

XV. Konstruktionsteile und Berechnung auf Festigkeit.

1. Allgemeines.

Mit Rücksicht auf die große Gefahr, welcher Leben und Eigentum der von einer Kesselexplosion betroffenen Menschen ausgesetzt sind, sind gesetzliche Vorschriften erlassen worden, welche die Anforderungen festlegen, die an die Güte der Baustoffe, die Abmessungen der einzelnen Teile des Kessels, die Ausrüstung, Aufstellung und Prüfung zu stellen sind. Das Reichsgesetz, welches diese Vorschriften für ortsfeste Anlagen enthält, ist auf Grund des § 24 Abs. 2 der Reichsgewerbeordnung am 17. Dezember 1908 unter dem Namen „Allgemeine polizeiliche Bestimmungen über die Anlegung von Landdampfkesseln“ vom Bundesrat erlassen worden.

In diesem Gesetz heißt es in § 2 Abs. 1:

Jeder Dampfkessel muß in bezug auf Baustoff, Ausführung und Ausrüstung den anerkannten Regeln der Wissenschaft und Technik entsprechen. Als solche Regeln gelten bis auf weiteres die in den Anlagen I und II zusammengestellten Grundsätze, welche entsprechend den Bedürfnissen der Praxis und den Ergebnissen der Wissenschaft auf Antrag oder nach Anhörung einer durch die Vereinbarung der verbündeten Regierungen anerkannten Sachverständigenkommission fortgebildet werden.

Die in der Anlage I zusammengestellten „Materialvorschriften für Landdampfkessel“ entsprechen, bis auf einige durch neuere Erkenntnisse bedingte Abänderungen, den bis dahin unter dem Namen „Würzburger Normen 1905“ bekannten „Grundsätzen für die Prüfung von Schweiß- und Flußeisen zum Bau von Dampfkesseln“. Ebenso entsprechen die „Bauvorschriften für Landdampfkessel“, Anlage II, den „Grundsätzen für die Berechnung der Materialdicken neuer Dampfkessel“, bekannt als „Hamburger Normen 1905“ mit der Abänderung, daß nunmehr mit geringerer Sicherheit, d. h. höheren Materialbeanspruchungen gerechnet werden darf.

Unter dem gleichen Datum vom 17. Dezember 1908 sind die „Allgemeinen polizeilichen Bestimmungen über die Anlegung von Schiffsdampfkesseln“ erlassen, mit den Anlagen: I. Materialvorschriften für Schiffsdampfkessel und II. Bauvorschriften für Schiffsdampfkessel.

Im folgenden wird auf Grundlage dieser Vorschriften die Berechnung der Dampfkessel auf Festigkeit behandelt. Teilweise sind die Formeln und Erläuterungen wörtlich abgedruckt.

2. Die Baustoffe.

Als Baustoffe für Dampfkessel kommen Schweißisen, Flußeisen, Stahl und für einzelne Teile Gußeisen und Kupfer in Betracht.

Während früher Schweißisen¹⁾ fast ausschließlich verwendet wurde, wird heute das Flußeisen¹⁾ infolge der Fortschritte in seiner Herstellung bevorzugt.

¹⁾ Schweißisen entsteht, indem Roheisen im Puddelofen durch die Flamme des unmittelbar vor dem Herde verfeuerten Brennstoffes (meist Steinkohle) geschmolzen oder genauer so weit erwärmt wird, daß seine Temperatur den Schmelzpunkt nicht übersteigt. Alsdann wird die teigig gewordene Masse in mühsamer Handarbeit mit eisernen Haken aufgerührt und dadurch mit den Feuergasen und der Luft in Berührung gebracht, wobei deren Sauerstoff die im Roheisen enthaltenen Bestandteile — Kohlenstoff, Phosphor usw. — bis auf einen für das Schmiedeeisen erforderlichen oder zulässigen Gehalt verbrennt. Der Abbrand des Eisens beträgt hierbei etwa 10 bis 15 v. H., bezogen auf den Einsatz an kaltem Roheisen. Das Verfahren dauert $1\frac{1}{2}$ bis 2 Stunden. Die den Puddelofen verlassenden Feuergase enthalten noch genügend Wärme, um zur Beheizung von Dampfkesseln benutzt zu werden (S. 245).

Bessemer-Flußeisen. Einen erfolgreichen Versuch, zur Reduzierung der schädlichen Bestandteile Luft durch flüssiges Roheisen zu blasen und damit den oben beschriebenen Prozeß wesentlich abzukürzen, machte zuerst Henry Bessemer in den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts. Heute erfolgt die Herstellung von Bessemer-Flußeisen, indem geschmolzenes Roheisen in einen birnenförmig gestalteten Konverter — die Bessemerbirne — gefüllt und Luft mit Pressung durch den durchlöchernten Boden von unten in das flüssige Eisen geblasen wird. Hierdurch verbrennt der überschüssige Gehalt des Roheisens an Kohlenstoff, Silicium usw. unter gleichzeitiger Steigerung der Temperatur auf etwa 1600°C , so daß das Eisen flüssig gehalten wird, ein besonderer Brennstoff hierfür also nicht mehr nötig ist. Wegen der hohen Temperatur muß die Birne mit einem Futter ausgemauert werden, welches beim Bessemer-Prozeß aus Quarz und Sand besteht und als saures Futter bezeichnet wird.

Dieses Futter ist die Ursache, daß der im Roheisen enthaltene und für Schmiedeeisen gefährliche Phosphor nicht mit verbrennt. (0,1 bis 0,2 v. H. Phosphor genügen schon, um das Material spröde und kaltbrüchig zu machen.) Bessemer-Eisen kann deshalb nur aus Roheisen hergestellt werden, welches aus phosphorfreien Erzen erblasen wurde, die aber in Deutschland sehr selten sind.

Bei einem Abbrand von 10 bis 12 v. H. des Einsatzes dauert der Prozeß nur etwa 20 Minuten. Bessemer-Flußeisen wird für Behälterbleche, Walzeisen und Schienen usw. benutzt; für Kesselbleche ist es in Deutschland nicht zugelassen.

Die Herstellung von Thomas-Flußeisen unterscheidet sich von derjenigen des Bessemer-Flußeisens nur dadurch, daß für die Ausmauerung der Birne ein basisches Futter, gebrannter Dolomit, bestehend aus kohlen-saurem Kalk und kohlen-saurer Magnesia, verwendet wird. Dieses Futter hat die Wirkung, daß auch der Phosphor verbrennt, somit also Roheisen verwendet werden kann, das aus phosphorhaltigen Erzen erblasen wurde. Das Thomas-Verfahren wird in Deutschland seit Ende der siebziger Jahre angewendet.

Siemens-Martin-Flußeisen wird auf dem Herde eines Flammofens mit basischem Futter erzeugt, indem Roheisen und Schmiedeeisenschrot zusammenschmolzen und dabei Kohlenstoff und Phosphor oxydiert — verbrannt — werden. Da dieser Prozeß langsamer vor sich geht, nämlich 4 bis 6 Stunden für eine Charge gegenüber 20 Minuten bei der Birne erfordert, so kann er genauer beobachtet werden und liefert im allgemeinen ein wertvolleres Erzeugnis. Als Brennstoff dient meist Steinkohlengas

Schweißisen ist wegen seiner Zähigkeit für Börtelungen und Krimpungen beliebt; ein Nachteil ist die Möglichkeit, daß Schlackeneinschlüsse vorhanden sind. Flußeisen erfordert vorsichtigere Behandlung beim Schweißen und bei solchen Arbeiten, welche ein späteres Ausglühen erfordern.

Für die Herstellung von Flußeisen, das heute ausschließlich für Kesselbaustoffe und auch als Nieteisen Verwendung findet, kommen zwei Verfahren in Betracht:

a) Herstellung im Flammofen durch Zusammenschmelzen von Roheisen und Schmiedeeisen.

Siemens - Martin - Flußeisen.

b) Herstellung in der mit basischem Futter ausgekleideten Bessemerbirne.

Thomas - Flußeisen.

Allgemein nennt man Bleche, die weniger als 5 mm dick sind, Feinbleche, solche, die 5 mm und darüber dick sind, Grobbleche. Im Kesselbau werden Bleche unter 9 mm kaum, unter 7 mm keinesfalls, verwendet.

A. Bleche.

Die Bleche werden mit einem Stempel des Werkes, welches sie herstellte, und mit einem Stempel, welcher ihre Herstellungsart und Verwendbarkeit bezeichnet, versehen.

Man unterscheidet:

bei Schweißisen:

| | | Geringste Zugfestigkeit kg/qmm | Geringste Dehnung v. H. |
|-------------------|------------|--------------------------------|-------------------------|
| Feuerblech (SI) | Längsfaser | 36 | 20 |
| | Querfaser | 34 | 15 |
| Börtelblech (SII) | Längsfaser | 35 | 15 |
| | Querfaser | 33 | 12 |

Die Zugfestigkeit darf bei keinem Blech 40 kg/qmm überschreiten

bei Flußeisen:

Flammofenflußeisen (Siemens-Martin-Flußeisen) (FI), sofern $K_z \leq 41$ kg/qmm

„ (FII), „ $K_z > 41$ „

Thomas Eisen (Birnenmaterial) (TII), „ $K_z \leq 41$ „

„ (TIII), „ $K > 41$ „

ist. Flußeisen weicher Qualität darf keine geringere Zugfestigkeit als $K_z = 34$ kg/qmm besitzen, während die harten Bleche in der Regel keine höhere Zugfestigkeit als $K_z = 51$ kg/qmm haben sollen.

In bezug auf die Mindestdehnung ist folgende Zahlentafel maßgebend:

Zahlentafel Nr. 62.

| Festigkeit . . . kg/qmm | 51—46 | 45 | 44 | 43 | 42 | 41—37 | 36 | 35 | 34 |
|-------------------------|-------|----|----|----|----|-------|----|----|----|
| Geringste Dehnung v. H. | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |

Es kommen drei Blechsarten zur Anwendung, und zwar:

Blechsorte I mit 34 bis 41 kg/qmm (Berechnungsfestigkeit 36 kg/qmm)
 „ II „ 40 „ 47 „ („ „ 40 „)
 „ III „ 44 „ 51 „ („ „ 44 „)

(Generatorgas), welches mit möglichst geringem Luftüberschuß, also mit hoher Temperatur über dem Herd verbrennt. Die von dem Ofen abziehenden heißen Verbrennungsgase werden durch Kammern (Regeneratoren) geleitet und dienen hier zur Vorwärmung des Gases und der Verbrennungsluft; sie erfahren dabei eine solche Abkühlung, daß sie zur Beheizung von Kesseln nicht mehr nutzbar gemacht werden können. Der Abbrand des Eisens beträgt etwa 6 bis 8 v. H. vom Einsatzgewicht.

Die Werte für Festigkeit und Dehnung sowie die sonstigen Eigenschaften der Bleche sind durch die in den Materialvorschriften geforderten Prüfungen nachzuweisen, über welche entweder Sachverständigenbescheinigungen oder in besonders zugelassenen Fällen Werksbescheinigungen vorzulegen sind.

Verwendbarkeit der Bleche.

a) In bezug auf Schweißisen:

Die Teile der Kesselwandung, welche im ersten Feuerzuge liegen, sind aus Feuerblech zu fertigen. Zu allen anderen Kesselteilen kann Börtelblech verwendet werden.

b) In bezug auf Flußeisen:

Für diejenigen Teile des Kessels, welche gebörtelt werden oder im ersten Feuerzuge liegen, dürfen nur Bleche der „I. Sorte“ verwendet werden. Für Teile, die nicht gebörtelt werden, oder nicht im ersten Feuerzuge liegen, können Bleche der Sorte II oder III verwendet werden. Da nach den bisher vorliegenden Erfahrungen das weiche Material zu verlässiger erscheint als das harte, so wird empfohlen¹⁾, auch für diese Teile die weicheren Bleche „Sorte I“ zu wählen und es sind deshalb die folgenden Zahlentafeln Nr. 71 bis 79 für diese Blechsorte berechnet worden.

Die Bestimmungen über Schiffsdampfkessel enthalten folgende Abweichungen von dem vorstehenden Auszuge:

Die Flußeisenbleche haben nur die Bezeichnungen (F) und (T) zu tragen.

In besonderen Fällen darf ausnahmsweise für Bleche, die gebörtelt werden oder im ersten Feuerzuge liegen, eine Festigkeit bis zu 47 kg/qmm, für gebörtelte Bleche, die nicht von Heizgasen bestrichen werden, eine Festigkeit bis zu 51 kg/qmm, und für Bleche, die nicht im ersten Feuerzuge liegen, eine höhere Festigkeit als 51 kg/qmm, jedoch mit mindestens 20 v. H. Dehnung, zugelassen werden.

B. Niete.

Material: Schweißisen:

$K_z = 35$ bis 40 kg/qmm, geringste Dehnung 20 v. H. Flußeisen:

$K_z = 34$ bis 41 kg/qmm, geringste Dehnung 25 v. H. Die Gütezahl (Summe der Ziffern von K_z und der Dehnung) soll mindestens 62 betragen.

Für Bleche mit $K_z > 41$ kg/qmm darf das Nietmaterial bis zu 47 kg/qmm Zugfestigkeit haben, wenn die Dehnung mindestens die gleiche wie in der Zahlentafel für Bleche ist.

Für Anker und Stehbolzen gelten entsprechend dieselben Zahlenwerte.

C. Wasserrohre.

Die Wanddicke der Wasserrohre ist nach den Mindestwerten folgender Zahlentafel zu bemessen:

Zahlentafel Nr. 63.

| Außerer Durchmesser mm | Geschweißte Rohre aus Schweißisen oder Flußeisen | | Nahtlose Rohre aus Flußeisen mm |
|------------------------|--|--|---------------------------------|
| | mm | | |
| bis 30 | 3,00 | | 1,80 |
| über 30 „ 50 | 3,00 | | 2,00 |
| „ 50 „ 57 | 3,00 | | 2,50 |
| „ 57 „ 60 | 3,00 | | 2,75 |
| „ 60 „ 83 | 3,00 | | 3,00 |
| „ 83 „ 102 | 3,25 | | 3,25 |
| „ 102 „ 121 | 3,75 | | 3,75 |
| „ 121 „ 140 | 4,00 | | 4,00 |
| „ 140 „ 191 | 4,50 | | 4,50 |
| „ 191 „ 216 | 5,50 | | 5,50 |

¹⁾ Siehe Jäger, S. 135 u. 148.

D. Kupfer.

Für kupferne Dampfleitungen ist eine Materialbeanspruchung von höchstens $\frac{1}{10}$ der Zugfestigkeit zulässig. Die letztere kann bei Temperaturen bis 120°C , wenn größere Festigkeit nicht nachgewiesen wird, zu 22 kg/qmm angenommen werden. Bei höherer Temperatur ist die Zugfestigkeit für je 20°C um 1 kg/qmm niedriger zu wählen.

Gegenüber überhitztem Wasserdampf von 250°C und mehr ist die Verwendung von Kupfer zu vermeiden.

3. Zylindrische Kesselmäntel.

A. Bezeichnungen.

- K_z = Zugfestigkeit in kg/qcm .
 K_s = Schubfestigkeit in kg/qcm .
 σ_z = Zugspannung bei beliebiger Belastung in kg/qcm .
 σ_s = Schubspannung bei beliebiger Belastung in kg/qcm .
 σ_b = Biegungsspannung bei beliebiger Belastung in kg/qcm .
 σ_n = Belastung von 1 qcm Nietquerschnitt, als Gleitwiderstand oder als Schubspannung angesehen.
 k_z = zulässige Zugbeanspruchung in kg/qcm .
 k_s = „ Schubbeanspruchung in kg/qcm .
 k_b = „ Biegungsbeanspruchung in kg/qcm .
 k_n = zulässiger Gleitwiderstand auf 1 qcm Nietquerschnitt.
 $\ominus = \frac{K_z}{k_z}$ = Sicherheitsfaktor.
 φ = Festigkeitsverhältnis
 $= \frac{\sigma_z \text{ im vollen Blech}}{\sigma_z \text{ in der Niet- oder Schweißnaht}}$
 D = lichter Durchmesser in cm .
 p = höchster Betriebsüberdruck in kg/qcm .
 s = Blechstärke in cm bzw. mm .
 d = Nietlochdurchmesser in cm bzw. mm .
 q = Nietquerschnitt in qcm .
 n = Zahl der tragenden Nietquerschnitte.

B. Beanspruchungen zylindrischer Kesselwandungen mit innerem Überdruck.

Der innere Druck beansprucht nur die Zugfestigkeit eines Rohres, und zwar:

a) In einem Querschnitt $I-I$ senkrecht zur Rohrachse (Fig. 367).

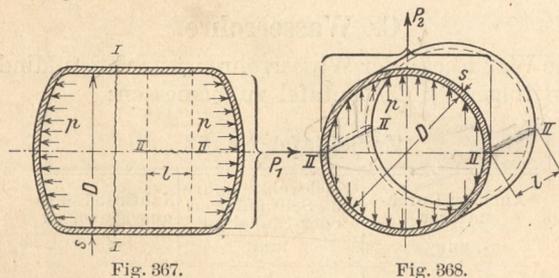


Fig. 367.

Auf diesen Querschnitt wirkt eine vom Dampfdruck p herrührende Zugkraft von der Größe

$$P_1 = \frac{\pi D^2}{4} \cdot p.$$

Die in der Querschnittsfläche des Bleches von der annähernden Größe $\pi D s$ auftretende Widerstandskraft ist

$$W_1 = \pi D s \sigma_z.$$

Aus der Gleichgewichtsbedingung $W_1 = P_1$ ergibt sich die Spannung im Bleche zu

$$\sigma_z = \frac{\pi D^2}{4} \cdot p \cdot \frac{1}{\pi D s} = \frac{D p}{4 \cdot s}.$$

b) In einem Querschnitt $II-II$ parallel zur Rohrachse (Fig. 368).

Um den Einfluß der Böden auszuschalten, denkt man sich ein Stück von der Länge l aus dem Rohr herausgeschnitten. Auf die beiden so erhaltenen Blechquerschnitte wirkt die Zugkraft

$$P_2 = D \cdot l \cdot p;$$

die im Blech auftretende Widerstandskraft ist

$$W_2 = 2 l s \sigma_z,$$

woraus sich

$$\sigma_z = \frac{D l p}{2 l s} = \frac{D p}{2 s} \text{ berechnet.}$$

Man erkennt, daß die Spannung im Querschnitt $I-I$ nur halb so groß ist wie im Querschnitt $II-II$. Für die Bemessung der Blechstärke ist also nur die letztere maßgebend, welche man aus der letzten Gleichung mit

$$s = \frac{p D}{2 \sigma_z}$$

erhält.

Anstatt mit einer gewählten zulässigen Beanspruchung k_z zu rechnen, wie sonst bei Festigkeitsrechnungen üblich ist, legt man bei der Berechnung der Blechstärken die Zugfestigkeit K_z und den Sicherheitsgrad \ominus zugrunde. Ferner ist zu beachten, daß die größte Spannung nicht im vollen Blech, sondern in der durch die Nietlöcher geschwächten Nietnaht auftritt, was man durch den Faktor φ berücksichtigt. Schließlich gibt man einen gesetzlich vorgeschriebenen Zuschlag von $0,1\text{ cm}$, um dem Angriff durch Anfrassungen und Rost Rechnung zu tragen. Danach ist die Blechstärke

$$s = \frac{D p \ominus}{2 \varphi K_z} + 0,1 \text{ cm.} \quad (76)$$

Für nahtlos gewalzte Kesselschüsse ist $\varphi = 1$, für überlappt geschweißte Nähte kann $\varphi = 0,7$ gesetzt werden, jedoch kann den gesetzlichen Bestimmungen entsprechend in besonderen Fällen verlangt werden, daß die Schweißung durch aufgenietete Laschen gesichert wird. Für die Nietnähte werden die Werte von φ im nächsten Abschnitt ermittelt. Ferner sind zu wählen:

- $K_z = 3300\text{ kg/qcm}$ bei Schweißeisen,
 $K_z = 3600, 4000, 4400\text{ kg/qcm}$ bei Flußeisen (s. S. 263).

Bei Schiffsdampfkesseln: $K_z = 3600$ bei Flußeisen von 3400 bis 4100 kg/qcm Zugfestigkeit und, sofern Flußeisen von höherer Festigkeit als 4100 kg/qcm benutzt werden soll, die vom Erbauer anzugebende und in die Kesselzeichnung oder Beschreibung einzutragende Mindestfestigkeit.

Der Sicherheitsfaktor \ominus ist wie folgt in Rechnung zu setzen:

- $\ominus = 4,75$ bei überlappten oder einseitig gelaschten, handgenieteten Nähten,
 $\ominus = 4,5$ bei überlappten oder einseitig gelaschten, maschinengenieteten Nähten und bei geschweißten Nähten,
 $\ominus = 4,35$ bei zweireihigen, doppelt gelaschten, handgenieteten Nähten, deren eine Lasche nur einreihig genietet ist,