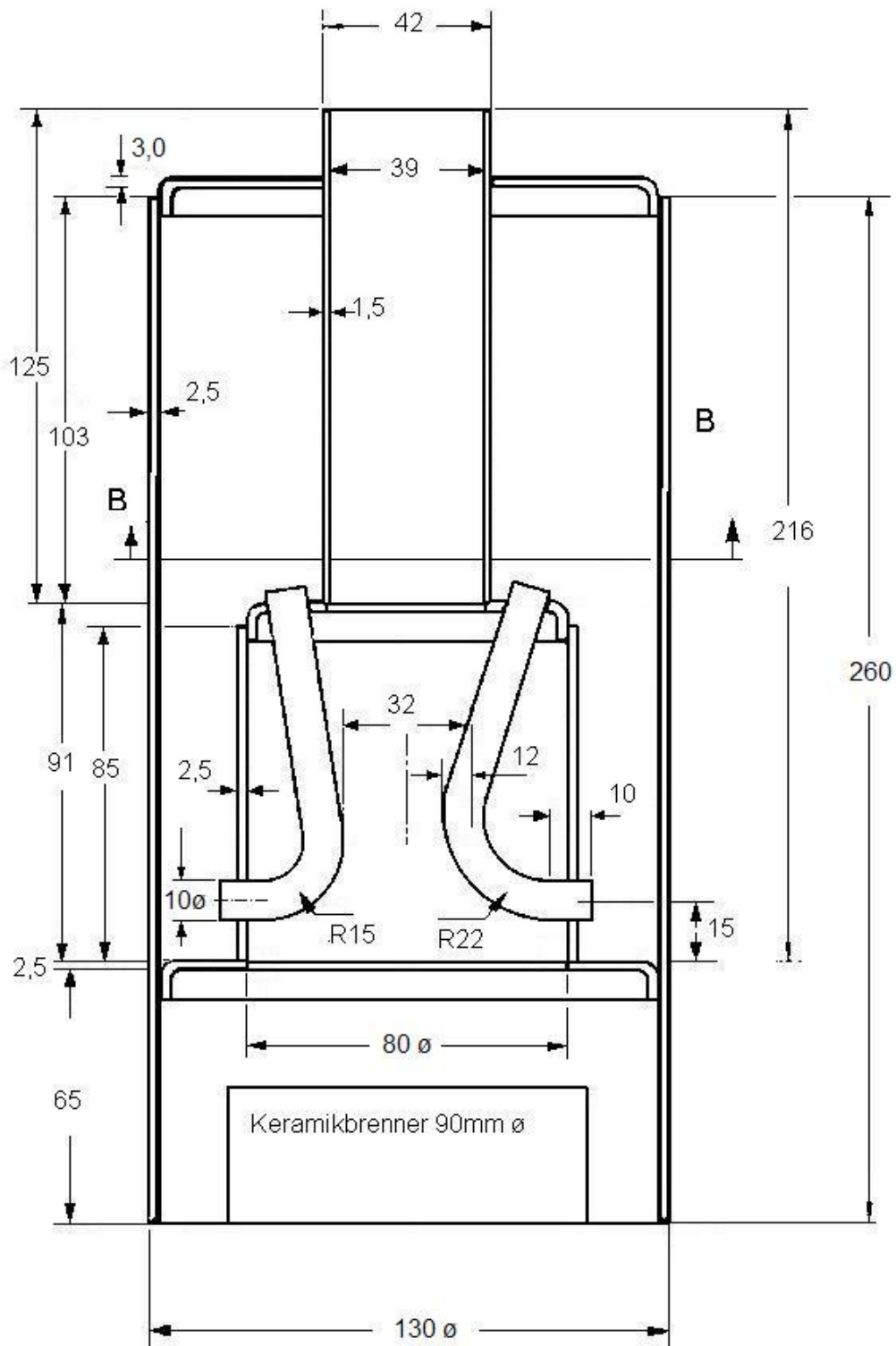


# Nachrechnung eines stehenden Dampfkessels aus Kupfer

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



## 2.) Betriebsdaten:

Betriebsdruck max. 5,0 bar

Betriebstemperatur 158,8°C

**Berechnungsdruck jedoch 6 bar**

Berechnungstemperatur 160°C ( in der Feuerbuchse 210°C )

Rauminhalt ( überschlägig )  $(12,5^2 - 4,2^2) * \text{Pi}/4 \text{ cm}^2 * 10,3 \text{ cm} = 1121 \text{ cm}^3$  [Oberteil]  
und  $(12,5^2 - 8,5^2) * \text{Pi}/4 \text{ cm}^2 * 9,2 \text{ cm} = 607 \text{ cm}^3$  [Unterteil]. Insgesamt also 1,73 Liter.

Aufgrund seines Inhalt \* Volumenprodukts ( $p*V$ ) 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 fachgerecht ausgeführten Druckprobe durch den Hersteller. ( Neubewertung )

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 Festikeitsnachweis 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.) die Siederohre

auf **inneren** Überdruck.

Und des weiteren die Belastbarkeit für

d.) die Feuerbüchse

e.) der Kamin

in Bezug auf **äusseren** Überdruck

## 4.) Randbedingungen

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

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

4.0 bar. Bei 4bar ist die Sattedampf-Temperatur max. 151°C

Gewählt wurde eine Berechnungstemperatur von 150°C

Gewählt wurde ein Berechnungsdruck von 5 bar

Das Brutto-Volumen des Kessels liegt bei 1,8 ltr . Der Grenzwert  $P*V \leq 50 \text{ bar*ltr}$  wird also mit  $1,8 * 5 = 9$  bei weitem nicht erreicht. Für die mit der Flamme der Feuerung direkt in Berührung kommende Flammrohrwand wurde nach AD-B0\_Abs.5 -

Tafel 1 eine um 50° erhöhte Berechnungstemperatur von 210°C angenommen.

Kleinere „Störungen“ der gleichmäßigen Wandstärken ( durch Anschluß Nippel für Ventile, Wasserstandsanzeige usw ) bleiben unberücksichtigt.

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 160°C 49 Mpa ( = 49 N/mm<sup>2</sup> ) zugelassen und bei 210°C nur noch 41 Mpa . Und wir merken uns auch gleich die Festigkeit bei Raumtemperatur mit 57 MPa , weil wir sie später noch benötigen werden.

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 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.

mit folgenden Parametern :

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

folgende Werte werden in diesem Fall hier zugrunde gelegt:

P = 6,0 bar

$K_{160^\circ\text{C}} = 49 \text{ N/mm}^2$

$K_{210^\circ\text{C}} = 41 \text{ N/mm}^2$

S = 1,5 für Kupfer als zähes Material

v = 1,0

c<sub>1</sub> = 0,1 mm

c<sub>2</sub> = 0 mm ( rostfreies Material, keine aggressive Umgebung, kein Abrieb )

Siehe auch dazu Merkblatt AD-B0 ; Abs. 9.2.3

$D_a / D_i = 130/125 = 1,04 \leq 1,2$  ! Der Gültigkeitsbereich der Formel ist also gegeben!

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

$$s = \frac{130 * 6,0}{20 \frac{49}{1,5} * 1 + 6,0} + 0,1 + 0 \text{ [ mm ]}$$

$$s = \frac{780}{653 + 6,0} + 0,1 \text{ [ mm ]}$$

$$s = 1,3 \text{ [ mm ]}$$

6.) Die Siederohre:

Weil sie im Feuerraum liegen ist der Festigkeitswert „K“ mit nur 41 N/mm<sup>2</sup> anzusetzen!

$$s = \frac{10 * 6,0}{20 \frac{41}{1,5} * 1 + 6,0} + 0,1 + 0 \text{ [ mm ]}$$

$$s = \frac{60}{573 + 6,0} + 0,1 \text{ [ mm ]}$$

$$s = 0,2 \text{ [ mm ]}$$

7.) Als nächstes nehmen wir uns die Böden ( End-Deckel ) vor.

Hier handelt es sich um ebene **gekrempte** Böden mit einem zentralen **Zuganker** ( hier das Kamin-Rohr ) und über den Mantel gegenseitig verankert sind. Daher benutzen wir das AD-Merkblatt B5. Absatz 6.5.1 . Da nur ein einziges inneres Anker-Rohr vorhanden ist wählen wir den Faktor C<sub>2</sub> nach Tafel 2 Abbildung „b“ mit 0,25 .

Dort lautet die Formel :

$$s = C_2 * (D_1 - d_1) * \sqrt{\frac{p * S}{10 * K}} + c_1 + c_2 \text{ [ mm ]}$$

d<sub>1</sub> ist Durchmesser des Ausschnitts für das Kamin-Rohr. bzw. unten das Mantelrohr der Feuerbüchse und D<sub>1</sub> der Aussendurchmesser des Bodens.

Beachten müssen wir noch , dass der Festigkeitskennwert K im Bereich der Feuerbüchse niedriger ist. (siehe oben)

Zuerst der obere Boden:

$$s = 0,25 * (125-42) * \sqrt{\frac{6,0 * 1,5}{10 * 49}} + 0,1 + 0 \text{ [ mm ]}$$

$$s = 20,7 * \sqrt{0,018} + 0,1 \text{ [ mm ]}$$

$$s = 2,9 \text{ [ mm ]}$$

Nun die Feuerbüchsen Decke:

$$s = 0,25 * (80-42) * \sqrt{\frac{6,0 * 1,5}{10 * 41}} + 0,1 + 0 \text{ [ mm ]}$$

$$s = 9,5 * \sqrt{0,022} + 0,1 \text{ [ mm ]}$$

$$s = 1,5 \text{ [ mm ]}$$

Und schließlich noch der untere Boden :

$$s = 0,25 * (125-85) * \sqrt{\frac{6,0 * 1,5}{10 * 41}} + 0,1 + 0 \text{ [ mm ]}$$

$$s = 10,0 * \sqrt{0,022} + 0,1 \text{ [ mm ]}$$

$$s = 1,6 \text{ [ mm ]}$$

7.) 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 das Kaminrohr zu. Ebenso auch für das Mantelrohr der Feuerbüchse.  $42/39 = 1,08$  und auch  $85/80 = 1,06$  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 2 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 . . .

p2 >> 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<sub>1</sub> . 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/mm<sup>2</sup> . 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 .

Unser Kaminrohr hat einen Aussen Durchmesser D<sub>a</sub> = 42 mm und eine effektive Wandsstärke s<sub>e</sub> = 1,5 mm bei einer Baulänge von 35 mm.

$$p_1 = \frac{122\,000 \text{ N/mm}^2}{3,0} * \frac{20}{2 - 0,122} * \left( \frac{1,5 - 0,1 - 0}{10} \right)^3 [ \text{bar} ]$$

$$P_1 = 40667 * 10,65 * 0,14^3 \text{ bar}$$

$$p_1 = 1188 \text{ bar}$$

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 den Feuerbüchsen Mantel werden wir uns diesen Nachweis aber ersparen !

Weiter geht es vorerst mit dem Nachweis gegen plastische Verformung der Feuerbüchse. Da sollten wir tunlichst mal den Grenzwert p2 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 der maximal 1,5% des Rohrdurchmessers sein darf, 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 der Feuerbüchse schwankt um 0,2 mm = ± 0,1 zum Nennmaß, dann haben wir  $D_{I \max} = 80,1$  und  $D_{I \min} = 79,9$  mm. Dann ist „u“:

$$u = 2 * \frac{80,1 - 79,9}{80,1 + 79,9} * 100$$

$$u = 2 * 0,2/160 * 100 = 0,25 \%$$

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.  $D_a / l = 85/85 = 1,0 \leq 5!$  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:  $10 * p * S / K$  wobei wegen der direkten Berührung mit der Feuerung der verminderte Festigkeitskennwert für 210°C = 41 N/mm<sup>2</sup> zu beachten ist. Also in unserem Fall:

$$10 * 6,0 \text{ bar} * 4,0 / 41 \text{ N/mm}^2 = 5,85$$

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

0,24 ist der Wert.

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

Für uns gilt also:  $0,24 * D_a / ((s_e - c_1 - c_2) * 10^2)$  mm/mm = 1 (dimensionslos)

oder mit eingesetzten Zahlenwerten:  $0,24 * 85 \text{ mm} / 100 = s_e - 0,1 \text{ mm} - 0$

$$0,20 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm} = s_e \text{ [mm]}$$

$$s_e = 0,3 \text{ mm}$$

Die Feuerbüchse müsste also mindestens 0,3 mm Wandstärke aufweisen. Vorhanden ist demgegenüber eine Wandstärke von 2,5 mm!

10.) In gleicher Weise kontrollieren wir auch das Kamin-Rohr, wobei hier aber wieder der Festigkeitskennwert für 160°C = 49 N/mm<sup>2</sup> angewendet werden darf.

Die freie Rohrlänge ist mit 103 mm vorgegeben.

Zuerst wieder die Gültigkeitskontrolle:  $D_a / l = 42 / 103 = 0,41 \leq 5$  ! Also ok.

Dazu müssen wir wieder den Eingangswert in das Diagramm ermitteln.

Dieser lautet:  $10 * p * S / K$  also in unserem Fall mit  $K_{150^\circ\text{C}} = 50 \text{ N/mm}^2$   
 $10 * 6,0 \text{ bar} * 4,0 / 49 \text{ N/mm}^2 = 4,89$

Das ist also die Material bezogene Belastung. Mit  $D_a / l = 0,41$  liegen wir in der Kurvenschar sehr niedrig. Und wir können so das geometrisch notwendige Verhältnis von Rohrdurchmesser zur Wandstärke, das der ermittelten Belastung widersteht, auf der anderen Diagrammachse ablesen.

0,26 ist diesmal der Wert.

Für uns gilt also:  $0,26 * D_a / ((s_e - c_1 - c_2) * 10^2) \text{ mm/mm} = 1$  (dimensionslos)

oder mit eingesetzten Zahlenwerten:  $0,26 * 42 \text{ mm} / 100 = s_e - 0,1 \text{ mm} - 0$

$0,109 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm} = s_e \text{ [mm]}$

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

Das Kamin-Rohr müsste also mindestens 0,2 mm Wandstärke aufweisen. Vorhanden sind aber demgegenüber 1,5 mm Wandstärke !

Auch diese mindest-Wanddickenberechnung basiert auf 6,0 bar ! Die Sicherheitsventile wollten wir nur auf 5,0 bar justieren. Das waren unsere eingangs gewählte Betriebsbedingung.

Diese Differenz von 1,0 bar haben wir uns also bei der Feuerbuchsen Decke gerade noch 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:

$$P_{\text{prüf}} = 5,0 \text{ bar} * 1,25 * 57 \text{ N/mm}^2 / 49 \text{ N/mm}^2 = 5,0 * 1,45 \text{ bar}$$

$$P_{\text{prüf}} = 7,25 \text{ bar} \quad !$$

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 9 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.