(max)}$	maximaler Wert von d_1 , [mm], siehe J.5.1.1.2;
$d_{1(min)}$	minimaler Wert von d_1 , [mm], siehe J.5.1.1.3;
d_2	tatsächlicher Durchmesser, [mm], an dem P_S und P_T wirken;
$d_3, d_{3,e}$	Lochkreisdurchmesser, [mm]; d_3 für den tatsächlichen Wert, $d_{3,e}$ für den effektiven Wert;
d_{GC}, d_{GS}	effektive Dichtungsdurchmesser, [mm], für Vorkammerseite (C) bzw. Schalseite (S);
d_K	Durchmesser über welchen die Axialkräfte wirken, [mm]; für Schwimmköpfe ist dies der Durchmesser der Gleitfläche an einer gefüllten Stopfbuchse oder einer O-Ring-Dichtung; für Kompensatoren ist dies der mittlere Innendurchmesser des Kompensators: $d_K = D_J + h_J$;
d_T	Rohraußendurchmesser, [mm];
E_P, E_T	E-Moduln von Rohrboden (P = Platte) bzw. Rohren (T), [MPa];
E_C, E_S	E-Moduln von Vorkammer (C) bzw. Schale (S), [MPa];
E^*	effektiver E-Modul des Rohrbodens [MPa], siehe Bilder 13.7.6-1, 13.7.6-2;
e_C	Berechnungswanddicke des Vorkammerzylinders im an den Rohrboden angrenzenden Abschnitt, [mm];
e_F	die durchschnittliche Dicke der Flanschverlängerung des Rohrbündels [mm], siehe Bilder J-10 bis J-13;
e_P	Berechnungswanddicke des Rohrbodens (Platte), [mm], im mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens und unberohrten Randes;
$e_{P,red}$	eventuell reduzierte Dicke des Rohrbodens (Platte) an seinem Außenumfang, [mm]; $e_{P,red} \leq e_P$;
e_S	Berechnungswanddicke des Schalenzylinders im an den Rohrboden angrenzenden Abschnitt, [mm];

$e_{S,av}$	mittlere Dicke des Schalenzyklinders über die Gesamtlänge L_T [mm];
e_T	Rohrwanddicke [mm];
e_U	Berechnungswanddicke des Rohrbodens im nicht mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens [mm]; normalerweise $e_U = e_P$;
F_B	Gesamtkraft durch die Schrauben (Gesamtkraft für eine Flanschverbindung) [N], siehe Anhang G.

ANMERKUNG Bis zur Einführung eines spezifischen Verfahrens zur Berechnung der Bolzenbelastung in der Verbindung zwischen Flansch und angeschraubtem Rohrboden (siehe Bild J-12 und J-13), darf der Wert F_B durch Betrachtung des Rohrbodens als flachen Abschluss der selben Dicke berechnet werden. Bei Rohrböden, die zwischen zwei Flanschen eingespannt sind (siehe Bild J-11), darf die Flanschberechnung über eine modifizierte Dichtung unter Berücksichtigung des Rohrbodens ausgeführt werden. Siehe J.4.3.1 für weitere Einzelheiten.

$F_{G,C}, F_{G,S}$	Gesamt-Reaktionskraft der Dichtung, [N], Vorkammerseite (C) bzw. Schalenseite (S);
$[F_t], [F_c]$	zulässige Gesamt-Axialkräfte in der Schale, [N], $[F_t]$ für Zugbeanspruchung, $[F_c]$ für Druckbeanspruchung, siehe J.7.5;
F_R	Gesamt-Axialkraft, die auf Rohrbündel und Schale wirkt, [N], siehe J.7.5;
F_W	Gesamtgewicht, das als Kraft auf einen Rohrboden wirkt, [N], siehe J.9.4;
f_C	Berechnungsnennspannung des Vorkammerzyklinders im an den Rohrboden angrenzenden Abschnitt, [MPa];
f_F	Berechnungsnennspannung der Flanschverlängerung des Rohrbodens (Platte), [MPa]; normalerweise $f_F = f_P$;
f_P	Berechnungsnennspannung des Rohrbodens (Platte), [MPa];
f_S	Berechnungsnennspannung des Schalenzyklinders im an den Rohrboden angrenzenden Schalenabschnitt, [MPa];
f_T	Berechnungsnennspannung der Rohre, [MPa];
$f_{T,t}$	zulässige Längsspannung in zugbeanspruchten Rohren, [MPa], siehe J.7.3;
$f_{T,c}$	zulässige Längsspannung in druckbeanspruchten Rohren, [MPa], siehe J.7.3;
f_X	zulässige Berechnungsspannung für die Verbindung Rohr/Rohrboden, [MPa], siehe J.7.3; $f_{X,E}$ und $f_{X,W}$ sind spezielle Werte von f_X ;
H_1, H_2, H_3	Faktoren, die bei der Berechnung auf Ermüdungslebensdauer verwendet werden, [1], siehe Bild J-15;
h_j	Innenhöhe des Kompensators, [mm]; siehe 13.5;
j	ganze Zahl zur Angabe einer trapezförmigen Fläche (berohrt oder unberohrt);
k	ganze Zahl zur Angabe eines unberohrten Bereiches (Durchgangstrennwand);
K_{e1}, K_{e2}, K_{e3}	wirksame Spannungserhöhungsfaktoren, [1], die bei der Berechnung auf Ermüdungslebensdauer verwendet werden, siehe J.10;
L_1, L_2, L_3	Belastungsparameter, [1], die bei der Berechnung eines Auslastungsgrades verwendet werden, siehe J.9.1;
L_T	tatsächliche Gesamtlänge der Rohre, [mm]; in Bild J-9 zwischen den Außenflächen der Rohrböden dargestellt;
l_A	nicht gestützte Länge der Rohre, [mm], zwischen dem ersten Rohrboden und dem ersten Stützblech, siehe Bild J-9;
l_B	Höchstwert der ungestützten Länge des Rohrs, [mm], zwischen zwei benachbarten Stützblechen, siehe Bild J-9;

l_C	ungestützte Länge des Rohrs, [mm], zwischen dem letzten Stützblech und dem zweiten Rohrboden, siehe Bild J-9;
l_R	charakteristische Länge des Rohrbündels, [mm], die für die Berechnung auf Ermüdungslebensdauer verwendet wird, siehe J.10.3;
$l_{T,K}$	Knicklänge der Rohre, [mm], siehe J.7.1;
l_X	Kontaktlänge zwischen Rohr und Rohrboden [mm], siehe J.5.2.1;
M_1	resultierendes Biegemoment [Nmm/mm] am Durchmesser d_1 ;
M_2	resultierendes Biegemoment [Nmm/mm] am Durchmesser d_2 ;
M_A	aktives Biegemoment durch Bolzenbelastung [Nmm/mm] am Durchmesser d_2 , siehe J.8.2;
M_B	aktives Biegemoment durch Fluiddruck [Nmm/mm] am Durchmesser d_2 , siehe J.8.3;
M_C	reaktives Biegemoment [Nmm/mm] von verbundenen Bauteilen, siehe J.8.4;
M_D	Begrenzung des reaktiven Biegemoments [Nmm/mm] am Durchmesser d_2 , siehe J.8.5;
N_B	Anzahl der Leitbleche [1]; $N_{B,t}$ ist die tatsächliche Anzahl, $N_{B,e}$ die wirksame Anzahl;
N_C	Anzahl der Lastzyklen [1];
N_I	die Anzahl der möglichen Rohre, [1]; siehe J.5.1;
$N_{I(min)}$	Mindestanzahl möglicher zusätzlicher Rohre für den gesamten mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens, [1], siehe J.5.1.1.3.2;
$N_{I(k)}$	Anzahl möglicher zusätzlicher Rohre in einem bestimmten unberohrten trapezförmigen Bereich, [1], siehe J.5.1.1.3.2;
$N_{I(r)}$	Anzahl möglicher zusätzlicher Rohre in einer bestimmten Rohrreihe, [1], siehe J.5.1.1.3.2;
N_T	Anzahl der Rohrlöcher [1];
n_B	Anzahl der Schrauben, [1], in einer Flanschverbindung;
P_A, P_I	Resultierende von aktiven und reaktiven Axialkräften je Flächeneinheit im Rohrbündel im mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens [$N/mm^2 = MPa$]; P_A im Außenbereich, P_I im Innenbereich, siehe J.7.6;
P_D	direkte Fluiddruckdifferenz zwischen Rohrseite und Schalenseite, [MPa], siehe J.6.2, J.7.2;
P_E	effektive Druckdifferenz im mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens, [MPa], siehe J.7.2;
P_M	äquivalenter Druck [MPa], welcher das resultierende Biegemoment M_1 (resultierendes Moment aus aktivem und reaktivem Moment, kann den Wert Null haben) am Durchmesser des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens repräsentiert, siehe J.8.6;
P_Q	äquivalenter Druck [MPa], welcher die resultierende effektive Axialkraft (resultierende Kraft aus aktiver und reaktiver Kraft, kann den Wert Null haben) am Durchmesser des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens repräsentiert, [MPa], siehe J.6.3, J.7.6;
P_R	äquivalenter Druck [MPa], welcher die resultierende aktive axiale Schubkraft am Durchmesser des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens repräsentiert, [MPa], siehe J.6.2, J.7.5;
p	Rohrteilung im mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens, [mm], siehe Bild J-7;
p_b	Rohrteilung im Verhältnis zur Höhe der trapezförmigen Fläche, [mm];
p_c	Rohrteilung im Verhältnis zur Breite der trapezförmigen Fläche, [mm];
Q_A, Q_I	reaktive Axialkräfte je Flächeneinheit des Rohrbündels im mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens [MPa]; Q_A im Außenbereich, Q_I im Innenbereich, siehe J.7.4;

$[Q_t], [Q_c]$	zulässige Axialkräfte je Flächeneinheit des Rohrbündels im mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens, [MPa]; $[Q_t]$ für Zugbeanspruchung, $[Q_c]$ für Druckbeanspruchung, siehe J.7.3;
q	Faktor für die Rohrabstützung, [1], siehe J.9.3;
r	ganze Zahl zur Angabe einer Rohrreihe;
r_o	Radius der äußersten Rohrlochmitte [mm]; siehe Bild J-7(a) und Anmerkung in J.5.1.1.2 (siehe auch Bild 13.7-1);
T_S, T_T	Temperaturbereiche, [K], zwischen Maximal- und Minimaltemperatur von Schale (S) bzw. Rohren (T). Zum Zwecke der Berechnung dieser Werte wird eine Umgebungstemperatur von + 20 °C angenommen;
u, v, w	Faktoren [1], welche in J.7.6 verwendet werden;
x_S, x_T	relative Flächen des Rohrbodens, [1], auf die P_S bzw. P_T einwirkt; siehe J.7.1;
Y	Faktor [1], welcher in J.7.1 verwendet werden;
α_S, α_T	Wärmeausdehnungsbeiwerte der Schale bzw. der Rohre [K ⁻¹];
β	Faktor, der durch die Gleichung (J.10.2-3) bestimmt wird;
γ_R	Steifigkeitsbeiwert des unberohrten Randes, siehe J.10.3;
$\Delta d_{\text{(act)}}$	die Differenz zwischen $d_{1(\text{max})}$ und $d_{1(\text{min})}$, [mm];
$\Delta d_{\text{(all)}}$	die zulässige Differenz zwischen $d_{1(\text{max})}$ und $d_{1(\text{min})}$, [mm];
$\Delta M_1, \Delta M_2$	Schwingbreite der Biegemomente im Rohrboden, [Nmm/mm], in einer Berechnung auf Ermüdungslebensdauer verwendet;
$\Delta P_F, \Delta P_S, \Delta P_T$	Schwingbreite der Drücke, [MPa], in einer Berechnung auf Ermüdungslebensdauer verwendet, siehe J.10.2;
$\Delta S_1, \Delta S_2$	Schwingbreite der Schubkräfte im Rohrboden, [N/mm], in einer Berechnung auf Ermüdungslebensdauer verwendet, siehe J.10.3;
$\Delta \sigma_{b1}, \Delta \sigma_{b2}$	Schwingbreite der rechnerischen Biegespannungen im Rohrboden, [MPa], in einer Berechnung auf Ermüdungslebensdauer verwendet, siehe J.10.3;
$\Delta \sigma_{IT}$	Schwingbreite der berechneten Längsspannungen in den Rohren [MPa], in einer Berechnung auf Ermüdungslebensdauer verwendet;
$\Delta \sigma_R$	erlaubte Spannungsschwingbreite des Rohrbodens (Platte) [MPa], in einer Berechnung auf Ermüdungslebensdauer verwendet;
δ_X	Beiwert für die relative Festigkeit der Verbindung Rohr/Rohrboden, [1], siehe J.5.2;
ζ	Kraftverteilungsparameter, [1], für gestützte Rohrböden; dies ist der relative Radius der Grenze zwischen den Reaktionen Q_1 und Q_A , siehe J.7.1.1 und J.7.6.2;
η	Momentverteilungsparameter, [1], für alle Rohrböden; dies ist der relative Radius der Grenze zwischen dem konstantem und dem variablem, tangentialen Biegemoment im Rohrboden, siehe J.6.3, J.7.1.1 und J.7.6.3;
ϑ	relative Querschnittsfläche der Rohre, [1], siehe J.7.1;
κ_P	relative Schubfestigkeit des Rohrbodens, [1], siehe J.5.2;
λ_A, λ_C	geometrische Parameter für das Knicken von Rohren, [1], siehe J.7.1;
λ_R, λ_S	geometrische Parameter für unberohrte Ränder, [1], siehe J.5.1;
μ_X	Reibungsbeiwert, [1], der Verbindung Rohr/Rohrboden bei Dehnung, siehe J.7.3;
μ^*	Rohrlochsteg-Verschwächungsbeiwert des Rohrbodens bei Biegebeanspruchung (Abschnitt 13); wird in diesem Anhang durch φ_P ersetzt;
ν_P	Querkontraktionszahl des nicht mit Löchern versehenen Rohrbodens (Platte), [1];

ν_S	Querkontraktionszahl des Schalenzylinders, [1];
ν_T	Querkontraktionszahl der Rohre, [1];
ν^*	effektive Querkontraktionszahl für den mit Löchern versehenen Rohrboden, [1], erhalten aus 13.7;
σ	allgemeines Symbol für aktive Spannung, [MPa], das durch tiefgestellte Symbole näher zu bezeichnen ist, siehe J.7.3, $\sigma_{T(P)}$;
$[\sigma]$	allgemeines Symbol für zulässige Spannung, [MPa], das durch tiefgestellte Symbole näher zu bezeichnen ist, siehe J.7.5;
$\sigma_{T(P)}$	mittlere Längsspannung in den Rohren, [MPa], dividiert durch den Sicherheitsfaktor 1,50, siehe J.7.3;
$\phi_B, \phi_S, \phi_U,$ ϕ_W und $\phi_{P,t}$	sind Auslastungsgrade [1], siehe J.2.2 und J.9;
φ_P	relative Biegefestigkeit des Rohrbodens, [1], siehe J.5.2;
χ	Parameter für den nicht mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens am Rand, [1], siehe J.9.3;
ψ_E	Steifigkeitsparameter für den nicht mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens, [1], siehe J.10.3;
ω_R	Steifigkeitsparameter für den nicht mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens, [1], siehe J.10.3.

J.4 Allgemeines

J.4.1 Anwendungsbereich

J.4.1.1 Geometrie und Werkstoffe

Das Verfahren ist für Rohrbündel (und einige angeschlossene Bauteile) unter den folgenden Bedingungen anwendbar:

- Das gesamte Rohrbündel (als Hauptbestandteil eines Rohrbündelwärmeaustauschers) ist achsensymmetrisch.
Zulässige Abweichungen von der Achsensymmetrie werden weiter unten definiert und eingeschränkt.
- Jeder Rohrboden (auch „Platte“ genannt, tiefgestelltes Symbol P) weist nur einen zentralen Bereich mit Löchern versehenen Rohrboden (annähernd kreisförmig) auf.
Innerhalb des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens sind kleine nicht mit Löchern versehene Bereiche des Rohrbodens gestattet, z. B. für Trennwände und Haltestangen.
Der Außenrand des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens muss nicht genau kreisförmig sein, muss sich aber einer Kreisform annähern.
- Die Rohrbodendicke e_P und die Teilung p haben für den gesamten mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens denselben Wert (sind konstant).
Bei einem zweiten Rohrboden kann die Dicke einen anderen Wert haben, muss jedoch ebenfalls konstant sein.
- Außerhalb des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens, kann die Platte einen nicht mit Löchern versehenen Bereich aufweisen.
Der Rand dieses nicht mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens und alle zusätzlichen Bereiche innerhalb des Rohrbodens müssen kreisförmig sein.

- Alle (inneren) Rohre müssen haben denselben Querschnitt $d_T \cdot e_T$ aufweisen und aus demselben Werkstoff bestehen.
- Bei Rohrbündeln mit zwei Rohrböden haben alle Rohre dieselbe gerade Länge L_T ; kein Längsanker darf mit beiden Rohrböden verbunden sein. (Bei einem Rohrbündel mit nur einem Rohrboden können die Längen der gekrümmten Rohre variieren. Falls ein Rohrbündel mit zwei Rohrböden gekrümmte Rohre aufweist, muss es als ein U-Rohr-Typ berechnet werden, wobei jeder Rohrboden gesondert zu berechnen ist.)
- Die Breite des unberohrten Randes sollte nicht zu groß sein:

$$\lambda_{R,max} \leq 0,30 \quad (J.4.1-1)$$

- Die Geometrie sollte annähernd achsensymmetrisch sein:

$$\lambda_{R,min}/\lambda_{R,max} \geq 0,20 \quad (J.4.1-2)$$

- Der mit Löchern versehene Bereich des Rohrbodens darf als eine homogene geschwächte Platte berechnet werden:

$$N_T \geq 20 \quad (J.4.1-3)$$

- Bei vertikalen Rohrbündeln muss das Gewicht nicht berücksichtigt werden, wenn die folgende Gleichung zutrifft ist:

$$N_T \leq 30 \cdot \{1\,000 \cdot f_T/L_T\}^2 \quad (J.4.1-4)$$

- Die Dicke des Rohrbodens sollte in folgendem Bereich liegen:

$$0,005 \leq e_P/d_1 \leq 0,50 \quad (J.4.1-5)$$

Mit einer gewissen Vorsicht darf das Verfahren auch bei anderen Bedingungen als den oben genannten angewendet werden.

J.4.1.2 Belastungen

Das Verfahren ist für die folgenden Belastungen anwendbar:

- Fluiddrücke auf der Rohrseite (P_T) und auf der Schalenseite (P_S), entweder innen oder außen;
- Momente am Außenrand der Rohrböden;
- Eigenlast des vertikalen Rohrbündels;
- axiale Wärmeausdehnung (für Rohrbündel mit festen Rohrböden ohne Kompensator).

J.4.2 Mechanisches Modell

Das Verfahren beruht auf dem folgenden mechanischen Modell:

- Der Hauptbestandteil der Schale und des Rohrwärmeaustauschers ist stets ein Rohrbündel. Es befindet sich für gewöhnlich in einem Behälter. Der Behälter kann in eine Schale und eine oder zwei vollständige Vorkammern mit Apparateflanschen, Stutzen und Tragelementen aufgeteilt sein. Dieses Verfahren berechnet die Festigkeit des Rohrbündels. Falls notwendig, werden andere Bauteile in die Berechnung einbezogen.

- Das Rohrbündel besteht aus einem oder zwei Rohrböden, einer großen Zahl von (inneren) Rohren und (normalerweise) einigen Leitblechen.
Das Verfahren berechnet die Festigkeit der Rohrböden, der Rohre und der Verbindung zwischen Rohr und Rohrboden.
- Die Leitbleche werden als Abstützungen gegen ein Knicken der inneren Rohre behandelt. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass in vielen Fällen nicht alle Rohre von jedem Leitblech gestützt werden. Die Abstände zwischen den Leitblechen und den Rohrböden müssen nicht gleich sein. Die Dicke der Leitbleche kann gering sein, ihre Festigkeit ist im Allgemeinen nicht kritisch und wird bei dem Verfahren nicht berechnet.
- Das Berechnungsmodell für den mit Löchern versehene Bereich des Rohrbodens ist eine geschwächte, homogene flache Platte, die durch Reaktionskräfte (oder Reaktionsmomente) je Flächeneinheit der Platte von den Rohren gestützt wird. Deshalb werden die Ergebnisse ungenau, wenn die Anzahl der Rohre zu klein ist. Die Rohrreaktionen können eventuell den Wert Null haben oder auch negativ sein.
Für den ersten unberohrten Rand um den mit Löchern versehene Bereich des Rohrbodens herum (durchschnittliche Breite b_R , beaufschlagt mit beiden Fluidrücken) ist das Modell dieselbe Platte, die jedoch nicht geschwächt ist und nicht gestützt wird.
Außerhalb des ersten unberohrten Randes befindet sich im Allgemeinen ein zweiter unberohrter Rand (tatsächliche Breite b_S , beaufschlagt mit nur einem Fluidruck), welcher als Teil eines „Flansch“-Ringes behandelt wird (tatsächliche Breite b_F , mittlere Dicke e_F). Diese Ringe werden als Flanschringe berechnet, um korrekte (so genau wie möglich) Randmomente zu erhalten. Die Breite der Ringe sollte jedoch nicht zu groß sein, und sie sollten zumindest näherungsweise achsensymmetrisch sein.
- Die zusätzlichen Auswirkungen des Gewichts des Rohrbündels in vertikal angebrachten Austauschern werden durch Berücksichtigung der Rohrbiegung betrachtet. Üblicherweise ist dies für diese Art von Belastung ausreichend. Diese Annahmen gelten nicht für sehr lange Rohrbündel und/oder Rohre mit niedriger Festigkeit.
- Die benötigten Flanschbolzen-Belastungen und Dichtungskräfte sind aus einer separaten Berechnung zu entnehmen, z. B. aus Anhang G oder aus Abschnitt 11, jedoch darf der Abschnitt 11 nur für Rohrböden des in Bild J-11 gezeigten Typs verwendet werden.
- Alle Festigkeitsberechnungen (außer der Berechnung auf Ermüdungslebensdauer in Unterabschnitt J.10) beruhen auf der Grenzbelastungs-Analyse (insofern progressiv), unter Verwendung des statischen Verfahrens (insofern entweder exakt oder konservativ).
- Alle Berechnungsmodelle (mit Ausnahme der Nachweise für die Belastungsgrenze der nicht mit Löchern versehenen Bereiche des Rohrbodens, Unterabschnitt J.9.3) sind achsensymmetrisch.

J.4.3 Berechnungsverfahren

J.4.3.1 Erforderliche Berechnungsprüfungen

Sämtliche Rohrböden sind innerhalb des mit Löchern versehenen Bereiches des Rohrbodens und an dessen Rand auf Biegung zu prüfen; siehe J.9.1.

Sämtliche Rohrböden sind auf Schubbeanspruchung am Rand des mit Löchern versehenen Bereiches des Rohrbodens zu prüfen; siehe J.9.2.

Dünne Rohrböden sind auch auf lokale Belastung in den nicht mit Löchern versehenen Bereichen des Rohrbodens zu prüfen; siehe J.9.3.

Bei dünnen Rohrböden in vertikalen Rohrbündeln muss eine zusätzliche Prüfung auf die Gewichtsauswirkungen des Rohrbündels ausgeführt werden; siehe J.9.4.

Festkopf-Wärmeaustauscher ohne Kompensatoren sind darüber hinaus nach J.10 (Berechnung auf Ermüdungslebensdauer) auf Wechselbeanspruchung zu prüfen.

Festkopf-Wärmeaustauscher mit Kompensatoren sind nicht nach J.10 zu prüfen, sondern ihr Kompensator muss nach Abschnitt 14 geprüft werden.

Alle benötigten Flanschbolzen-Belastungen und Dichtungsdurchmesser sind aus einer geeigneten Berechnung für Rohrboden-Flansch-Verbindungen zu bestimmen. Solange ein solches spezielles Berechnungsverfahren nicht zur Verfügung steht, müssen die benötigten Daten mittels Anhang G mit den folgenden Änderungen bestimmt werden:

- bei Rohrboden-Flansch-Verbindungen nach den Bildern J-12 und J-13 darf der Rohrboden als flache Abdeckung (siehe Bild G.3-9) mit einem Blindflansch betrachtet werden, für jenen:

Anhang G	Anhang J
e_0	$= e_p$
e_F	$= e_F$
d_0	$= d_F$
d_g	$= 0$
d_{Ge}	$= d_{GC}$ oder d_{GS} an den Vorkammer-, bzw. Schalendichtungen

- bei Rohrboden-Flansch-Verbindungen nach Bild J-11 darf der Rohrboden als Teil einer effektiven Dichtung betrachtet werden, wenn beide tatsächlichen Dichtungen dieselben Maße und Eigenschaften aufweisen. Die effektive Dichtung weist die folgenden Parameter auf:

$$e_{\text{Geff}} = 2 \cdot e_G + e_F$$

$$E_{\text{Geff}} = E_{0\text{eff}} + K_{1\text{eff}} \cdot Q \quad (\text{J.4.1-6})$$

mit

$$E_{0\text{eff}} = \frac{E_0}{\frac{2 \cdot e_G + e_F}{e_{\text{Geff}}} + \frac{e_F}{e_{\text{Geff}}} \cdot \frac{E_0 + K_1 \cdot \frac{Q_{\text{max}}}{2}}{E_F}} \quad (\text{J.4.1-7})$$

$$K_{1\text{eff}} = \frac{K_1}{\frac{2 \cdot e_G + e_F}{e_{\text{Geff}}} + \frac{e_F}{e_{\text{Geff}}} \cdot \frac{E_0 + K_1 \cdot \frac{Q_{\text{max}}}{2}}{E_F}} \quad (\text{J.4.1-8})$$

$$\alpha_{\text{Geff}} = \alpha_G \cdot \frac{2 \cdot e_G}{e_{\text{Geff}}} + \alpha_F \cdot \frac{e_F}{e_{\text{Geff}}} \quad (\text{J.4.1-9})$$

Die effektiven Werte für m , $Q_{0\text{min}}$, Q_{max} und g_c sind die unveränderten Werte der zwei gleichartigen Einzeldichtungen.

Die Berechnung muss mit dem höheren der zwei Druckwerte P_T und P_S erfolgen.

- In Fällen bei denen die Prüfungen der Belastungsgrenzen nach G.7 auf der Seite mit niedrigerem Druck nicht erfüllt werden, darf die gesamte Berechnung mit dem geringeren Druck, aber mit der Schraubenkraft F_{B0} von der Seite mit dem höheren Druck ausgeführt werden.

- In Fällen bei denen auf der Schalenseite $|P_D - P_R| > 0$ (d. h. $P_D \neq P_R$) gilt, muss die entstehende Axialkraft $F_{RS} = \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 \cdot (P_D - P_R)$ berücksichtigt werden und die Berechnung sowohl für P_T als auch P_S und F_{RS} ausgeführt werden. Die höheren Bolzenbelastungen aus beiden Läufen sind zu verwenden.

In Fällen bei denen Anhang G nicht anwendbar ist, d. h. für Bild J-11, darf die Flanschberechnung nach Abschnitt 11 herangezogen werden. Dann sind die Dichtungsdurchmesser d_{GC} und d_{GS} als Wert von G aus Abschnitt 11 an den Vorkammer- bzw. Schalendichtungen zu verwenden.

J.4.3.2 Zu berücksichtigende Lastfälle

J.4.3.2.1 Es müssen Grenzlastberechnungen (J.5 bis J.9) durchgeführt werden

- für alle Arten von Rohrbündeln unter Verwendung aller in der Praxis möglichen Kombinationen von Auslegungsdrücken und zusätzlichen Auslegungslasten.

ANMERKUNG 1 Eine Beschränkung auf eine Berechnung für das absolute Maximum von $|P_T - P_S|$ ist im Allgemeinen nicht ausreichend.

ANMERKUNG 2 Auslegungslasten sind statt Betriebslasten zu verwenden.

J.4.3.2.2 Die Berechnung auf Ermüdungslebensdauer (J.10) ist durchzuführen

- nur für feste Rohrböden ohne Kompensator;
- unter Verwendung aller normalen gleichzeitig wirkenden Betriebsdrücke, zusätzlichen Lasten und Temperaturen.

ANMERKUNG 1 In vielen Fällen ist es ausreichend, die Berechnung nur für die ungünstigste Laständerung durchzuführen, welche durch den höchsten Wert $|\Delta P_F|$ aus Gleichung (J.10.2-2) gegeben ist. In anderen Fällen mit unterschiedlichen vergleichbaren Laständerungen, insbesondere wenn etwas höhere Lastwerte mit nur etwas geringeren Anzahlen von Lastzyklen verknüpft sind, kann es jedoch notwendig sein, mehrere Berechnungen durchzuführen und die Annehmbarkeit nach 17.7 zu prüfen.

ANMERKUNG 2 Betriebslasten sind statt Auslegungslasten zu verwenden.

J.4.3.3 Anwendung des Verfahrens

J.4.3.3.1 Grundregeln

Die Berechnung muss im korrodierten Zustand durchgeführt werden. Eventuell sind mehrere Iterationen erforderlich.

Wenn sich die zwei Rohrböden in einem Rohrbündel hinsichtlich der Maße, des Werkstoffes oder der Randabstützungs-Bedingungen unterscheiden, muss für jeden Rohrboden eine separate Berechnung durchgeführt werden.

Die Berechnung beginnt mit J.5.1. In J.5.2 muss ein Wert für die Rohrbodendicke e_p angenommen werden. Anschließend ist – in Abhängigkeit vom Typ des Wärmeaustauschers – entweder J.6 oder J.7 zu verwenden. J.8 und J.9 sind in jedem Falle anzuwenden.

Viele Berechnungen in J.5 bis J.7 sind von e_p unabhängig; es sollte jedoch beachtet werden, dass l_x und e_F eventuell geändert werden können, wenn sich e_p ändert; ebenso können f_p und F_B von e_p abhängen. Es wird deshalb empfohlen, nach jeder Änderung von e_p die Berechnungen zu wiederholen, beginnend bei J.5.2.

J.4.3.3.2 Hauptsächliche Schlussfolgerungen

Wenn der berechnete Gesamt-Auslastungsgrad $\Phi_{p,t}$ kleiner als 1,0 ist, so ist das Ergebnis annehmbar; die tatsächlich erforderliche Rohrbodendicke kann jedoch kleiner sein als die angenommene, und die Berechnung sollte unter Verwendung eines kleineren e_p wiederholt werden.

Wenn der berechnete Gesamt-Auslastungsgrad $\Phi_{p,t}$ größer ist als 1,0, so ist das Ergebnis nicht annehmbar; die angenommene Rohrbodendicke e_p muss erhöht werden, und die Berechnung ist zu wiederholen.

J.5 Parameter für alle Typen

J.5.1 Durchmesser und Breiten

J.5.1.1 Außendurchmesser d_1 des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens

J.5.1.1.1 Allgemeines

Das Verfahren zur Bestimmung von d_1 ist nachstehend angegeben.

ANMERKUNG Die oberen und unteren Grenzwerte für d_1 können unter Berücksichtigung des für zusätzliche Rohre d_1 zur Verfügung stehenden Raumes innerhalb des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens festgelegt werden.

J.5.1.1.2 Maximaler Durchmesser $d_{1(max)}$

$d_{1(max)}$ wird wie folgt bestimmt:

$$d_{1(max)} = 2r_o + d_T \quad (J.5.1-1)$$

Wenn ein einzelnes Rohr oder eine kleine Gruppe von Rohren außerhalb des mit Löchern versehenen Hauptbereichs des Rohrbodens liegt (in einer Entfernung von mehr als einer Rohrleitung), sollten diese bei der Bestimmung von r_o und N_T nicht berücksichtigt werden.

J.5.1.1.3 Minimaler Durchmesser $d_{1(min)}$

J.5.1.1.3.1 Festlegung von trapezförmigen Flächen

Die Tangenten an den Außenrohren anlegen, sodass der mit Löchern versehene Bereich des Rohrbodens in einem Polygon liegt. Die Lage der Stäbe ist nicht zu berücksichtigen.

ANMERKUNG 1 Ein Beispiel ist in den Bildern J.7(a) und J.7(b) enthalten.

ANMERKUNG 2 Wenn zwei Tangenten nahezu die gleiche Steigung haben, können sie zur Vereinfachung durch eine Tangente ersetzt werden, sofern diese außerhalb der Mittelpunkte aller sie kreuzenden Rohre liegt (d. h. die Tangente schneidet weniger als die Hälfte der Rohrquerschnitte). (Siehe b_7 in Bild J.7(b).)

Der mit Löchern versehene Bereich des Rohrbodens wird in (mit Löchern versehene oder nicht mit Löchern versehene) trapezförmige Bereiche unterteilt, indem parallel zu den Rohrreihen Geraden gezogen werden.

Wenn der Schnittpunkt der Tangenten, die das Polygon bilden, näher an der Rohr-Mittellinie liegt, muss die Konstruktionslinie durch die Rohrmittelpunkte verlaufen (siehe Bild J-7(b)). Wenn der Schnittpunkt der Tangenten, die das Polygon bilden, näher an der Tangente als am Rohrmittelpunkt liegt, muss die Konstruktionslinie die Tangente zur Rohrreihe sein (siehe Bild J-7(b)). Dies gilt auch, wenn der Schnittpunkt mittig zwischen Mittellinie und Tangente des Rohres liegt. Um trapezförmige Flächen zu erhalten, werden die Konstruktionslinien bis zu dem umschließenden Polygon verlängert. Die Höhen der trapezförmigen Flächen mit b_j ($j = 1, 2, \dots$) und die Breiten mit c_j ($j = 0, 1, 2, \dots$) bezeichnen.

J.5.1.1.3.2 Bestimmung der Mindestfläche des mit Löchern versehenen Rohrbodens $A_{R(\min)}$

$A_{R(\min)}$ ist nach einem der drei folgenden Verfahren zu bestimmen.

a) Rohrzählung

Bestimmung der Gesamtanzahl möglicher zusätzlicher Rohre $N_{I(\min)}$ wie folgt:

Berechnung der Rohrteilungen p_b und p_c wie folgt:

Dreieckige Rohrteilung:

$$p_b = 0,866p \quad (J.5.1-2)$$

und

$$p_c = p \quad (J.5.1-3)$$

Quadratische Rohrteilung:

$$p_b = p \quad (J.5.1-4)$$

und

$$p_c = p \quad (J.5.1-5)$$

Bei jeder Rohrreihe alle nicht gefüllten Positionen innerhalb der Reihe zählen. Bei leeren Positionen an den Enden der Reihe dürfen Vielfache einer Rohrhälfte hinzugefügt werden, wenn die Tangente im Innenkreis des eventuellen zusätzlichen Rohres liegt. Dies ergibt $N_{I(r)}$ für jede Rohrreihe.

ANMERKUNG 1 Ein Beispiel ist in Bild J.7(c) dargestellt.

In einem Bereich mit Trennwänden, in dem der Abstand zwischen den nächsten Rohrreihen einer ganzzahligen Rohrteilung entspricht, werden alle möglichen zusätzlichen Rohrpositionen gezählt, um $N_{I(k)}$ für diesen Bereich zu erhalten.

ANMERKUNG 2 Die Fläche mit der Höhe b_3 in Bild J.7(b) ist ein Bereich, in dem der Abstand zwischen den nächsten Rohrreihen ganzzahligen Rohrteilungen entspricht.

In einem Bereich mit Trennwänden oder einem anderen nicht mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens mit beliebigen Abständen zu den nächsten Rohrreihen wird $N_{I(k)}$ für diesen Bereich wie folgt errechnet:

$$N_{I(k)} = \frac{[b_{k,p} - p_b](c_{k-1,p} + c_{k,p})}{2p_b \cdot p_c} \quad (J.5.1-6)$$

In Gleichung J.5.16 ist $b_{k,p}$ der Abstand zwischen den Mittellinien nebeneinander angeordneter Rohrreihen und p_b die entsprechende (vertikale) Rohrteilung; $c_{k-1,p}$ und $c_{k,p}$ ist die (obere bzw. untere) Breite der trapezförmigen Fläche und p_c ist die entsprechende (horizontale) Rohrteilung, siehe Bild J.7(b). Die errechnete Anzahl $N_{I(k)}$ für jeden Trennwandbereich ist auf das halbe Rohr aufzurunden.

ANMERKUNG 3 Die Fläche mit der Höhe $b_{5,p}$ in Bild J.7(b) ist ein nicht mit Löchern versehener Bereich des Rohrbodens mit einem beliebigen Abstand zwischen den nebeneinander liegenden Rohrreihen.

$N_{I(\min)}$ ist die Summe aller möglichen zusätzlichen Rohre der Rohrreihen, $N_{I(r)}$, und aller möglichen zusätzlichen Rohre der mit Trennwand angeordneten Bereiche, $N_{I(k)}$. In Extremfällen (bei dicht gepackter Anordnung) kann $N_{I(\min)}$ gleich Null sein.

Die Fläche $A_{R(\min)}$ wie folgt berechnen:

$$A_{R(\min)} = (N_T + N_{l(\min)}) \cdot p_b \cdot p_c \quad (J.5.1-7)$$

b) Berechnung aller trapezförmigen Flächen

Die Werte für b_j und c_j für jede trapezförmige Fläche (siehe Bild J.7(b)) wie folgt berechnen:

- In den berohrten Bereichen müssen die Höhen b_j als Vielfache von p_b und $\frac{d_T}{2}$ berechnet werden. Die Breiten c_j sind gleichermaßen als Vielfache von p_c und $\frac{d_T}{2}$ zu berechnen. In Zweifelsfällen gilt immer der niedrigere Wert.
- Für alle Bereiche mit Trennwand wird die Höhe des Bereichs in die Gleichung J.5.1-8 eingesetzt, unabhängig davon, ob dieser Wert eine genaue Vielfache von p_b ist oder nicht.

Berechnung von $A_{R(\min)}$ unter Einbeziehung aller berohrten und unberohrten Bereiche wie folgt:

$$A_{R(\min)} = 0,5 \cdot \{(c_0 + c_1) \cdot b_1 + (c_1 + c_2) \cdot b_2 + (c_2 + c_3) \cdot b_3 \dots\} = \sum_{j=1}^{j=j_{\max}} 0,5 \times (c_{j-1} + c_j) \times b_j \quad (J.5.1-8)$$

c) Messung der Fläche

Die Fläche wird gemessen $A_{R(\min)}$

ANMERKUNG 4 Dies könnte mit dem Computer oder einer anderen Einrichtung erfolgen.

J.5.1.1.3.3 Berechnung des Mindestdurchmessers des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens $d_{1(\min)}$

$d_{1(\min)}$ wie folgt aus $A_{R(\min)}$ berechnen:

$$d_{1(\min)} = \sqrt{\frac{4A_{R(\min)}}{\pi}} \quad (J.5.1-9)$$

Wenn $d_{1(\min)}$ den Wert für $d_{1(\max)}$ überschreitet, ist die Berechnung falsch und sollte überprüft werden.

J.5.1.1.4 Berechnung des durchschnittlichen Durchmessers des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens $d_{1(av)}$

$d_{1(av)}$ wie folgt berechnen:

$$d_{1(av)} = \frac{[d_{1(\min)} + d_{1(\max)}]}{2} \quad (J.5.1-10)$$

J.5.1.1.5 Berechnung des Durchmessers des mit Löchern versehenen Bereichs des Rohrbodens d_1

Die errechnete Durchmesserdiffferenz und die zulässige Durchmessertoleranz wie folgt vergleichen:

$$\Delta d_{(\text{act})} = d_{1(\text{max})} - d_{1(\text{min})} \quad (\text{J.5.1-11})$$

$$\Delta d_{(\text{all})} = \min\{1,0p ; 0,03d_{1(\text{av})}\} \quad (\text{J.5.1-12})$$

Falls die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\Delta d_{(\text{act})} \leq \Delta d_{(\text{all})} \quad (\text{J.5.1-13})$$

wird in allen nachfolgenden Berechnungen der folgende Wert eingesetzt:

$$d_1 = d_{1(\text{av})} \quad (\text{J.5.1-14})$$

Falls die Bedingung nach (J.5.1-13) nicht erfüllt ist, wird M wie folgt errechnet:

$$M = \text{Integer}\left(\frac{\Delta d_{(\text{act})}}{\Delta d_{(\text{all})}}\right) + 1 \quad (\text{J.5.1-15})$$

Dabei ist

$$\text{Integer}\left(\frac{\Delta d_{(\text{act})}}{\Delta d_{(\text{all})}}\right) \text{ ganze Zahl weniger oder gleich dem Wert aus } \left(\frac{\Delta d_{(\text{act})}}{\Delta d_{(\text{all})}}\right).$$

Alle nachfolgenden Berechnungen M mal mit den Werten aus d_1 durchführen, die sich ergeben aus:

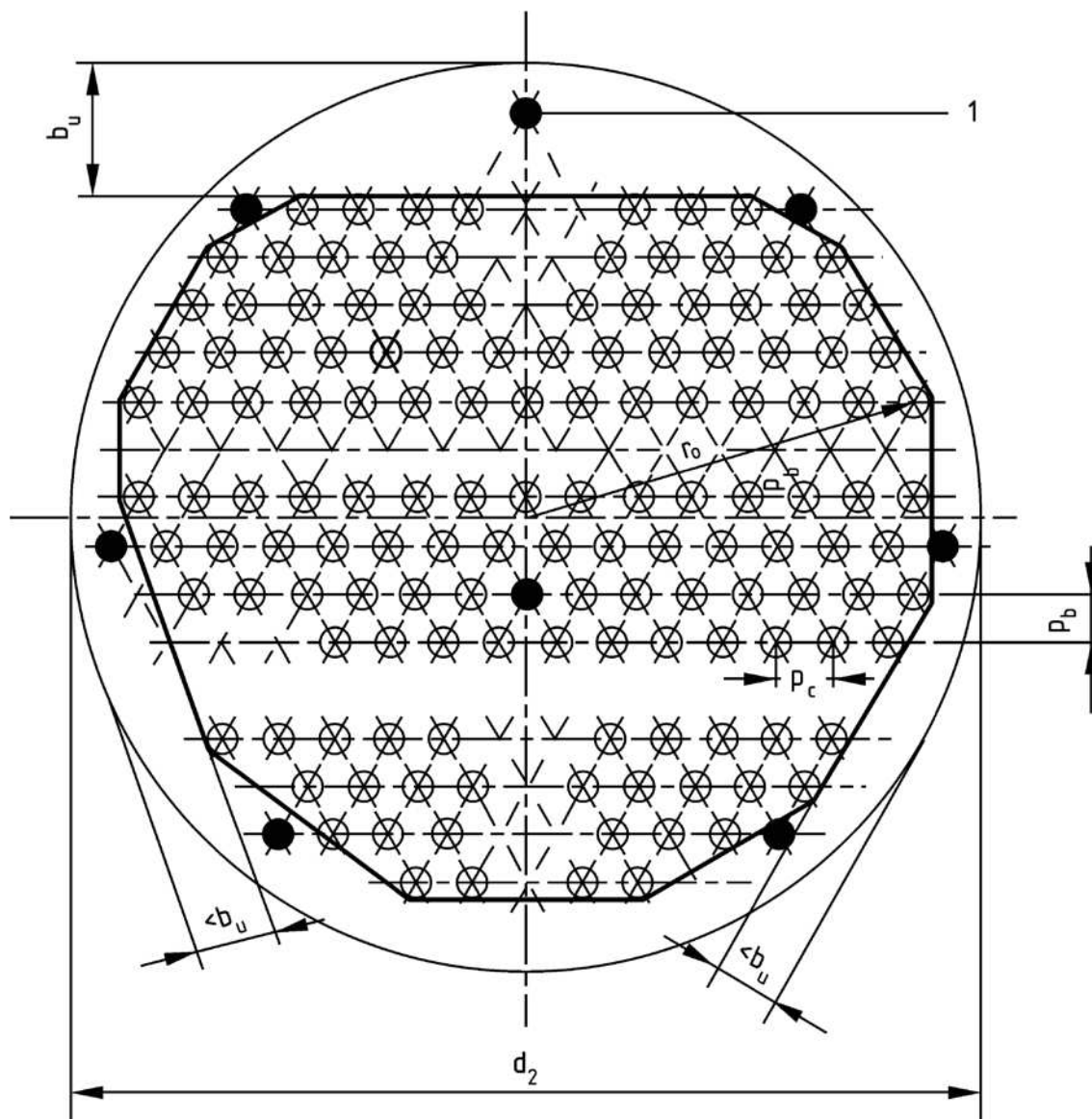
$$d_1 = d_{1(\text{min})} + n \frac{(d_{1(\text{max})} - d_{1(\text{min})})}{(M - 1)} \quad (\text{J.5.1-16})$$

Dabei ist

$$n = 0, 1, 2 \dots (M - 1)$$

Das Ergebnis mit dem größten Auslastungsgrad und folglich der größten erforderlichen Plattendicke gilt als die erforderliche Dicke des Rohrbodens.

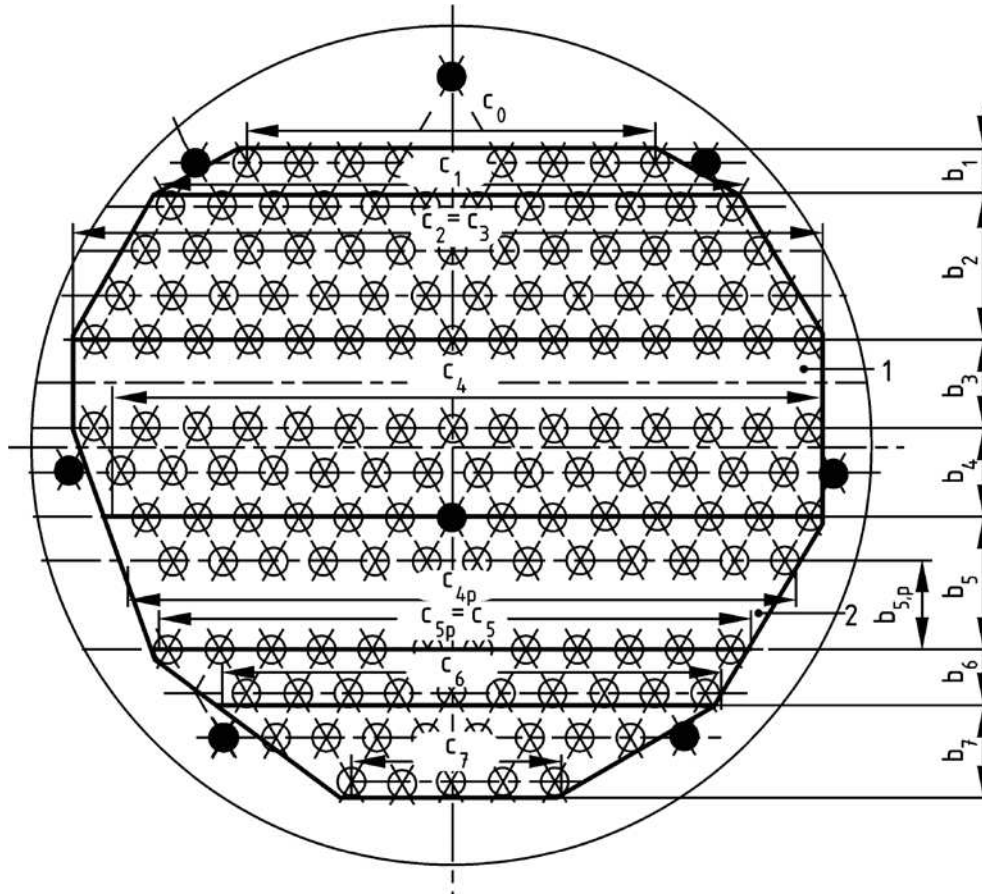
ANMERKUNG Wiederholte Berechnungen sind erforderlich, um Fehler bei Berechnungen, bei denen von einer Symmetrie der Bauteile ausgegangen wird, die nicht achsensymmetrisch sind, möglichst gering zu halten.



Legende

1 Haltestange

Bild J.7(a) — Konstruktion des Polygons um den mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens



Legende

- 1 Trennwand mit einer Höhe, die einem Vielfachen der Rohrteilungen entspricht
- 2 Trennwand mit beliebiger Höhe

ANMERKUNG Gleichungen zur Berechnung der Maße in Bild J.7(b):

Fläche 1 $c_0 = 8p_c + \frac{d_T}{2}; \quad b_1 = p_b$

Fläche 2 $c_1 = 11p_c + \frac{d_T}{2}; \quad b_2 = 3p_b + \frac{d_T}{2}$

Fläche 3 $c_2 = 14p_c + 2\left(\frac{d_T}{2}\right); \quad b_3 = 2p_b$

Fläche 4 $c_3 = 14p_c + 2\left(\frac{d_T}{2}\right); \quad b_4 = 2p_b$

Fläche 5 $c_4 = 13p_c + 2\left(\frac{d_T}{2}\right); \quad b_5 = p_b + b_{5,p}$

Fläche 6 $c_5 = 11p_c + 2\left(\frac{d_T}{2}\right); \quad b_6 = p_b + \frac{d_T}{2}$

Fläche 7 $c_6 = 9p_c + 2\left(\frac{d_T}{2}\right); \quad b_7 = 2p_b;$

$c_7 = 4p_c + \frac{d_T}{2}$

Bild J.7(b) — Konstruktion der trapezförmigen Flächen

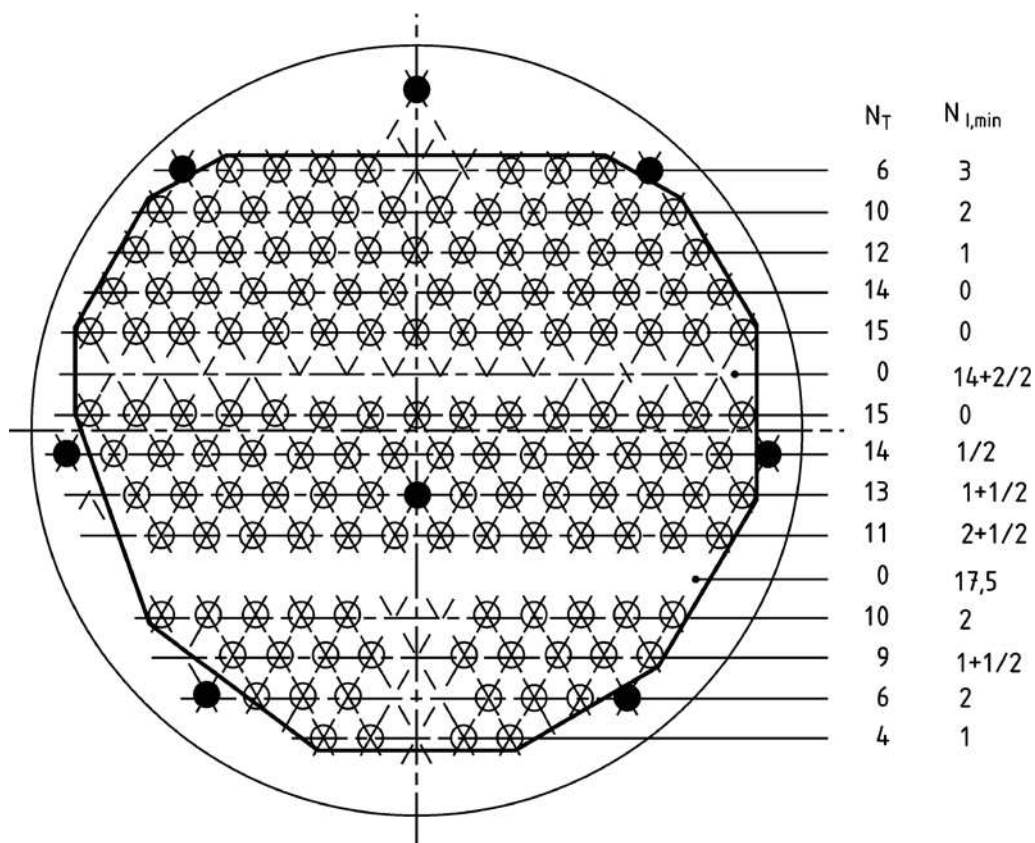


Bild J.7(c) — Rohrzahlverfahren

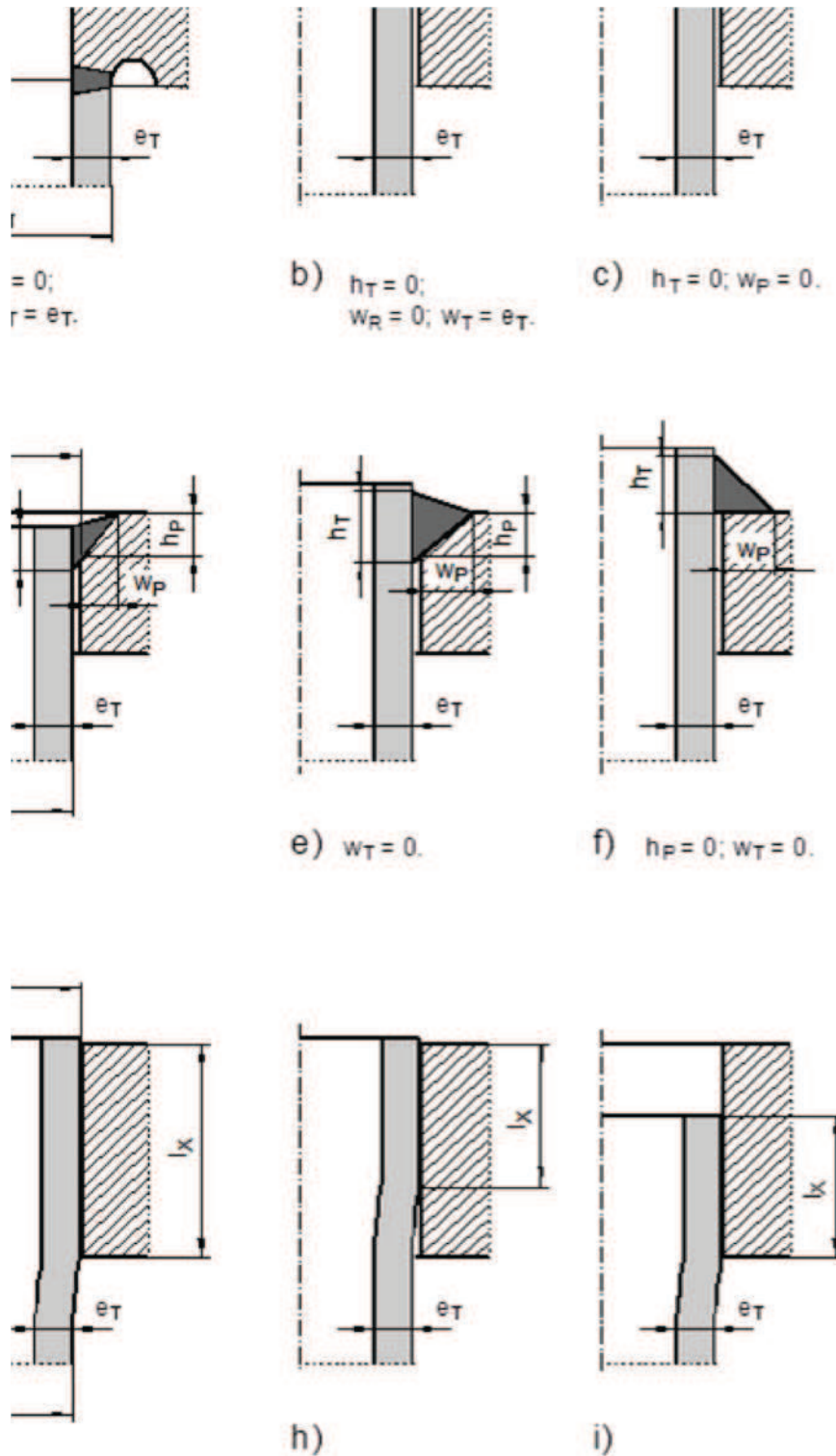


Bild J.8 — Verbindungen Rohr-Rohrboden

J.5.1.2 Andere Durchmesser, Breiten und Parameter

Der Außendurchmesser des beidseitig druckbeaufschlagten Rohrbodenbereichs wird wie folgt berechnet:

$$d_2 = \min\{\max(d_c, d_{GC}); \max(d_s, d_{GS})\} \quad (\text{J.5.1-17})$$

Danach sind folgende Werte zu berechnen:

$$b_R = (d_2 - d_1)/2 \quad (\text{J.5.1-18})$$

$$\lambda_R = 2 \times b_R/d_1 \quad (\text{J.5.1-19})$$

$$b_s = \{\max(d_c; d_G) - \max(d_s; d_{GS})\}/2 \quad (\text{J.5.1-20})$$

$$\lambda_s = 2 \times b_R/d_2 \quad (\text{J.5.1-21})$$

b_s und λ_s können entweder positiv oder negativ sein; das Vorzeichen ist unbedingt zu beachten.

J.5.2 Mit Löchern versehener Bereich des Rohrbodens am Rohrboden

J.5.2.1 Effektiver Rohrlochdurchmesser

Der effektive Durchmesser der Rohrlöcher wird wie folgt ermittelt:

$$d_{0,e} = \max\{d_0 - 2 \cdot \delta_X \cdot A_X / e_P; d_T - 2 \cdot e_T\} \quad (\text{J.5.2-1})$$

Dabei ist

$$\delta_X = \min\{1, 0; f_T/f_P\} \quad (\text{J.5.2-2})$$

$$A_X = (l_X + \sqrt{d_T \cdot e_T}) \cdot e_T \quad (\text{J.5.2-3})$$

Für geschweißte Rohr-Rohrbodenverbindungen ist die Länge l_X die Schweißnahthöhe h_T am Rohr; für aufgeweitete Rohre ist es die aufgeweitete Länge l_X ; beide Parameter sind in Bild J-8 dargestellt.

Die Gleichung (J.5.2-1) kann nur berechnet werden, wenn e_P bekannt ist; deshalb muss ein Wert für e_P angenommen werden.

J.5.2.2 Parameter der mit Löchern versehenen Platte

Die relative Biegefestigkeit und die relative Schubfestigkeit κ_P sind wie folgt zu berechnen:

$$\varphi_P = 1 - d_{0,e}/p \quad (\text{J.5.2-4})$$

Für $\varphi_P < 0,50$:

$$\kappa_P = \sqrt{\varphi_P \cdot (1 - \varphi_P)} \quad (\text{J.5.2-5})$$

Für $\varphi_P \geq 0,50$:

$$\kappa_P = 0,50 \quad (\text{J.5.2-6})$$

J.6 Nicht durch Rohre gestützte Rohrböden

J.6.1 Allgemeines

ANMERKUNG 1 Bei folgenden Wärmeaustauschertypen wird der Rohrboden nicht durch die Rohre abgestützt: U-Rohr-Wärmeaustauscher (Bild J-1); Wärmeaustauscher mit durch Kappen verschlossenen Rohren und einem einzigen Rohrboden, z. B. elektrische Heizgeräte; Wärmeaustauscher mit allgemein gekrümmten Rohren und einem, zwei oder mehr Rohrböden.

ANMERKUNG 2 Für die späteren iterativen Berechnungen werden die aktiven Axialkräfte durch entsprechende aktive Drücke (P_D , P_R ; Kräfte je Flächeneinheit des Rohrbodens) ausgedrückt. Reaktive Kräfte wirken nicht auf ungestützte Rohrböden (oder sind vernachlässigbar) (daher gilt $P_Q = P_D$). Der Momentverteilungsparameter η wird für spätere iterative Berechnungen benötigt.

J.6.2 Aktive Drücke

J.6.2.1 Auf den Rohrboden wirkender Differenzdruck

$$P_D = P_T - P_S \quad (\text{J.6.2-1})$$

J.6.2.2 Resultierender Schubkraftdruck am Außenrand des behrten Bereiches

$$P_R = P_D \quad (\text{J.6.2-2})$$

J.6.3 Bestimmender Druck und Verteilungsparameter

$$P_Q = P_D \quad (\text{J.6.3-1})$$

$$\eta^2 = \min \left(1; \frac{12 \cdot \kappa_P \cdot \varphi_P \cdot f_P \cdot e_P^2}{|P_D| \cdot d_1^2} \right) \quad (\text{J.6.3-2})$$

Nach diesem Unterabschnitt ist die Berechnung mit J.8 fortzusetzen.

Bis zu dieser Stelle wurde die Rohrbodendicke nur in den Gleichungen J.5.2-1 und J.6.3-2 benötigt. Weitere Iterationen der Dicke des Rohrbodens beeinflussen J.8.4 im weiteren Verlauf. Diese Regel gilt nicht für die Wiederholung vollständiger Berechnungen mit unterschiedlichen Durchmessern d_1 (siehe J.5.1.1.5).

J.7 Durch gerade Rohre gestützte Rohrböden

J.7.1 Allgemeines und konstante Parameter

J.7.1.1 Geltungsbereich

ANMERKUNG 1 Bei folgenden Typen von Wärmeaustauschern werden die Rohrböden durch die Rohre abgestützt: Wärmeaustauscher mit eingetauchtem Schwimmkopf; mit außen abgedichtetem Schwimmkopf; mit innen abgedichtetem Schwimmkopf; mit festen Rohrböden mit Kompensator; mit festen Rohrböden ohne Kompensator. (Bilder J-2 bis J-6).

ANMERKUNG 2 Für die späteren Berechnungen werden die aktiven Axialkräfte durch entsprechende aktive Drücke (P_D , P_E , P_R ; Kräfte je Flächeneinheit des Rohrbodens) ausgedrückt. Reaktive Drücke an den Rohrböden (Q_A , Q_I , hervorgerufen durch Axialkräfte in den Rohren) können die bestimmende resultierende effektive Axialkraft P_Q verringern. Die Kraft- und Momentverteilungsparameter ζ und η werden für die Bestimmung von P_Q und für spätere Berechnungen benötigt.

J.7.1.2 Relative Flächen im mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens

Die relativen mit Fluiddruck beaufschlagten Flächen im mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens sind:

$$x_T = 1 - N_T \cdot \left(\frac{d_T - 2 \cdot e_T}{d_1} \right)^2 \quad (\text{J.7.1-1})$$

$$x_S = 1 - N_T \cdot \left(\frac{d_T}{d_1} \right)^2 \quad (\text{J.7.1-2})$$

Die Differenz zwischen den beiden Flächen ist die relative Querschnittsfläche der Rohre im mit Löchern versehenen Bereich des Rohrbodens:

$$\vartheta = x_T - x_S = 4 \cdot N_T (d_T - e_T) \cdot e_T / d_1^2 \quad (\text{J.7.1-3})$$

J.7.1.3 Rohrknicklänge

Die Knickbelastung der Rohre wird mittels der Knicklänge $l_{T,K}$ ausgedrückt. Diese Länge ist von der Abstützung durch die Leitbleche, jedoch nicht von den Belastungen abhängig. Die Knicklänge muss durch die Rohre bestimmt werden, welche die längste Knicklänge aufweisen.

Bild J-9 zeigt, wie die effektive Anzahl von abstützenden Leitblechen $N_{B,e}$ zu bestimmen ist, in Abhängigkeit von der Gesamtzahl $N_{B,t}$. Falls alle Leitbleche alle Rohre stützen, gilt $N_{B,e} = N_{B,t}$.

In Abhängigkeit von der effektiven Anzahl $N_{B,e}$ wird die Knicklänge wie folgt bestimmt:

Für $N_{B,e} = 0$:

$$l_{T,K} = 0,50 \cdot L_T \quad (\text{J.7.1-4})$$

Für $N_{B,e} = 1$ und $l_C \leq l_A$:

$$l_{T,K} = \sqrt{0,250 \cdot l_A^2 + 0,106 \cdot l_A \cdot l_C + 0,132 \cdot l_C^2} \quad (\text{J.7.1-5})$$

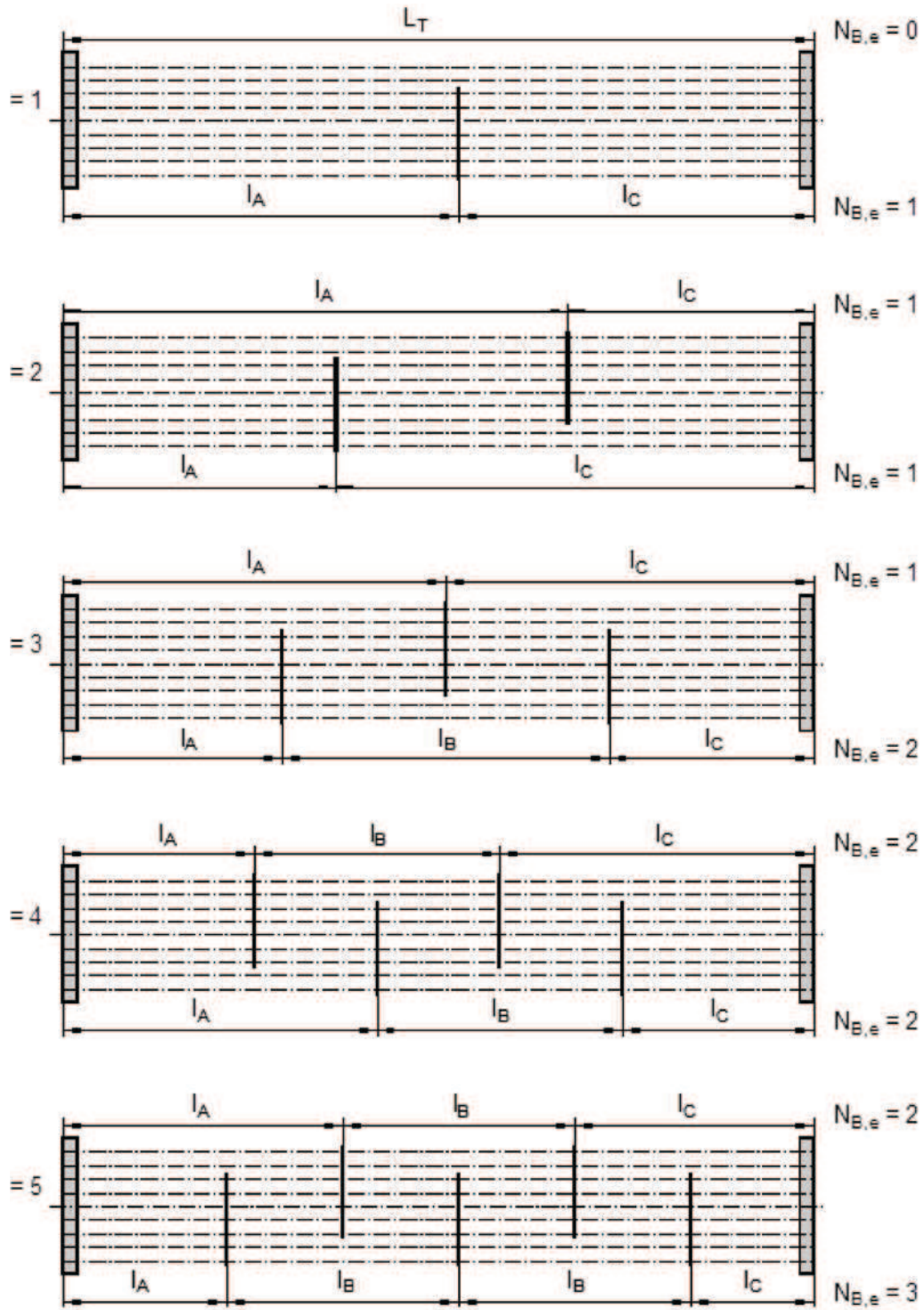


Bild J.9 — Definition der ungestützten Rohrlängen l_A , l_B , l_C für das Knicken