

DER STAHLBAU

Verantwortliche Schriftleitung: Dr.-Ing. A. Hertwig, Geh. Regierungsrat, Professor an der Technischen Hochschule Berlin
Berlin-Charlottenburg 2, Technische Hochschule. — Fernspr.: Steinplatz 0011

Beilage
zur Zeitschrift

DIE BAUTECHNIK

Fachschrift für das ge-
samte Bauingenieurwesen

Preis des Jahrganges 10 R.-M. und Postgeld

3. Jahrgang

BERLIN, 4. April 1930

Heft 7

Alle Rechte vorbehalten.

Der Stahlbehälterbau.

Von Oberingenieur E. Kottenmeier, Hannover-Herrenhausen.
(Schluß aus Heft 5.)

Was schließlich die Festigkeitsberechnungen der Stahlbehälter betrifft, so kann vorweg gesagt werden, daß bei kleineren Gefäßen eine Berechnung gewöhnlich nicht erforderlich ist, weil die Blechstärken aus praktischen Gründen (Dichtnietung usw.) ein gewisses Mindestmaß bedingen. Bei den größeren und neueren Konstruktionen, bei denen die Wandungen und Böden aus einer gesetzmäßigen Umdrehungsfläche (Zylinder, Kegel, Kugel) gebildet werden, gestaltet sich die Untersuchung im Grunde genommen einfach, soweit es sich um die Spannungsverhältnisse in den eigentlichen Behälterwandungen handelt. Für Wandungen dagegen, die gleichzeitig als Ringträger wirken, Auflageringe auf einzelnen Stützen, Druckringe und Druckversteifungen usw., die einer vielseitigeren Inanspruchnahme ausgesetzt sind, eröffnen sich schwierigere Probleme. Das gleiche trifft zu für Behälter, die in eckiger Form, also mit ebenen Böden und Wänden ausgeführt werden, deren strenge Untersuchungen, obgleich von Grashof, Bach, Föppl u. a. eingehend behandelt, heute noch zu den schwierigsten Problemen der Festigkeitslehre gehören. Das hat seinen Grund hauptsächlich in der hochgradigen Unbestimmtheit der räumlichen Konstruktionen, so daß in vielen Fällen das praktische und statische Gefühl der langjährig erfahrenen Ingenieure über die Schwierigkeiten hinweghelfen muß, zumal auch von der Wissenschaft Konzessionen gemacht werden, um zu Berechnungsformeln zu gelangen, die sich für den Konstruktionstisch eignen.

Für die Berechnungsmethoden sei daher auf die eingehende Literatur von Grashof, Bach, Intze, Barkhausen, Engeßer, Forchheimer, Reissner, Meissner usw. verwiesen. — Erläuternd soll hierzu folgendes dargelegt werden:

Die Gleichung der elastischen Linie eines Balkens, welcher von einem Momente M ergriffen wird,

$$(4) \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_x}{EJ} = \frac{1}{\rho}$$

hat zur Voraussetzung, daß der Balken bei der Biegung an der Ausdehnung seiner Zugfasern bzw. Zusammendrückung seiner Druckfasern seitlich nicht behindert wird. Wird diese seitliche Bewegung aber, wie das bei einer Platte der Fall ist, verhindert, so ist streng genommen eine Korrektur des Elastizitätsmaßes vorzunehmen. Für einen aus einer Platte herausgeschnitten gedachten Streifen gilt mit den üblichen Bezeichnungen:

$$(5) \quad \text{in der Längsrichtung: } \epsilon_1 E = \sigma_x - \frac{\sigma_y}{m}$$

$$(6) \quad \text{in der Querrichtung: } \epsilon_2 E = \sigma_y - \frac{\sigma_x}{m}$$

worin $\frac{1}{m} = \mu$ die Poissonsche Zahl der Querdehnung mit $m = 3$ bis 4 bedeutet. Setzt man den Wert σ_y aus Gl. 6 in Gl. 5 ein, so erhält man für den zweiachsigen Spannungszustand die sogenannte reduzierte Dehnung zu

$$(7) \quad \epsilon_1 + \frac{\epsilon_2}{m} = \frac{\sigma_x}{E} \left(1 - \frac{1}{m^2}\right),$$

$$\epsilon = \frac{\sigma_x}{E} (1 - \mu^2)$$

Da man für $1 - \mu^2$, da μ^2 klein, auch den angenäherten reziproken Wert $\frac{1}{1 + \mu^2}$ setzen kann, so findet man in der oben angeführten Literatur

$\epsilon = \frac{\sigma_x}{E(1 + \mu^2)}$, so daß in der weiteren Entwicklung die Gleichung der elastischen Linie dann in der Form

$$(8) \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_x}{EJ(1 + \mu^2)}$$

erscheint.

Betrachtet man nun den vorerwähnten Streifen einer auf Trägern in der Entfernung $2l$ gelagerten ebenen Platte und stellt nach Abb. 49 das Angriffsmoment M_x an der Stelle x (für eine Belastung p je Längeneinheit) auf, so findet sich bei festgehaltenen aber drehbaren Enden

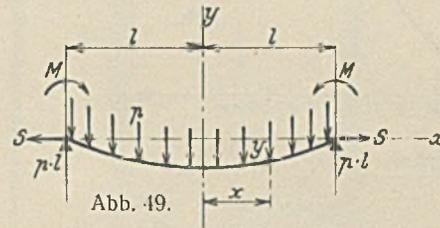


Abb. 49.

$$M_x = \frac{p l^3}{2} - \frac{p x^2}{2} - S y,$$

daß also in dieser Momentengleichung die Größe y vorkommt, die ihrerseits als Ordinate der elastischen Linie, die zur Beurteilung

der Spannungen gesucht wird, noch unbekannt ist. Die Lösung der entstehenden Differentialgleichung von der zweiten Ordnung mit abhängiger und unabhängiger Variablen führt auf eine transzendente Form, die immerhin für den praktischen Gebrauch einer gewissen Bequemlichkeit entbehrt. Berücksichtigt man ein- oder beiderseitige Einspannung, wie dies der Wirklichkeit meistens entspricht, so tritt eine weitere Unbekannte hinzu, wengleich die Rechnung sonst die gleiche bleibt. Dieser Umstand veranlaßt Engeßer dazu, ein Näherungsverfahren anzugeben, welches in dem Buche von Forchheimer über „Ebene und gekrümmte Behälterböden“ ebenfalls angeführt ist. Das Verfahren sieht vor, daß ein Teil der Belastung p , etwa αp , von dem Streifen als Balken getragen wird und diesen auf Biegung beansprucht, während der restliche Teil der Belastung, also $(1 - \alpha)p$, von dem unter dem Einfluß von αp sich durchgebogenen Streifen als Kette bzw. Seil aufgenommen wird und die entsprechende Zusatzbeanspruchung S hervorruft. Es entstehen hierbei 3 Unbekannte, und zwar: der Teilungsfaktor α , die Durchbiegung y_0 und die Spannkraft S .

Läßt man nun an Stelle der elastischen Linie die Annahme eines flachen Parabelbogens gelten, für den die Längenänderung zwischen dem Bogen und der Sehne $2l$ etwa $\frac{4}{3} \cdot \frac{y_0^2}{l}$ und also die Dehnung $\epsilon = \frac{2}{3} \cdot \frac{y_0^2}{l^2}$ beträgt, so entsteht die nachfolgende Gleichung (9) durch Substitution der beiden Unbekannten α und S in der Weise, indem man zuerst α aus der Durchbiegung y_0 des einfachen Balkens infolge der Teilbelastung αp , und zwar in der Form

$$\alpha p l^2 = \frac{2 \delta^3 E (1 + \mu^2)}{5 l^2} \cdot y_0$$

in den Ausdruck für den Biegeungspfeil gleichen

$$y_0 = \frac{(1 - \alpha) p (2l)^2}{8 S} \quad \text{bzw.} \quad y_0 + \frac{\alpha p l^2}{2 S} = \frac{p l^2}{2 S}$$

einsetzt und dann die hierin vorkommende Spannkraft S durch die Dehnung $\epsilon = \frac{\sigma}{E(1 + \mu^2)} = \frac{2}{3} \cdot \frac{y_0^2}{l^2}$, und zwar für den Streifen von der Breite 1 durch den Wert

$$S = \sigma \delta = \frac{2}{3} \cdot \frac{y_0^2}{l^2} \cdot \delta E (1 + \mu^2)$$

ausdrückt.

Bezeichnet man die angenommene Blechdicke mit δ , so erscheint zunächst y_0 in Form einer kubischen Gleichung, und zwar:

$$(9) \quad y_0^3 + \frac{3}{10} \cdot \delta^2 y_0 - \frac{3}{4} \cdot \frac{p l^4}{\delta E (1 + \mu^2)} = 0,$$

die man am besten durch Probieren löst oder, was äußerst zweckmäßig ist, graphisch behandelt, indem man die vorstehende Gleichung in die beiden Simultansysteme, und zwar in die kubische Parabel $y = y_0^3$ und in die gerade Linie $y = -\frac{3}{10} \cdot \delta^2 y_0 + \frac{3}{4} \cdot \frac{p l^4}{\delta E (1 + \mu^2)}$ zerlegt. Der Schnittpunkt der Geraden mit der Parabel liefert dann die gesuchte Durchbiegung. In Abb. 50 ist die Darstellung für $2l = 100$ cm, eine

Wassertiefe von 2,50 m ($p = 0,25 \text{ kg/cm}^2$) und für verschiedene Blechstärken $\delta = 6$ bis 14 mm durchgeführt. So findet sich z. B. für die Blechstärke $\delta = 10$ mm eine Durchbiegung von $y_0 = 0,67$ cm.

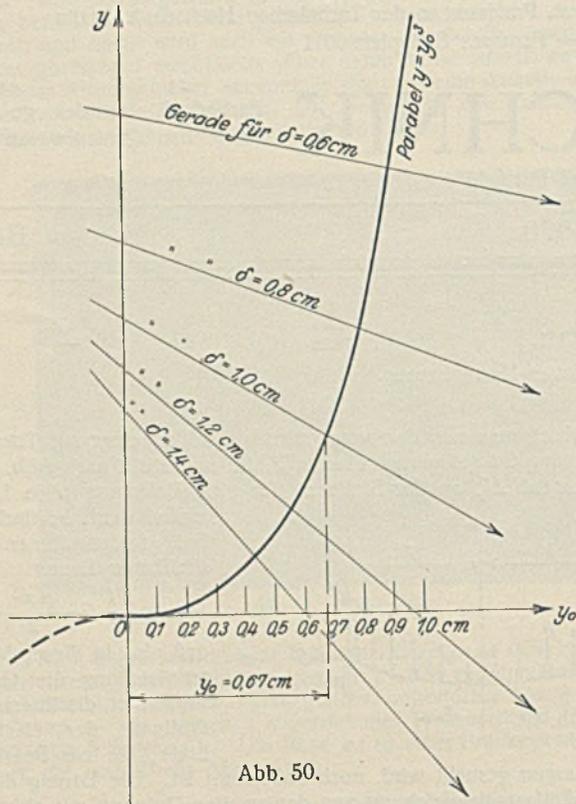


Abb. 50.

Ist y_0 gefunden, dann ergibt sich α aus der Beziehung:

$$(10) \quad \alpha = \frac{2}{5} \cdot \frac{\delta^3 E (1 + \mu^2)}{p l^4} \cdot y_0$$

welcher Wert auch in anderer Form

$$(11) \quad \alpha = \frac{1}{\frac{10}{3} \cdot \frac{y_0^2}{\delta^2} + 1}$$

geschrieben werden kann, und schließlich die Spannkraft

$$(12) \quad S = \frac{(1 - \alpha) p l^2}{2 y_0}$$

Untersucht man einen Streifen von der Breite 1, so ergibt sich aus der Zugkraft S und bei fester, aber drehbarer Endlagerung aus dem Moment in der Mitte:

$$(13) \quad \sigma_{\max} = \frac{S}{\delta} + \frac{3 \alpha p l^2}{\delta^2}$$

Sind die Enden außerdem eingespannt, so liegt das absolute Maximum des biegenden Momentes und damit auch σ_{\max} über den Stützträgern. Im übrigen ist die Rechnung die gleiche wie vor, nur ist, da für den Biegungsanteil in den Entfernungen $x_0 = 0,21$ der Spannweite $2l$ oder $0,42$ der halben Spannweite l Momentennullpunkte eintreten, in den vorstehenden Gleichungen für y_0 , α und S für l der Wert $0,58 l$ zu setzen. Man erhält dann für die größte Beanspruchung über den Stützen

$$(14) \quad \sigma_{\max} = \frac{S}{\delta} + \frac{2 \alpha p l^2}{\delta^2}$$

Die Beanspruchung wird dann nicht, wie man erwarten sollte, kleiner, sondern größer. Das hat seinen Grund in der kleineren Durchbiegung y_0 , wodurch die Spannkraft S größer wird, während der Biegungsanteil über den Stützen nicht in dem gleichen Maße geringer ausfällt. In Wirklichkeit werden die Verhältnisse günstiger, weil das Blech über den Stützen stärker nachgeben, y_0 sich daher vergrößern und damit die Spannkraft S und also auch σ_{\max} geringer ausfallen wird.

Für ebene Böden als runde Scheibe kann die Berechnung sinngemäß durchgeführt werden; doch läßt man solche Böden von vornherein etwas durchhängen, was die Beanspruchung wesentlich herabsetzt. Bei flachem Bogen, bei denen das Verhältnis der Pfeilhöhe zur Sehne $f:s$ klein ist, kann man dann die Beziehung gelten lassen, die für den Krümmungsradius bei einer Parabel zutrifft: $r = \frac{s^2}{8f}$. Man errechnet auf diese Weise den Krümmungsradius und mit diesem, wenn φ das Güteverhältnis des durch Nietlöcher geschwächten Blechquerschnittes ist, die Beanspruchung:

$$(15) \quad \text{für Zylinderbleche} \quad \sigma = \frac{r p}{\varphi \delta}$$

$$(16) \quad \text{für Kugelbleche} \quad \sigma = \frac{r p}{2 \varphi \delta}$$

Auch bei ebenen Böden und Wänden eckiger Behälter läßt sich das vorstehende Verfahren, wenn man den Biegungspfeil zwischen den Verstärkungen, der durch die Last selbst entsteht, ermittelt hat, mit guter Annäherung anwenden. Wie schon erwähnt, werden die Beanspruchungen bedeutend geringer und die Biegung verschwindet gänzlich, wenn man einen runden Boden so weit durchhängen läßt bzw. ihn gleich so ausbildet, daß er eine Umdrehungsfläche bildet. Dieser Gedanke veranlaßte Dupuit zu seiner Konstruktion und ebenfalls Intze und Barkhausen. In diesen Behälterkonstruktionen treten Biegungsspannungen in dem früheren Sinne nicht mehr auf. Man unterscheidet dabei grundlegend Spannungen im Sinne der Meridiane S und solche im Sinne der horizontalen Schnittkreise T . Die bekannte Beziehung zur Berechnung vorstehender Spannkräfte läßt sich ausdrücken durch die Gleichung

$$(17) \quad \frac{S}{r} + \frac{T}{n} = p,$$

worin p den auf die Flächeneinheit wirkenden Flüssigkeitsdruck, r den Radius des Meridians und n den Radius des hierzu senkrechten Haupt-schnittbogens bedeutet. Zur Erläuterung dieser Grundformel sei unter Hinweis auf Abb. 51 folgendes erwähnt: Betrachtet man ein von zwei

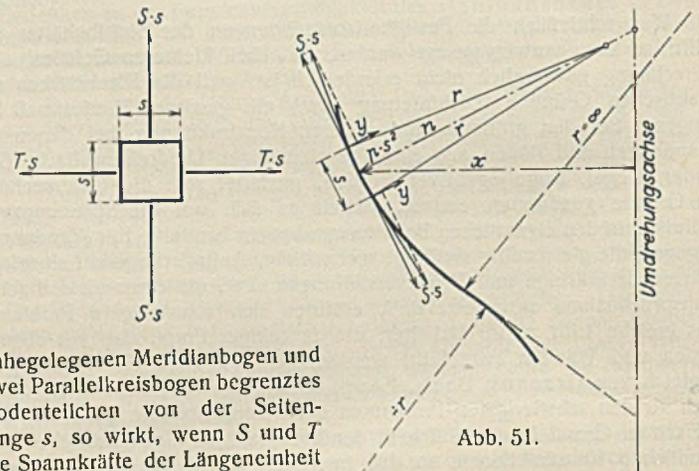


Abb. 51.

nahegelegenen Meridianbögen und zwei Parallelkreisbögen begrenztes Bodenteilchen von der Seitenlänge s , so wirkt, wenn S und T die Spannkräfte der Längeneinheit sind, im Sinne des Meridians Ss , senkrecht hierzu tangential im Sinne des horizontalen Schnittkreises Ts . Diese Kräfte setzen dem auf das Flächenteilchen wirkenden Flüssigkeitsdruck $p s^2$ die Teilkräfte $2y$ bzw. $2z$ entgegen. Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke folgt:

$$y : S s = \frac{s}{2} : r,$$

hieraus

$$2 y = \frac{S s^2}{r}$$

In gleicher Weise gilt für die Tangentialkräfte

$$2 z = \frac{T s^2}{n}$$

Die Gleichgewichtsbedingung fordert, daß

$$\frac{S s^2}{r} + \frac{T s^2}{n} = p s^2$$

sein muß, woraus die bekannte von Milancovitch¹⁾ aufgestellte und von Forchheimer eingeführte Formel

$$\frac{S}{r} + \frac{T}{n} = p$$

entsteht.

Ist p ein an jeder Stelle der Gefäßwand konstanter Druck, wie z. B. bei einem Gasballon, und soll $S = T$ sein, so ist das nur möglich, wenn $r = n$ ist, was nur bei einer Kugel zutrifft. Die Kugel ist also für einen an jeder Stelle der Oberfläche gleich stark wirkenden Druck die Gleichgewichtsform.

$$\text{Es ist} \quad S = T = \frac{r p}{2}$$

Ist p ein Außendruck, so sind die Werte negativ. Ist aber p nicht konstant und soll $S = T$ werden, so müssen r und n voneinander verschieden sein. Gl. 17 stellt also allgemein die Gleichgewichtsbedingung für die Oberflächenspannung einer Umdrehungsfläche dar, wie Milancovitch nachgewiesen hat. Bei einem Zylinder oder Kegel ist der Krümmungsradius r des Meridians ∞ . Das erste Glied der Grundgleichung verschwindet daher und es ist die Tangentialspannung in diesem Falle: $T = n p$ (also auch ohne Kenntnis von S bestimmbar), worin n den Zylinderradius bzw. beim Kegel den Radius des Ergänzungskegels bedeutet. Man erkennt, daß bei gleichen Radien und sonst gleichen Druckverhältnissen die Beanspruchung in einer gleichartig gespannten Kugel- fläche nur halb so groß wird als in einer Zylinder- oder Kegelfläche. Daraus erklärt sich, wenn es auf geringen Materialverbrauch ankommt,

¹⁾ M. Milancovitch, Arbeiten der südslawischen Akademie der Wissenschaften, Agram, Bd. 175 (1908), S. 150.

die möglichste Verwendung einer Kugeloberfläche. Selbstverständlich spielen auch die Herstellungskosten eine Rolle, die für die Kugel höher sind als für den Zylinder. Der erste Summand der Grundgleichung 17 kann also positiv und auch 0 sein; er kann aber auch, immer noch abgesehen von einer Stützung des Behälters, negativ werden, nämlich dann, wenn der Krümmungsmittelpunkt des Meridianbogens auf der entgegengesetzten Seite desjenigen des Hauptschnittbogens liegt. — Doch kommen solche Konstruktionen wegen der schwierigeren Herstellungsweise kaum in Betracht. — Da also bei jeder Umdrehungsfläche der Krümmungsmittelpunkt des Hauptschnittbogens stets auf der Umdrehungsachse liegt, die Lage des Mittelpunktes der Meridianbogen dagegen unbeschränkt ist, so können die beiden Glieder auf der linken Seite der Grundgleichung voneinander verschiedene Vorzeichen haben, die außerdem aber noch von der Art der Stützung des Behälters bestimmt werden, wovon bei der Aufstellung der Gl. 17 noch keine Rede war. Für die Beurteilung der Spannkraft S und T ist diese zunächst ausschlaggebend. So ist z. B. bei einem äußeren Stützkugelboden S negativ, bei einem inneren Stützkugelboden außer S auch T negativ. Im Behälterbau kommen im allgemeinen Gefäße mit lotrechter Umdrehungsachse in Betracht. Die Größe der Meridianspannkraft S ergibt sich dann für einen waagerechten Schnittkreis stets aus der Bedingung, daß die Summe der lotrechten Teilkräfte aller S dieses Schnittkreises gleich ist dem Gewicht derjenigen Flüssigkeitsmenge, deren Volumen innen oder außen von der Zylinderfläche begrenzt ist, die eben den Schnittkreis als Grundlinie hat.

Je nachdem der Boden ein Hängeboden oder ein Stützboden ist, wird S positiv oder negativ sein. Hierbei hat man zu unterscheiden, ob es sich um einen Innen- oder um einen Außenboden handelt. Innenböden sind an ihrem äußeren Umfang, Außenböden an ihrem inneren Umfang gestützt. Für Innenböden ist zur Ermittlung der Spannkraft S das Gewicht der innerhalb des Zylinders vom Durchmesser des Schnittkreises auf dem Boden lastenden Flüssigkeitsmenge maßgebend, für Außenböden (auskragende Böden) dagegen das außerhalb des Schnitt-

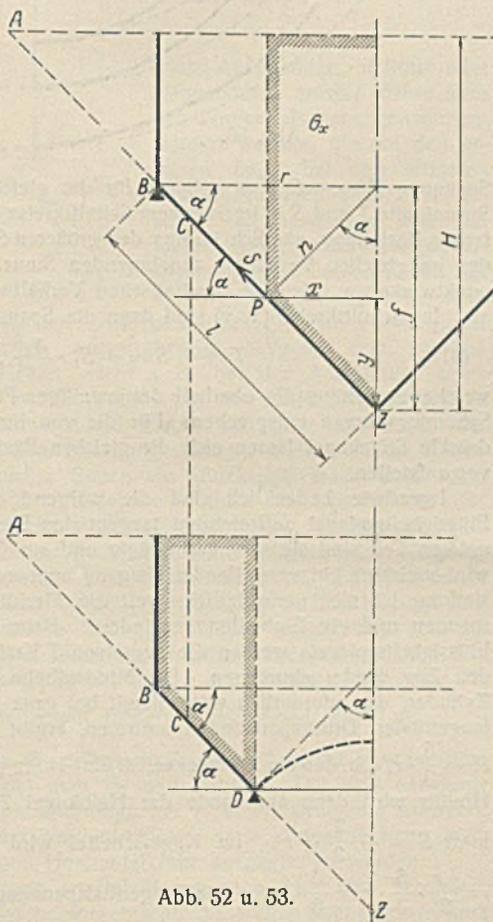


Abb. 52 u. 53.

Es ist nun sehr wichtig zu wissen, daß dieser Wert für $y = \frac{H}{2}$ sein Maximum hat und für die Dimensionierung, weil zahlenmäßig größer, maßgebend ist. Für die größte Tangentialspannung T_{max} ist also der Punkt C, der in der Mitte zwischen A und Z liegt, bzw. der Schnittkreis an dieser Stelle zu untersuchen. Wird die Stützung nicht in B, sondern in einem kleineren Durchmesser etwa in D (Abb. 53) vorgenommen, so entsteht für den Teil D—B des Kegels ein Außenboden, für dessen Beanspruchung die außerhalb des Stützzylinders liegende Flüssigkeitsmenge in Betracht kommt. Für die Beurteilung der Meridiankräfte ist nunmehr der Stützkreis in D maßgebend, weil die Kräfte hier von dem kleineren Umfang aufgenommen werden müssen. Die Kräfte S sind jetzt negativ, also Druckkräfte. Nun haben aber die Tangentialkräfte T in halber Höhe zwischen A und Z, d. i. im Punkte C ihren Scheitelwert. Da die Lage dieses Punktes von der Höhe des Behälters und auch von dem Neigungswinkel α abhängt, muß seine genaue Lage und die in ihm auftretende Spannung T in jedem Falle festgestellt werden, da diese in den meisten Fällen die größere ist. Nur bei verhältnismäßig kleinem Auflagerdurchmesser können natürlich auch die Meridiankräfte die größeren sein, was stets untersucht werden muß. Es sei noch darauf

hingewiesen, daß der Punkt Z die wirkliche oder für eine andere Konstruktion — etwa die nach Intze (Abb. 53) — die gedachte Spitze des Außenkegels ist.

Für Kugelböden gestaltet sich die formelmäßige Darstellung der Spannungen S und T in der gleichen Weise wie vor. Man unterscheidet auch hier Innenböden und Außenböden, die jeweilig sowohl Hänge- als auch Stützböden sein können. Abb. 54 stellt einen Innenboden, und zwar in der linken Hälfte einen Hängeboden, in der rechten Hälfte einen Stützboden dar. In beiden Fällen ist daher für die Bestimmung der Meridian-

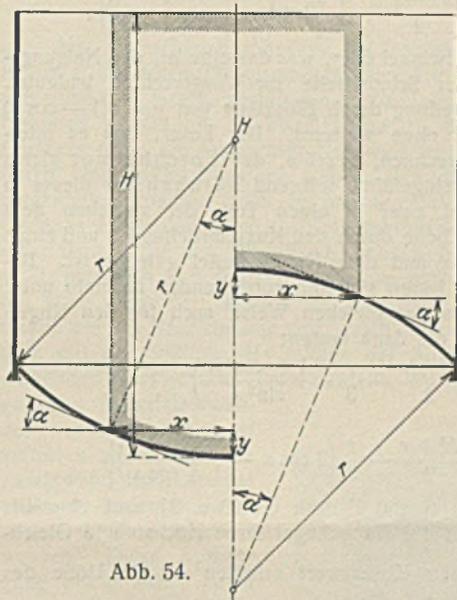


Abb. 54.

kräfte die innerhalb des Schnittzylinders liegende Flüssigkeitsmenge einzusetzen. Man bestimmt zunächst die Spannkraft S aus der Beziehung $S = \frac{G_x}{2x\pi \sin \alpha}$ und erhält dann mit den in der Abb. 54 eingetragenen Bezeichnungen:

$$(20) \quad S = \frac{\gamma r}{2} \left(H - \frac{y}{3} \cdot \frac{3r - 2y}{2r - y} \right),$$

und hiermit aus der Grundformel (17) $\frac{S}{r} + \frac{T}{n} = p$ mit Beachtung, daß $n = r$, nach kurzer Umformung:

$$(21) \quad T = \frac{\gamma r}{2} \left(H - \frac{y}{3} \cdot \frac{9r - 4y}{2r - y} \right).$$

Für den in der rechten Hälfte der Abb. 54 dargestellten Stützboden erhält man entsprechend mit Umkehrung der Vorzeichen des zweiten Summanden in der Klammer die sonst gleichen Formeln:

$$(22) \quad S = \frac{\gamma r}{2} \left(H + \frac{y}{3} \cdot \frac{3r - 2y}{2r - y} \right),$$

und

$$(23) \quad T = \frac{\gamma r}{2} \left(H + \frac{y}{3} \cdot \frac{9r - 4y}{2r - y} \right).$$

Hieraus erkennt man deutlich, daß für Kugelinnenhängeböden der Wert S , für Kugelinnenstützböden der Wert T der größere und daher für die Bestimmung der Blechstärke ausschlaggebend ist, weil im ersten Falle der kleinere Wert in der Klammer abzuziehen, im zweiten Falle der größere Wert zuzuzählen ist. Bei dem Hängeboden nehmen die Kräfte S und T gegen die Mitte des Bodens zu und erreichen beide im Scheitel der Kugel ihren Höchst- und Gleichwert

$$S = T = \frac{\gamma r H}{2},$$

bei dem Stützboden nehmen sie gegen die Mitte des Bodens ab. Ein innerer Stützboden, ganz gleich, ob er als Kugel oder Kegel hergestellt ist, wird durch S und T stets auf Druck beansprucht und muß daher entsprechend ausgesteift werden. Ist dagegen S oder T eine Zugspannung, so ist eine besondere Aussteifung im allgemeinen nicht notwendig.

zylinders liegende Gewicht der Flüssigkeit. Sowohl Innenböden als auch Außenböden können je nach ihrer Anordnung Stütz- oder Hängeböden sein. In Abb. 52 ist ein Behälter mit hängendem Kugelboden dargestellt, und zwar als Innenboden, da er längs seines äußeren Umfanges gestützt sein soll. Im waagerechten Schnittkreis bei P lastet auf diesem das Gewicht des gestrichelt angedeuteten Flüssigkeitsvolumens, das sich zusammensetzt aus dem Zylinder von der Höhe $H - y$ und dem Radius x , sowie dem Kegel vom gleichen Radius und der Höhe y . Es ist:

$$G_x = \gamma x^2 \pi \left(H - y + \frac{y}{3} \right) = \gamma x^2 \pi \left(H - \frac{2}{3} \cdot y \right)$$

und mit den eingetragenen Maßen:

$$(18) \quad S = \frac{G_x}{2x\pi \sin \alpha} = \gamma \cdot \frac{l}{2f} \cdot x \left(H - \frac{2}{3} \cdot y \right),$$

welcher Wert für $y = \frac{3}{4} \cdot H$ sein Maximum erreicht. Das bedeutet, daß der Kugelboden solange an seinem Oberrande seine größte Meridianspannung erhält, als der anschließende Zylindermantel höher ist als $\frac{1}{4} \cdot H$.

Da der Meridianradius ∞ ist, ergibt sich mit $n = \frac{x}{\sin \alpha}$ und $p = \gamma(H - y)$

$$(19) \quad T = n p = \gamma \cdot \frac{(H - y)x}{\sin \alpha} = \gamma \cdot \frac{l}{f} \cdot x (H - y).$$

Die vorstehend von Forchheimer aufgestellten Formeln 20 bis 23 gelten auch für den hängenden Halbkugelboden (Abbild. 55). Für diesen verwendete Barkhausen speziell für seine Bauart eine im Prinzip gleiche Formelgruppe, die die trigonometrischen Funktionen des Mittelpunktswinkels α enthält. Die bekannten Formeln lauten dann:

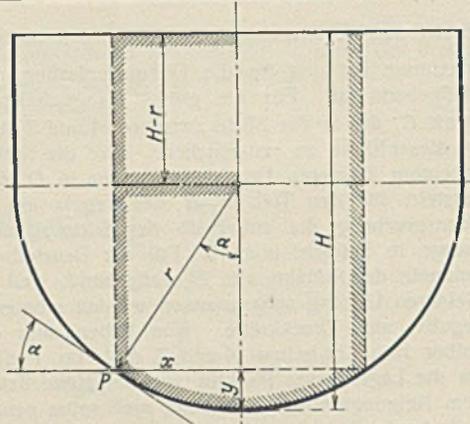


Abb. 55.

$$(24) \quad S = \gamma r \left(\frac{H-r}{2} + \frac{r}{3} \cdot \frac{1 - \cos^3 \alpha}{\sin^2 \alpha} \right)$$

und

$$(25) \quad T = \gamma r \left[\frac{H-r}{2} + \frac{r}{3} \left(2 \cos \alpha - \frac{1}{1 + \cos \alpha} \right) \right],$$

worin also α den Mittelpunktswinkel oder, was dasselbe ist, den Neigungswinkel der Tangente an der Schnittstelle zur Waagerechten bedeutet. Man gelangt zu dieser Darstellung durch Einsetzen von $y = r(1 - \cos \alpha)$ in die Gl. 21 bis 23 nicht ohne weiteres. Der Leser, den es interessiert, die Formeln nachzurechnen, beachte, daß Forchheimer gleich das ganze Zylindervolumen eingeführt, während Barkhausen dieses in zwei Teile zerlegt hat, und zwar in einen Teil, der zwischen dem Flüssigkeitsspiegel und der Ebene durch den Kugelmittelpunkt, und einen anderen, der zwischen dieser und dem Kugelscheitel gelegen ist. Berücksichtigt man dieses, so lassen sich die vorstehenden Formeln unter Beachtung der Vorzeichen in der gleichen Weise auch für den Kugelinnenstützboden verwenden, die dann lauten:

$$(26) \quad S = \gamma r \left(\frac{H+r}{2} - \frac{r}{3} \cdot \frac{1 - \cos^3 \alpha}{\sin^2 \alpha} \right)$$

und

$$(27) \quad T = \gamma r \left[\frac{H+r}{2} - \frac{r}{3} \left(2 \cos \alpha - \frac{1}{1 + \cos \alpha} \right) \right].$$

Wie schon gesagt, erhalten S und T nach Gl. 20 u. 21 und ebenfalls nach Gl. 24 u. 25 im Scheitel der Hängekugel ihren Höchst- und Gleichwert $S = T = \frac{\gamma r H}{2}$; ihren Kleinstwert erhalten sie in Höhe des Kugelmittelpunktes, und zwar für $y = r$ bzw. $\alpha = 90^\circ$ zu:

$$(28 \text{ a u. b}) \quad S = \frac{\gamma r}{2} \left(H - \frac{r}{3} \right) \text{ und } T = \frac{\gamma r}{2} \left(H - \frac{5}{3} r \right).$$

Füllt man einen solchen Behälter bis zum Mittelpunkt der Kugel, so ist $H = r$, und es wird $S = \frac{\gamma r^2}{3}$, $T = -\frac{\gamma r^2}{3}$, d. h. die Tangentialkräfte sind Druckspannungen vom gleichen Absolutwerte der Zugkräfte S . Dies ist nun während der Füllung innerhalb der Halbkugel in der Ebene des Flüssigkeitsspiegels immer der Fall. Denn setzt man für H den jeweiligen Flüssigkeitsstand y z. B. in die Gl. 20 u. 21 ein, so entsteht:

$$(29) \quad S = \frac{\gamma r}{2} \left(y - \frac{y}{3} \cdot \frac{3r-2y}{2r-y} \right) = \frac{\gamma r}{6} \cdot y \cdot \frac{3r-y}{2r-y}$$

und

$$(30) \quad T = \frac{\gamma r}{2} \left(y - \frac{y}{3} \cdot \frac{9r-4y}{2r-y} \right) = -\frac{\gamma r}{6} \cdot y \cdot \frac{3r-y}{2r-y}.$$

Innerhalb der Halbkugel ist also in Höhe des jeweiligen Flüssigkeitsspiegels stets $T = -S$. In der Abb. 56 ist der Verlauf der Tangentialspannungen T für die verschiedenen Füllhöhen $y = \frac{1}{3}r$, $\frac{2}{3}r$, r u. $\frac{5}{3}r$ eingetragen. Die T -Kräfte werden in einem Abstände von etwa $\frac{1}{3}$ der jeweiligen Füllhöhe unter dem Spiegel zu 0, um dann nach unten, wie die S -Kräfte, positiv zu sein. Die Beziehung, daß bei einer Kugel in der Ebene des Flüssigkeitsspiegels $T = -S$ sein muß, folgt übrigens auch ohne weiteres aus der Grundgleichung 17

$$\frac{S}{r} + \frac{T}{n} = p,$$

wenn man nämlich $p = 0$ setzt. Mit $n = r$ für die Kugel ist dann tatsächlich $S + T = 0$, oder $T = -S$.

Da nun bei einer teilweisen Belastung der Halbkugel der Druck p auf die Wandung oberhalb des Spiegels überall gleich 0 ist, die Meridiankräfte S aus der teilweisen Füllung sich aber bis zu ihrer Stützung am Oberrande fortsetzen, so folgt weiterhin, daß in jedem horizontalen Schnittkreise der von der Flüssigkeit noch nicht bespülten Bodenteile die Beziehung $T = -S$ bestehen muß. Ist für eine bestimmte Füllhöhe, etwa y_1 vom Bodenscheitel in der Ebene des Spiegels vom Radius x_1 , die

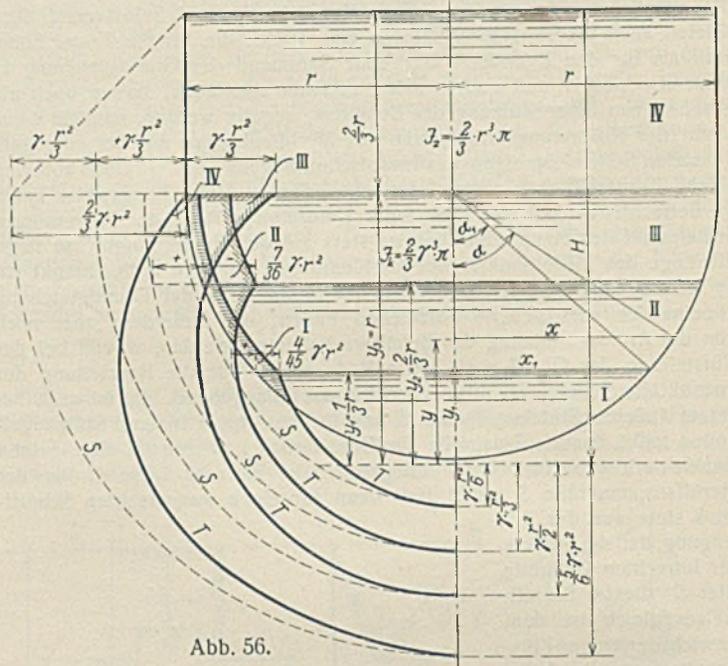


Abb. 56.

Spannung $T_1 = -S_1$, so nehmen für die gleichbleibende Füllhöhe die Spannkräfte T und S in irgendeinem Schnittkreise (x, y) nach oben in zweifacher Beziehung, nämlich infolge des größeren Schnittkreisumfangs und des im gleichen Verhältnis zunehmenden Sinus des wachsenden Mittelpunktswinkels α , also im quadratischen Verhältnis der Schnittkreisradien ab. Im Schnittkreise (x, y) sind dann die Spannkräfte

$$(31) \quad T = -S = -S_1 \cdot \frac{x_1^2}{x^2},$$

welcher Beziehung die oberhalb der jeweiligen Füllhöhen eingezeichneten Spannungskurven entsprechen. Für die von innen oder von außen gedrückte Stützkugel lassen sich die gleichen Beziehungen sinngemäß wie vor aufstellen.

Irgendwie bedenklich sind die während der Füllung unter dem Flüssigkeitsspiegel auftretenden tangentialen Druckspannungen nicht, im unteren Teil sind sie sehr geringfügig und am Oberrande der Halbkugel wird meistens ein versteifender Umgang angeordnet. Eine weitere Versteifung ist nicht erforderlich, weil die Meridiankräfte $+S$ das Blech spannen und ein Einbeulen verhindern. Beim weiteren Ansteigen des Flüssigkeitsspiegels werden die negativen T -Kräfte durch den zunehmenden Zug wieder abnehmen. Die Mindesthöhe für den anschließenden Zylinder, die erforderlich wäre, damit bei ganz gefülltem Behälter keine tangentialen Druckspannungen auftreten, ergibt sich aus Formel 28 b zu $H = \frac{5}{3} \cdot r$, d. h. daß der Zylinder selbst eine Höhe von $\frac{2}{3} \cdot r$ erhalten müßte.

Hierfür wird dann am Rande der Halbkugel $T = 0$ und die Meridiankraft $S = +\frac{2}{3} \cdot \gamma r^2$. Im Kugelscheitel wird für diesen Fall $S = T = \frac{\gamma r}{2} \cdot \frac{5}{3} \cdot r = \frac{5}{6} \cdot \gamma r^2$. Die Tangentialspannung am Fuße des Zylinders

hat dann für diesen den Wert $T = r p = r \gamma \cdot \frac{2}{3} \cdot r = +\frac{2}{3} \cdot \gamma r^2$, sie ist

also der Meridianspannung S der anschließenden Halbkugel gleich. Die oben aufgehängte Halbkugel ist auch ein Innenboden. Aus dem Spannungsverlauf ersieht man, daß die Meridianspannungen in der Blechhaut nach der Mitte des Bodens hin zunehmen und die Tangentialspannungen durchweg kleiner, nirgends aber größer als jene sein können. Die hängenden Kugel-Innenböden sind daher stets nach den Meridiankräften zu dimensionieren. Die gestützten Kugel-Innenböden dagegen sind nach den Tangentialkräften zu bemessen, weil diese durchweg die größeren sind. (Im Scheitel der Kugeln sind stets beide Spannungen einander gleich.) Bei den letzteren ist daher auch den Ringversteifungen besondere Beachtung zu schenken. Spanten allein genügen nicht.

Für Kugel-Außenböden ist zur Bestimmung der Meridiankräfte S immer die außerhalb des Schnittzylinders liegende Flüssigkeitsmenge mit $\frac{G x}{2 x \pi \sin \alpha}$ einzusetzen. Bel dem Stützboden nach Abb. 57a ist S , wie man sieht, negativ, bei dem Hängeboden nach Abb. 57b positiv. Nachdem die Kräfte S ermittelt sind, ergeben sich die Tangentialspannungen

$$\text{für Abb. 57a aus } -\frac{S}{r} + \frac{T}{n} = p \text{ mit } n = r \text{ zu } T = r p + S,$$

für Abb. 57b unter Beachtung, daß p von außen auf die Kugel drückt,

$$\text{aus } +\frac{S}{r} + \frac{T}{n} = -p \text{ und mit } n = r \text{ zu } T = -(r p + S).$$

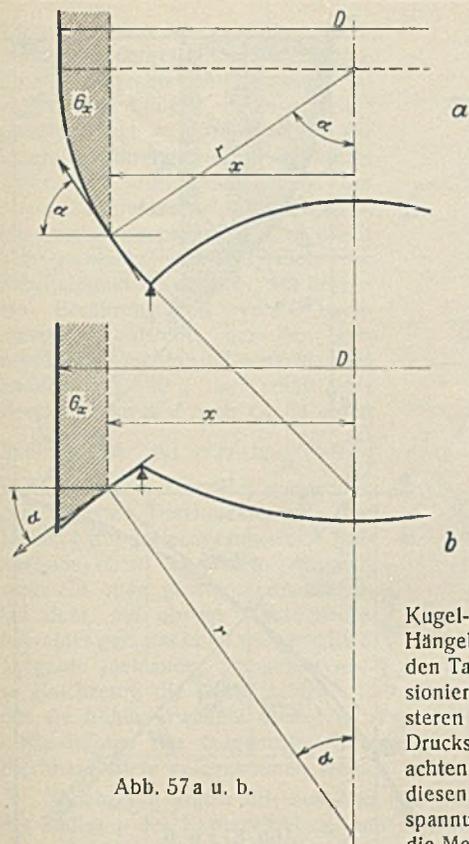


Abb. 57a u. b.

Kugel-Außenböden, ob Stütz- oder Hängeböden, müssen daher nach den Tangentialspannungen dimensioniert werden, die bei den ersteren Zug-, bei den letzteren Druckspannungen sind. Zu beachten ist besonders, daß bei diesen Böden die Tangentialspannungen in beiden Fällen um die Meridianspannung größer sind,

als sie jeweils an der gleichen Stelle und unter gleichen Verhältnissen für einen Kegelboden von entsprechender Neigung sein würden. Aus diesem Grunde werden auch z. B. bei der Ausführung eines Behälters nach Abb. 58 an der Stelle, wo die erste Kugelzone sich an den punktiert gezeichneten Stützkegel kelchartig anschließt, die Kugelbleche bei gleicher Beanspruchung stärker ausfallen als die Kegelbleche. Die Neigung solcher Böden am Stützkreise macht man nicht gern unter 45°. Soll aus irgendeinem Grunde der Durchmesser des Auflagerringes bei gegebenem Behälterdurchmesser kleiner gehalten werden, so ordnet man unter Beibehaltung der vorgenannten Neigung, wie punktiert angedeutet, einen äußeren Stützkegel an. Behälter dieser Bauart vermeiden den sonst notwendigen Eckring am Mantel und sind aus ästhetischen und anderen Gründen vielfach ausgeführt; vgl. die Wassertürme Hannover-Brink, Ibbenbüren, Götzau und andere. Abb. 58a zeigt die Ausbildung eines Bodens, dessen Auflagerringdurchmesser D_1 aus irgendwelchen Gründen einen größeren Durchmesser erhält als $\frac{D}{\sqrt{2}}$.

Will man in diesem Falle die erforderliche Aussteifung der ganzen Stützkugel vermeiden, so ordnet man für den mittleren Teil eine hängende Kugelkalotte an, die dann allerdings bei C einen Druckring erfordert. Durch geeignete Wahl der Neigungswinkel nach Formel 3 kann auch hier der Auflagerring gegen Horizontalkräfte ausgeglichen werden.

Die weitere Entwicklung im Behälterbau hat noch eine besondere Formgebung von Behältern hervorgebracht, die wegen ihrer Eigenart kurz beschrieben werden soll und deren Entstehung in dem Bestreben nach möglichstster Materialersparnis sich wie folgt ergeben hat: Bei den Zylindermänteln besonders großer Becken, z. B. den Wasserbassins größerer Gasbehälter, sind trotz der günstigen Beanspruchung der Wandung auf Zug immerhin recht erhebliche Blechstärken erforderlich, die etwa bei einem Bassin von 70 m Durchmesser und 12 m Höhe in der unteren Blechbahn über 40 mm betragen. Bleche von solcher Stärke bedeuten bei dem großen Umfang des Mantels einen besonderen Materialaufwand und verteuern außerdem, zumal die Bleche auf der Baustelle vernietet werden müssen, die Arbeit erheblich. Es kommt hinzu, daß man bei größeren Durchmessern nicht übersehen darf, daß die Mäntel außer der reinen Zugbeanspruchung noch Nebenspannungen dadurch erhalten, indem sie infolge ihrer festen Vernietung mit dem starren Boden und wegen der oberen Randversteifung an ihrer elastischen Ausdehnung ungleich stark behindert werden, so daß zu der rechnermäßigen Blechstärke noch ein entsprechender Zuschlag gemacht werden muß, was besonders für den unteren am stärksten beeinflussten Teil zu beachten ist. Das Bestreben der Fachkreise ging daher zunächst dahin, den Mänteln anstatt der Form eines geraden Kreiszylinders, von vornherein eine geringe Ausbuchtung zu geben, die der natürlichen elastischen Ausdehnung entsprach, um die Nebenspannungen zu vermeiden. Die hierdurch erzielte mäßige Ersparnis an Material wurde aber durch die Verteuerung in der Herstellung wirtschaftlich mehr als reichlich aufgehoben. Es widersprach

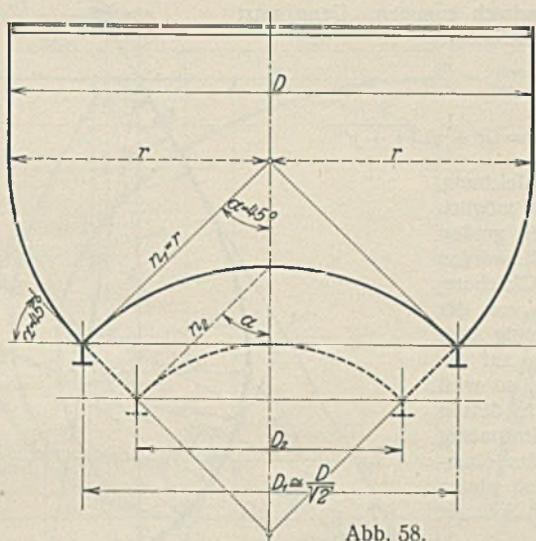


Abb. 58.

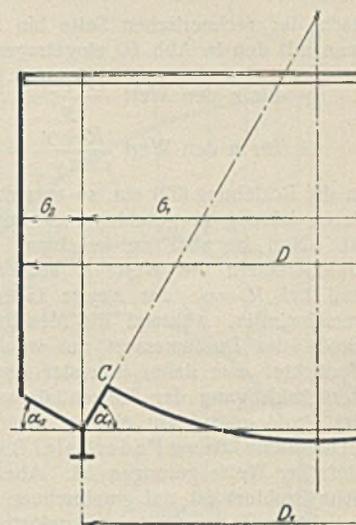


Abb. 58a.

nun dem statischen Empfinden, bei solchen Mänteln die auftretenden Kräfte allein durch Ringspannungen von dem großen Umfang des Mantels aufnehmen zu lassen, anstatt sie durch Meridiankräfte vielleicht zu ihrem Hauptteil direkt auf die Fundamente zu übertragen. Es lag also der Gedanke nahe, die Ausbuchtung so weit zu treiben und dem Becken dadurch eine solche Form zu geben, daß die Spannungen nicht nur in tangentialer, sondern auch in meridionaler Richtung auftraten. Dieser Gedanke führte denn auch zur Konstruktion des sogenannten Wölbmantels, einer Bauart, die der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg A.-G. s. Zt. patentiert und erstmalig bei dem großen Gasbehälter für Simmering bei Wien ausgeführt worden ist (Abb. 59). Hierbei ist also die Bassinwand, wie die Bezeichnung sagt, gewölbt, und zwar so, daß ihre Schwerlinie mit der Seillinie des infolge der Ausbuchtung schräg nach unten wirkenden Wasserdrucks zusammenfällt. Da zur Erzielung eines möglichst

geringen Materialaufwandes nur Zugspannungen auftreten sollen, muß die Bassinwand nach Art der Halbkugelböden an ihrem oberen Rande aufgehängt werden. Diese Aufhängung erfolgt durch einen auch zur Aufnahme waagerechter Kräfte verstellten lotrechten Ringträger, der mittels einer entsprechenden Anzahl auf den Umfang gleichmäßig verteilter Stützen direkt gegen die Fundamenteabgestützt ist. Der so aufgehängte Mantel, der in seinem unteren Teil allmählich in den im allgemeinen ebenen und in seiner ganzen Fläche auf einer eingeschlämmten Sand- oder Kiesschüttung satt aufliegenden Boden übergeht, wird natürlich während der Füllung nicht ganz von Druckspannungen frei sein können. Versteifende Scheiben zwischen Mantel und Stützen sorgen daher für die Formhaltung des Beckens. Im übrigen wird für die Berechnung zugrunde gelegt, daß der Mantel für volle Füllung eine Gleichgewichtsfäche bildet. Die Differentialgleichung der Meridiankurve, deren Umdrehungsfläche um eine lotrechte Achse eine solche Gleichgewichtsfäche ergibt, folgt dann nach Gl. 17 aus der Bedingung, daß die Spannungen in meridionaler und tangentialer Richtung an jeder Stelle der Wandung gleichen und unveränderlichen Wert haben. Sie lautet mit $S = T = S_0$ und $p = \gamma x$

$$(32) \quad \frac{1}{r} + \frac{1}{n} = \frac{\gamma x}{S_0},$$

wenn für r und n die geometrischen Werte der Halbmesser des Meridian- und des Hauptschnittbogens gesetzt werden. Da der Wasserdruck an jeder Stelle senkrecht auf die Wandfläche, also in Richtung des jeweiligen Krümmungsradius wirkt und die Seillinie selbst abhängig ist von der Richtung der einzelnen Drucke, also auch von der Form der Wölbung, die aber ihrerseits noch nicht bekannt ist, so ist zu erwarten, daß der genauen Behandlung der Aufgabe Schwierigkeiten anhaften, die besonders

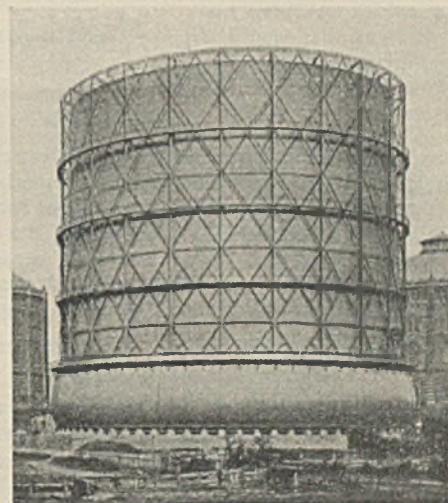


Abb. 59.
Gasbehälter für Simmering bei Wien.

nach der rechnerischen Seite hin zum Ausdruck kommen. Denn setzt man mit den in Abb. 60 eingetragenen Bezeichnungen:

für r den Wert $\frac{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}}{y''}$ und

für n den Wert $\frac{R+y}{\sin \varphi} = \frac{R+y}{\cos \tau} = (R+y) \sqrt{1+y'^2}$

in die Beziehung (32) ein, so entsteht eine Gleichung, deren Lösung in geschlossener Form nicht möglich ist. Nun ist aber zu beachten, daß bei großen Durchmessern die Werte n ebenfalls groß werden und bei $R = \infty$ das zweite Glied der Gleichung verschwindet, während die Meridianradien von der Größe des Durchmessers nur wenig abhängig sind. Verzichtet man daher in erster Annäherung auf die Berücksichtigung der Tangentialspannungen, so wird das Problem auf ein ebenes zurückgeführt, dessen rechnerische Lösung Federhofer²⁾ in verhältnismäßig einfacher Weise gelungen ist. Aber auch das räumliche Problem ist auf graphischem Wege mit einem beliebigen Genauigkeitsgrade gelöst worden.³⁾ Schreibt man die Grundformel in der Form:

$$(33) \quad \frac{S_0}{\gamma r} + \frac{S_0}{\gamma n} = x,$$

so stellt die linke Seite die Summe zweier Druckhöhen dar, die zusammen die Höhe x ergeben und von denen die erste die Spannungen in meridionaler, die zweite in tangentialer Richtung beeinflußt. Hierauf kann man, vom ebenen Problem ausgehend, sodann eine praktisch genaue Korrektur vornehmen. Bei dem Entwurf eines Wölbmantels geht man also stets von dem Sonderfall $R = \infty$ aus, wofür sich im besonderen Maße eine Konstruktion eignet, die Kulka⁴⁾ in seiner Dissertation bzw. in seinem „Beitrag zur Theorie des Wasserdrucks usf.“ bekanntgegeben hat und die wegen ihrer Einfachheit hier kurz erläutert werden soll:

Wirkt auf eine Wand OB (Abb. 61a) an irgendeiner Stelle in der Tiefe x auf das Wandteilchen ds von der Breite l (senkrecht zur Bildebene) der Wasserdruck $dW = \gamma x ds$ senkrecht zu ds , so beträgt die Horizontalkomponente des Druckes auf den Wandteil von der Höhe x :

$$H_x = \gamma \int_0^x x dx = \gamma \cdot \frac{x^2}{2}$$

und die Vertikalkomponente

$$G_x = \gamma \int_0^x x dy.$$

Trägt man in einem neuen Achsensystem (u, v) (Abb. 61b), von O' beginnend, die jeweils der Tiefe x entsprechenden senkrecht zur Wand wirkenden Kräfte zu einem Linienzuge aneinander, so entsteht nach Kulka die sogenannte Wasserdrucklinie, die dadurch gekennzeichnet ist, daß jedem Punkte P' dieser Linie ein bestimmter Punkt P der Wandlinie und umgekehrt zugeordnet ist, und zwar in der Weise, daß die in den Punkten an die Kurven gelegten Tangenten voraussetzungsgemäß aufeinander senkrecht stehen. Die Abszissen $u = \gamma \cdot \frac{x^2}{2}$ stellen hierbei die Horizontalkomponenten, die Ordinaten $v = \gamma \int x dy$ die Vertikalkomponenten des Wasserdrucks auf den Wandteil von der jeweiligen Höhe x dar. Da die Ordinaten $v = G_x$ die Flächengewichte bedeuten, die zwischen der Wandlinie und der y -Achse liegen, so ist die Wasserdrucklinie gewissermaßen eine Integralkurve, allerdings mit dem Unterschiede, daß die Abszissen nicht jenen der Wandlinie gleich sind, sondern sich von ihnen nach dem vorstehenden Gesetz unterscheiden. Handelt es sich um eine etwa in B gestützte Wand, so liegt $G_x = G_a$ außerhalb, in der Abbildung links von der Ordinate x , handelt es sich dagegen um eine in O aufgehängte Wand, so liegt $G_x = G_i$ innerhalb, in der Abbildung also rechts von der Ordinate x des zu untersuchenden Schnittes bei P . Die in P auftretende Meridiankraft ist dann im ersten Falle für die gestützte Wand

$$S = \frac{G_a}{\sin \varphi},$$

im anderen Falle für die aufgehängte Wand

$$S = \frac{G_i}{\sin \varphi}.$$

²⁾ Dr.-Ing. Karl Federhofer: „Über die Formbestimmung des Wölbmantelbeckens“. Der Eisenbau 1913, Heft 10.

³⁾ Dr.-Ing. Karl Federhofer und Dr.-Ing. Josef Krebitz: „Über die strenge Ermittlung der Form einer allseitig gleichgespannten Rotationsmembrane usf.“ Der Eisenbau 1914, Heft 6.

⁴⁾ Prof. Dr.-Ing. Hugo Kulka: „Beitrag zur Theorie des Wasserdruckes usf.“ Leipzig 1913. Verlag von Wilh. Engelmann. — Derselbe: „Der Eisenwasserbau“. Berlin 1928. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn.

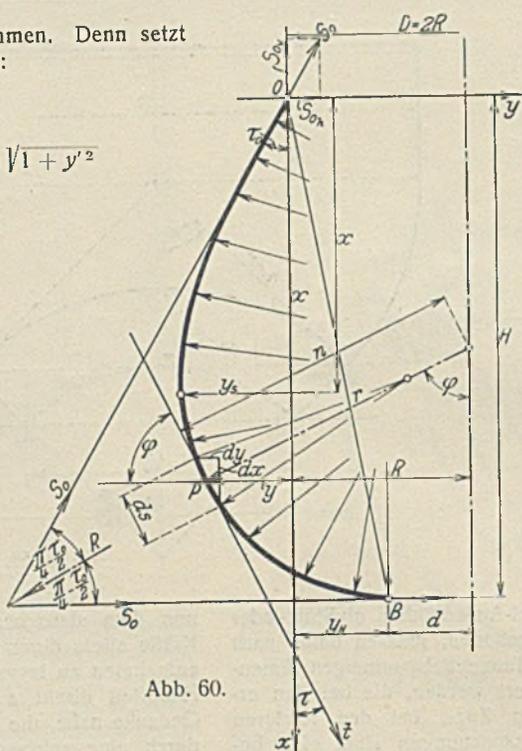


Abb. 60.

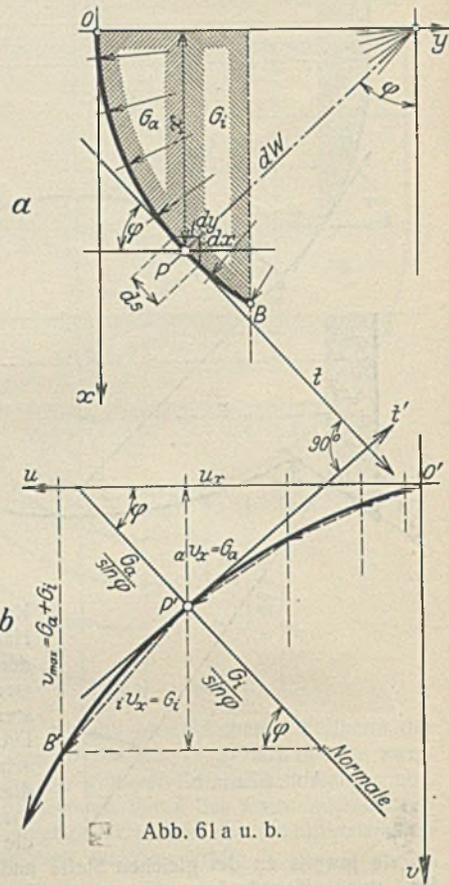


Abb. 61 a u. b.

Zieht man nun durch den zugeordneten Punkt P' der Wasserdrucklinie eine Normale zur Tangente t' daselbst und projiziert die Vertikalprojektionen von $O'P'$, das ist G_a , sowie $P'B'$, das ist G_i auf die Normale, so können die vorstehenden Werte von S aus der Abb. 61b sofort abgegriffen werden. Für die gestützte Wand nehmen die Meridiankräfte mit wachsender Tiefe zu, für die aufgehängte Wand dagegen im allgemeinen ab. Wird nun die Forderung erhoben, daß, worauf es hier ankommt,

die Meridiankräfte für die hängende Wand, das ist $\frac{G_i}{\sin \varphi}$, konstant sein sollen, so muß diese Projektion, also die Normale, für alle Tiefen konstant sein, was aber nur bei einem Kreise möglich ist. Die vorstehende Bedingung wird also nur von derjenigen Wandlinie erfüllt, für welche die Wasserdrucklinie ein Kreis ist (vgl. Abb. 62a u. b). Zu diesem Kreise als Kraftreck mit seinem Mittelpunkt als Pol läßt sich nunmehr die Meridiankurve als zugehöriges Seileck leicht zeichnen, indem man zu den Radien ρ als Polstrahlen, deren Lagen durch die Beziehung $u_x = \gamma \cdot \frac{x^2}{2}$ bestimmt sind, die Parallelen zieht. Der Radius ρ ergibt sich aus der Projektion des Kraftkreisbogens auf die Waagerechte, nämlich $u_{max} = \gamma \cdot \frac{H^2}{2}$ unter Berücksichtigung des Neigungswinkels τ_0 , unter welchem der Mantel oben aufgehängt wird, zu: $\rho = \frac{H^2 \gamma}{2(1 + \sin \tau_0)}$. Dieser Radius muß außerdem, da

die Spannungen durch Kräfte hervorgerufen werden, die an jeder Stelle der Wandung senkrecht auf dieser in Richtung des jeweiligen Krümmungsradius r wirken, dem Produkte aus diesem und der Druckhöhe x gleich sein, also $\rho = r \cdot x$, woraus die Radien r rechnerisch genau ermittelt werden können. Der Abstand y_H der lotrechten x -Achse durch den Aufhängepunkt von dem unteren Berührungspunkte B kann mit praktischer Genauigkeit aus der Beziehung

$$(34) \quad y_H = H \operatorname{tg} \frac{1}{3} (\frac{\pi}{2} - 2\tau_0)$$

ermittelt werden oder auch zeichnerisch, indem man zur Verbindungslinie des oberen Drittelpunktes des Druckkreises mit dem Pol eine Parallele durch den Aufhängepunkt des Mantels zieht. Diese Parallele geht durch den Punkt B . Ist B als Bodenscheitel gleichzeitig der Durchstoßpunkt der Umdrehungsachse, so liegt damit der obere Durchmesser D des Behälters fest. So ist z. B. für $\tau_0 = 0$ (Behälter mit lotrecht tangentialer Aufhängung) $y_H = 0,58 H$, der Durchmesser also $D \approx 1,2 H$. Soll der Durchmesser D größer werden, so schließt sich in B ein etwa ebener Boden vom Durchmesser d (Abb. 60) in der Weise an, daß dieser eine Tangentialebene an den Mantel bildet. Die auf diesen entfallende Wasserlast muß dann, wie bei dem Gasbehälterbassin (Abb. 59), von einer besonderen Unterlagerung aufgenommen werden. Ein solcher Boden wird aber auch notwendig, wenn der Neigungswinkel der Aufhängung größer wird als 45° . In Abb. 62a u. b sind drei Varianten von Meridian-

kurven mit den dazugehörigen Kraft-
eckkreisen dargestellt. Bei Mantel-
linie I (lotrechte Aufhängung) ist
 $\tau_0 = 0$; bei Linie II wurde $\tau_0 = 30^\circ$
gewählt; bei $\tau_0 = 45^\circ$ würde der
untere Berührungspunkt *B* senkrecht
unter der Aufhängung liegen, der
obere Durchmesser wird hierbei zu 0;
mit weiter wachsendem τ_0 öffnet
sich nunmehr gewissermaßen der
Scheitelpunkt *B*, so daß statt dessen
ein Berührungskreis vom Durch-
messer *d* entsteht, der den vor-
erwähnten Abschluß nötig macht; wird
endlich $\tau_0 = 90^\circ$, so erhält der
Berührungskreis *d* nach Gl. 34 einen
Radius von $y_H = H \cdot \operatorname{tg} \frac{1}{3} \left(-\frac{\pi}{2} \right)$
 $= -0,58 H$, d. h. absolut genommen
den gleichen Durchmesser wie der
Mantel I (für lotrecht tangentialer Auf-
hängung) oben. In diesem Falle ent-
steht ein oben geschlossenes Gefäß,
bei dem die oberen Mantelbleche
mit einer gemeinsamen waagerechten
Tangente ineinander übergehen und
so gleichzeitig die Decke bilden. Es ergibt sich eine Behälterform, bei
der die früher erwähnte obere Aufhängung fortfällt, weil die Meridian-
kräfte infolge des tangentialen Überganges im Deckenscheitel von der
Blechhaut allein aufgenommen werden.

Gleichzeitig ergibt sich aus Abb. 62b hierfür der Grenzfall, für den
der Radius ρ des Krafteckkreises, und also auch die Beanspruchung und
damit der Materialverbrauch bei gegebener Behälterhöhe *H* ein Minimum
wird. Formen von der Art, wie sie in Abb. 62a dargestellt sind, können
in der Natur in Fülle beobachtet werden.

Wenn sich nach Milancovitch die Form I und II als etwa zu-
treffend für den hängenden Tropfen ergibt, so wird ein liegender Tropfen
etwa die Oberfläche nach Form III einnehmen. Auch in der Keramik
wurden schon von den Alten ähnliche Formen, wenn auch gefühlsmäßig,
gestaltet. Eine mit Wasser gefüllte Membrane nimmt, auf eine waage-
rechte Platte gelegt, die Ausbuchtung nach Form III an.

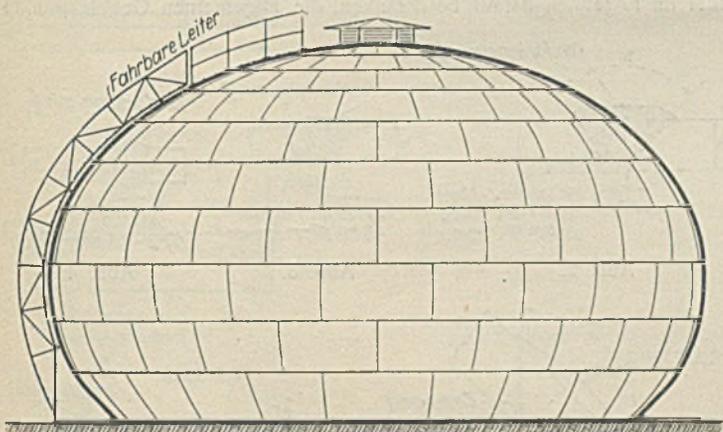


Abb. 62c.

In Rücksicht auf teilweise Füllung des Behälters nach Form III ist
zur Vermeidung von sehr großen Druckspannungen, die sich im unteren
Teil wegen der flachen Neigungen, also der kleinen τ , sonst ergeben
werden, eine Aufhängung bzw. Stützung unterhalb der größten Aus-
buchtung dennoch notwendig. In gleicher Weise erfordert der Behälter
im leeren oder teilweise gefüllten Zustande zum Tragen seiner Decke
und zur Aufnahme einseitiger Lasten aus Schnee und Wind in Anbetracht
der sonst ausreichenden geringen Blechstärken eine entsprechende Aus-
steifung, die durch einzuziehende Ringe und Spanten zu erfolgen hat.
Es sei noch bemerkt, daß die Spannungsverhältnisse auch für diesen
Zustand sich ohne weiteres aus Abb. 62b ergeben, worüber gegebenen-
falls an anderer Stelle noch berichtet werden soll. Durch den Einbau
eines unteren, an den Wölbmantel tangential anschließenden Stützkegels
kann eine besondere Aussteifung der unteren Behälterwandung im wesent-
lichen bzw. ganz vermieden werden. Der so konstruierte Behälter würde
etwa die in Abb. 62c dargestellte Form erhalten.

Zurückkommend auf die Stützung des Mantels I erfolgt dessen Auf-
hängung in gleicher Weise wie bei den Halbkugelböden.

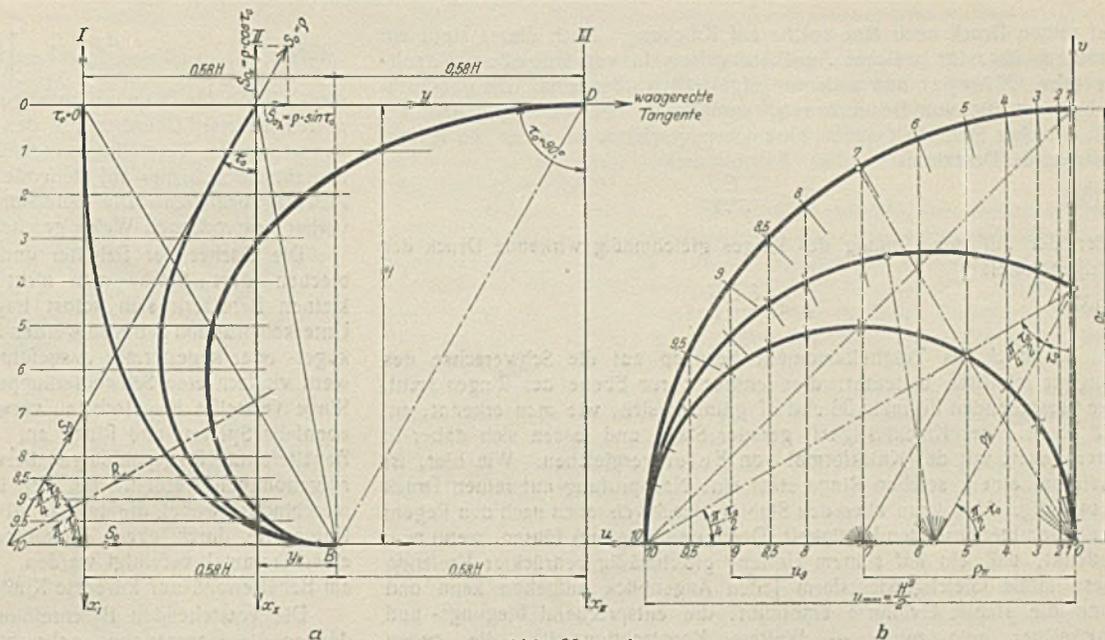


Abb. 62a u. b.

Es wurde schon früher erwähnt, daß bei lotrecht tangentialer Stützung
solcher Behälter auf diese radiale Kräfte nicht ausgeübt werden. Da aber
die Zylinderwand bei Anordnung von Einzelstützen als Ringträger wirkt,
so treten hierbei infolge der Wirbelmomente horizontale Kräfte auf, die
den oberen Rand des Zylinders nach außen, den unteren Rand nach
innen auf Biegung beanspruchen. Die hierdurch an den Stützpunkten
hervorgerufenen waagerechten Drücke, die sich mit denen der Nachbar-
felder zu radial wirkenden Kräftepaaren vereinigen, beanspruchen ihrer-
seits den oberen Rand auf Zug, den unteren Rand auf Druck. Da außer-
dem die Zylinderwand als kontinuierlicher Träger die gesamte lotrechte
Last aufzunehmen hat, wird sie mit kräftigen Gurtringen versehen, die

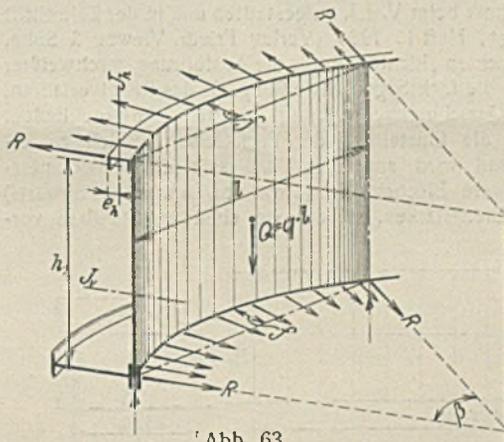


Abb. 63.

den vielseitigen Be-
anspruchungen ent-
sprechend zu dimen-
sionieren sind und
von denen der untere
meistens als Laufsteg
dient. Eine Formel
zur Berechnung der-
artigen Ringträger,
die den vorgenann-
ten Beanspruchungen
mit guter Annähe-
rung Rechnung trägt,
wurde zuerst von
Barkhausen aufge-
stellt und lautet mit
den aus Abb. 63 er-
sichtlichen Bezeich-
nungen:

$$(35) \quad d = \frac{q l}{3} \left[\frac{l h_1}{8 J_v} + \frac{f}{h_1} \left(\frac{l e_h}{5 J_h} + \frac{180^\circ}{F} \sum_0^{180^\circ} \sin \beta \right) \right]$$

worin $\sum_0^{180^\circ} \sin \beta$ die Summe der Sinuswerte im Halbkreise, und zwar $\beta_1, \beta_2 \dots$

die Zentriwinkel bedeuten, welche einmal von den durch die Stützen
gehenden Radien und einer durch die Mitten zweier gegenüberliegenden
Felder gehenden festen Achse oder von den durch die Mitten zwischen
zwei benachbarten Stützen gezogenen Radien und einer durch zwei
gegenüberliegenden Stützen gehenden festen Achse eingeschlossen
werden.

Sie besteht aus drei Gliedern, deren erstes den kontinuierlichen
Träger, das zweite die aus den Wirbelmomenten entstehenden waage-
rechten Biegungen und das dritte die aus den Radialkräften *R* entstehenden
Zug- bzw. Druckkräfte berücksichtigt. Um das Problem der Ringträger
hat sich anregend der vor einigen Jahren verstorbene Obergeningenieur
J. Schmidt (in Firma Aug. Klönne, Dortmund) sehr verdient gemacht.
Eine ausführliche Behandlung findet sich in dem Buche: „Neuere
Methoden der Festigkeitslehre“ von Müller-Breslau. Eine äußerst
exakte und ausführliche Abhandlung über dieses Problem hat ferner
Dipl.-Ing. Constantin Weber in der Z. d. Vdl. Nr. 40, 1919, S. 978 u. f.
veröffentlicht. Die Auflageringe für die Behälter nach Dupuit und Intze,
sowie überhaupt alle Ringversteifungen erfordern außer einer Untersuchung

auf reinen Druck noch eine solche auf Knickung. Auch dieses stellt ein Problem dar, für welches Annäherungsformeln von Engeßer, Forchheimer, R. Meyer und anderen aufgestellt worden sind. Die gebräuchlichste ist die von Boussinesq, wonach ein Druckring vom Radius r mit γ -facher Sicherheit gegen Einknicken geschützt ist, wenn die in ihm auftretende Druckkraft

$$(36) \quad P < \frac{3 E J}{\gamma r^2}$$

oder der auf den Umfang des Ringes gleichmäßig wirkende Druck der Längeneinheit

$$(37) \quad p < \frac{3 E J}{\gamma r^3}$$

ist, worin J das Trägheitsmoment bezogen auf die Schwerachse des Ringquerschnittes bedeutet, die senkrecht zur Ebene des Ringes steht. Die vorstehenden Formeln 36 und 37 gründen sich, wie man erkennt, auf die Theorie der Knickfestigkeit gerader Stäbe und lassen sich daher in ihrer Bauart mit der Knickformel von Euler vergleichen. Wie hier, ist auch bei einem solchen Ringe stets eine Nachprüfung auf reinen Druck notwendig. Man kann aber den Stabilitätsnachweis auch nach den Regeln der zusammengesetzten Festigkeit (Druck und Biegung) führen, wenn man bedenkt, daß ein auf seinem Umfang gleichmäßig gedrückter Kreisring diese labile Gleichgewichtsform jeden Augenblick aufgeben kann und dann die stabile Ovalform einnimmt, die entsprechend biegungs- und drucksicher sein muß. — Weitere Konstruktionsteile, die gegen äußeren Druck dimensioniert werden müssen, sind die sogenannten Fahrrohre, die Innenzylinder der konzentrisch unterteilten Behälter und Schornsteinbehälter usw. Sie werden meistens nach der Formel gerechnet:

$$(38) \quad s = \frac{d p}{2400} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{a}{p} \cdot \frac{l}{l+d}} \right) + c,$$

die C. Bach für Flammrohre abgeleitet hat und worin s die Blechstärke, p den äußeren Überdruck, d den inneren Durchmesser, l den Abstand der wirksamen Versteifungsringe und schließlich a und c Konstante bedeuten, die sich hier auf stehende Rohre sowie auf einen angemessenen Zuschlag beziehen. Die Berechnung der Versteifungsringe kann in der vorher besprochenen Weise geschehen.

Die Dächer der Behälter und Tanks bestehen meistens aus Stahlblechen, deren Stärke man nicht gern unter 3 mm wählt und die bei kleinen Behältern sich selbst tragen, bei größeren dagegen von einer Unterkonstruktion getragen werden müssen. Die Dächer werden gewöhnlich kugel- oder kegelförmig ausgeführt. Bei ersteren wählt man als Tragwerk vielfach eine Schwedlerkuppel, doch werden auch durch Rippen und Ringe versteifte Kugelschalen verwendet. Bei Kegeldächern ordnet man ebenfalls Sparren und Ringe an. Die Horizontalschübe rufen dann am Behälterrande Ringspannungen hervor, die von einem kräftigen Saumring aufgenommen werden. Bei den Kegeldächern wählt man häufig Fachwerkbinder, wobei die in der Mitte zusammenkommenden Ober- und Untergurte durch ebene Rundbleche verbunden und diese wieder zu einer Trommel vereinigt werden. Diese Dächer haben den Vorteil, daß am Behälterrand nur lotrechte Kräfte, also keine Ringspannungen auftreten.

Die vorstehenden Beschreibungen und rechnerischen Erläuterungen dürften die Überzeugung gebracht haben, daß an den Baustoff für Behälter sowohl in wirtschaftlicher als auch in statischer Hinsicht hohe Anforderungen gestellt werden, daß das isotrope Material des Stahls diesen Anforderungen in jeder Beziehung entspricht und sich daher für den Behälterbau am besten eignet.

Alle Rechte vorbehalten.

Anwendung der Gasschmelzschweißung für Stahlbauten.

Von Oberbaurat R. Cajar, Berlin-Halensee.

Bisher war man fast allgemein der Ansicht, daß für die Schweißung der Verbindung und Anschlüsse von Stahlkonstruktionen lediglich das elektrische Lichtbogenverfahren in Frage käme. Auch die vom Ausschuss für Schweißtechnik beim V. d. I. aufgestellten und in der Zeitschrift „Die Elektroschweißung“, Heft 1, 1930 (Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig) veröffentlichten „Richtlinien für die Ausführung geschweißter Stahlbauten“ bezeichnen die Lichtbogenschweißung als das Regelverfahren, allerdings ohne die Gasschmelzschweißung gänzlich auszuschließen. Hieraus aber schon ist die Einstellung der Fachreise deutlich zu erkennen. Als Hauptgrund wird angeführt, daß sich das Gasschmelzverfahren nur für geringere Blechstärken (etwa von 5 mm an abwärts) eignet. Bei größeren Blechstärken, so wie sie eben im Stahlbau vor-

laboratorium erbaut, einen Stahlfachwerkbau, bei dem sämtliche Anschlüsse durch Gasschmelzschweißung hergestellt wurden.)

Die Hauptabmessungen des Gebäudes gehen aus Abb. 1 hervor. Konstruktion und Ausbildung der Anschlüsse zeigen im großen und ganzen keinerlei Abweichungen vom Üblichen. Man hat sich an die bewährten Muster der Lichtbogenschweißung gehalten. Die bemerkenswertesten Einzelheiten sind bereits anderweitig²⁾ mitgeteilt worden. Ich will mich daher im folgenden darauf beschränken, die allgemeinen Gesichtspunkte

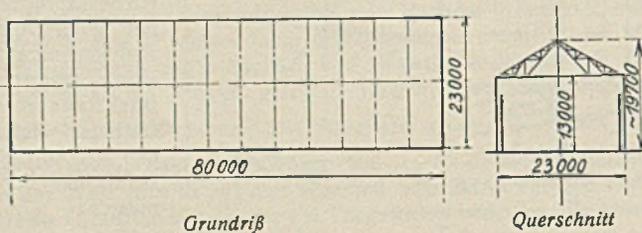


Abb. 1. Hauptabmessungen der Halle.

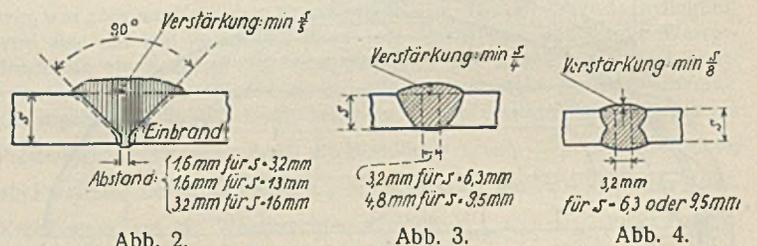


Abb. 2.

Abb. 3.

Abb. 4.

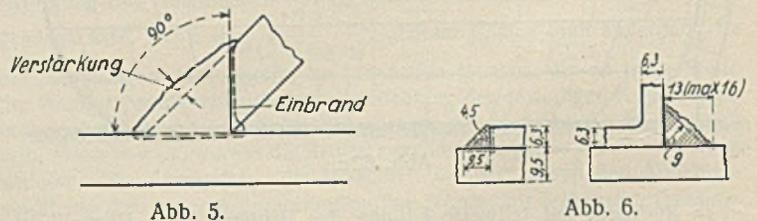


Abb. 5.

Abb. 6.

kommen, erwärmen sich die an die Anschlußnaht angrenzenden Teile zu stark, so daß Verziehungen oder Worfungen von bedenklichen Ausmaßen entstehen. Bei der Lichtbogenschweißung bleibt die Entwicklung der hohen Temperatur fast ausschließlich auf den verhältnismäßig kleinen Ort des Schmelzvorganges beschränkt, so daß diese Übelstände nicht auftreten können. Bei der Gasschmelzschweißung dagegen ist es nicht zu vermeiden, daß die verhältnismäßig große Gasflamme auch Teile der weiteren Umgebung berührt und erhitzt, wozu noch kommt, daß auch die Wärmestrahlung der Gasflamme anscheinend größer ist als die des Lichtbogens. Wie dem auch sei, eins ist jedenfalls sicher, daß erst seit der Vervollkommnung des Lichtbogenschweißverfahrens ernsthaft an die Möglichkeit der Schweißung von Stahlkonstruktionen gedacht worden ist. Man darf aber nicht vergessen, daß der erste Impuls von den großen Elektrizitätsfirmen ausgegangen ist, die naturgemäß ein großes Interesse am Absatz von elektrischen Schweißgeräten haben. Vorauszusehen war, daß auch die Gegenseite den Versuch machen würde, sich dieses Arbeitsgebiet zu erobern, und wiederum sind es die Vereinigten Staaten von Amerika, die hier, wie ja auf dem ganzen Gebiete der Schweißtechnik vorangehen. Die Union Carbide Company, eine Firma, von der man wohl annehmen darf, daß sie an dem Verbrauch des Acetylen-gases lebhaft interessiert ist, hat auf ihrem Werkgelände ein Versuchs-

zu besprechen, die sich bei der Ausarbeitung des Entwurfes und der Ausführung der Arbeiten ergaben.

Um sich vor Fehlschlägen möglichst sicherzustellen, machte man sich zunächst einen sehr sorgfältig durchdachten Arbeitsplan. Es ergaben sich dabei die folgenden Gesichtspunkte:

1. Ausbildung der Schweißer. Das Anwerben der Schweißer geschah in der Weise, daß man durch Zeitungsanzeigen „Schweißer für Alles“ verlangte. Die sich Meldenden wurden einer vorläufigen Beobachtung unterzogen und mußten eine Biegeprobe anfertigen. Die Ergebnisse genügten im allgemeinen, blieben aber doch so weit unter dem Durchschnitt, daß eine kurze Sonderausbildung nötig war.

2. Auswahl und Prüfung der Werkstoffe. Der verwendete Konstruktionsstahl entspricht den amerikanischen Normen für Stahlbauten.

¹⁾ Eng. News-Rec. vom 12. u. 19. Dezember 1929.

²⁾ Bauling. 2, 1930.

Er hat sich für die Herstellung von Schweißverbindungen gut bewährt. Das Material der Schweißstäbe war ebenfalls bekannt, so daß sich eine weitere Prüfung erübrigte.

3. Entwurf und Anordnung der geschweißten Verbindungen. Jede Schweißverbindung muß gut zugänglich sein, und zwar müssen einerseits die vom Schweißmetall auszufüllenden Ecken und Schlitz in ihren Oberflächenteilen durch Schweißstab und Gasflamme gut erreichbar sein, andererseits muß auch der Schweißer genügend Bewegungsfreiheit haben, um die Schweißwerkzeuge richtig anwenden und die Schweißstellen gut übersehen zu können. Bei der Anordnung der Schweißnähte ist anzustreben, daß sie möglichst alle in waagerechter Lage oder unter einer Neigung von 45° hergestellt werden können.

Eisenbahnneiggleis einzurichten und die Gase von dort durch Rohrleitungen den einzelnen Arbeitsstellen zuzuführen. Die Binder- und Stützteile wurden vor dem Schweißen mittels Schraubenklammern zusammengehalten. Gelegentlich ist auch Heftschweißung angewendet worden, doch ist diese augenscheinlich nicht so einfach wie bei der Lichtbogenschweißung.

6. Schweißverfahren. Es wurden verschiedene Methoden ausprobiert. Die allgemeine Anwendung einer und derselben normalen Schweißnahtstärke (3/8") hat sich nicht bewährt. Es ist vielmehr besser, die Schweißnahtdicke der Blechstärke anzupassen, wobei die von der Gasflamme erhitze Fläche zu berücksichtigen ist. Auch in dieser Beziehung erzielte man mit den in Abb. 6 bis 12 dargestellten Profilen die günstigsten Ergebnisse.

7. Beaufsichtigung der Schweißer. Während der ersten Arbeitsstadien sah man besonders darauf, daß jeder Schweißer der Schweißzone genügend Hitze zuführte, so daß die beiden Anlageschenkel der Kehlnaht gleichzeitig zum Schmelzen kamen. Bei verschiedenen Blechstärken erhitzt sich das dünnere Blech stärker, es sei denn, daß man die Flamme mehr auf den stärkeren Teil wirken läßt. Im allgemeinen genügen ganz kurze Einwirkungen der Schweißflamme auf den schwächeren Teil, da dieser durch Strahlung hinreichend stark erhitzt wird.

Was die Form der Gasflamme betrifft, so ist ein gut abgerundeter innerer Flammenkegel einem dünnen und spitzen vorzuziehen. Der erstere bewirkt eine bessere Wärmeverteilung und erhält eine größere Oberfläche in geschmolzenem Zustand. Mit wachsendem Querschnitt der Schweißnaht sind größere Schweißbrenner und stärkere Schweißstäbe zu verwenden.

Das beim Gasschmelzverfahren so gefürchtete Verziehen der Konstruktionsteile hat sich anscheinend in größerem Ausmaße nur dort gezeigt, wo eine unsymmetrische Anordnung der Schweißnaht nicht zu umgehen war. In diesem Fall mußten die Konstruktionsteile entweder auf kaltem Wege oder durch Wiedererhitzung gerade gerichtet werden. Bei guter Einspannung bleiben die Teile wenigstens für die Zwecke der Schweißarbeiten genügend gerade. Bei symmetrischer Anordnung der Schweißnähte heben sich die Verziehungen annähernd gegenseitig auf.

Festigkeitsproben wurden bei diesen Arbeiten im allgemeinen nicht vorgenommen. Erfahrungsgemäß haben sie sich bei strenger Beaufsichtigung und genauer Beachtung der Regeln für eine gute Schweißarbeit als überflüssig erwiesen.

Interessant sind schließlich noch die Kurven, die die geleisteten Schweißnahtlängen in Metern je Stunde bei verschiedenen Nahtstärken angeben (Abb. 14). Hierbei ist ein Wirkungsgrad von 85% zugrunde gelegt, d. h. es ist angenommen, daß in jeder Stunde die Schweißflamme 50 Minuten lang wirklich in Tätigkeit war.

Über die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens läßt sich noch nichts Abschließendes sagen. Bei dem vorerwähnten Bau ist der Aufwand an Zeit sowohl als auch an Kosten immerhin noch höher gewesen als für eine genietete Konstruktion. Zum Teil ist dies aus den umfassenden Vorarbeiten erklärlich, die bei späteren Ausführungen fortfallen. Außerdem hofft man Ersparnisse durch eine zentrale Gaserzeugung und sorgfältigere Auswahl des jeweilig wirtschaftlichsten Nahtquerschnitts erzielen zu können.

Ohne Zweifel bietet das Gasschmelzverfahren gewisse Vorteile. So kann es z. B. überall dort angewendet werden, wo elektrischer Strom nicht verfügbar ist. Nach allem, was bisher darüber bekanntgeworden ist, scheint auch die Güte der Schweißung beim Gasschmelzverfahren höher zu sein, insbesondere hinsichtlich der Zähigkeit. Schließlich wird aber doch wohl der wirtschaftliche Faktor der entscheidende sein. Vergleichende Kostenermittlungen liegen für Stahlkonstruktionsschweißungen noch nicht vor. Nach Bardtke³⁾ werden die Kosten für das Gasschmelzverfahren im allgemeinen etwas höher als für das Lichtbogenverfahren. Doch sind die Unterlagen für diese Kostenermittlungen sehr unsicher. Die Zahlen stammen überdies aus der Schiffsbaupraxis. Nur eins steht fest: Bei sonst gleichen Kosten ist bei der Gasschmelzschweißung der Zeitaufwand zur Herstellung einer und derselben Naht von gewissen Blechstärken an größer als bei der Lichtbogenschweißung. Diese Verhältnisse verschieben sich um so mehr zuungunsten der ersteren, je kürzer die Naht ist. Hieran ist die erforderliche Vorwärmung schuld. Außerdem sind auch die Kosten für das Geraderichten der Konstruktionsteile nach der Schweißung, das bei der Gasschmelzschweißung wohl nie zu umgehen sein wird, nicht zu unterschätzen.

Vorläufig ist also nur die Möglichkeit gezeigt worden, das Gasschmelzverfahren überhaupt im Stahlbau anwenden zu können. Der weiteren Entwicklung muß es überlassen bleiben, ob es Aussicht hat, erfolgreich mit dem sich bisher gut bewährenden Lichtbogenschweißverfahren in Wettbewerb zu treten.

³⁾ Gemeinfaßliche Darstellung der gesamten Schweißtechnik (1927). VDI-Verlag.

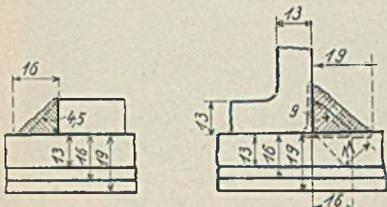


Abb. 7.

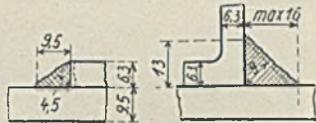


Abb. 8.

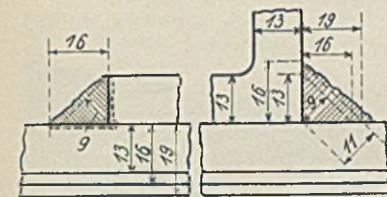


Abb. 9.

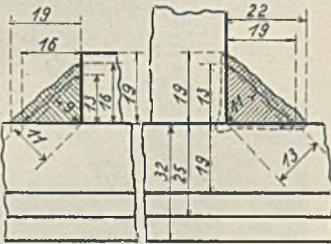


Abb. 10.

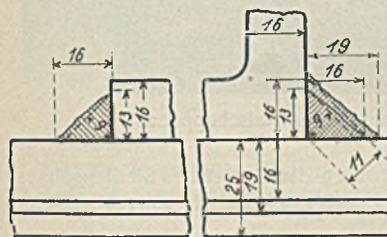


Abb. 12.

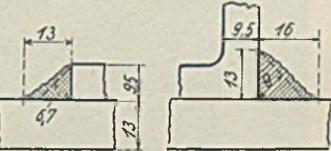


Abb. 11.

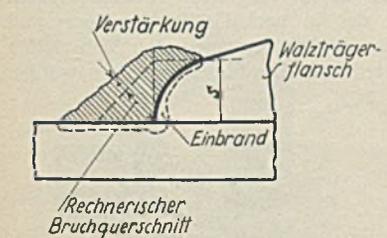


Abb. 13.

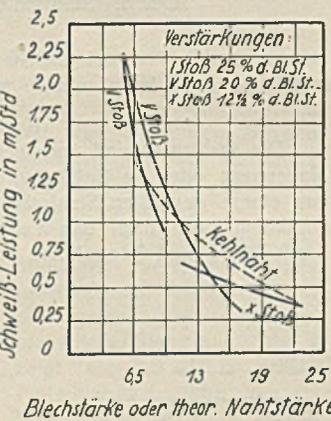


Abb. 14.

Eine von der Lichtbogenschweißung etwas abweichende Form zeigen die Stumpfschweißnähte. Man braucht hierzu bei der Gasschmelzschweißung augenscheinlich mehr Platz und schrägt die Kanten nach Abb. 2 auf insgesamt 90° ab (gegenüber 60° bei der Lichtbogenschweißung). Dies bedingt offenbar einen größeren Verbrauch an Schweißmaterial. Bleche, die dünner sind als 3/8" (10 mm) kann man auch einfach nach Abb. 3 oder besser nach Abb. 4 zusammenschweißen. Die Doppelnah ist für Bleche, die dicker als 1/2" (12 mm) sind, wirtschaftlicher. Die Ausbildung nach Abb. 5 erfordert eine starke Abschrägung des schräg ansteigenden Bleches, immer mit der Absicht, daß man gut in die Ecke hineinschauen kann. Für Kehlnahtschweißungen haben sich die in Abb. 6 bis 12 dargestellten Abmessungen im Verhältnis zur Blechdicke als am vorteilhaftesten herausgestellt. Bei Walzprofilen mit abgerundeten Ecken ist eine Verstärkung der Naht bei entsprechend kürzerer Länge nach Abb. 13 erforderlich.

5. Vorbereitung der Schweißarbeiten. Das Schweißen in der Werkstatt geschah abteilungsweise nach Bindern, Stützen, Trägern und sonstigem. Jede Abteilung wurde mit ihrem besonderen Satz an Gasflaschen, Werkzeugen, Klammern, Handkranen usw. versehen. Azetylen und Sauerstoff wurden bei diesem Bau noch in einzelnen Flaschen geliefert. Bei Dauerbetrieb würde es sich empfehlen, ein zentrales Gasbehälterdepot an einem

Alle Rechte vorbehalten.

Stahltüren und Stahltore.

Von Oberingenieur Kegel, Essen.

Der Entwicklungsgang der modernen Stahltür reicht verhältnismäßig weit zurück. Das Schlosserhandwerk, vornehmlich die Bauschlossereien, fertigen sogenannte eiserne Türen schon seit Verwendung der Walzeisen und Bleche für Bauzwecke an, und zwar hauptsächlich als Gittertüren für Einfahrten und hin und wieder auch als Innen- und Außentüren an Gebäuden. Heute noch sieht man an älteren Gebäuden die auf primitive Art aus Winkeleisen und Blechen genieteten eisernen Türen. Auch die sogenannte Feuerschutztür der vergangenen Epoche ist noch hier und da zu finden. Sie besteht in der Hauptsache aus einer Tür aus Eichenbohlen, deren beide Seiten mit Blech beschlagen sind, damit bei einem ausbrechenden Brande die Tür länger Widerstand leisten sollte. Die heute

Erst die sachliche Bauweise der neueren Zeit brachte auch der Stahltür die schöne und elegante Form, in der wir sie heute wohl in und an vielen Gebäuden finden. Unter Fortlassung aller störenden Linien und im engsten Einvernehmen mit der Architektur findet sich heute die Stahltür als feuerbeständige Tür in Treppenhäusern vieler öffentlicher Gebäude, auf unseren Ozeanriesen und insbesondere bis zu den größten Abmessungen von 12 m Höhe und darüber in den riesigen Kraftwerken, die in den letzten Jahren entstanden sind. Als weitere Verwendungsgebiete seien an dieser Stelle noch genannt: Flugzeughallen, Kaischuppen, Fabrikhallen jeder Art, Autobus- und Straßenbahnhallen. In

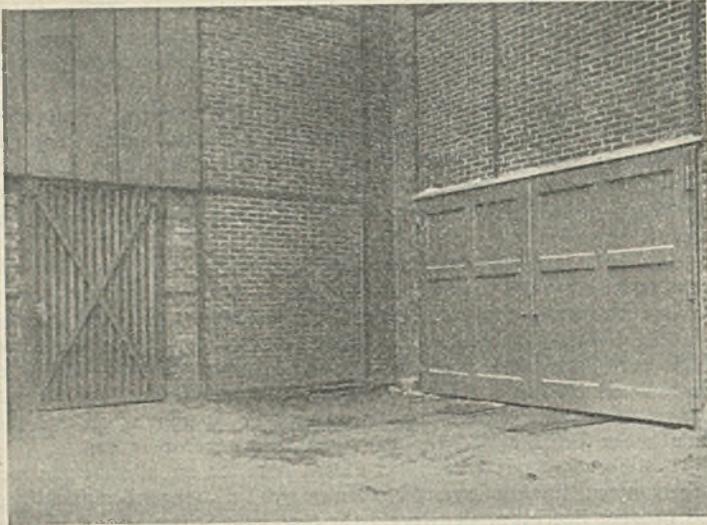


Abb. 1. Gegenüberstellung einer alten und neuen Stahltür.

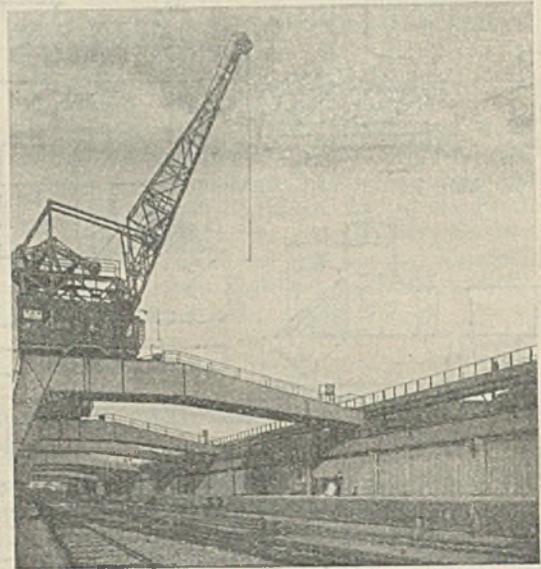


Abb. 5. Stahlschiebetore eines Kaischuppens.

noch vielfach verwendeten Türen aus Profileisenrahmen mit Wellblechverkleidung haben wohl hauptsächlich bei Gebäuden aus Stahlkonstruktionen ihre weiteste Verbreitung gefunden.

Nachdem die Verwendbarkeit der S.-M.-Feinbleche als Baustoff mehr bekannt wurde, haben weitblickende Konstrukteure unter Benutzung der sich schnell entwickelnden Maschinen für Blechbearbeitung, hauptsächlich der hydraulischen Presse, mit der Herstellung sogenannter stahlgepreßter Türen begonnen. Die bisher auf handwerksmäßige Weise angefertigte

allerjüngster Zeit hat sich die Stahltür auch das Gebiet des Siedlungsbaues erobert; auch in Krankenhaus- und Hotelbauten hat sie Einzug gehalten.

Konstruktion.

Die Stahltüren und -tore bestehen in der Hauptsache außer dem am Mauerwerk oder an Gebäudeprofilen zu befestigenden Anschlagrahmen aus einem gepreßten Stahlrahmen, der je nach Größe des Tores und außerdem noch nach der Walzgröße der zu verwendenden Stahlplatten durch Längs- und Querrahmen unterteilt ist. Die Führungsplatten werden

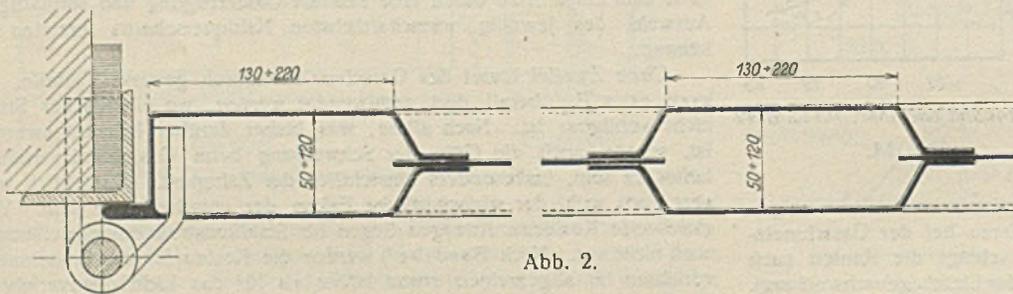


Abb. 2.

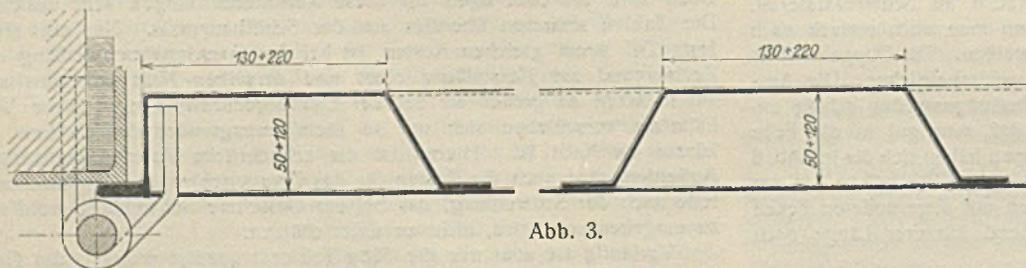


Abb. 3.

Tür war für eine weite Verwendung zu teuer und es mußte deshalb angestrebt werden, bei fabrikmäßiger Herstellung nicht nur eine Senkung des Verkaufspreises, sondern auch eine in jeder Hinsicht schöne Form der Tür zu erreichen. Abb. 1 gibt beispielsweise einen anschaulichen Vergleich zwischen einer älteren Ausführung, einer Wellblechtür, mit außen sichtbarem Versteifungsrahmen und einer neueren fabrikmäßig hergestellten Stahltür rechts.

zwischen die an der Innenseite lappenartig geformten Rahmen gebracht und mit diesen vernietet oder elektrisch verschweißt (Abb. 2). Bei Erzielung einer glatten Außenfläche, auf die oft besonderer Wert gelegt wird, benutzen die Werke einseitige Hohlrahmen, die hinter die Stahlplatte gesetzt, mit dieser vernietet und verfalzt werden und die dem Tore bei Vermeidung jedweden überflüssigen Baustoffes eine hinreichende Versteifung geben (Abb. 3).



Abb. 4.
Ansicht eines Faltschiebetores von 11 m Höhe.

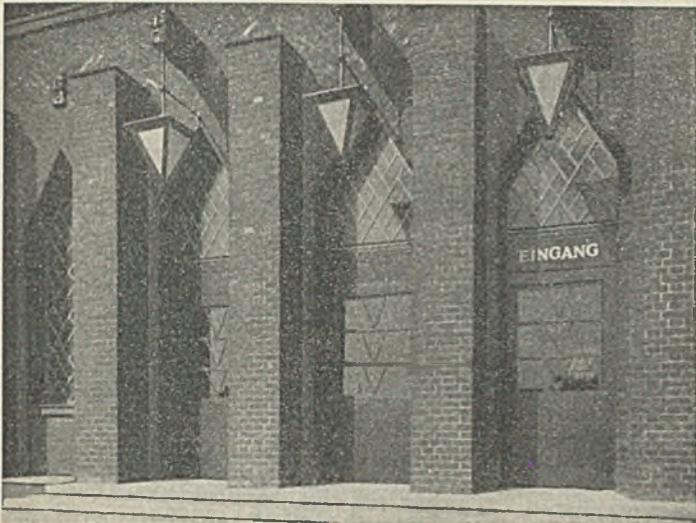


Abb. 6. Stählerne Türen eines Reichsbahnhauptgebäudes.

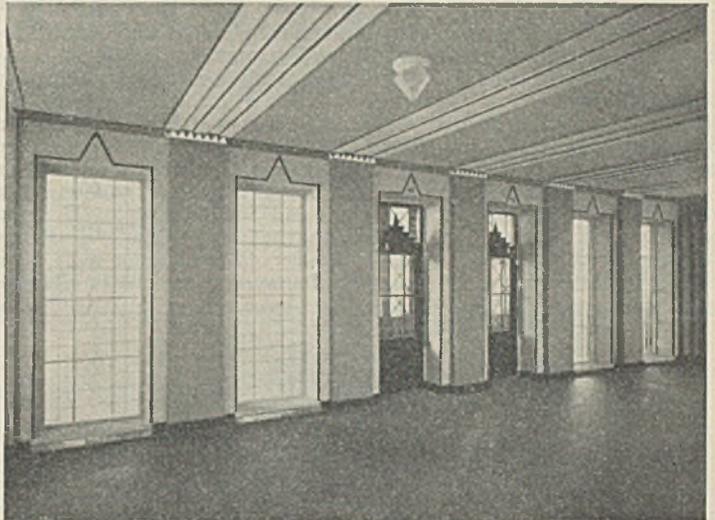


Abb. 9. Stahltüren mit Elektrolytverglasung.

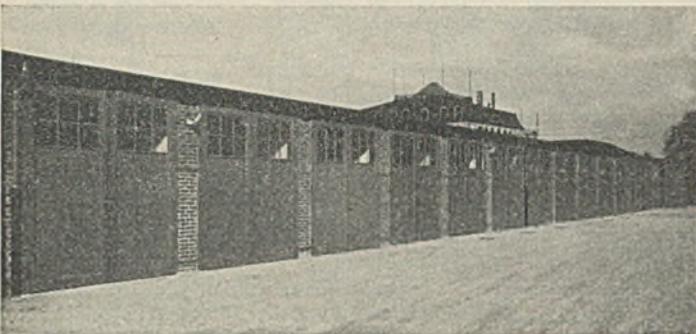


Abb. 7. Stahltüren einer Autogroßgarage.

Erst die Fortschritte im Bau von Blechbearbeitungsmaschinen, sowie der heutige Stand der Schweißtechnik und moderne Arbeitsverfahren haben dazu beigetragen, den Bau von Stahltüren in den Abmessungen, wie sie heute gebräuchlich sind, überhaupt möglich zu machen.

Die nachfolgenden Abbildungen vermitteln einen bescheidenen Ausschnitt aus dem großen Verwendungsgebiet solcher Stahltüren. Abb. 4 zeigt ein 5,0 · 11 m großes Faltschiebetor, Abb. 5 die Stahlschiebetore eines langen Kaischuppens, Abb. 6 die Eingangstüren eines Reichsbahnhauptgebäudes und Abb. 7 die mit oberer Verglasung versehene Stahltüren einer Autogroßgarage.

Feuerbeständige Türen werden nach den Vorschriften der Baupolizei doppelwandig, mit zwischen den Stahlwänden verlegten hochglut-sicheren Platten oder einer sonstigen feuerbeständigen Isoliermasse ausgeführt (Abbild. 8). Infolge der verschärften behördlichen Verordnungen sind die an eine feuerbeständige Tür gestellten Ansprüche recht weitgehend. Bei den Staatlichen Materialprüfungsämtern wird beispielsweise eine zu erprobende feuerbeständige Tür bei ein-

stündiger Prüfungsdauer einer Temperatur von über 1000° C ausgesetzt, wobei nach Beendigung des Versuches die Verschlüsse noch intakt sein müssen.

Neuerdings legt man bei den vorerwähnten Türen auf eine beider-

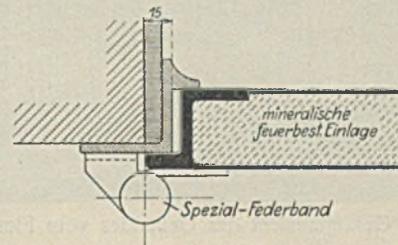


Abb. 8. Schnitt durch eine feuerbeständige Tür.

seitige, glatte Außenfläche besonderen Wert. Ohne sichtbare Niete oder Schrauben und mit ihren maschinell gefalzten Schlagleisten besitzen Türen dieser Art bei leichtem Gewicht große Widerstandsfähigkeit und Steifigkeit. Die außerordentlich leichte Bauart und äußere Gefälligkeit gepreßter Stahltüren zeigt u. a. auch Abb. 9, welche die mit Elektrolytverglasung versehenen Stahlfenster und Türen darstellen.

Zu den neuzeitlichen Bauelementen zählt auch die gepreßte Stahltürzarge (Abb. 10).

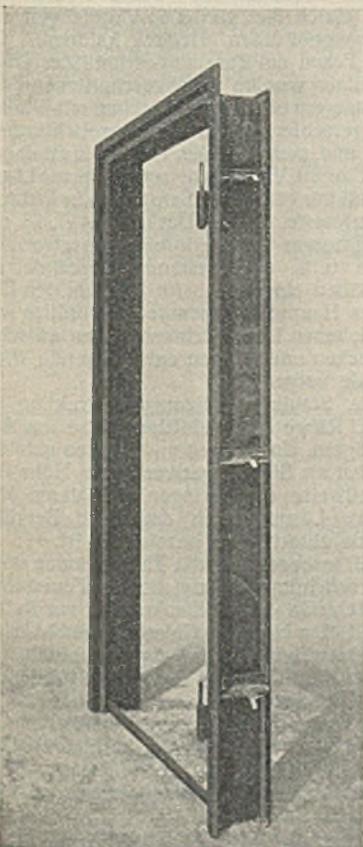


Abb. 10. Gepreßte Stahltürzarge.

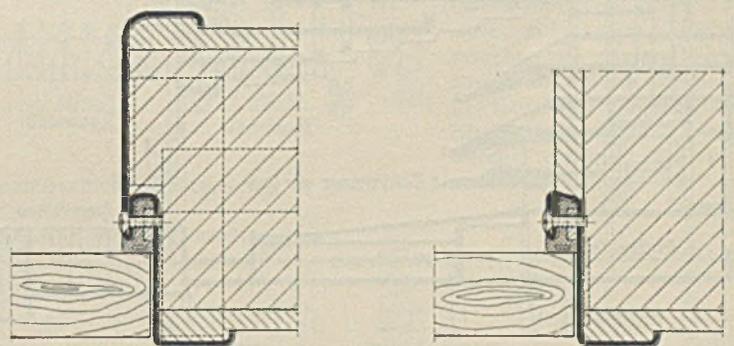


Abb. 11. Querschnitt durch eine Tür mit Gummiprofil.

Trotz ihrer verhältnismäßig dünnen Wandung ist sie infolge der zweckmäßigen, gepreßten Form überaus kräftig und hat bei vielen modernen Bauten steigende Verwendung gefunden. Insbesondere hat sich die gepreßte Zarge bewährt bei Türen für Krankenhäuser und Kliniken. Infolge ihrer gerundeten Kanten und des glatten Anschlages an der Mauer vermeidet sie jeden Ansatz von Unreinigkeiten und ist deshalb von hohem hygienischen Wert. Das lautlose Zuschlagen der Türen wird durch besondere, in gepreßten Nuten verlegte Gummiprofile erreicht (Abb. 11).

Gepreßte Türzargen können in denkbar verschiedenartigster Form und den weitgehendsten Ansprüchen entsprechend hergestellt werden.

Verschiedenes.

Stahlkonstruktion zu einem Wolkenkratzer-Theater- und Bürogebäude in Chicago. (Nach Eng. News-Rec. vom 14. 11. 1929.)

Wieder hat ein neuer Wolkenkratzer in Stahlskelettbau, der außer den üblichen Geschäfts- und Büroräumen sogar zwei Theater beherbergt, die Silhouette Chicagos verändert, nämlich das Wacker Drive Building von 45 Stockwerken bzw. 171 m größter Höhe, das Anfang 1928 entworfen und begonnen und dessen Opern- und Schauspielhaus kürzlich eröffnet wurden.

U-förmig im Grundriß von 119 m Länge und 58 m größter Breite erheben sich an den Schmalseiten Nord- und Südflügel bis zu 22 Stockwerken, schließen dazwischen die Räumlichkeiten für die Oper ein, während alles überragend sich an der Längsseite der 45 Stockwerke hohe Turm erhebt. Die interessante Gliederung des Bauwerkes, das sich im Chicago-



Abb. 1. Gesamtansicht des Gebäudes vom Flusse aus.

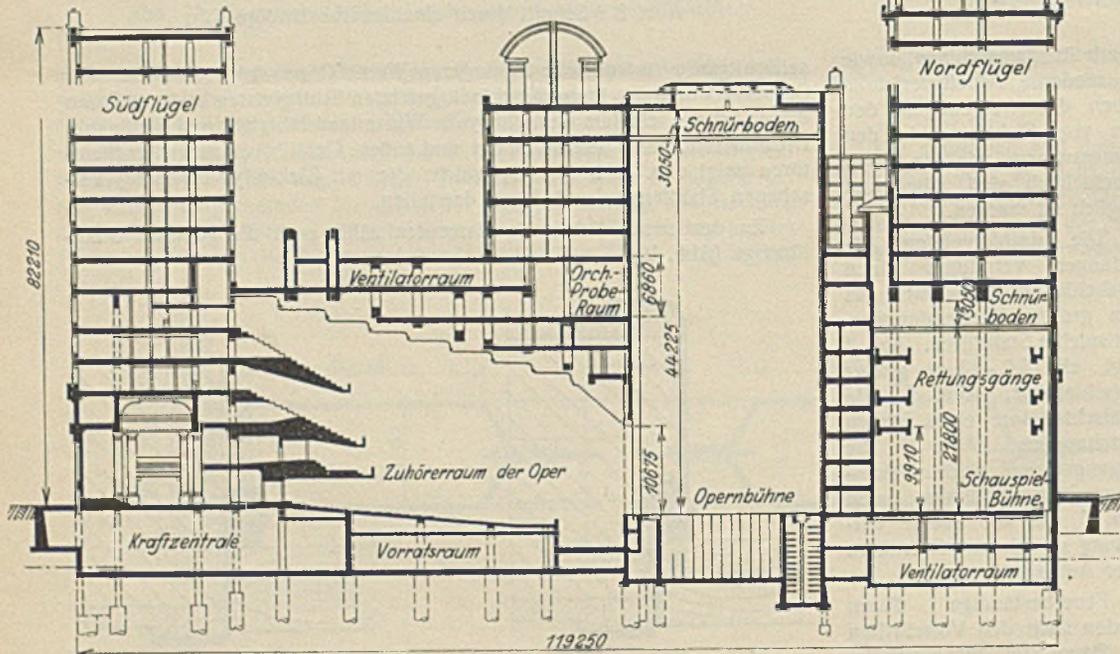


Abb. 2. Längsschnitt durch das Gebäude.

fluß spiegelt, zeigt Abb. 1. Die Abmessungen des Opernhauses für 3600 Personen sind: Zuhörerraum 48,2 m lang, 37,2 m breit und 26,4 m hoch im Innern, Bühne 36,6 m breit, 22 m tief und rd. 44 m hoch bis zum Schnürboden. Das kleine Schauspielhaus für nur 800 Personen liegt im Nordflügel und hat einen Zuschauerraum von 24,4 m Länge, 17,4 m Breite und 14,3 m Höhe mit einer Bühne von 21,4 m Breite, 9,8 m Tiefe und 21,8 m Höhe. Wenn auch diese Abmessungen (außer denen der Opernbühne) für deutsche Verhältnisse nichts Außergewöhnliches bedeuten, so muß man doch die selbstverständliche Großzügigkeit bewundern, mit der man die Theater z. T. überbaute und die Lasten von weiteren 15 bzw. 37 Stockwerken den Unterzügen und Stützen der Stahlkonstruktion zuwies, die dafür ausschließlich in Frage kam (Abb. 2). Da die Stützenteile der Büroräume von der der Theater wesentlich abwich, mußten große Unterzüge sehr erhebliche Lasten (z. B. 3400 t) auf die Außenstützen übertragen. Es ergaben sich dadurch stählerne kreisförmige Fußplatten von 2,5 m Durchmesser und 34 cm Gesamtstärke, die allein 14 t je Stück wogen.

Am stärksten belastet ist ein Kragträger von 22,4 m Spannweite und ~ 17 m Höhe, der fünf Stützen der oberen 37 Geschosse des Mittelturmes samt Mauerwerk usw., insgesamt ~ 5000 t aufnimmt. Um Nebenspannungen infolge Vernietung der Stäbe und größere Biegemomente in der Stütze

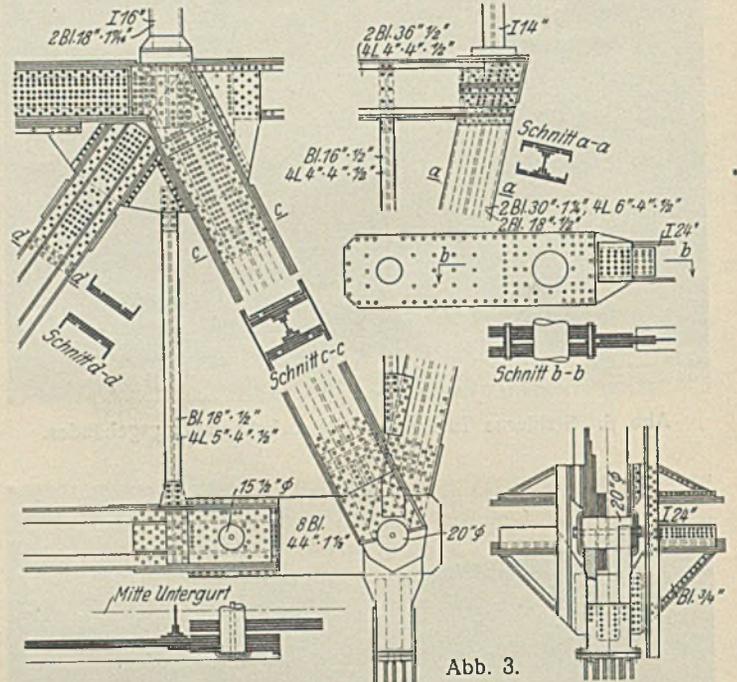


Abb. 3. Konstruktive Durchbildung eines Kragträgers mit Stützenanschluß.

zu vermeiden, wurden wie Abb. 3 zeigt, der Untergurt und die Stütze gelenkig durch Bolzen von 500 mm Durchmesser angeschlossen. Das Gewicht dieses Untergurtes allein beträgt 235 t. Die Belastungen der Unterzüge von 27 bis 37 m Länge über dem Zuhörerraum der Oper schwanken zwischen 1450 und 3300 t.

Als Winddruck wurde 210 kg/m² für den großen Turm und 140 kg/m² für das Hauptgebäude angenommen. Seine Übertragung erfolgt durch die von den Unterzügen und Stützen gebildeten steifen Rahmen. Die steifen Ecken am Zusammenschluß der Träger und Stützen wurden aus abgeschnittenen Breitflanschträgern oder Knotenblechen mit Winkeln in waagerechter und senkrechter Richtung gebildet, und zwar bei den Außen- und Innenstützen für die Verstelkung senkrecht zur Längsseite und nur bei den Außenstützen in Richtung der Längsseite. In die Decken des 7., 13. und 23. Geschosses wurden infolge Versetzens der Stützen u. ä. entsprechende Verbände aus Flachstäben eingebaut. An den um den Bauteil des Hauptzuhörerraumes behördlich vorgeschriebenen Luftschrägen wurden zwischen den Decken und Stützen entsprechende Windverbände vorgesehen.

Die Stahlunterstützungsstruktur für die drei Ränge ist in üblicher Weise aus Auslegerträgern, Unterzügen und Stützen gebildet, und zwar als Blechträger von 1,9 m Höhe, die sich teilweise durchdringen und deren konstruktive Lösung nach deutschen Begriffen nicht als glücklich zu bezeichnen ist.

Daß insbesondere die Theaterräume durch Pumpen, Röhrenanlagen und Regenvorrichtungen hinreichenden Feuerschutz erhalten haben, und daß die Kraftzentrale des Wolkenkratzers zur Anfuhr der Kohle und Abfuhr der Asche mit dem Netz der Chicago-Tunnel-Gesellschaft verbunden ist, sei nebenbei erwähnt, 35 Aufzüge vermitteln den Verkehr für die verschiedenen Höhenabschnitte mit Geschwindigkeiten bis 3,6 m/sek und 1200 kg Nutzlast. — Bei der Planung des Gebäudes wurde angenommen, daß die Theater vom Ertrag der Büroräume unterstützt werden können. — Sollte diese Voraussetzung sich nicht erfüllen, so bietet die gewählte Stahlkonstruktion die gute Möglichkeit, später aus den Theatern durch Um- und Einbauten Räume zu schaffen, die sich besser lohnen. A. D.

INHALT: Der Stahlbehälterbau. (Schluß.) — Anwendung der Gasschmelzschweißung für Stahlbauten. — Stahltürn und Stahlöre. — Verschiedenes: Stahlkonstruktion zu einem Wolkenkratzer-Theater- und Bürogebäude in Chicago.