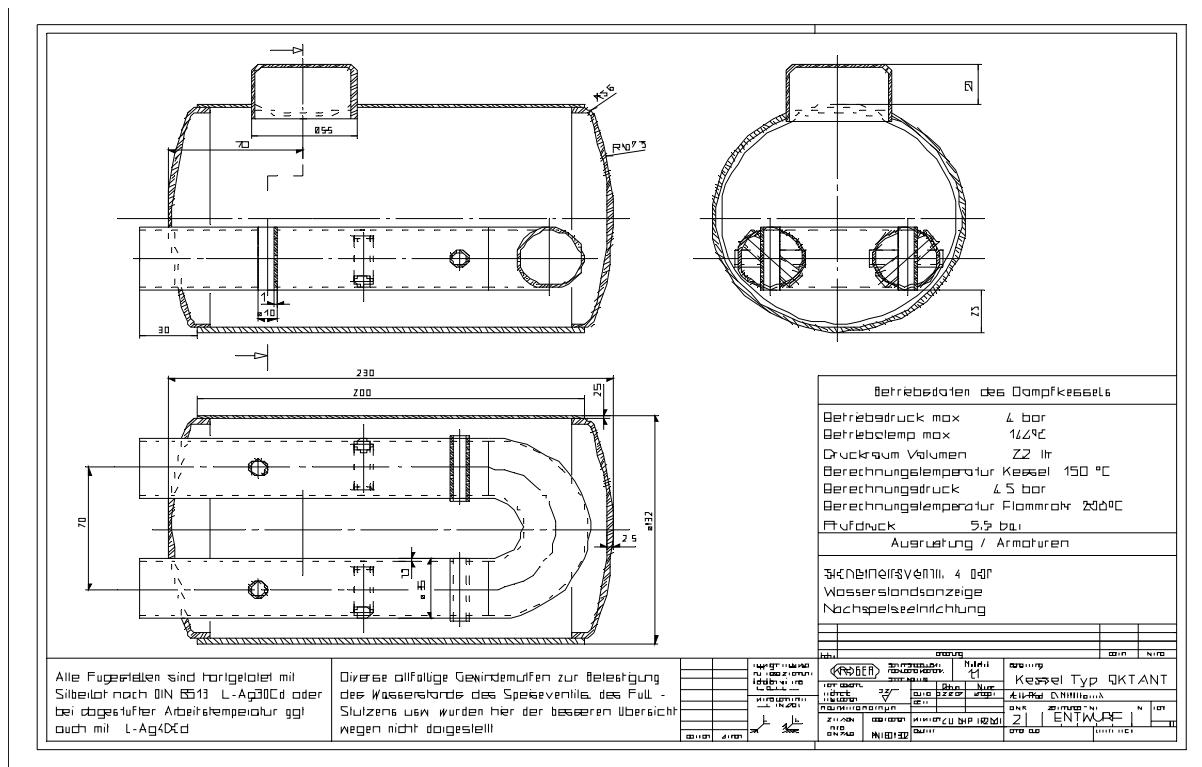


Nachrechnung eines liegenden Dampfkessels aus Kupfer

1.) Eine Übersichts Zeichnung, sowie die Randbedingungen der Berechnung.



2.) Geltungsbereich

Aufgrund seines Inhalt * Volumenprodukts ($p \cdot V$) ist ein solcher Kessel zwar **nicht** überwachungspflichtig im Sinne der europäischen Druckgeräte - Richtlinie, es sollte aber tunlichst eine bewertende sogenannte „Gefahren Analyse“ gemacht werden. Dabei ist die Mindestforderung eine sogenannte „Neubewertung“, welche im einfachsten Falle aus einer fachgerecht ausgeführten Druckprobe besteht. „Neubewertung“ heißt dieser Vorgang, weil er zumindest bei einem neu hergestellten Kessel zwingend erfolgen muß. Die Bauunterlagen (Zeichnungen und Berechnungen und Angaben zum angewendeten Material und zum Füge-Verfahren) sind zwar wünschenswert aber nicht unabdingbar, weil sie nur der rechnerischen Vorprüfung dienen. Diese Vorprüfung soll aber wiederum nur die eigentliche Prüfung, nämlich die Druckprobe „vorbereiten“. Durch eine erfolgreich vollzogene Druckprobe können also auch vorhandene „ALTANLAGEN“ eine gültige Neubewertung erhalten.

Diese Auskunft habe ich aktuell von einem Mitarbeiter des TÜV, der täglich mit diesen Dingen befasst ist und somit ein Mitarbeiter einer „benannten Stelle“ also einer europaweit zugelassenen und registrierten / nummerierten Abnahmebehörde ist. Eine kompetentere Auskunft konnte ich nicht bekommen. Ich hoffe, daß ich das alles so richtig wiedergegeben habe.

Zum Schutz meiner eigenen Person sind diese Angaben aber ohne Gewähr. Im Zweifelsfall sind also eigene Rücksprachen mit einer „benannten Stelle“ angeraten.

3.) Die Berechnung erfolgt hier auf Basis der AD2000-Merkblätter (Berechnungsregeln), die auch für eine überwachungspflichtige Anlage in Originalgröße angewendet werden würden. Eventuell vorgeschriebene Mindest-Wandstärken werden mit dem Hinweis auf die im Merkblatt AD-B0 ; Abs. 10.2 gegebene Möglichkeit auch bewußt unterschritten. Insbesondere im Modellbau Bereich kann man davon Gebrauch machen, wenn ein sorgfältiger Festigkeitsnachweis dieses zulässt. Das Ganze ist die reine Festigkeits Berechnung zur Betriebssicherheit und hat mit einer Berechnung der Verdampfungsleistung (Feuerung, Heizfläche, Speisewasserbedarf usw) nichts zu tun. Berechnet werden also die mindestens erforderlichen Wandstärken folgender Bauteile:

- a.) der Kesselmantel (auch Zarge oder Schuß benannt)
 - b.) die Kessel Böden (End-Deckel)
 - c.) der Dampfdom Mantel
 - d.) der Dampfdom Boden (oberer Deckel)
- auf inneren Überdruck. Und des weiteren die Belastbarkeit für
- e.) das rückkehrende Flammrohr
 - d.) die darin eingefügten Quersiederohre
- in Bezug auf äusseren Überdruck

4.) Randbedingungen

Der Kessel ist vollständig aus Kupfer Cu-DHP (R200) hergestellt.

Der angestrebte Betriebsdruck (Ansprechdruck der Sicherheitsventile) liegt bei max.

4.0 bar. Bei 4bar ist die Satttdampf-Temperatur max. 144°C

Gewählt wurde eine Berechnungstemperatur von 150°C

Gewählt wurde ein Berechnungsdruck von 4,5 bar

Das Bruttvolumen des Kessels liegt bei 2,2 ltr . Der Grenzwert $P \cdot V \leq 50 \text{ bar} \cdot \text{ltr}$ wird

also mit $2,2 \cdot 4,5 = 9,9$ bei weitem nicht erreicht. Für die mit der Flamme der

Feuerung direkt in Berührung kommende Flammrohrwand wurde nach AD-B0_Abs.5 - Tafel1 eine um 50° erhöhte Berechnungstemperatur von 200°C angenommen.

Kleinere „Störungen“ der gleichmäßigen Wandstärken durch Anschluß Nippel für Ventile, Wasserstandsanzeige usw bleiben unberücksichtigt, während größere Ausschnitte (Dampfdom und Flammrohr-Durchtritte) beachtet sind und der entsprechende Verschwächungs-Faktor eingesetzt wurde.

Zunächst ist erst einmal die Temperaturfestigkeit [K] des verwendeten Kupfermaterials zu bestimmen. Im AD-Merkblatt W6/2 finden wir auf Seite 18 die entsprechenden Angaben. Für 100 000 Stunden (das sind immerhin 11 Jahre ununterbrochener Betrieb) Auslegungsdauer sind für das Material bei 150°C 50 Mpa (= 50 N/mm²) zugelassen und bei 200°C nur noch 43 Mpa . Und wir merken uns auch gleich die Festigkeit bei Raumtemperatur mit 57 MPa , weil wir sie später noch benötigen werden.

Um gleich die Frage zu beantworten, ob denn auch Messing geeignet sei, weil es ja als zulässiges Material ebenfalls dort aufgelistet ist, folgender Hinweis:

Das in der Tabelle aufgeführte CuZn20 Al2As enthält nur 20% Zink und wäre also nach der alten Schreibweise ein Ms80 und außerdem enthält es 2%Aluminium und Arsen Spuren. Durch den erhöhten Kupferanteil und die

Zusätze von Aluminium und Arsen wird es einerseits widerstandsfähiger gegen die „Zink Abreicherung“ oder „Entzinkung“, (welche einen porösen Werkstoff hinterlässt) und andererseits hat es dadurch nur noch sehr wenig mit dem handelsüblichen Ms63 oder gar dem Ms58 gemeinsam. Diese beiden zuletzt genannten sind also auch im Regelwerk für den Bau von Druckbehältern ganz eindeutig **NICHT** zugelassen. Das Messingblech/Rohr welches Wileco und andere vergleichbare Hersteller verwenden ist hingegen von dieser geprüften Qualität. Es kann also nicht als Vergleichs-Hinweis dienen , um damit Standard Messing Kessel „schön zu reden“ ! Leider hört man diese Argument immer wieder. Aber es ist exakt aus diesem Grunde falsch ! Ohne alles „Wenn“ und „Aber“ !

Soviel zum Material. Das nächste wäre dann, den erforderlichen Sicherheitsfaktor [S] (Großbuchstabe !) zu bestimmen. Kupfer gehört zu den „zähen“ Metallen die man schmieden kann. Dafür finden wir nach AD-B0_ Abs.9 -Tafel 2 vorgegeben den Wert $S=1,5$ vorgegeben, wobei der Festigkeitswert K für die jeweilige Berechnungstemperatur passend gewählt werden muß.

5.) So,nun ist es an der Zeit , mal die erste Berechnung einer erforderlichen Wanddicke [s] (Kleinbuchstabe !) zu starten. Zuerst also (wie bereits angekündigt) der Kesselmantel. Das machen wir vorab einmal , ohne uns um den großen Mantelausschnitt für den Dampfdom zu kümmern. Das Merkblatt AD-B1 liefert uns unter Abs.5 die Formel 2 . Jedoch mit der Einschränkung der Gültigkeitsbereichs auf Wandstärken die im Bereich : $D_a / D_i \leq 1,2$ liegen.

$$s = \frac{D_a * p}{20 \frac{K}{S} * v + p} + c_1 + c_2 \text{ [mm]}$$

mit folgenden Parametern :

s = erforderliche Wanddicke	in [mm]
P = Berechnungsdruck	in [bar]
K = Festigkeitskennwert des Materials	in [N/mm ²]
S = Sicherheitsfaktor	dimensionslos
v = ggf. Verschwächungsbeiwert	dimensionslos
c ₁ = Zuschlag für Wandstärken Unterschreitung innerhalb der zulässigen Rohr-Toleranzen in [mm].	
c ₂ = Zuschlag für Abnutzungen und Korrosion in [mm]	

folgende Werte werden in diesem Fall hier zugrunde gelegt:

P = 4,5 bar

K = 50 N/mm²

S = 1,5 für Kupfer als zähes Material

v = 1,0 (siehe Anmerkung zum Domausschnitt oben im Text)

c₁ = 0,1 mm

c₂ = 0 mm (rostfreies Material, keine aggressive Umgebung, kein Abrieb)

Siehe auch dazu Merkblatt AD-B0 ; Abs. 9.2.3

$D_a / D_i = 132/127 = 1,04 \leq 1,2$! Der Gültigkeitsbereich der Formel ist also gegeben!

Und nun mit den gewählten Zahlenwerten sieht das dann so aus :

$$s = \frac{132 * 4,5}{20 \frac{50}{1,5} * 1 + 4,5} + 0,1 + 0 \text{ [mm]}$$

$$s = \frac{594}{666,7 + 4,5} + 0,1 \text{ [mm]}$$

$$s = 0,88 + 0,1 = 0,98 \text{ [mm]}$$

So ist es aber noch nicht völlig korrekt , denn wir haben ja vorerst bewußt den Domausschnitt oben unberücksichtigt gelassen. Dafür müssen wir nun einen Verschwächungs - Faktor ermitteln. Klar, man ahnt es schon, wieder exakt nach irgendeiner Vorschrift. In diesem Fall das Merkblatt AD-B9 . Zuerst wird wieder der Geltungsbereich definiert.

$$0,002 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_i} \leq 0,1$$

Hierbei ist s_e die effektiv ausgeführte Wanddicke des verschwächten Zylindermantels. Die übrigen Werte kennen wir ja schon !

Wir ermitteln also : $(2,5 - 0,1 - 0) / 132 = 0,018$

Das passt schon mal zwischen die Untergrenze $0,002 < 0,018 > 0,1$ als Obergrenze ! Weiter geht's auf die Seite 3. Dort stehen unter Abs.4 die Randbedingungen für die Auswahl eines zutreffenden Schaubilds. Falls rechtwinklig angesetzte Stutzen an Zylindermäntel gesetzt sind gelten aus AD-B9 die Bilder 7a bis 7e. An jedem dieser Diagramme ist ein Gültigkeitsbereich definiert , und zwar das Verhältnis S_A / D_i . Dabei ist S_A = Wandstärke des verschwächten Rohrs und D_i = der Innendurchmesser des verschwächten Rohrs.

In unserem Fall hier also : $2,5 / 127 = 0,0196$ Das Diagramm mit dem nächstkleineren Grenzwert ist das Bild 7c mit dem Grenzwert 0,01 . Weil wir beim Mantelrohr und beim Stutzen die gleiche Wandstärke haben ist das Verhältnis 1,0 und die entsprechende Linie der Kurvenschar direkt klar. Mit dem Verhältnis der Innendurchmesser von Stutzenrohr und Mantelrohr $d_i / D_i = 50/127 = 0,39$ ist auch schnell der Wert für die waagerechte Diagramm-Achse gefunden . Dort von 0,39 ausgehend stossen wir senkrecht nach oben gehend auf die 1,0- Kurve und von diesem Schnittpunkt aus finden wir links dann endlich den gesuchten Verschwächungs - Faktor „v“ $v = 0,56$

Korrekt gerechnet sieht es also folgendermassen aus :

$$s = \frac{132 * 4,5}{20 \frac{50}{1,5} * 0,56 + 4,5} + 0,1 + 0 \text{ [mm]}$$

$$s = \frac{594}{373 + 4,5} + 0,1 \text{ [mm]}$$

$s = 1,57 + 0,1 = 1,7 \text{ [mm]}$ ist die erforderliche mindest Wanddicke für den Kesselmantel . Vorhanden sind demgegenüber 2,5 mm.

6.)Als nächstes nehmen wir und die Böden (End-Deckel) vor. Sie entsprechen leider in diesem Fall nicht der üblichen Klöpperboden-Form mit

Wölbungsradius = Durchmesser . Und auch nicht der etwas älteren Korbbogen-Form mit Wölbungsradius = 0,8 * Durchmesser . Und schon gar nicht der drucktechnischen Idealform, den Halbkugel Böden mit Wölbungsradius = 0,5 * Durchmesser , oder etwa den in USA beliebten Ellipsenböden mit dem stetig ansteigendem / abfallenden Radius einer 1:2 Ellipse. Daher kommt hier nicht das AD-B3 Merkblatt für „tief gewölbte“ Böden zum Einsatz, sondern wir müssen uns mit den flach gewölbten, sogenannten Tellerböden auseinander setzen . Die finden wir im AD-B4 Merkblatt . Auch hier gehen wir wieder stufenweise vor und berechnen zuerst den Boden ohne Ausschnitte. Und schon finden wir wieder einen vorgegebenen Geltungsbereich :

$$0,005 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{R} \leq 0,1$$

Dabei ist „R“ der Innenradius des Bodens. $187 - 2,5 = R = 184,5$ Gerundet 184. Die übrigen Formelglieder sind wie schon mal gehabt .
 $(2,5 - 0,1 - 0) / 184 = 0,013$. $0,005 < 0,013 < 0,1$ Der Geltungsbereich ist also gegeben ! Zu Beachten ist, daß Tellerböden gewöhnlich mit Flansch und Dichtung am Mantelrohr angebracht sind. Der „Blechboden“ wird dabei dann nicht **nur** durch den Kesseldruck nach aussen gewölbt, sondern er bekommt noch ein **zusätzliches** Randmoment , welches dieses „nach Aussen Wölben“ verstärkt. Das Randmoment entsteht durch die Spannkraft der Schrauben und den Abstand der Schrauben zur Mitte der weichen (als Gelenk wirkenden) Dichtung. Weil das bei unserer Bauweise nicht zutrifft , dürfen wir die Mindest-Wandstärke der Kugel-Kalotte berechnen mit der Formel nach Seite 4 Abs. 8.3.1 zu :

$$s = \frac{R * p}{20 \frac{K}{S} * v + p} + c_1 + c_2 \text{ [mm]}$$

Und mit den bereits bekannten Zahlenwerten erhalten wir dann:

$$s = \frac{184 * 4,5}{20 \frac{50}{1,5} * 1 + 4,5} + 0,1 + 0 \text{ [mm]}$$

$$s = \frac{828}{666,7 + 4,5} + 0,1 \text{ [mm]}$$

Für den Deckel ohne Flammrohr-Ausschnitte benötigen wir also nur 1,33 mm Wandstärke !

Aber für die Gegenseite steht uns ja wieder ein Verschwächungs Faktor nach Merkblatt AD-B9 an, welcher beachtet werden muß. An jedem dieser Diagramme ist ein Gültigkeitsbereich definiert , und zwar das Verhältnis S_A / D_i . Dabei ist S_A = Wandstärke des verschwächten Rohrs und D_i = der Innendurchmesser des verschwächten Rohrs. Alles wie schon gehabt ! Nur haben wir es jetzt mit einer Kugelkalotte zu tun und daher sind die Bilder 8a bis 8c zuständig.

In unserem Fall hier also : $2,5 / 127 = 0,0196$ Das Diagramm mit dem nächstkleineren Grenzwert ist das AD-B9 ; Bild 8a mit dem Grenzwert 0,02 . Weil wir beim Mantelrohr und beim Stutzen diesmal nicht gleiche Wandstärke haben ist das Verhältnis zu bestimmen. Stutzendicke zu Kalottendicke ist $1,5 / 2,5 = 0,6$ und somit die entsprechende Linie der Kurvenschar auch wieder klar.

Abgelesen wir der Wert $v = 0,76$

$$s = \frac{184 \cdot 4,5}{20 \cdot \frac{50}{1,5} \cdot 0,76 + 4,5} + 0,1 + 0 \text{ [mm]}$$

$$s = \frac{828}{506,7 + 4,5} + 0,1 \text{ [mm]}$$

$s = 1,72 \text{ mm}$ ist dann die erforderliche Wandstärke für den Deckel mit den Flammrohr Ausschnitten. Vorhanden ist demgegenüber eine Wandstärke von $2,5 \text{ mm}$.

7.) Nun geht es an den Mantel des Dampfdoms. Genau wie beim Kesselmantel unter Punkt 5 !

Das Merkblatt AD-B1 lieferte uns dort unter Abs.5 die Formel 2. Jedoch mit der Einschränkung der Gültigkeitsbereichs auf Wandstärken die im Bereich : $D_a / D_i \leq 1,2$ liegen. Kontrolle: $55/50=1,1$ Also ok !

$$s = \frac{D_a \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 \text{ [mm]}$$

Diesmal haben wir aber :

$$s = \frac{55 \cdot 4,5}{20 \cdot \frac{50}{1,5} \cdot 1 + 4,5} + 0,1 + 0 \text{ [mm]}$$

$$s = \frac{247,5}{666,7 + 4,5} + 0,1 \text{ [mm]}$$

$$s = 0,36 + 0,1 = 0,46$$

$s = 0,5 \text{ [mm]}$ ist die erforderliche mindest Wanddicke für den Dampfdom Mantel .

8.) Der Dom-Deckel besitzt hier aber keinerlei Wölbung und muß daher nach Merkblatt AD-B5 (für ebene Böden) dimensioniert werden . Die Formel lautet diesmal :

$$s = C \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{S \cdot p}{10 \cdot K}} + c_1 + c_2 \text{ [mm]}$$

Dabei ist D_1 = Innendurchmesser - Eckradius innen. Und den Wert „C“ liefert uns die Tafel 1 mit Bild-a als $C = 0,3$. Den Grenzwert des Innenradius von mindestens 30 mm dürfen wir hier aufgrund der geometrischen Ähnlichkeit (Modellmaßstab) unterschlagen. Mit diesen Werten erhalten wir :

$$s = 0,3 \cdot 48 \cdot \sqrt{\frac{4,5 \cdot 1,5}{10 \cdot 50}} + 0,1 + 0 \text{ [mm]}$$

$$s = 14,4 \cdot \sqrt{0,0135} + 0,1 \text{ [mm]}$$

$$s = 1,67 + 0,1 = 1,77 \text{ [mm]}$$

$s = 1,8 \text{ [mm]}$ ist die erforderliche mindest Wanddicke für den Dampfdom Deckel .

9.) Nun aber kommt für zylindrische Rohre unter äußerem Überdruck eine andere Betrachtungsweise ins Spiel ! Es muß daher nach Merkblatt AD-B6 kontrolliert werden . Dort geht man von konstruktiv vorgegebenen Dimensionen aus und ermittelt den Druck den sie ertragen können. Wie schon gehabt , überprüfen wir zuerst einmal den Gültigkeitsbereich für die verwendeten Formeln . Gefordert ist $D_a / D_i \leq 1,7$ weil $D_a \leq 200$ mm ist. Das trifft sowohl für die Quersiederrohre als auch für das (zum End-Deckel) rückkehrende Flammrohr zu. $10/8 = 1,25$ und $35/32 = 1,09$ Also beide ok ! Als Sicherheitsfaktor gegen plastische Verformung ist hier nach Tafel 1 für Kupfer $S = 4,0$ und gegen elastisches Einbeulen $S_K = 3,0$ vorgegeben.

Grundsätzlich werden dabei 3 verschiedene Grenz-Druckwerte betrachtet.
 $p_1 \gg$ wegen Gefahr gegen elastisches Einbeulen des Rohrs, was bei unserer niedrigen Druckbelastung eher nicht zu treffen wird. Aber wir wollen es wenigstens einmal prüfen, um den Vorgang mal zu sehen . . .
 $p_2 \gg$ wegen Gefahr gegen plastische Verformung . Die zugeordnete Formel ist aber sehr unübersichtlich und es gibt daher auch die Alternative nach Merkblatt AD-B6 aus dem Bild 7 eine erforderliche Wandstärke zu ermitteln.

Als Erstes also p_1 . Die Formel lautet diesmal :

$$p_1 = \frac{E}{S_K} * \frac{20}{2 - \nu^2} * \left(\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \right)^3 \text{ [bar]}$$

Hier tauchen neue Parameter auf . Zunächst der Elastizitäts-Modul „E“ des Materials (Kupfer). Das ist die Zugspannung die man aufbringen muß, wenn man einen Körper (beispielsweise einen Gummifaden oder ...) einen Metallstab elastisch (federnd) in die Länge ziehen will. Den Zahlenwert für Kupfer finden wir im Merkblatt AD-W6/2 auf Tafel 14.

Für 150°C finden wir dort 122 GPa . Diese 122 Giga-Pascal sind dann in der üblichen Schreibweise nach AD-B0 = 122 000 N/mm². Ein weiterer neuer Wert ist die Querkontraktionszahl „ ν “, die angibt, um wieviel ein Körper (beispielsweise ein Gummifaden) dünner wird, wenn man ihn in die Länge zieht. Für Stahl ist der Verhältniswert gleich im AD Merkblatt mit 0,3 angegeben. Für Kupfer müssen wir den Wert aus der allgemeinen Literatur erst noch besorgen. Für Kupfer finden wir dort 0,35 .

Die übrigen Werte sind uns ja schon aus den bisherigen Formeln bekannt . Unsere Quersiederrohre haben einen Aussen Durchmesser $D_a = 10$ mm und eine effektive Wandstärke $s_e = 1$ mm bei einer Baulänge von 35 mm.

$$p_1 = \frac{122\,000 \text{ N/mm}^2}{3,0} * \frac{20}{2 - 0,122} * \left(\frac{1 - 0,1 - 0}{10} \right)^3 \text{ [bar]}$$

$$P_1 = 40667 * 10,65 * 0,09^3 \text{ bar}$$

$$p_1 = 315 \text{ bar}$$

Das ist zwar **in unserem Fall** ein relativ absurder Wert, aber es war ja auch (wie schon oben erwähnt) nicht anders zu erwarten bei unseren Modell Dimensionen ! Hier sollte man eigentlich nur nachrechnen bei hohen

Drücken (Hydraulik Bereich mit einigen Hundert bar) und dickwandigen Rohren. Aber so etwas merkt man erst, wenn man es öfters macht. Und einfach behaupten: „das brauchen wir nicht, elastisches Einbeulen kommt hier nicht in Frage“, wäre denn doch zu banal.

Für das Flammrohr werden wir uns diesen Nachweis aber ersparen! Weiter geht es vorerst mit dem Nachweis gegen plastische Verformung der Quersiederohre.

Da sollten wir tunlichst mal den Grenzwert p_2 ermitteln. Die Formel dazu hat wieder mal nur einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich der mit der „Unrundheit“ der Rohre zusammen hängt. Also wie weit sie von der idealen Kreisform im Querschnitt abweichen. Den Grenzwert von 1,5% des Rohrdurchmessers können wir schnell nach der Formel im Merkblatt ermitteln. Unter 7.3.4 ist dort angegeben:

$$u = 2 * \frac{D_{I \max} - D_{I \min}}{D_{I \max} + D_{I \min}} * 100$$

Nehmen wir an, der Innendurchmesser schwankt um 0,1 mm = $\pm 0,05$ zum Nennmaß, dann haben wir $D_{I \max} = 8,05$ und $D_{I \min} = 7,95$ mm. Dann ist „u“:

$$u = 2 * \frac{8,05 - 7,95}{8,05 + 7,95} * 100$$

$$u = 2 * 0,1/16 * 100 = 1,25 \%$$

Der zweite Grenzwert ist das Verhältnis vom Aussen Durchmesser zur freien (ungestützten) Rohrlänge.

Dieser darf nicht größer als „5“ sein, wenn wir die Formeln nach Merkblatt AD-B6, Abs. 7.3.3 anwenden wollen. $D_a/l = 10/35 = 0,28 \leq 5!$ Also ok. Wie bereits oben erwähnt, werden wir jedoch nicht die „krause“ Formel anwenden, sondern lieber das Diagramm nach AD-B6; Bild-7 benutzen. Dazu müssen wir erst einmal den Eingangswert in das Diagramm ermitteln. Dieser lautet: $10 * P * S / K$ also in unserem Fall

$$10 * 4,5 \text{ bar} * 4,0 / 50 \text{ N/mm}^2 = 3,6$$

Das ist dabei die in unserem Fall zutreffende Material bezogene Belastung. Mit $D_a/l = 0,28$ liegen wir in der Kurvenschar zwischen 0 und 1,0. Und wir können so das geometrisch notwendige Verhältnis von Rohrdurchmesser zur Wandstärke, welches der ermittelten Belastung widersteht, auf der anderen Diagrammachse ablesen.

0,34 ist der Wert.

Und die „Einheit“ der Skalierung ist: $Da / ((s_e - c_1 - c_2) * 10^2)$ mm/mm

Für uns gilt also: $0,34 * Da / ((s_e - c_1 - c_2) * 10^2)$ mm/mm = 1 (dimensionslos)

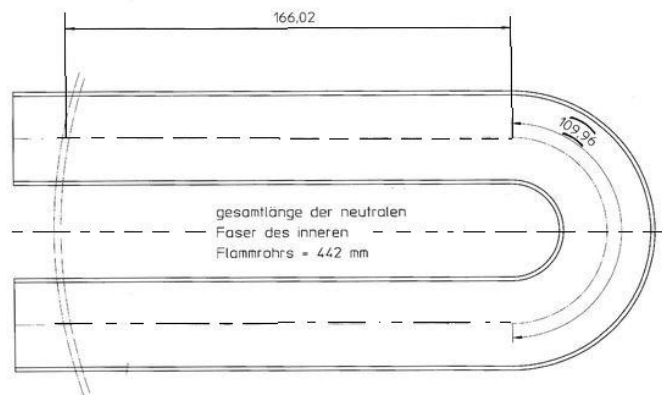
oder mit eingesetzten Zahlenwerten: $0,34 * 10 \text{ mm} / 100 = s_e - 0,1 \text{ mm} - 0$

$$0,034 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm} = s_e \text{ [mm]}$$

$$s_e = 0,14 \text{ mm}$$

Die Quersiede-Rohre müssen also mindestens 0,14 mm Wandstärke aufweisen. Vorhanden ist demgegenüber eine Wandstärke von 1,0 mm!

10.) In gleicher Weise kontrollieren wir auch das Flammrohr, wobei wegen der direkten Berührung mit der Feuerung der verminderte Festigkeitskennwert für $200^{\circ}\text{C} = 43 \text{ N/mm}^2$ zu beachten ist. Die freie Rohrlänge bestimmen wir am einfachsten zeichnerisch.



Zwei Geraden a 166,02 mm und ein Bogen a 109,96 mm ergeben zusammen eine Länge von $l = 442 \text{ mm}$.

Zuerst wieder die Gültigkeitskontrolle : $D_a / l = 35 / 442 = 0,08 \leq 5$! Also ok.

Dazu müssen wir wieder den Eingangswert in das Diagramm ermitteln.

Dieser lautet: $10 * P * S / K$ also in unserem Fall mit $K_{200^{\circ}\text{C}} = 43$

$$10 * 4,5 \text{ bar} * 4,0 / 43 \text{ N/mm}^2 = 4,2$$

Das ist also die Material bezogene Belastung. Mit $D_a / l = 0,08$ liegen wir in der Kurvenschar fast bei 0. Und wir können so das geometrisch notwendige Verhältnis von Rohrdurchmesser zur Wandstärke, das der ermittelten Belastung widersteht, auf der anderen Diagrammachse ablesen.

0,28 ist diesmal der Wert.

Für uns gilt also : $2,8 * D_a / ((s_e - c_1 - c_2) * 10^2) \text{ mm/mm} = 1$ (dimensionslos)

oder mit eingesetzten Zahlenwerten : $0,28 * 35 \text{ mm} / 100 = s_e - 0,1 \text{ mm} - 0$

$$0,098 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm} = s_e \text{ [mm]}$$

$$s_e = 0,2 \text{ mm}$$

Das Flammrohr muss also mindestens 0,2 mm Wandstärke aufweisen.

Vorhanden sind aber demgegenüber 1,5 mm Wandstärke !

Auch diese mindest-Wanddickenberechnung basiert auf 4,5 bar ! Die Sicherheitsventile wollten wir nur auf 4,0 bar justieren. Das waren unsere eingangs gewählte Betriebsbedingung.

Diese Differenz von 0,5 bar haben wir uns also problemlos als zusätzliche Betriebssicherheit leisten können !

11.) Mit diesen Randbedingungen wollen wir nun abschließend noch den Prüfdruck für die Kaltwasser Druckprobe ermitteln. Denn durch diesen Vorgang erhalten wir ja die gewünschte „**Neubewertung**“ unseres Kessels. Wie man dabei **fachkundig** vorzu gehen hat, beschreibt im Detail das Merkblatt für **H**-erstellung und **P**-röfung HP-30 im Detail.

Der auf zu bringende Prüfdruck errechnet sich dabei nach folgenden Formeln :
Falls die Temperatur-Festigkeitswerte des Kesselmaterials nicht bekannt sind, gilt:

$$P_{\text{prüf}} = P_{\text{nenn}} * 1,43$$

Sind die Temperatur-Festigkeitswerte hingegen bekannt, so ist es besser die andere alternative Formel anzuwenden.

Dabei gilt: $P_{\text{prüf}} = P_{\text{nenn}} * 1,25 * K_{20^\circ} / K_{\theta}$

Es Wird also das Verhältnis der Materialfestigkeit bei Raumtemperatur zu Materialfestigkeit bei der maximal vorgesehenen Betriebstemperatur in Rechnung gestellt.

In unserem Fall also:

$$P_{\text{prüf}} = 4,0 \text{ bar} * 1,25 * 57 \text{ N/mm}^2 / 43 \text{ N/mm}^2 = 5,0 * 1,32 \text{ bar}$$

$$P_{\text{prüf}} = 6,6 \text{ bar} !$$

Dieser Druck darf nicht wesentlich überschritten werden, weil er sonst (von aussen unsichtbare) Veränderungen (Schädigungen) im Kesselmaterial hervorrufen könnte.

Und der Prüfdruck soll über eine angemessene Zeit (15...20 Minuten) konstant ohne abzufallen anstehen.

Über diesen Vorgang ist ein Protokoll zu erstellen, in welchem die Hauptabmessungen (Länge / Aussendurchmesser) und ggf. eine Bau-Nummer des Kessels aufgeführt sind , um eine eindeutige Zuordnung des Protokolls zum Prüfobjekt möglich zu machen.

Ferner natürlich das Datum der Prüfung , der Prüfdruck und die Haltezeit dieses Prüfdrucks.

Es ist von Vorteil, wenn es auch von einem unabhängigen und sachkundigen Dritten , der den Prüfvorgang als Zeuge mitverfolgt hat, zusätzlich ebenfalls unterzeichnet wird.

Dass man nicht mit kompressiblen Medien (z. B.) Druckluft abdrücken darf ist selbstverständlich ! Das wäre wegen der in Pressluft gespeicherten Energie eine unverantwortliche „Bomben“ Herstellung . . .

=====
Ja. Das war es , was hier mal beispielhaft aufgezeigt werden sollte.

Immerhin sind es nun knapp 10 Seiten geworden.

Die AD - Merkblätter sind geschützt und dürfen nicht vervielfältigt werden. Soweit sie aber für dieses Rechenbeispiel verwendet wurden, habe ich kleinstmögliche Ausschnitte davon in einer getrennten Datei sichtbar gemacht und stelle diese (auf Anforderung , z.B. e-mail) ausschließlich als Ergänzung zum obigen Text getrennt zur Verfügung. Eine andere Nutzung dieser Datei als die Begleitung der oben gezeigten Beispiel-Berechnung bleibt nach wie vor verboten.