

DER STAHLBAU

Schriftleitung:

Dr.-Ing. A. Hertwig, Geh. Regierungsrat, Professor an der Technischen Hochschule Berlin, Berlin-Charlottenburg 2, Technische Hochschule
 Fernsprecher: C 1 Steinplatz 0011
 Professor W. Rein, Breslau, Technische Hochschule. — Fernsprecher: Breslau 421 61

Beilage
 zur Zeitschrift

DIE BAUTECHNIK

Fachschrift für das gesamte Bauingenieurwesen

Preis des Jahrganges 10 RM und Postgeld

5. Jahrgang

BERLIN, 8. Januar 1932

Heft 1

Alle Rechte vorbehalten.

Zur Berechnung statisch unbestimmter Raumfachwerke (Zellwerke).

Von Dr.-Ing. H. Ebner.

Übersicht: Bisher fehlte ein für die Praxis geeignetes Verfahren zur genauen Berechnung querversteifter Raumfachwerke, wie sie als Brücken, Pfeiler, Masten usw. Verwendung finden. Ein solches Verfahren für die gleichartigen Systeme des Flugzeugbaues wurde vom Verfasser in den Forschungsarbeiten der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt veröffentlicht¹⁾. Die folgenden Ausführungen geben einen Auszug dieser Veröffentlichungen und zeigen überdies die Anwendung des entwickelten Verfahrens und der daraus abgeleiteten Näherungsverfahren bei der Berechnung eines stählernen Brückenpfeilers.

gestaltet sich ziemlich verwickelt. Die in der Praxis meist übliche Vernachlässigung der räumlichen Kräfteverteilung durch die Querwände kann bei größerer Exzentrizität der Quer- oder Längsbelastung zu beträchtlichen Fehlern führen. Andere Näherungsverfahren³⁾ geben nur in Sonderfällen ein zutreffendes Bild des Kräfteverlaufes. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist nun, zunächst die genaue Berechnung möglichst einfach und wenig fehlerempfindlich zu gestalten und danach die bei praktisch vorkommenden Systemen im allgemeinen zulässigen Vereinfachungen zu zeigen.

1. Einleitung.

Die behandelten Raumfachwerke bestehen aus vier ebenen oder gebrochenen „Längswänden“, die durch einander parallele und rechteckige „Querwände“ ausgesteift sind (Abb. 1 bis 3²⁾). Die genaue Berechnung

2. Statischer Aufbau und Lagerung.

Sind bei den Raumfachwerken in Abb. 1 bis 3 nur die Endquerwände ausgesteift, so bezeichnet man solche Systeme mit gelenkigen Knotenpunkten und aus Dreiecken zusammengesetzter Mantelfläche nach Föppl als „Flechtwerke“⁴⁾. Zum Unterschied von diesen besitzen die hier be-

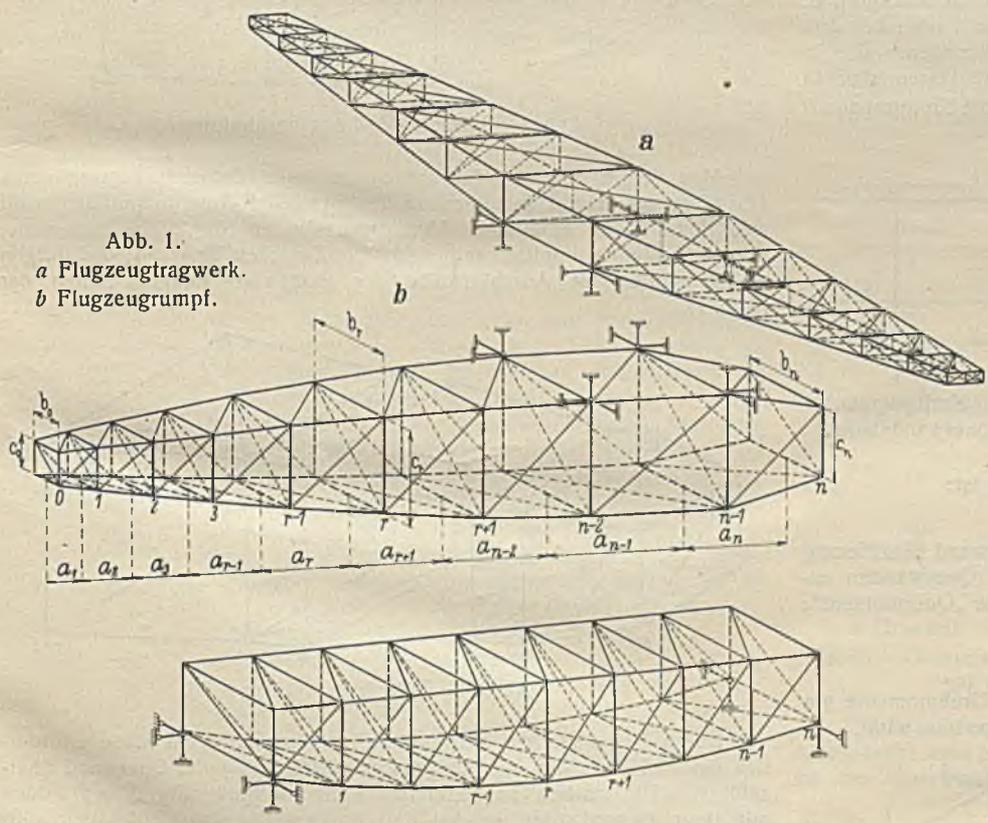


Abb. 1.
 a Flugzeugtragwerk.
 b Flugzeugrumpf.

Abb. 2.

Abb. 3. Fachwerkbrücke (Zellwerk mit zwei Stützquerwänden).

Turmpfeiler (eingespanntes Zellwerk).

solcher bei größerer Anzahl von Querwänden hochgradig statisch unbestimmter Raumfachwerke nach den allgemeinen Verfahren der Baustatik

handelten Raumfachwerke weitere Zwischenquerwände, die sie in „Zellen“ unterteilen; sie werden demnach sinngemäß als „Zellwerke“ bezeichnet.

¹⁾ H. Ebner, Zur Berechnung räumlicher Fachwerke im Flugzeugbau, 138. DVL-Bericht, Luftfahrtforschung, Bd. V, Heft 2 und Jahrbuch 1929 der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt e. V., Berlin-Adlershof; München, Oldenbourg. — H. Ebner, Die Berechnung regelmäßiger, vielfach statisch unbestimmter Raumfachwerke mit Hilfe von Differenzgleichungen, 235. DVL-Bericht, DVL-Jahrbuch 1931.

³⁾ Vgl. u. a.: Engesser, Die Zusatzkräfte und Nebenspannungen eiserner Fachwerkbrücken, Berlin 1892, Springer. — Löschner, Beitrag zur Theorie der Balkenbrücken als räumliche Gebilde, Wittenberg 1913, Ziemsen & Herrosé. — Wagner, Über räumliche Flugzeugfachwerke (Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt 1928, H. 15), München, Oldenbourg.

²⁾ Die Bezeichnung „Längs- und Querwände“ wird auch für die aufrechten und waagerechten Verbände der Turmpfeiler beibehalten.

⁴⁾ Föppl, Vorlesungen über technische Mechanik, 2. Band, Graphische Statik, S. 241, 7. Auflage. Leipzig, Teubner.

Flechtwerke sind statisch bestimmte Raumbauwerke. Jede statisch bestimmte Zwischenquerwand bedeutet für das viergurtige Raumbauwerk eine „räumliche“ statische Unbestimmtheit. Bei Ausbildung der Längs- oder Querwände als statisch unbestimmte Fachwerke oder Rahmen kommen deren „ebene“ Unbestimmtheiten noch hinzu. Viergurtige Zellwerke mit n Zellen und statisch bestimmten Längs- und Querwänden sind demnach innerlich $(n - 1)$ -fach statisch unbestimmt.

Die Lagerung der beschriebenen Systeme erfolgt meistens in der Weise, daß entweder die vier Eckpunkte einer Endquerwand (z. B. bei Turmpfeilern, Abb. 2) oder je zwei Eckpunkte von zwei Querwänden (z. B. bei Flugzeugen und Brücken, Abb. 1 u. 3) fest angeschlossen oder zwangsläufig geführt sind. Nach Art der Abb. 2 gelagerte Zellwerke werden als eingespannt bezeichnet.

Einer Lagerung in vier festen Punkten einer Ebene entsprechen zwölf Auflagerstäbe, und zwar acht in der Auflagerebene, vier senkrecht zu dieser. Von diesen sind nur sechs Stäbe — drei in der Auflagerebene, drei senkrecht zu dieser — statisch erforderlich. Ist das System wie in Abb. 1 oder 2 in vier benachbarten Knotenpunkten angeschlossen, dann können die fünf im Raumbauwerk unbeanspruchten Auflagerverbindungsstäbe oder — wenn man diese starr annimmt — die fünf überzähligen Auflagerstäbe in der Auflagerebene fortgelassen werden. Dann bleibt nur einer der vier Auflagerstäbe senkrecht zur Auflagerebene statisch überzählig. Eingespannte oder nach Abb. 1 (gegen den starr angenommenen Rumpf bzw. Flügel) abgestützte viergurtige Zellwerke mit n Zellen und für sich statisch bestimmten Längs- und Querwänden sind also n -fach statisch unbestimmt. Bei der üblichen Brückenlagerung (s. Abb. 3) fallen infolge der Längsbeweglichkeit der Lager an einem Ende zwei Auflagerstäbe in Längsrichtung fort; außerdem können die beiden Auflagerverbindungsstäbe in den Stützquerwänden oder zwei waagerechte Auflagerstäbe in Querrichtung fortgelassen werden. Dann bleiben vier Auflagerstäbe in der Auflagerebene und vier senkrecht zu dieser übrig. Außer dem überzähligen senkrechten Auflagerstab bleibt dann noch ein überzähliger Auflagerstab in der Auflagerebene.

3. Die äußere Belastung.

Als äußere Belastung wirken beliebige Kräfte P in den Ecken I, II, III und IV der rechteckigen Querwände. Diese lassen sich nach den drei Querwandachsen in drei Komponenten A, B und C zerlegen. Die in die Querwandebene fallenden Komponenten B und C lassen sich in symmetrische Kraftgruppen B' und C' und antisymmetrische Kraftgruppen \bar{B} und \bar{C} ordnen, deren Kräfte betragen (Abb. 4):

$$B' = \frac{1}{2} [B_I + B_{II} + B_{III} + B_{IV}]$$

$$C' = \frac{1}{2} [C_I + C_{II} + C_{III} + C_{IV}]$$

$$\bar{B} = \frac{1}{2} [B_I - B_{II} - B_{III} + B_{IV}]$$

$$\bar{C} = \frac{1}{2} [C_I + C_{II} - C_{III} - C_{IV}]$$

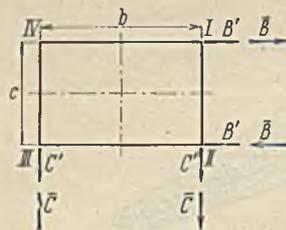


Abb. 4. Kraftgruppen in der Querwandebene.

Die antisymmetrischen Kräftepaare \bar{B} und \bar{C} lassen sich zu Drehmomenten M um die Längsachse zusammenfassen. Bedeutet b und c die Querwandseiten (Abb. 4), dann ist:

$$M = \bar{B}c + \bar{C}b.$$

Gibt man den Zellen die Nummern ihrer rechten Querwand (Bezeichnung s. Abb. 1 u. 2), so bestimmen die an den einzelnen Querwänden angreifenden Drehmomente M_i das auf die r te Zelle wirkende „Quermoment“:

$$\bar{M}_r = \sum_{i=0}^{r-1} M_i.$$

Dieses gilt als positiv, wenn die Summe der äußeren Drehmomente am linken Systemteil in Längsrichtung gesehen im Uhrzeigersinn wirkt.

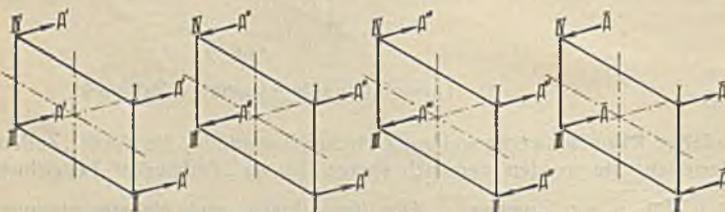


Abb. 5. Kraftgruppen senkrecht zur Querwandebene.

Die senkrecht zu den Querwänden in den Ecken angreifenden Längskräfte A_I, A_{II}, A_{III} und A_{IV} lassen sich in der Weise ordnen, daß vier Gruppen gleich großer, teils gleich gerichteter, teils paarweise entgegengesetzt gerichteter Kräfte entstehen (Abb. 5):

$$A' = \frac{1}{4} [A_I + A_{II} + A_{III} + A_{IV}]$$

$$A'' = \frac{1}{4} [A_I + A_{II} - A_{III} - A_{IV}]$$

$$A''' = \frac{1}{4} [A_I - A_{II} - A_{III} + A_{IV}]$$

$$\bar{A} = \frac{1}{4} [A_I - A_{II} + A_{III} - A_{IV}]$$

Davon ist die erste Gruppe zu beiden Querachsen symmetrisch, die zweite und dritte zu einer Querachse symmetrisch und die vierte zu beiden Querachsen antisymmetrisch. Die Längskraftgruppen gelten als positiv, wenn die Kraft in der oberen vorderen Ecke in Längsrichtung zeigt.

4. Die Elastizitätsgleichungen.

Umfang und Genauigkeit einer statisch unbestimmten Rechnung hängt wesentlich von der Wahl des statisch bestimmten Hauptsystems ab. Bei den Zellwerken (Abb. 1 bis 3) erscheint auf den ersten Blick das Nächstliegende, als Überzählige die Diagonalen der Zwischenquerwände, als statisch bestimmtes Hauptsystem also das Flechtwerk einzuführen. Hierbei würden jedoch vielgliedrige sowie fehlerempfindliche Elastizitätsgleichungen entstehen, da die Zustände $X=1$ sich über das ganze System erstrecken und die Überzähligen sich als Differenzen nahezu gleich großer Zahlen ergeben. Diesen Nachteil vermeidet man, wenn man den Anschluß der Längsstäbe in einer Querwanddecke senkrecht zur Querwandebene längsbeweglich macht (Abb. 6) und als Überzählige die Längsanschlußkräfte einführt.

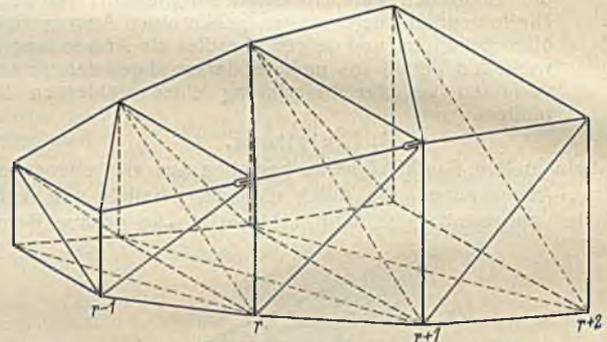


Abb. 6. Lösung der Längsverbinding.

Man denke sich nun das System an jeder Zwischenquerwand auseinandergezogen und entsprechend den vier festen Anschlußpunkten zwölf zusätzliche Stäbe eingefügt. Von diesen bilden fünf Stäbe eine neue, der vorhandenen unmittelbar benachbarte Zwischenquerwand; die übrigen sieben stellen die Anschlußstäbe der jetzt selbständigen Zellen dar (Abb. 7).

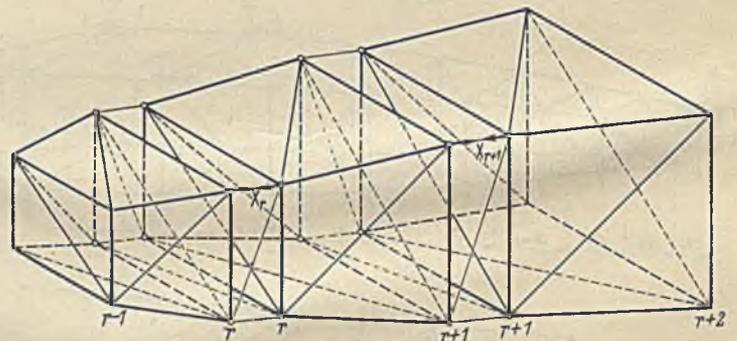


Abb. 7. Zellenhauptsystem.

Da zu einem statisch bestimmten Anschluß nur sechs Stäbe erforderlich sind, ist einer der vier Längsanschlußstäbe an jeder Querwand überzählig⁵⁾. Die statisch unbestimmten Längsanschlußkräfte $X=1$ bilden mit ihren Gegenkräften in den drei übrigen Längsanschlußstäben antisymmetrische Längskraftgruppen (positiv entsprechend Abb. 8), die an den einzelnen Zellen im Gleichgewicht stehen. Der Einfluß einer jeden Gruppe $X_r=1$ am Hauptsystem erstreckt sich jetzt nur auf die beiden benachbarten Zellen r und $(r + 1)$.

⁵⁾ Bei dieser gedachten Anordnung, Abb. 7, erhält man die Kräfte der Querwandstäbe im Hauptsystem, indem die Zellen wieder zusammengesoben und die Stabkräfte der hierbei zusammenfallenden Querwand- und Verbindungsstäbe überlagert werden. Zweckmäßiger ist es jedoch, die Stabkräfte der Querwände nach Berechnung der Stabkräfte in den Längswandgurt- und -diagonalen aus deren Querkomponenten zu bestimmen (s. Abschnitt 6).

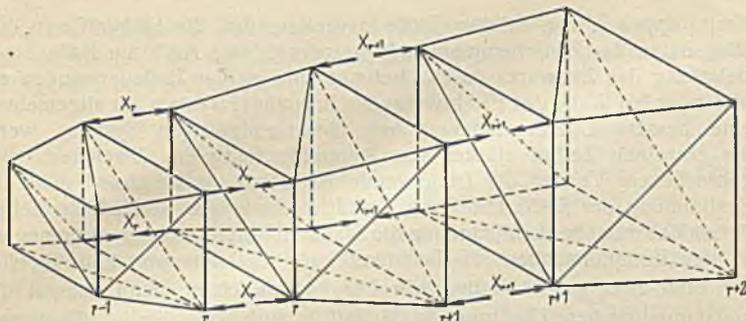


Abb. 8. Antisymmetrische Längskraftgruppen X am Zellenhauptsystem.

Damit lautet die r te Elastizitätsgleichung des Gleichungssystems (Bezeichnung vgl. Abb. 1 u. 2) bei in ihrer Ebene starren Querwänden:

$$\delta_{r(r-1)} X_{r-1} + \delta_{rr} X_r + \delta_{r(r+1)} X_{r+1} = -\delta_{ro}$$

und bei elastischen Querwänden:

$$\delta_{r(r-2)} X_{r-2} + \delta_{r(r-1)} X_{r-1} + \delta_{rr} X_r + \delta_{r(r+1)} X_{r+1} + \delta_{r(r+2)} X_{r+2} = -\delta_{ro}$$

Man erhält also für das Zellwerk mit starren bzw. elastischen Querwänden dieselben drei- bzw. fünfgliedrigen Gleichungssysteme wie für den durchlaufenden Balken auf starren bzw. elastischen Stützen bei Einführung der Stützenmomente als Überzählige. Die zweckmäßige Auflösung solcher Gleichungssysteme ist von verschiedenen Verfassern behandelt⁶⁾.

Die Lastwerte δ_{ro} und Belwerte δ_{ri} in den Elastizitätsgleichungen bedeuten gegenseitige Verwölbungen der rechten Querwand von Zelle r und der linken Querwand von Zelle $(r+1)$ infolge der äußeren Belastung und der Zustände $X_i = 1$. Dabei gilt als Verwölbung die Gruppe der vier Eckverschiebungen im Sinne einer antisymmetrischen Längskraftgruppe A . Die Elastizitätsgleichungen besagen also, daß die gegenseitige Verwölbung aufeinanderfolgender Zellen an der gemeinsamen Querwand verschwinden muß.

Bei statisch unbestimmten Querwänden gewinnt man fünfgliedrige Elastizitätsgleichungen, wenn man der Berechnung ein der Abb. 7 entsprechendes, statisch unbestimmtes Hauptsystem aus für sich statisch unbestimmten Zellen zugrunde legt. Im Falle statisch unbestimmter Lagerung entsprechend Abb. 2 fügt sich die überzählige Auflagerlängskraft des eingespannten Zellwerks, genau wie ein Einspannmoment am Ende eines durchlaufenden Balkens, in das System der Elastizitätsgleichungen ein. Bei dem in zwei Querwänden gestützten Zellwerk (Abb. 1 u. 3) ermittelt man die Überzähligen infolge der Lagerung, indem man das statisch bestimmt gelagerte Zellwerk als $(n-1)$ -fach statisch unbestimmtes Hauptsystem einführt.

5. Ersatzhauptsysteme für die äußere Belastung.

Die Lastwerte in den Elastizitätsgleichungen und die endgültigen Stabkräfte können mit Stabkräften S_0' infolge der äußeren Belastung an „Ersatzhauptsystemen“ ermittelt werden, die mit dem Hauptsystem für die Zustände $X=1$ nicht übereinstimmen⁷⁾. Die Unbekannten X in den Elastizitätsgleichungen bedeuten dann die Differenz zwischen den endgültigen Kräften der überzähligen System- oder Auflagerstäbe und den statisch bestimmten Kräften dieser Stäbe infolge der äußeren Belastung am Ersatzhauptsystem. Für einzelne Teilzustände der äußeren Belastung — z. B. symmetrische und antisymmetrische oder senkrechte und waagerechte — können verschiedene Ersatzhauptsysteme gewählt werden. Diese brauchen dann keine für alle Belastungsfälle stabilen Raumbachwerke zu sein; es genügt, daß für den jeweiligen Belastungszustand an dem zugeordneten Ersatzhauptsystem Gleichgewicht herrscht.

Unter den möglichen Ersatzhauptsystemen für die äußere Belastung wird man nun solche auswählen, deren Stabkräfte S_0' sich einfach ergeben und außerdem den endgültigen Stabkräften möglichst nahe kommen. Die statisch unbestimmte Rechnung wird dann wenig fehlerempfindlich, und die Stabkräfte S_0' können zur Vorbemessung benutzt werden. Bei den vorliegenden Zellwerken erreicht man diesen Vorteil, indem man den symmetrischen und antisymmetrischen Gruppen der äußeren Kräfte (s. Abschnitt 3) verschiedene Hauptsysteme zuordnet.

Als Ersatzhauptsysteme für die symmetrischen Kraftgruppen (A', A'', A''', B' und C') werden beim eingespannten Zellwerk (Abb. 2) die am Ende eingespannten Längswände (s. Abb. 9) und beim Zellwerk mit zwei Stützquerwänden (Abb. 1 oder 3) die Längswände und Endquerwände auf je zwei Stützen gewählt (Abb. 10). Diese Ersatzhauptsysteme für die symmetrischen Kraftgruppen stimmen also mit den

⁶⁾ Vgl. die Arbeiten von Hertwig, Müller-Breslau, Pirlet, Ostenfeld und Lewe im Eisenbau 1917, Heft 4 u. 7; 1910, Heft 9; 1913, Heft 4; 1916, Heft 8, Leipzig, Engelmann.

⁷⁾ Vgl. Abschnitt II, 4 des 138. DVL-Berichts (s. Anmerkung 1).

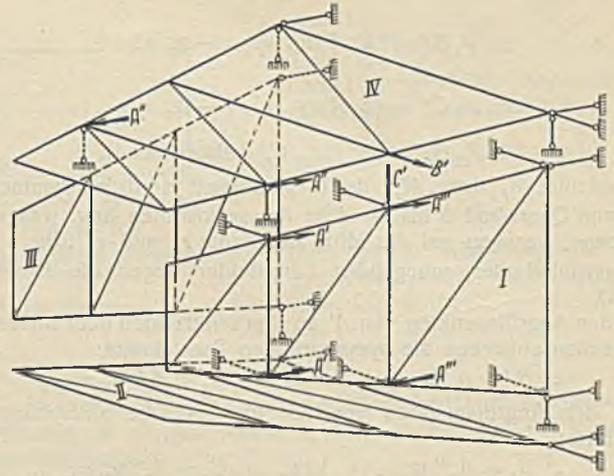


Abb. 9. Ersatzhauptsystem für das eingespannte Zellwerk.

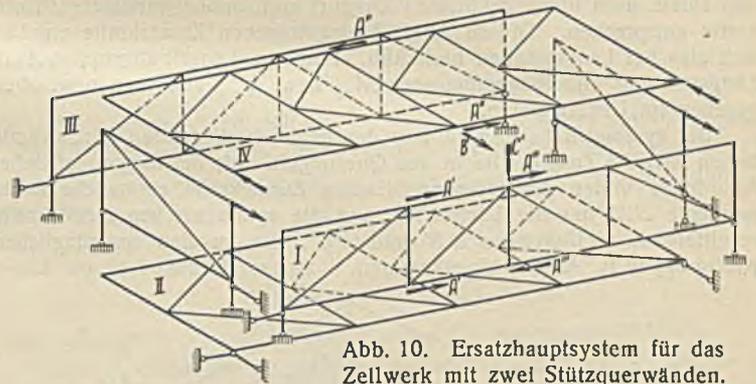


Abb. 10. Ersatzhauptsystem für das Zellwerk mit zwei Stützquerwänden.

Systemen überein, die man der üblichen Näherungsberechnung von Brücken, Pfeilern usw. zugrunde legt.

Sind die einzelnen Längswände der statisch bestimmten Ersatzhauptsysteme eben, dann stehen sie unter der Wirkung der symmetrischen Kraftgruppen B' und C' für sich im Gleichgewicht; nur an den Angriffspunkten der Längskräfte A', A'' und A''' sind, wenn die Längswände nicht

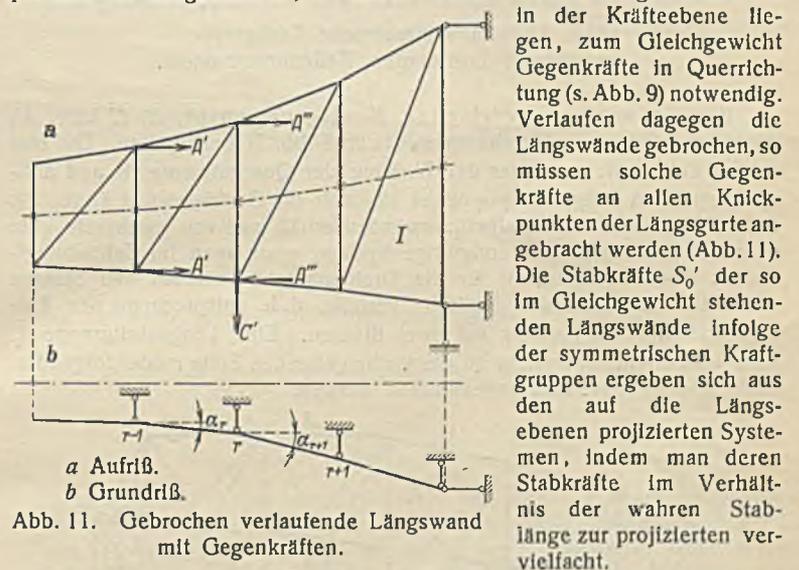


Abb. 11. Gebrochen verlaufende Längswand mit Gegenkräften.

in der Kräfteebene liegen, zum Gleichgewicht Gegenkräfte in Querrichtung (s. Abb. 9) notwendig. Verlaufen dagegen die Längswände gebrochen, so müssen solche Gegenkräfte an allen Knickpunkten der Längsurte angebracht werden (Abb. 11). Die Stabkräfte S_0' der so im Gleichgewicht stehenden Längswände infolge der symmetrischen Kraftgruppen ergeben sich aus den auf die Längsebenen projizierten Systemen, indem man deren Stabkräfte im Verhältnis der wahren Stablänge zur projizierten vervielfacht.

Die zum Gleichgewicht an den Längswänden I, II, III, IV notwendigen Gegenkräfte sind in umgekehrter Richtung als „Zusatzkräfte“ ΔB und ΔC an den Querwänden anzubringen (Abb. 12), und zwar wirken an den Knickpunkten r der Längsurte antisymmetrische Zusatzkräfte vom Betrag:

$$\begin{aligned} \Delta I B_r &= \frac{M_{rz}}{c_r} (\operatorname{tg}_I \alpha_{r+1} - \operatorname{tg}_I \alpha_r) \\ \Delta II C_r &= \frac{M_{ry}}{b_r} (\operatorname{tg}_{II} \alpha_{r+1} - \operatorname{tg}_{II} \alpha_r) \\ (\Delta III B_r \text{ und } \Delta III C_r \text{ entsprechend}) \end{aligned}$$

Abb. 12. Zusatzkräfte an den Querwänden.

und, je nachdem die Kraftgruppen A' an den senkrechten oder waagerechten Längswänden angebracht werden, symmetrische Zusatzkräfte vom Betrag:

$$\begin{aligned} \Delta_I B_r' &= \sum_0^{r-1} A' (tg_{II} \alpha_{r+1} - tg_I \alpha_r) \\ \text{oder } \Delta_{II} C_r' &= \sum_0^{r-1} A' (tg_{II} \alpha_{r+1} - tg_{II} \alpha_r) \\ &(\Delta_{III} B_r' \text{ oder } \Delta_{IV} C_r' \text{ entsprechend}). \end{aligned}$$

Darin bedeutet M_{rz} bzw. M_{ry} das Biegemoment sämtlicher symmetrischen Kräfte von Querwand 0 bis $r-1$ in der senkrechten bzw. waagerechten Längsebene, bezogen auf die Mitte der Kante r , und α_r bzw. α_{r+1} die Neigungswinkel der anliegenden Längsfelder gegen die Längsebenen (Abb. 11).

In den Angriffspunkten von A' an den senkrechten oder waagerechten Längswänden entstehen die symmetrischen Zusatzkräfte:

$$\Delta_I B_r' = A_r' tg_I \alpha_{r+1} \text{ oder } \Delta_{II} C_r' = A_r' tg_{II} \alpha_{r+1}$$

und in den Angriffspunkten von A''' bzw. A'' die antisymmetrischen Zusatzkräfte:

$$\Delta_I \bar{B}_r = A_r''' tg_I \alpha_{r+1} \text{ bzw. } \Delta_{II} \bar{C}_r = A_r'' tg_{II} \alpha_{r+1}.$$

Den Richtungssinn der Zusatzkräfte bestimmt man aus der Regel, daß einem nach innen geknickten Zuggurt nach außen gerichtete Zusatzkräfte entsprechen. Die in Abb. 12 eingetragenen Zusatzkräfte ergeben sich also bei Längswänden nach Abb. 11 infolge Längskraftgruppen A' in Längsrichtung und Biegemomenten M_{rz} bzw. M_{ry} von vorn bzw. oben gesehen im Uhrzeigersinn.

Bei symmetrischer Anordnung der gegenüberliegenden Längswände heben sich die Zusatzkräfte in den Querriegeln auf; bei unsymmetrischer Anordnung bilden die antisymmetrischen Zusatzkräfte zusätzliche Drehmomente ΔM um die Längsachse und die symmetrischen Zusatzkräfte resultierende Kraftgruppen $\Delta B'$ und $\Delta C'$, die zu den ursprünglichen Kraftgruppen (s. Abb. 4) hinzukommen.

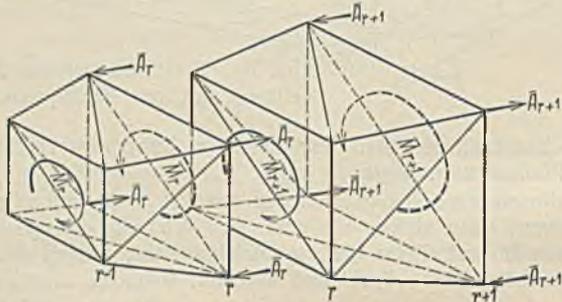


Abb. 13. Antisymmetrische Kraftgruppen am statisch bestimmten Zellenhauptsystem.

Für die antisymmetrischen Kraftgruppen (\bar{A} , \bar{B} , \bar{C} bzw. \bar{M}) wird das frühere „Zellenhauptsystem“ (Abb. 7) beibehalten. Die einzelnen Zellen stehen unter der Wirkung der Quermomente \bar{M} und antisymmetrischen Längskraftgruppen \bar{A} für sich im Gleichgewicht (Abb. 13). Beim Zellwerk mit zwei Stützquerwänden erhält man von vornherein eine gute Annäherung an das endgültige System, wenn man im Zellenhauptsystem das Gegenmoment für die Drehmomente zwischen den Stützen auf die Stützquerwände „statisch“ verteilt, d. h. entsprechend den Auflagerkräften eines Balkens auf zwei Stützen. Eine Längskraftgruppe \bar{A}_r kann im Zellenhauptsystem an der vorhergehenden Zelle r oder folgenden Zelle $(r+1)$ angreifend angenommen werden.

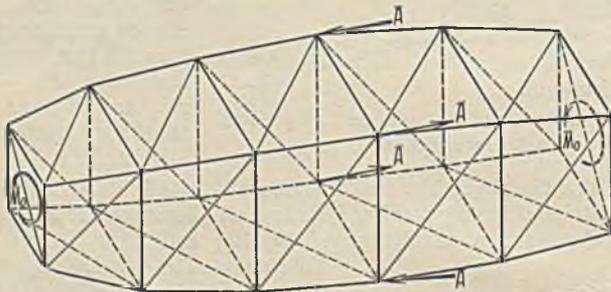


Abb. 14. Drehmomente an den Endquerwänden und antisymmetrische Längskraftkräfte am Flechtwerk.

Bei dieser Wahl des Hauptsystems für \bar{A} hat man den Vorteil, daß im Hauptsystem nur die Stäbe einer Zelle belastet sind. Allerdings können hierbei besonders bei weichen Querwänden und steifen Längsgurten die Stabkräfte S_0 beträchtlich von den endgültigen abweichen. Eine bessere Annäherung an das endgültige System erhält man in diesem Fall, wenn man die antisymmetrischen Längskraftgruppen \bar{A} am ganzen Flechtwerk angreifen läßt (Abb. 14). Dieses System entspricht dann einem Zellenhauptsystem, an dem in diesem Falle statisch bestimmbare

Kraftgruppen X von solcher Größe angreifen, daß die Stabkräfte in den Diagonalen der Zwischenquerwände verschwinden. Auch im Falle einer Belastung des Zellwerks durch Drehmomente an den Endquerwänden erhält man bei Wahl des Flechtwerks als Ersatzhauptsystem im allgemeinen eine bessere Übereinstimmung mit dem endgültigen System, wenn die einzelnen Zellen stärker von Pyramidenstümpfen abweichen. Bei gebrochenem Verlauf der Längswände ist allerdings in diesem Fall die Bestimmung der Stabkräfte S_0 wesentlich schwieriger⁶⁾. Sind die Zellen Pyramidenstümpfe, dann stimmen die Stabkräfte infolge von Drehmomenten an den Endquerwänden im Flechtwerk und Zellenhauptsystem überein.

Sind zwei gegenüberliegende Längswände eben, dann können die antisymmetrischen Kraftgruppen \bar{M} und \bar{A} auch von diesen allein aufgenommen werden. Wählt man diese entsprechend Abb. 9 oder 10 als Ersatzhauptsystem, so erhält man — allerdings bei stärkerer Abweichung der Stabkräfte S_0 von den endgültigen — eine geringere Anzahl belasteter Stäbe im Hauptsystem. Sind nur eine oder zwei benachbarte Längswände eben, dann kann man die symmetrischen Kräfte B' bzw. C' und A'' bzw. A''' — unter Hinzufügung von Drehmomenten \bar{M} und antisymmetrischen Längskraftgruppen \bar{A} am Zellenhauptsystem — in die ebenen Längswände verschieben. Man spart dann die Bestimmung der Zusatzkräfte an den gebrochen verlaufenden Längswänden, die den ebenen Längswänden gegenüberliegen.

6. Stabkräfte des Zellenhauptsystems infolge der antisymmetrischen Kraftgruppen.

Für die antisymmetrischen Kraftgruppen \bar{M} und \bar{A} werden im folgenden die auf die Stablänge bezogenen Stabkräfte $\mathfrak{S} = \frac{S}{s}$ der r ten Zelle angegeben. Die Stabkräfte infolge der Zustände $X=1$ (s. Abb. 8) lassen sich ohne weiteres aus den Stabkräften infolge $\bar{A}=1$ zusammensetzen.

Für den Längsverband zwischen den Querwänden wird einfacher N - oder K -Verband vorausgesetzt (Abb. 15). Bei unterteiltem Längsverband zwischen den Querwänden kann man die Stabkräfte durch Überlagerung der Stabkräfte bei ein-

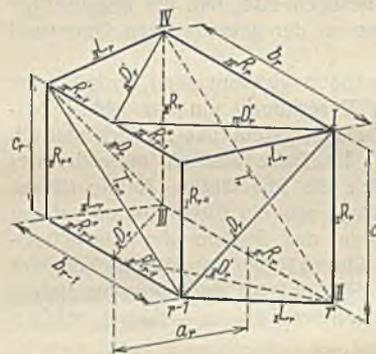


Abb. 15. Stäbe der r ten Zelle.

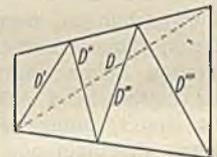


Abb. 16. Unterteilung der Längsfache.

fachem N -Verband mit den Stabkräften infolge der umgekehrten Diagonalkraft am unterteilten System erhalten (Abb. 16). Aus den Abmessungen der r ten Zelle (Abb. 15) werden folgende Abkürzungen gebildet:

$$F_r = b_r c_r, \quad K_r = b_{r-1} c_r + c_{r-1} b_r, \quad \mu_r = \frac{b_{r-1} c_r}{c_{r-1} b_r}.$$

Infolge eines Quermomentes \bar{M}_r an der r ten Zelle (Abb. 13) entstehen in allen Längsdiagonalen oder K -Streben (D) die gleichen bezogenen Stabkräfte:

$$\mathfrak{S}_r^{(D)} = \pm \frac{\bar{M}_r}{K_r}.$$

Die bezogenen Stabkräfte der Längsgurte (L) infolge \bar{M}_r sind, je nachdem an beiden oder nur an einem Stabende Diagonalen vorhanden sind:

$$\mathfrak{S}_r^{(L)} = -\mathfrak{S}_r^{(D)} \text{ oder } = 0.$$

Die Längsdiagonalen infolge eines positiven Quermomentes (s. Abb. 13) haben positive Stabkräfte (Zug), wenn sie in Längsrichtung in einer Schraube entgegen dem Uhrzeigersinn laufen.

Infolge der antisymmetrischen Längskraftgruppe \bar{A}_r an der rechten Querwand der r ten Zelle sind die bezogenen Stabkräfte der Diagonalen der senkrechten bzw. waagerechten Längswände:

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}_r^{(D)} &= \pm \frac{1}{1 + \mu_r} \cdot \frac{\bar{A}_r}{a_r} \\ &= \pm \frac{\mu_r}{1 + \mu_r} \cdot \frac{\bar{A}_r}{a_r}. \end{aligned}$$

bzw.

infolge \bar{A}_{r-1} an der linken Querwand der r ten Zelle sind sie:

$$\mathfrak{S}_r^{(D)} = \pm \frac{\mu_r}{1 + \mu_r} \cdot \frac{\bar{A}_{r-1}}{a_r} \quad \text{bzw.} \quad = \pm \frac{1}{1 + \mu_r} \cdot \frac{\bar{A}_{r-1}}{a_r}.$$

Bei Quader- und Pyramidenstumpf-Zellen ist $\mu_r = 1$.

⁶⁾ Vgl. hierzu Abschnitt III des 138. DVL-Berichts (s. Anmerkung 1).

Die bezogenen Stabkräfte der Längsurte infolge A_r bzw. A_{r-1} sind, je nachdem sie an der unbelasteten Querwand mit einer, zwei oder keiner Diagonale zusammenstoßen:

$$\mathfrak{E}_r^{(L)} = -\mathfrak{E}_r^{(D)} \text{ oder } \pm \frac{A_r}{a_r} \text{ bzw. } \pm \frac{A_{r-1}}{a_r} \text{ oder } 0.$$

Das Vorzeichen der Stabkräfte infolge A ergibt sich aus dem Gleichgewicht der senkrecht zur belasteten Querwand wirkenden Kräfte.

Der beliebig angenommene Verband der Querwände besteht aus den Randstäben oder Riegeln R und den Innenstäben oder Querdiagonalen T (Abb. 15). Die Stabkräfte einer Querwand ergeben sich aus dem Gleichgewichtssystem der in der Querwandebene wirkenden Komponenten der anliegenden Längsstäbe D und L und äußeren Kräfte. Die Komponenten der Längsstäbe erhält man, indem man ihre bezogenen Stabkräfte mit ihren auf die Querebene projizierten Stablängen multipliziert und in ihrer Richtung ansetzt (Abb. 17). Während die Stabkräfte in den Randstäben der Querwand von den Angriffspunkten der Diagonalen und der äußeren Kräfte abhängen und von

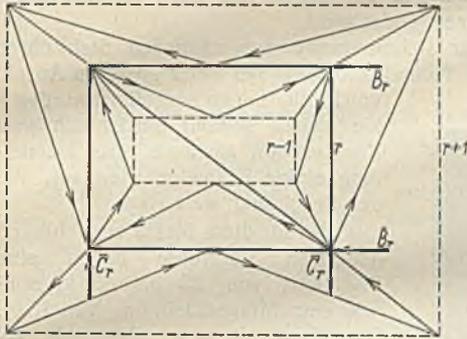


Abb. 17. Bestimmung der Stabkräfte in den Querwandstäben.

von diesen Angriffspunkten unabhängig, wenn die äußeren Kräfte nur in den Ecken angreifen, und zwar sind die bezogenen Stabkräfte sämtlicher beanspruchten Innenstäbe T, T' usw. (Abb. 18) dem absoluten Betrag nach gleich.

Wird an der Querwand r nur das Quermoment M_r übergeleitet ($M_r = 0$), so sind die bezogenen Stabkräfte der Innenstäbe:

$$\mathfrak{E}_r^{(T)} = \pm \frac{1 - \mu_r \mu_{r+1}}{(1 + \mu_r)(1 + \mu_{r+1})} \cdot \frac{M_r}{F_r}$$

Bei Quader- und Pyramidenstumpfzellen ($\mu = 1$) wird:

$$\mathfrak{E}_r^{(T)} = 0.$$

Wird an der Querwand r ein Moment eingeleitet (s. Abb. 4):

$$M_r = B_r c_r + C_r b_r,$$

dann erhalten die Innenstäbe außerdem

$$\mathfrak{E}_r^{(T)} = \pm \frac{C_r / c_r - \mu_{r+1} B_r / b_r}{1 + \mu_{r+1}}$$

Wirken an der rechten bzw. linken Querwand der r -ten Zelle die antisymmetrischen Längskraftgruppen A_r bzw. A_{r-1} , so erhalten die Innenstäbe der rechten und linken Querwand der r -ten Zelle:

$$\mathfrak{E}_r^{(T)} = \pm \left(1 - \frac{F_{r-1}}{K_r}\right) \frac{A_r}{a_r}$$

$$\mathfrak{E}_{r-1}^{(T)} = \mp \frac{F_r}{K_r} \cdot \frac{A_r}{a_r}$$

bzw.

$$\mathfrak{E}_r^{(T)} = \pm \frac{F_{r-1}}{K_r} \cdot \frac{A_{r-1}}{a_r}$$

$$\mathfrak{E}_{r-1}^{(T)} = \mp \left(1 - \frac{F_r}{K_r}\right) \frac{A_{r-1}}{a_r}$$

Ist die Querwand nur durch eine Querdiagonale ausgesteift, so gilt das obere Vorzeichen in den vorstehenden Formeln, wenn sie in Längsrichtung gesehen nach rechts fällt. Bei unterteiltem Querverband (s. Abb. 18) läßt sich hieraus das Vorzeichen der Innenstäbe festlegen (Vorzeichen von M und A vgl. Abschnitt 3).

Ist die Querwand ein in seiner Ebene biegesteifer Rechteckrahmen mit einer oder zwei Symmetrieachsen, so kann man aus der Belastung des Querrahmens mit den vorstehenden Diagonalkräften $S^{(T)}$ ohne weiteres die Momentenfläche des Querrahmens infolge M oder A angeben.

Es bedeute (Abb. 18a):

J_c das Trägheitsmoment der symmetrischen senkrechten Riegel,
 J_o bzw. J_u das Trägheitsmoment des oberen bzw. unteren Riegels,

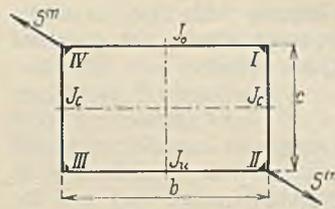


Abb. 18a.

Biegesteifer Querrahmen.

$$\alpha = \frac{b/J_o - b/J_u}{b/J_o + b/J_u + 6c/J_c}$$

Dann betragen die Eckmomente der geradlinigen Momentenfläche:

$$M_I = -M_{III} = (1 - \alpha) \frac{bc}{4} \cdot \mathfrak{E}^{(T)}$$

$$M_{II} = -M_{IV} = -(1 + \alpha) \frac{bc}{4} \cdot \mathfrak{E}^{(T)}$$

Nach außen hohl biegende Momente gelten als positiv. Bei doppelter Symmetrie des Rahmens ($J_o = J_u$, d. h. $\alpha = 0$) wird:

$$M_I = -M_{II} = M_{III} = -M_{IV} = \frac{bc}{4} \cdot \mathfrak{E}^{(T)}$$

7. Verschiebungsbeiträge und endgültige Stabkräfte.

Mit den im vorigen Abschnitt bestimmten, auf die Stablänge bezogenen Stabkräften:

$$\mathfrak{E} = \frac{S}{s}$$

ergeben sich die Belwerte der Elastizitätsgleichungen aus:

$$\delta_{ik} = \sum \mathfrak{E}_i \mathfrak{E}_k \omega,$$

worin

$$\omega = \frac{s^3}{EF} \text{ (*Stabwert*)}$$

Im häufigen Sonderfall eines Zellwerks mit Quader- oder Pyramidenstumpfzellen lassen sich die Verschiebungsbeiträge der Längsstäbe infolge der antisymmetrischen Kraftgruppen A und M mit Hilfe der Stabwertsummen:

$$\sum \omega = I\omega + II\omega + III\omega + IV\omega$$

und der Stabwertdifferenzen:

$$\Delta \omega = I\omega - II\omega + III\omega - IV\omega$$

der Längsurte (L) und Längsdiagonalen (D) angeben (s. Abb. 15).

Bei K -Verbänden ist statt des Stabwertes $\omega^{(D)}$ einer Diagonale die Summe der Stabwerte $\omega^{(D')}$ und $\omega^{(D'')}$ der beiden K -Streben einzusetzen.

Ist ε die Anzahl der diagonalenfreien Ecken in einer Zelle, und zwar ε' an der rechten und ε'' an der linken Querwand, und wird gesetzt:

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon' - \varepsilon'',$$

dann betragen bei Annahme eines gleichen Mittelwertes $\frac{\sum \omega^{(L)}}{4}$ für die im allgemeinen innerhalb einer Zelle wenig verschiedenen Stabwerte der Längsurte die Belwerte der Unbekannten in der r -ten Elastizitätsgleichung:

$$\delta_{rr} = \frac{1}{4a_r^2} \left[\sum \omega_r^{(D)} + \left(1 + \frac{\varepsilon + 2\Delta \varepsilon}{4}\right) \sum \omega_r^{(L)} \right] + \frac{1}{4a_{r+1}^2} \left[\sum \omega_{r+1}^{(D)} + \left(1 + \frac{\varepsilon - 2\Delta \varepsilon}{4}\right) \sum \omega_{r+1}^{(L)} \right]$$

$$\delta_{r(r-1)} = -\frac{1}{4a_r^2} \left[\sum \omega_r^{(D)} - \left(1 - \frac{\varepsilon}{4}\right) \sum \omega_r^{(L)} \right]$$

$$\delta_{r(r+1)} = -\frac{1}{4a_{r+1}^2} \left[\sum \omega_{r+1}^{(D)} - \left(1 - \frac{\varepsilon}{4}\right) \sum \omega_{r+1}^{(L)} \right]$$

Die Lastwerte infolge Drehmomentenbelastung betragen:

$$\delta_{ro} = \frac{M_r}{4a_r b_r c_{r-1}} \left(\Delta \omega_r^{(D)} + \frac{x}{4} \sum \omega_r^{(L)} \right) - \frac{M_{r+1}}{4a_{r+1} b_{r+1} c_r} \left(\Delta \omega_{r+1}^{(D)} - \frac{x}{4} \sum \omega_{r+1}^{(L)} \right)$$

Darin bedeutet x eine von der Anzahl und Richtung der K -Verbände in der Zelle abhängige Zahl. Zu dieser trägt jeder K -Verband $+1$ oder -1 bei, und zwar $+1$, wenn die Spitze des K -Verbandes in der Wand I oder III in bzw. in der Wand II oder IV gegen die Längsrichtung zeigt. Die Werte ε , $\Delta \varepsilon$ und x sind ganze Zahlen zwischen 0 und 4. Bei reinem N -Verband ist $\Delta \varepsilon = x = 0$. Die Lastwerte infolge antisymmetrischer Längskräfte A an den vorhergehenden oder folgenden Zellen ergeben sich aus den obigen Belwerten der Unbekannten.

Vernachlässigt man bei den Querwänden die Verschiebungsbeiträge der im allgemeinen steifen Querriegel R , so ist der Verschiebungsbeitrag der Querwände mit einer Querdiagonale T :

$$\bar{\delta}_{ik} = \mathfrak{E}_i^{(T)} \mathfrak{E}_k^{(T)} \omega^{(T)}$$

Ist die Querwand unterteilt (s. Abb. 18), so erhält man aus den beanspruchten Innenstäben T' :

$$\bar{\delta}_{ik} = \mathfrak{E}_i^{(T')} \mathfrak{E}_k^{(T')} \sum \omega^{(T')}$$

d. h. den gleichen Beitrag wie bei einer Querwand mit starren Riegeln und einer Querdiagonale vom Stabwert: $\omega^{(T')} = \sum \omega^{(T')}$.

Ist die Querwand ein biegungsstifer Rahmen (Abb. 18a), so erhält man aus der in Abschnitt 6 bestimmten Momentenfläche bei einfacher Symmetrie den Verschiebungsbeitrag des Querrahmens:

$$\delta_{ik} = \frac{b^2 c^2}{48 E} [(1 + \alpha)^2 b/J_u + (1 - \alpha)^2 b/J_o + 2(1 + 3\alpha^2) c/J_c] \mathfrak{E}_i^{(T)} \mathfrak{E}_k^{(T)}$$

bzw. bei doppelter Symmetrie ($J_o = J_u = J_b$, d. h. $\alpha = 0$):

$$\delta_{ik} = \frac{b^2 c^2}{24 E} [b/J_b + c/J_c] \mathfrak{E}_i^{(T)} \mathfrak{E}_k^{(T)}$$

Man erhält also den gleichen Verschiebungsbeitrag, wenn man den Querrahmen ersetzt durch eine Querwand mit gelenkigen Knoten und einer aussteifenden Diagonale vom Stabwert:

Alle Rechte vorbehalten.

Einfache Stahlrohrmaste haben sich seit langem als Gestänge von Freileitungen und elektrischen Bahnen eingeführt. In der Regel sind es nahtlose Stahlrohre in der bekannten schußweise abgesetzten Form, die dazu verwendet werden; aber auch genietete oder geschweißte, aus Blechen hergestellte konische Maste teils runden, teils ovalen Querschnitts sind ausgeführt worden und haben sich bewährt. Die Höhen und Spitzenzüge, für die solche Maste noch ausreichen, sind durch das erzielbare

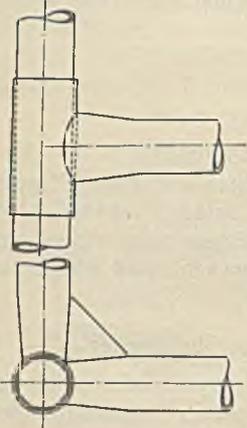


Abb. 1. Verbindung zwischen Riegel und Stiel.

Widerstandsmoment im Einspannquerschnitt und durch die zulässige Durchbiegung begrenzt. Wenn auch die Grenze der Verwendbarkeit der einfachen Stahlrohrmaste durch die Fortschritte der Technik stark hinaufgerückt wurde, so sind doch durch die Einführung des Weltspannsystems bei den Freileitungen und durch die Vergrößerung der Leiterquerschnitte die Anforderungen an die Freileitungsmaste derart gestiegen, daß diese Grenze vielfach überschritten wird. Der Gedanke lag nahe, der Einheitlichkeit wegen auch für solche schweren Maste in der Form der Gitter- und Rahmenmaste Stahlrohre zu verwenden. Ist doch das Rohrprofil das geeignetste in bezug auf Widerstand gegen Knicken. Den Schwierigkeiten des Anschlusses suchte man auf mannigfaltige Weise zu begegnen: durch Verschraubungen, Verwendung von Schellen, an die die an den Enden platt zusammengedrückten Rohrschrägen mittels Schrauben angeschlossen wurden, oder andere Klemmverbindungen, durch schwierige Rohrrinnennietung und Kombination derselben mit Schraubenanschlüssen bei den Rahmenmasten usw. Diese Verbindungen waren alle teils technisch nicht einwandfrei, teils zu teuer. Erst die Einführung der Schweißtechnik schaffte Abhilfe. Durch Schweißung lassen sich sowohl Verlängerungen von Rohren als auch Anschlüsse von Rohr an Rohr verhältnismäßig leicht herstellen.

Gegliederte Rohrmaste können sowohl in der bekannten Form der Gittermaste als auch als Rahmenmaste ausgeführt werden. Bei den Gittermasten werden die Rohrschrägen entweder direkt an die Stielrohre angeschweißt oder, was vorzuziehen ist, mit Hilfe von Knotenblechen, die durch Schlitze der Rohrstiele gesteckt und mit ihnen verschweißt werden, angeschlossen. Bei größerer Masthöhe können die Stiele, der abnehmenden Beanspruchung entsprechend, nach oben schußweise verjüngt oder gegen schwächere gestoßen werden. Rahmenmaste erhalten Stiele, die auf ihrer ganzen Länge gleiches Profil haben; die im Anschluß

$$\omega^{(T)} = \frac{b^2 c^2}{48 E} [(1 + \alpha)^2 b/J_u + (1 - \alpha)^2 b/J_o + 2(1 + 3\alpha^2) c/J_c]$$

$$\text{bzw. } \omega^{(T)} = \frac{b^2 c^2}{24 E} [b/J_b + c/J_c]$$

Mit den Stabkräften S_0 bzw. S_0' infolge der äußeren Belastung am Zellen- bzw. Ersatzhauptsystem und S_i infolge der Zustände $X_i = 1$ am Zellenhauptsystem sind die endgültigen Stabkräfte der r^{ten} Zelle:

$$S_r = S_{r0} + S_{r0}' + S_{r(r-1)} X_{r-1} + S_{rr} X_r,$$

und die endgültigen Stabkräfte der r^{ten} Querwand:

$$S_r = S_{r0} + S_{r0}' + S_{r(r-1)} X_{r-1} + S_{rr} X_r + S_{r(r+1)} X_{r+1}$$

(Schluß folgt.)

Geschweißte Stahlrohrmaste.

Von Ing. Dr. J. Wanke, o. ö. Professor, Prag.

auf tretenden Momente erfordern in der Regel, daß auch für die Riegel die gleiche Rohrmaßung verwendet wird.

Im folgenden soll über Rahmenmaste aus nahtlosen Stahlrohren berichtet werden, die in der Tschechoslowakei bei einer größeren Anzahl von Freileitungen ausgeführt wurden.¹⁾

Sie weisen sowohl hinsichtlich ihrer Konstruktion als auch ihrer Herstellung einige Besonderheiten auf, die der Beachtung wert sind.

Die für diese Maste verwendeten nahtlosen Stahlrohre haben eine Festigkeit von 55 bis 65 kg/mm² und eine Mindestdehnung von 15%. Die Maste werden elektrisch geschweißt. Wie in anderen Zweigen des Stahlhochbaus erweist sich auch hier die Elektroschweißung vorteilhafter als die Gasschmelzschweißung. Als Elektroden werden ummantelte Drähte normaler Festigkeit, wie sie auch zum Schweißen von Konstruktionsmaterial Cc, C38 (Bezeichnung nach der tschechoslowakischen Norm) bzw. St 37 dienen, verwendet. Eine höhere Festigkeit der Schweiße ist mit Rücksicht auf die geringe Rohrwanddicke nicht erforderlich; die Nahtstärken können leicht so groß gewählt werden, daß der Unterschied in der Festigkeit zwischen Schweiße und Grundmaterial ausgeglichen wird.

Die Rahmenmaste haben quadratischen Grundriß. Stiel- und Riegelrohre erhalten gleichen Querschnitt. Um den Anschluß der Riegel in einer Ebene zu ermöglichen, werden sie an den Enden elliptisch geformt

(Abb. 1). Dadurch wird auch die am Anschluß erwünschte Vergrößerung des Widerstandsmomentes erzielt. Die Stielrohre werden an den Riegelanschlüssen durch kurze Überschubrohre verstärkt. An diese wird der aus vier Riegeln gebildete Horizontalrahmen durch Rundschweißen angeschlossen. Um diese am stärksten beanspruchten Rundschweißen bequem herstellen zu können, um also Überkopfschweißen zu vermeiden, wird das Überschubrohr aus zwei diagonal zum Horizontalrahmenquadrat gestoßenen Schalen hergestellt und der Horizontalrahmen aus vier Rohrschalen und vier Riegeln gebildet. Durch eine besondere Spannvorrichtung (Abb. 2) ist die Reihenherstellung solcher Rahmen möglich. Die Zapfen dieser Spannvorrichtung, an die sich die Schalen lehnen, sind auswechselbar und können dem Durchmesser der Stielrohre angepaßt werden; sie lassen sich auch in horizontaler Richtung verstellen und beliebig neigen.

Die Herstellung der Maste in der Werkstatt erfolgt in der Weise, daß die fertigen Rahmen auf zwei liegende Stielrohre aufgestellt und mit ihnen durch Kehlschweißung am Umfang der Rohrschalen verbunden werden. Hierauf werden die oberen Stielrohre in die Schalen eingelegt und auf gleiche Weise verschweißt. Die Verbindung der zweiten Schale des Überschubrohres erfolgt nun einerseits durch Stumpfschweißung mit der ersten Schale und andererseits durch Rundkehlschweißung mit dem Stielrohr. Zwecks besserer Eckensteifung der Horizontalrahmen werden dreieckige Bleche eingeschweißt, die des guten Wasserabflusses wegen

¹⁾ Geliiefert von der Mannesmannröhren-Werke A.-G. in Komotau.

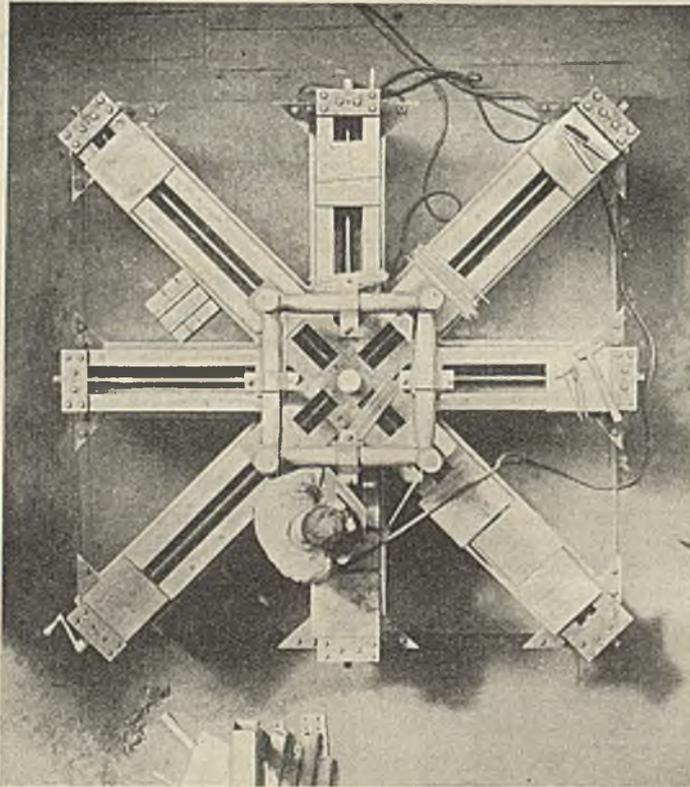


Abb. 2. Spannvorrichtung.

etwas geneigt angeordnet sind. Die Seitenlänge dieser Bleche entspricht etwa der Länge der elliptischen Verformung des Riegelrohres und ist bei den breiteren Rahmen größer als bei den schmäleren.

Die Verwendbarkeit der Stahlrohr-Rahmenmaste wurde auch im Großversuch erprobt. Als Versuchsmast diente ein Tragmast mit 22,3 m freier Höhe, der einer normalen Lieferung entnommen wurde. Er ist für einen reduzierten Spitzenzug von 715 kg und Winddruck (260 kg reduziert) berechnet. Dabei sei noch bemerkt, daß in der statischen Berechnung die tatsächliche Lasten-

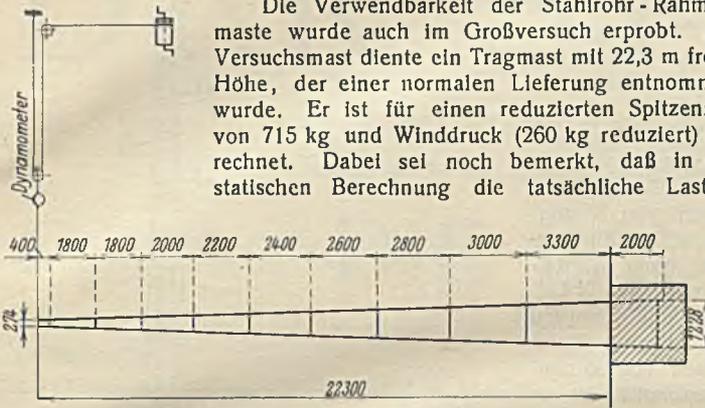


Abb. 3. Vorrichtung für den Biegeversuch.

verteilung berücksichtigt wurde, da beim Rahmenmast die Berechnung der Beanspruchungen aus dem reduzierten Spitzenzug zu günstig und deshalb nicht mehr zulässig ist. Das System des untersuchten Mastes ist aus der Abb. 3 ersichtlich; Stiel- und Riegelrohre haben das Profil $\phi 89 \cdot 3,5$.

Da die Erprobung des stehenden Mastes sehr umständlich geworden wäre, wurde er horizontal liegend in einen schweren Betonkörper von etwa 60 t Gewicht, der selbst wieder teilweise in eine niedrige Stützmauer eingelassen war, eingespannt. Diese Einspannung konnte von vornherein als vollkommen zuverlässig angesehen werden; trotzdem wurde während des Versuchs auch das Fundament genau beobachtet; irgendwelche Bewegungen konnten aber nicht festgestellt werden. Die Wirkung des Eigengewichts wurde dadurch aufgehoben, daß der Mast an drei Punkten der Achse aufgehängt und durch Ausgleichsgewichte in horizontaler Lage gehalten wurde (Abb. 4). Um auch beim Biegeversuch die Aufhängeselle in jeder Lage des Mastes lotrecht zu erhalten, waren die Umlenkrollen an einer Laufschiene beweglich angehängt. Mit Rücksicht auf den Torsionsversuch war die Aufhängung in der Mastachse geboten.

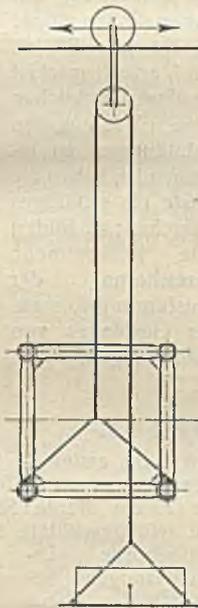


Abb. 4. Vorrichtung zur Ausschaltung der Eigengewichts-Wirkung.

Abb. 3 zeigt die Anordnung des Biegeversuchs. Die Meßergebnisse von zwei Versuchen sind in Zahlentafel 1 zusammengestellt. Bemerkenswert ist,

Zahlentafel 1.

Versuch 1.		Versuch 2.	
Zugkraft P In kg	Durchbiegung*) In mm	Zugkraft P In kg	Durchbiegung*) In mm
0	0	0	0
100	14	200	31
200	28	300	45
300	42	400	59
400	55	500	74
500	70	600	88
700	98	700	102
750	107	800	116
0	0	900	131
300	42	1000	145
500	72	0	1
750	107	1000	148
800	113	1100	162
900	127	1200	177
1000	142	1300	190
0	0	1400	205
		1500	221
		1600	238
		0	3

*) Gemessen an der Mastspitze.

daß beim ersten Versuch bis $P = 1000$ kg fast vollständige Proportionalität zwischen Durchbiegung und Belastung besteht, ein Ergebnis, das bei geneigten Konstruktionen nicht zu erzielen ist. Beim zweiten Versuch machte sich der Einfluß ungleichmäßiger Erwärmung durch einseitige Sonnenbestrahlung störend bemerkbar. Während der erste Versuch bei bedecktem Himmel im Sommer durchgeführt wurde, ging der zweite

nach einer Reifnacht an einem Herbstvormittage vor sich, an dem nur zeitweilig Wolken die direkte Sonnenbestrahlung verhinderten; der Mast hatte also eine verhältnismäßig tiefe Temperatur, wodurch der Einfluß der ungleichen Erwärmung, wie aus den Meßwerten zu erkennen ist, um so mehr zur Geltung kam. Es war leider noch nicht möglich, den Versuch bei ausgeglichener Temperatur des Mastes und mit größeren Spitzenzügen zu wiederholen. Die beiden angeführten Versuche zeigen aber schon, daß eine gute Übereinstimmung zwischen der theoretischen Durchbiegung, die für $P = 100$ kg 14,17 mm beträgt, und den Meßwerten besteht.

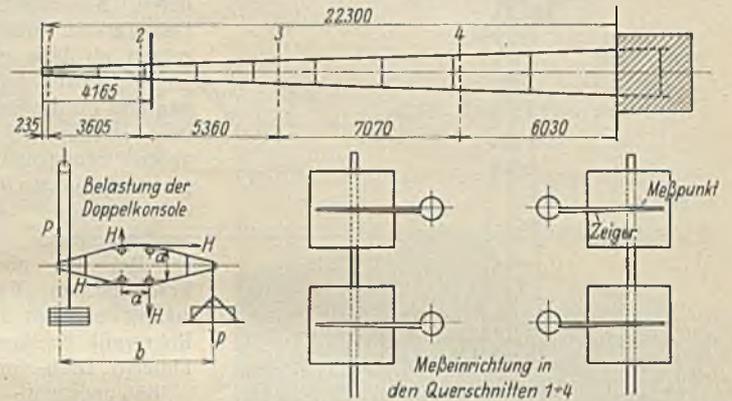


Abb. 5. Vorrichtung für den Torsionsversuch.

Der gleiche Mast wurde auch zur Durchführung eines Torsionsversuchs benutzt. Um den Einfluß des Drehmoments allein verfolgen zu können, wurde die Anordnung so getroffen, daß keine Biegung auftrat (Abb. 5). Zu dem Zwecke waren an einer Doppelkonsole auf einer Seite Gewichte direkt angehängt, auf der anderen Seite wurde das die gleich große Belastung tragende Seil über eine Rolle geleitet. Bei einer Länge der Doppelkonsole von 3 m, zwischen den Anhängepunkten gemessen, ist das durch die Gewichte $P = 100$ kg hervorgerufene Drehmoment $M_D = 100 \cdot 300 = 30000$ kgcm.

Die Meßvorrichtungen waren so beschaffen, daß in einigen Querschnitten sowohl die Verschiebungen der Stielrohrmitten als auch die Verdrehungen der Stielrohre ermittelt werden konnten. An die Stielrohre waren Zeiger aus Stahl angeschweißt, deren Meßkanten durch die Mittelpunkte der Rohre gingen. Im Abstände 700 mm von Rohrmitte war auf jedem Zeiger ein Punkt markiert, aus dessen Verschiebungen die Bewegungen der Rohrmitten berechnet werden konnten. Die Verdrehungen wurden direkt abgelesen.

Der Versuch wurde bis $P = 500$ kg, entsprechend einem Torsionsmoment von 150000 kgcm, fortgeführt, ohne daß nach Entlastung bleibende Verdrehungen oder sonstige Verformungen festzustellen waren. Dabei darf nicht übersehen werden, daß es sich nicht um einen Abspann-, Winkel- oder Endmast handelt, also einen Mast, der infolge seiner Form und größerer Profile besser zur Aufnahme von Drehmomenten geeignet ist, sondern daß der Versuchsmast als einfacher Tragmast bemessen wurde. Ohne auf die Auswertung des Torsionsversuchs, die an anderer Stelle noch behandelt werden soll, näher einzugehen, sei nur festgestellt, daß die Versuchswerte mit der üblichen Berechnung, nach der das Drehmoment Pb in zwei Kräftepaare $2Ha$ aufgelöst wird (Abb. 5), in Widerspruch stehen. Ein großer Teil des Drehmoments wird durch den Torsionswiderstand der Rohre, die dazu durch ihre günstige Profilform besonders geeignet sind, direkt aufgenommen. Wie aus Zahlentafel 2 ersichtlich ist,

Zahlentafel 2. Gemessene Verdrehungen.

P In kg	Querschnitt			
	1	2	3	4
100	2° 43'	2° 45'	1° 52'	0° 52'
200	5° 32'	5° 35'	3° 50'	1° 41'
300	8° 23'	8° 24'	5° 40'	2° 29'
400	11° 10'	11° 10'	7° 31'	3° 18'
500	14° 0'	13° 58'	9° 21'	4° 7'

besteht gute Proportionalität zwischen Verdrehungswinkel und Drehmoment. Dagegen sind die Verdrehungen in den einzelnen Querschnitten nicht verhältnismäßig dem Abstände von der Einspannstelle, vielmehr sind die der Konsole benachbarten Querschnitte verhältnismäßig stärker verdreht; die Stielrohre erfahren demnach auch ihre größte Torsionsbeanspruchung in der Nähe der Konsole.

Es wäre interessant, einmal einen Torsionsversuch an einem Gittermast zu verfolgen. Diese Maste werden sich vermutlich etwas anders verhalten, da der Verformungswiderstand der horizontalen Kreuze mit den verhältnismäßig schwachen Winkeln geringer ist als der der Horizontalrahmen. Es werden also sowohl Verdrehungen der Eckstiele als auch

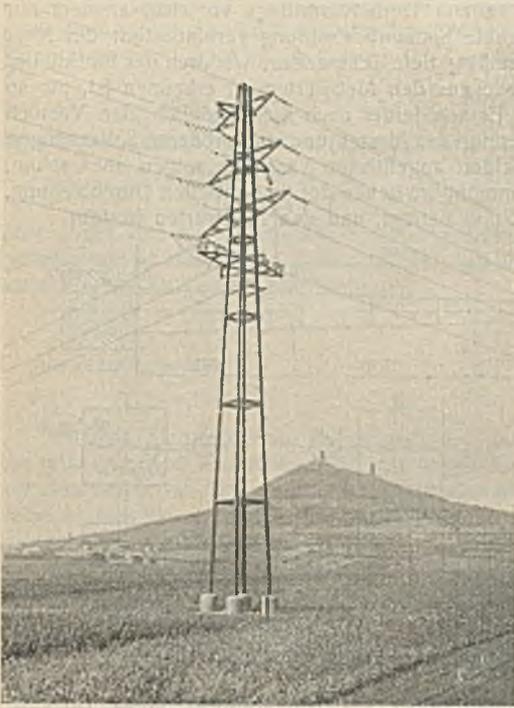


Abb. 6. Abspann-Abzweigmast.

Formänderungen der Ausfachungsstäbe eintreten; für erstere sind Winkel keine günstigen Profile, letztere ergeben Zusatzbeanspruchungen sowohl in den Wandstäben als auch in deren Anschlüssen. Der Versuch müßte zeigen, ob diese gefährlich werden können und ob die Eckstiele und namentlich deren Stoßdeckungen den erhöhten Beanspruchungen gewachsen sind.

Bei den oben beschriebenen Versuchen hat sich das Rohrprofil für kombinierte Dreh- und Biegebeanspruchungen günstig verhalten. Die gegliederten Rohrmaste können also wohl hinsichtlich ihrer Eignung

In der Tschechoslowakei haben sich die Stahlrohrmaste bereits an einer Reihe von Freileitungen bewährt. Abb. 6 zeigt einen Abspann-Abzweigmast einer 60 KV-Leitung mit 6 Leitern von je $35 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ und einem Erdseil von 35 mm^2 Querschnitt. Ein Tragmast einer 35 KV-Leitung mit 3 Leitern von je $50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ und einem Stahl-Erdseil von 35 mm^2 Querschnitt ist in Abb. 7 dargestellt. Die Entfernung der 22,3 m hohen Maste beträgt hier 320 m. Der Versuchsmast ist ein Mast der gleichen Type. Wie aus den Abbildungen zu erkennen ist, haben die Maste ein gefälliges Aussehen; sie bilden eine willkommene Bereicherung der Ausführungsformen des Gestanges von Freileitungen.

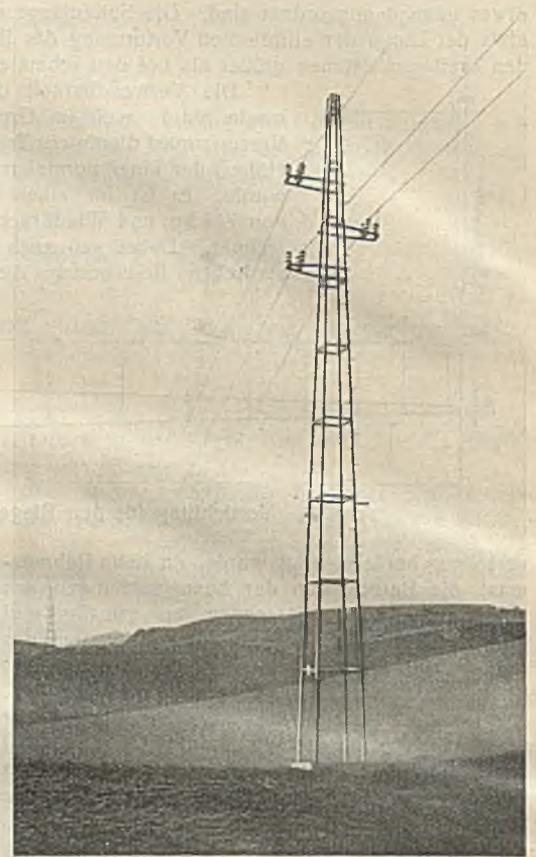


Abb. 7. Tragmast.

mit den Gittermasten in Wettbewerb treten und haben gegen sie die Vorteile, die das Rohrprofil bietet, voraus. Ob die Gestehungskosten diesen Wettbewerb gestatten, hängt von den Rohr- und Winkelpreisen sowie den Arbeitslöhnen ab; in dieser Hinsicht herrschen nicht überall die gleichen Verhältnisse.

Verschiedenes.

Erweiterung des Kaufhauses Mathias Löwenthal in Aschaffenburg. Das Kaufhaus Mathias Löwenthal in Aschaffenburg wurde nach den Plänen des Architekten Reg.-Bmstr. Fritz Nathan, Frankfurt a. M., modern umgebaut und auch bedeutend erweitert.

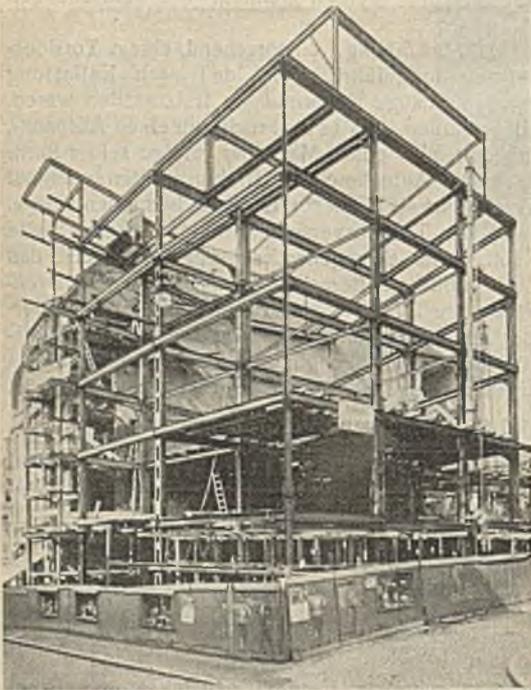


Abb. 1. Stahlskelett des Kaufhauses Löwenthal, Aschaffenburg.

Die Haupterweiterung liegt an der Herstattstraße, Treibgasse und Nebensteingasse. Als Tragkonstruktion dieses im Hauptteil sechsgeschossigen Erweiterungsbaues wurde eine Stahlskelettkonstruktion gewählt, die bis zum Kellerfußboden durchgeht. An der Herstattstraße ist das fünfte Obergeschoß etwas zurückgesetzt worden. Das bestehende Kaufhaus ist ein Eisenbetonbau. Bei dem Erweiterungsbau sind als Decken weitgespannte Eisenbetonrippendecken zwischen Stahlträgern von insgesamt 320 kg/cm^2 Eigengewicht ausgeführt. Die Ausmauerung des Stahlskeletts erfolgte in Schwemmsteinen, die dann verputzt wurden.

Die Stahlkonstruktion, die für sich standsicher ausgeführt wurde, schließt sich dicht an den alten Eisenbetonbau an, ohne damit besonders verankert zu sein, denn bei der Bearbeitung des Entwurfs stellte sich heraus, daß die Eisenbetonkonstruktion nur für vertikale Belastungen berechnet war, so daß ein Zusammenschluß oder eine Verankerung zwecks Aufnahme der Windkräfte nicht zugelassen werden konnte, obwohl das Gebäude mitten im alten Stadtteil sehr geschützt liegt. Der Winddruck wird von Rahmen, die im Innern des Baues angeordnet sind, aufgenommen und in die Fundamente geleitet.

Für die Belastungen und zulässigen Beanspruchungen waren die bayrischen Vorschriften maßgebend. Die Nutzlasten wurden im Erdgeschoß

sowie im ersten bis dritten Obergeschoß mit 500 kg/m^2 , in den oberen Geschossen mit 350 kg/m^2 , zuzüglich einem Zuschlag von 150 kg/m^2 für 10 cm starke Schwemmsteinwände angesetzt. Mit Rücksicht auf die windgeschützte Lage des Bauwerks wurden von der maßgebenden Baubehörde Erleichterungen bezüglich der Windbelastungen eingeräumt, und zwar kam bis zum dritten Obergeschoß ein Winddruck nicht in Ansatz, vom dritten bis vierten Obergeschoß wurde mit 75 kg/m^2 , darüber hinaus mit 125 kg/m^2 gerechnet. Die Windübertragung auf die Rahmen erfolgt durch die bereits erwähnten massiven Eisenbetondecken, die als steife Tafeln angesehen werden durften. Die Höchstbeanspruchung des Flußstahlmaterials beträgt, gemäß den maßgebenden Vorschriften, 1500 kg/cm^2 , ohne Rücksicht auf Winddruck wurden nur 1200 kg/cm^2 zugelassen. — Abb. 1 gibt einen Blick auf die Stahlskelettkonstruktion Ecke Herstattstraße und Treibgasse. Die auf diesem Bild links vorstehende und oben überkragende Konstruktion ist für ein Treppenhaus bestimmt. Abb. 2 zeigt den vollendeten Bau, der Anfang Dezember 1930 eröffnet wurde. — Das Gesamtgewicht der Konstruktion beträgt etwa 210 t. Entwurf und Ausführung derselben erfolgte durch die Firma Michael Lavis Söhne, Offenbach a. M.



Abb. 2. Das fertiggestellte Kaufhaus.

Offenbach a. M. Obering. R. Moosbrucker.

INHALT: Berechnung statisch unbestimmter Raumfachwerke (Zellwerke). — Geschweißte Stahlrohrmaste. — Verschiedenes: Erweiterung des Kaufhauses M. Löwenthal in Aschaffenburg.

Für die Schriftleitung verantwortlich: Geh. Regierungsrat Prof. A. Hertwig, Berlin-Charlottenburg. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin W 8. Druck der Buchdruckerei Gebrüder Ernst, Berlin SW 68.