Bibliografie

Titel	Technische Regeln für Dampfkessel Berechnung Kugelschalen und gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck (TRD 303)
Amtliche Abkürzung	TRD 303
Normtyp	Technische Regel
Normgeber	Bund
Gliederungs-Nr.	Keine FN

Abschnitt 5 TRD 303 - Berechnung (1)

5.1. Kugelschalen

5.1.1. Kugelschalen ohne Ausschnitte

Die Wanddicke ohne Zuschläge beträgt

$$s_v = r_{wi} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{2p}{(2\sigma_{zul} - p)v_N}} - 1 \right) \quad (5)$$

oder

$$s_v = r_{wa} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{2p}{(2\sigma_{zul} - p)v_N}} - 1}{\sqrt{1 + \frac{2p}{(2\sigma_{zul} - p)v_N}}} \quad (6)$$

Die Gl. (5) und (6) liefern nur gleiche Ergebnisse, wenn

$r_{Wi} = r_{Wa} - s_v$ (7)

gesetzt wird.

Für dünnwandige Schalen bis etwa $s_v/r_{Wi} <= 0,1$ kann die Wanddicke näherungsweise berechnet werden zu

$$s_v = \frac{r_{Wi} \cdot p}{(2\sigma_{zul} - p)v_N} \quad (8)$$

oder

$$s_v = \frac{r_{Wa} \cdot p}{(2\sigma_{zul} - p) \cdot v_N + p} \quad (9)$$

5.1.2. Kugelschalen mit Ausschnitten

5.1.2.1. Kugelschalen mit einem senkrechten Abzweig und zusätzlicher Verstärkung (Bild 5)

5.1.2.1.1. Eine unmittelbare Berechnung der Wanddicke der Kugelschale ist wegen der verschiedenen Einflußgrößen nicht möglich. Die Wanddicke s_v muß zunächst auf Grund der Erfahrung angenommen und die Richtigkeit der Annahme mit Hilfe von Gl. (10)

nachgeprüft bzw. die Rechnung mit einer verbesserten Annahme wiederholt werden.

Mit der druckbelasteten Fläche A_p (einfach schraffiert) sowie mit den tragenden Querschnittsflächen $A_{\sigma 0}$, $A_{\sigma 1}$ und A'_{σ} (kreuzschraffiert) lautet die Festigkeitsbedingung

$$\overline{\sigma}_v = p\left(\frac{A_p}{A_{\sigma 0} + A_{\sigma 1} + f_1 \cdot A'_{\sigma}} + \frac{1}{2}\right) \leq \sigma_{zul} \quad (10)$$

Die mittragenden Längen dürfen höchstens eingesetzt werden für die Kugelschale mit

$$e_G = \sqrt{(2r_{Wi} + s_V) \cdot s_V} \quad (11)$$

für den Abzweig mit

$$e_A = \sqrt{(d_{Ai} + s_{A0}) \cdot s_{A0}} \quad (12)$$

wobei für nach innen überstehende Abzweige die Nummer 3.4 (2) zu beachten ist.

Der Bewertungsfaktor f_1 ist aus der Tafel 3 zu entnehmen. Die über Gl. (10) ermittelte Wanddicke s_V darf nicht kleiner sein als die Wanddicke s_0, die für die Kugelschale ohne Ausschnitt erforderlich ist.

5.1.2.1.2. Bestehen Grundkörper, Abzweig und Verstärkung aus Werkstoffen unterschiedlicher zulässiger Spannung, so ist, wenn der Werkstoff des Grundkörpers die kleinste zulässige Spannung σ_{zul} aufweist, diese für die Berechnung der gesamten Konstruktion maßgebend. Vorausgesetzt wird, daß das Verformungsvermögen von Abzweig und Verstärkung nicht nennenswert (2) kleiner ist als das des Grundkörpers.

5.1.2.1.3. Hat der Werkstoff des Abzweigs mit σ_{1zul} oder der zusätzlichen Verstärkung σ'_{zul} eine kleinere zulässige Spannung als der Grundkörper mit σ_{0zul}, so kann die Bemessung auf Grund der Festigkeitsbedingung

$$\left(\sigma_{0\,zul} - \frac{p}{2}\right) \cdot A_{\sigma 0} + \left(\sigma_{1\,zul} - \frac{p}{2}\right) \cdot A_{\sigma 1} + \left(\sigma'_{zul} - \frac{p}{2}\right) \cdot f_1 \cdot A'_{\sigma} \geq p \cdot A_p \quad (13)$$

durchgeführt werden.

5.1.2.2. Kugelschalen mit senkrechtem Einzelabzweig ohne zusätzliche Verstärkung

Für den Einzelausschnitt mit senkrechtem Abzweig ohne zusätzliche Verstärkung gilt gemäß Bild 6 die Festigkeitsbedingung

$$\overline{\sigma}_v = p \cdot \left(\frac{A_p}{A_\sigma} + \frac{1}{2}\right) \leq \sigma_{zul} \quad (14)$$

Die mittragenden Längen sind noch Gl. (11) und (12) einzusetzen.

Werden Werkstoffe mit unterschiedlichen zulässigen Spannungen verwendet, so gelten sinngemäß die Nummern 5.1.2.1.2 und 5.1.2.1.3.

Die der Gl. (14) entsprechende Wanddicke berechnet sich zu

$$s_V = r_{Wi} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{2p}{(2\sigma_{zul} - p)v_A}} - 1\right) \quad (15)$$

Gl. (15) ist geeignet zur Nachrechnung ausgeführter Konstruktionen wie auch zur iterativen Ermittlung von s_V. Die Verschwächungsbeiwerte v_A sind den Bildern 8 bis 12 zu entnehmen. Zwischenwerte sind linear zu interpolieren.

Bei ausgehalsten Abzweigen ist der v_A-Wert mit 0,9 zu multiplizieren, um den Querschnittsverlust durch die übliche Formgebung zu berücksichtigen.

Der Verschwächungsbeiwert kann auch für solche Ausschnitte, bei denen die Abklinglänge noch Gl. (11) innerhalb der Kugelschale liegt, als Funktion von s/r_{Wi}, s_{A0}/s_V, d_{Ai}/r_{Wi} errechnet werden zu

$$v_A = \frac{r_{Wi}}{2s_v\left(1+\frac{s_v}{2r_{Wi}}\right)} \cdot \frac{A_s}{A_p} = \frac{1}{\frac{s_v}{r_{Wi}}} \cdot \frac{B_3 \cdot \frac{s_v}{r_{Wi}} + \frac{1}{1+0{,}5\cdot\frac{s_v}{r_{Wi}}} \cdot \frac{e_A}{s_v} \cdot \frac{s_{A0}}{s_v} \cdot \left(\frac{s_v}{r_{Wi}}\right)^2}{B_3 + \frac{d_{Ai}}{r_{Wi}} \cdot \left(\frac{e_A}{s_v} \cdot \frac{s_v}{r_{Wi}} + B_2 - \frac{B_1}{2+\frac{s_v}{r_{Wi}}}\right)} \le 1 \qquad (16)$$

hierin bedeuten:

$$B_1 = \sqrt{\left(1+\frac{s_V}{r_{Wi}}\right)^2 - \left(\frac{d_{Ai}}{r_{Wi}} \cdot \frac{1+\frac{s_V}{r_{Wi}}}{2+\frac{s_V}{r_{Wi}}}\right)^2} \qquad (17)$$

$$B_2 = \sqrt{\left(1+\frac{s_V}{r_{Wi}}\right)^2 - \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{d_{Ai}}{r_{Wi}} + \frac{s_{A0}}{s_V} \cdot \frac{s_V}{r_{Wi}}\right)^2} \qquad (18)$$

$$B_3 = \frac{e_G}{s_V} \cdot \frac{\frac{s_V}{r_{Wi}}}{1+0{,}5\cdot\frac{s_V}{r_{Wi}}} + \arcsin \frac{\frac{d_{Ai}}{r_{Wi}} + 2\frac{s_{A0}}{s_V} \cdot \frac{s_V}{r_{Wi}}}{2+\frac{s_V}{r_{Wi}}} - \arcsin \frac{\frac{d_{Ai}}{r_{Wi}}}{2+\frac{s_V}{r_{Wi}}} \qquad (19)$$ (3)

$$\frac{e_G}{s_V} = \sqrt{1+\frac{2}{\frac{s_V}{r_{Wi}}}} \qquad (20)$$

$$\frac{e_A}{s_V} = \sqrt{\frac{s_{A0}}{s_V} \cdot \left(\frac{\frac{d_{Ai}}{r_{Wi}}}{\frac{s_V}{r_{Wi}}} + \frac{s_{A0}}{s_V}\right)} \qquad (21)$$

5.1.2.3. Kugelschalen mit nicht senkrechtem Einzelabzweig ohne zusätzliche Verstärkung

Kugelschalen mit nicht senkrechtem Einzelabzweig ohne zusätzliche Verstärkung sind mit den Bezeichnungen nach Bild 7 sinngemäß nach Nummer 5.1.2.2. zu berechnen.

5.1.2.4. Kugelschalen mit mehreren Abzweigen

Benachbarte Abzweige werden wie Einzelausschnitte behandelt, wenn für den Mittenabstand t gemäß Bild 13 die Beziehung gilt

$$t \ge \left(\arcsin \frac{\frac{d_{Ai1}}{2} + s_{A01}}{r_{Wi} + \frac{s_V}{2}} + \arcsin \frac{\frac{d_{Ai2}}{2} + s_{A02}}{r_{Wi} + \frac{s_V}{2}}\right) \cdot \left(r_{Wi} + \frac{s_V}{2}\right) + 2 \cdot \sqrt{(2r_{Wi} + s_V) \cdot s_V} \qquad (22)$$

Im anderen Falle muß die Festigkeitsbetrachtung entsprechend Bild 13 durchgeführt werden, wobei die Festigkeitsbedingung lautet:

$$\overline{\sigma}_v = p \cdot \left(\frac{A_p}{A_{\sigma 0} + A_{\sigma 1} + A_{\sigma 2}} + \frac{1}{2} \right) \leq \sigma_{zul} \quad (23)$$

Bestehen Grundkörper, Abzweig und Verstärkung aus Werkstoffen unterschiedlicher zulässiger Spannung und weist der Werkstoff des Grundkörpers den kleinsten Wert auf, so ist nach Nummer 5.1.2.1.2 zu verfahren. Ist die zulässige Spannung der Abzweige geringer als die des Grundkörpers, so gilt

$$\left(\sigma_{0zul} - \frac{P}{2} \right) A_{\sigma 0} + \left(\sigma_{1zul} - \frac{P}{2} \right) A_{\sigma 1} + \left(\sigma_{2zul} - \frac{P}{2} \right) A_{\sigma 2} \geq p \cdot A_p$$
(24)

5.1.2.5. Kugelschalen mit gabelförmigem Abzweig (Y-Stücke)

Mit den Bezeichnungen nach Bild 14 ist als Festigkeitsbedingung zu fordern

im Bereich I

$$\overline{\sigma}_{vI} = p \cdot \left(\frac{A_{pI}}{A_{\sigma I}} + \frac{1}{2} \right) \leq \sigma_{zul} \quad (25)$$

im Bereich II

$$\overline{\sigma}_{vII} = p \cdot \left(\frac{A_{pII}}{A_{\sigma II}} + \frac{1}{2} \right) \leq \sigma_{zul} \quad (26)$$

Die tragenden Längen sind gemäß Gl. (12)

$$e_{A1} = \sqrt{(d_{A1} + s_{A01}) \cdot s_{A01}} \quad (27)$$

und

$$e_{A2} = \sqrt{(d_{A2} + s_{A02}) \cdot s_{A02}} \quad (28)$$

5.2. Halbkugelböden

5.2.1. Bei Halbkugelböden ist im Bereich der Anschlußnaht die nach den Gl. (5) und (6) bzw. (8) und (9) ermittelte

5.2.2. Ist bei einem Halbkugelboden die ausgeführte Wanddicke abzüglich der Zuschläge kleiner als die

Wanddicke des Zylinders ohne Verschwächung und ohne Zuschläge, sind für den Anschluß die Bedingungen von Bild 18 einzuhalten. Im Regelfall ist gegenzuschweißen.

5.3. Gewölbte Böden

Bei gewölbten Böden unter Innendruck kann je nach den Umständen die größte Beanspruchung in der Krempe oder im Bereich von Ausschnitten auftreten, so daß die Rechnung für beide Stellen durchzuführen ist. Bei dünnwandigen Böden ist außerdem nach die Gefahr der Faltenbildung in der Krempe in Betracht zu ziehen.

5.3.1. Kugelschalenteil

Die Berechnung erfolgt nach Nummer 5.1, wobei Ausschnitte nur im Scheitelbereich 0,6 · d_a liegen dürfen (4). Bei Ausschnitten außerhalb des Scheitelbereichs von 0,6 · d_a ist der Festigkeitsnachweis in anderer Weise zu erbringen.

5.3.2. Krempe

Die erforderliche Wanddicke ohne Zuschläge im Bereich der

Bodenkrempe beträgt:

$$s_K = \frac{p \cdot d_a \cdot \beta_K}{4 \cdot v_N \cdot \sigma_{zul}} \quad (29)$$

Bei geschweißten Böden ist v_N abhängig von der Bewertung nach TRD 201 einzusetzen. Abweichend davon kann mit v_N = 1 gerechnet werden, wenn die Schweißnaht den Scheitelbereich 0,6 · d_a schneidet.

Der Berechnungsbeiwert ß $_K$ ist in Abhängigkeit von s_V/d_a für Klöpperböden aus Bild 15 und für tiefgewölbte Böden aus Bild 16 zu entnehmen.

Die ausgeführte Wanddicke des zylindrischen Bordes ohne Zuschläge muß dabei mindestens gleich der erforderlichen Wanddicke eines zylindrischen Mantels ohne Verschwächung und ohne Zuschläge sein.

Der Anschluß eines zylindrischen Bordes mit größerer Wanddicke als der des zylindrischen Mantels soll nach Bild 19 erfolgen.

5.3.3. Faltenbildung in der Krempe (Krempenbeulung)

Bei dünnwandigen Böden (s_K/d_a <= 0,005) ist nachzuprüfen, ob die Krempe ausreichend gegen Faltenbildung bemessen ist. Faltenbildung in der Krempe ist nicht zu erwarten, wenn der aus Bild 17 in Abhängigkeit von s_K/d_a ermittelte Einbeulüberdruck

p_1 >= p · 1,5 (30)

ist.

Die Beulrechnung der Krempe kann durch einen auf das Beulen bezogenen Berechnungsbeiwert ß $_{KF}$ in die Festigkeitsberechnung einbezogen werden. Aus Gl. (29) und (30) ergibt sich

$ß_{KF}$ = 6/p_7 · σ_{zul} · s_K/d_a (31)

Der Einbeulüberdruck p_7 kann aus Bild 17 ermittelt werden. Die $ß_{KF}$-Werte sind für E_ϑ = 2 · 10^5 N/mm² in den Bildern 15 und 16 für verschiedene σ_{zul} dargestellt. In die Gl. (29) ist jeweils der größere der beiden Werte p'_K oder p'_{KF} einzusetzen.

5.3.4. Halbkugelböden und gewölbte Böden unter äußerem Überdruck

Bei unter äußerem Überdruck stehenden Böden sind alle für inneren Überdruck geltenden Forderungen gemäß den Nummern 5.1 bis 5.3.3 mit einem um 20 % erhöhten Sicherheitsbeiwert zu erfüllen.

Außerdem ist nachzuprüfen, ob im Bereich des Kugelschalenteils kein elastisches Einbeulen auftritt. Mit elastischem Einbeulen ist nicht zu rechnen, wenn der nach der Gl. (32)

$p_B/E_\vartheta = 0{,}366\,(s_V/r_{Wi})^{0,5}$ (32)

bestimmte Einbeulüberdruck

p_S >= p · S_B (33)

ist.

Der Sicherheitsbeiwert S_B kann Tafel 4 entnommen und in die Rechnung eingesetzt werden.

Fußnoten

(1) Red. Anm.: Außer Kraft am 1. Januar 2013 durch die Bek. vom 17. Oktober 2012 (GMBl S. 902)

(2) Amtl. Anm.: Unterschiede bis zu 4 % in den Bruchdehnungen der Werkstoffe von Grundkörper, Abzweig und Verstärkung werden als nicht nennenswerter Unterschied des Verformungsvermögens der Werkstoffe angesehen, wobei d5 14 % nicht unterschritten sein darf (vgl. Nummer 1.2).

(3) Amtl. Anm.: Es ist zu beachten, daß die Umkehrfunktion arc sin den Winkel im Bogenmaß, gemessen auf dem Einheitskreis in rad, liefert. Ergibt sich der Winkel im Gradmaß, so ist er durch Multiplikation mit dem Quotienten 2p /360 in das Bogenmaß umzurechnen.

(4) Amtl. Anm.: Eine eventuell vorhandene scheibenförmige Verstärkung darf den Scheitelbereich von 0,8 . da nicht überschreiten.