

Zeitschrift: IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen

Band: 4 (1936)

Artikel: Beitrag zur Berechnung von Zweigelenkbogen-Rippenkuppeln mit elastischem Fussring

Autor: Pohl, K.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-5094>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 05.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BEITRAG ZUR BERECHNUNG VON ZWEIGELENKBOGEN-RIPPENKUPPELN MIT ELASTISCHEM FUSSRING.

**CONTRIBUTION AU CALCUL DES COUPOLES À NERVURES À DEUX
ARTICULATIONS AVEC ANNEAU DE BASE ÉLASTIQUE.**

**ON THE CALCULATION OF TWO-HINGED RIBBED DOMES WITH
ELASTIC RING AT BASE.**

Dr. Ing. K. POHL, a. o. Professor an der Technischen Hochschule Berlin.

A. Einleitung.

Über einem regelmäßigen Vieleck von $2n$ Seiten seien n gleiche Zweigelenkbogen oder Rahmen gespannt, die im Scheitel miteinander verbunden sind. Wir setzen voraus, daß alle Bogenrippen, der Eigenart des Stahlbaues entsprechend, hohe schmale Querschnitte haben, die nur in der Stegebene Lasten übertragen können. Wir vernachlässigen also die Biegssteifigkeit in Bezug auf die lotrechte Schwerlinie der Rippenquerschnitte und ebenso die Verdrehungssteifigkeit, wie wenn die Querschnitte nur aus einem dünnen Stehblech bestünden. Die statischen Voraussetzungen der Anordnung im Scheitel kann man sich nach Figur 1 in der Weise verwirklicht denken, daß alle Rippen mit Augenlaschen einen gemeinsamen lotrechten Gelenkbolzen umfassen. Beide Laschen übertragen die Horizontalkraft und das Biegungsmoment auf die $2n - 1$ anderen Rippen, während die Querkraft etwa durch Bunde übertragen wird. Der Bolzen bewirkt demnach, daß alle Rippen im Scheitelpunkt zunächst dieselbe lotrechte Verschiebung ausführen. Außerdem verschiebt sich der Scheitelknoten in waagerechter Ebene und der Bolzen nimmt eine gewisse Neigung an, beide Bewegungen bestimmen zugleich die Scheitelverschiebungen und -Verdrehungen der einzelnen Bogenrippen. Diese gedachte Anordnung erlaubt, daß die Winkel zwischen den Rippen sich um kleine Beträge ändern können.

Alle auf die Rippen wirkenden Lasten liegen in lotrechten (Durchmesser-) Ebenen und schneiden die Kuppelachse.

Denkt man sich zunächst jeden Fußpunkt fest gelagert, so läßt sich der Kämpferdruck, der in die Ebene der Rippe fällt, in eine lotrechte Komponente V und eine waagerechte, radial gerichtete Komponente H zerlegen. Es sind also bei $2n$ Fußpunkten $4n$ Auflagerkräfte vorhanden. Diesen stehen nur 5 Gleichgewichtsbedingungen gegenüber, da die Bedingung: Summe der Momente aller Kräfte um die Kuppelachse gleich Null, durch die Voraussetzung ohnehin erfüllt ist. Das Tragwerk mit ebenen Rippen und festen Fußpunkten ist

$4n - 5$ fach

statisch unbestimmt.

Es werden nun die Stützpunkte durch einen Fußring verbunden und jedem eine Verschiebungsmöglichkeit, z. B. in radialer Richtung, erteilt. Senkrecht

dazu, also tangential, wirkt dann eine Führungskraft oder ein Lagerwiderstand W , den man sich auch durch einen waagerechten Stützstab \perp Verschiebungsrichtung ersetzt denken kann. Es sind dann wieder $4n$ Auflagerkomponenten vorhanden, denen jetzt aber 6 Gleichgewichtsbedingungen gegenüberstehen, da die Momentengleichung in Bezug auf die Kuppelachse diesmal anwendbar ist. Die äußere statische Unbestimmtheit ist demnach nur $4n - 6$. Es ist aber dafür eine innere Unbestimmtheit hinzugekommen, da ein Fußringstab überzählig ist. Die Rippen bilden nämlich in der Horizontalprojektion mit dem Fußring ein ebenes Fachwerk, das auch bei statisch bestimmter Stützung durch nur drei Führungskräfte W einen Stab zu viel hat, weil $4n$ Stäbe und nur $2n + 1$ Knotenpunkte vorhanden sind, den $4n + 3$ Unbekannten also nur $4n + 2$ Gleichgewichtsbedingungen gegenüberstehen. Im ganzen ist daher die statische Unbestimmtheit wieder

$$4n - 6 + 1 = 4n - 5 \text{ fach},$$

wie bei der Kuppel mit festen Fußpunkten.

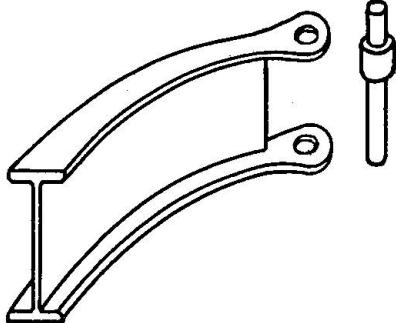


Fig. 1.

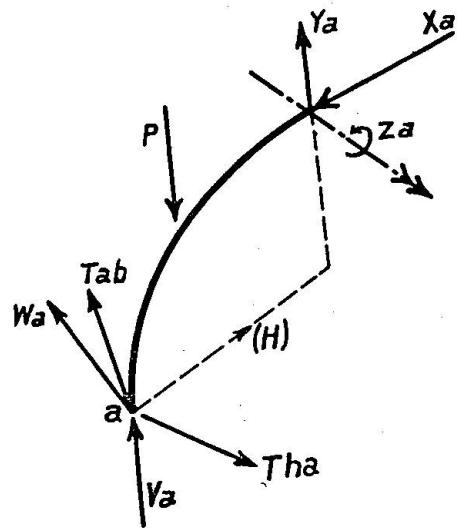


Fig. 2.

Jede Rippe überträgt auf den Scheitelknoten eine waagerechte Kraft X (Horizontalschub), eine lotrechte Y (Querkraft) und ein Biegungsmoment Z in lotrechter Ebene, dessen Achse waagerecht und \perp Rippenebene gerichtet ist. Von jeder Art sind $2n$ vorhanden, die sich am Scheitelknoten das Gleichgewicht halten müssen. Reiht man also alle Y aneinander, so bilden sie eine gerade Linie, deren Anfangs- und Endpunkt zusammenfallen oder einen Abstand haben, der einer etwa vorhandenen lotrechten Knotenlast im Scheitel entspricht. Die $2n$ Werte X bilden ein geschlossenes Polygon in waagerechter Ebene, und dasselbe gilt von den Vektoren der Scheitelmomente Z .

Die weiteren Erläuterungen sollen sich auf das Achteck beziehen ($n = 4$), die Übertragung des Berechnungsverfahrens auf andere Seitenzahlen bietet keine Schwierigkeiten. Die Stützpunkte seien mit $a b c \dots h$ bezeichnet, die lotrechten Auflagerkräfte mit V_a, V_b, \dots , die Horizontalschübe der Rippen am Fußpunkt mit H_a, H_b, \dots , die Führungskräfte mit W_a, W_b, \dots , die Spannkräfte im Fußring seien $T_{ab}, T_{bc}, \dots T_{ha}$. Am Scheitelknoten greifen an

- die Querkräfte Y_a, Y_b, \dots
- „ Horizontalkräfte X_a, X_b, \dots und
- „ Scheitelmomente Z_a, Z_b, \dots

Wir greifen einen ganzen Bogen, z. B. $a - e$, heraus. Die von den Seitenrippen $b c d$ einerseits, $f g h$ andererseits übertragenen Querkräfte Y setzen wir zu

einer Summenkraft Y_{ae} zusammen, die gleich $Y_a + Y_e$ ist mit umgekehrtem Vorzeichen und den Bogen ae im Scheitel lotrecht belastet. Ebenso ergibt die Zusammensetzung der Horizontalkraft X_{bcd} und X_{fgh} der Seitenrippen eine Summenkraft $X_{ae} = X_a + X_e$ mit umgekehrtem Vorzeichen, die im Scheitel vom Bogen ae waagerecht angreift. Endlich kann man auch die Momentenvektoren von Z_{bcd} einerseits und Z_{fgh} andererseits zu einem Summenvektor Z_{ae} zusammensetzen, dessen Moment als Lastmoment im Scheitel vom Bogen ae angreift. Bogen ae muß sich dann unter der Wirkung der Lasten P , der Scheitellasten X_{ae} Y_{ae} Z_{ae} , der Auflagerkräfte V_a V_e und der Horizontalschübe H_a H_e im Gleichgewicht befinden.

Was wir hier für den Bogen ae nachgewiesen haben, gilt natürlich genau so auch für bf , cg und dh . Es wird also darauf ankommen, die Scheitellasten der Bogen zu berechnen. Hierzu werden außer den Gleichgewichtsbedingungen die Formänderungsbedingungen im Scheitelpunkt dienen, wonach die beiden Verschiebungskomponenten ξ und η sowie die Verdrehung ζ der Tangentialebene — oder des gedachten Gelenkbolzens — für alle 4 Bogen dieselbe sein muß. Außerdem müssen die radial erfolgenden Verschiebungen der Auflagerpunkte mit den Dehnungen der Fußringstäbe verträglich sein.

Wir wollen uns auf lotrechte wirkende Lasten P beschränken und untersuchen die Wirkung einer auf einem beliebigen Punkt des Bogens ae stehenden Einzellast. Wegen der achsensymmetrischen Anordnung lassen sich die Rechnungsergebnisse auf die Belastung jedes anderen Bogens übertragen und damit auf jede beliebig zusammengesetzte lotrechte Belastung der Kuppel.

Die Berechnung vereinfacht sich bedeutend, wenn wir den gegebenen Belastungszustand durch zwei Teilbelastungszustände ersetzen,

I mit 2 symmetrisch wirkenden Lasten P ,

II „ 2 antimetrisch „ „ „ „ P

in denselben Punkten. Jede statische Größe M des gegebenen Belastungsfalles ist dann

$$M = \frac{1}{2} (M_I + M_{II}).$$

B. Symmetrischer Belastungsfall I.

1. Gleichgewicht der äußeren Kräfte.

$$V_a = V_e, V_b = V_d = V_f = V_h, V_c = V_g.$$

$$\Sigma V = 2P.$$

$$W_a = W_e = W_c = W_g = 0.$$

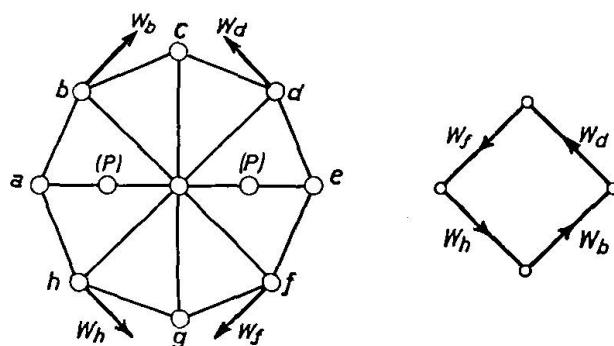


Fig. 3.

Fig. 4.

Da $\Sigma W_{bdhf} = 0$ sein muß, bilden sie im Kräfteplan ein Quadrat von der Seitenlänge W , Figur 4.

2. Gleichgewicht am Scheitelknoten.

$$\begin{aligned} Y_b &= Y_d = Y_f = Y_h, \\ Y_a &= Y_e, \quad Y_c = Y_g. \end{aligned}$$

Aus $\Sigma Y = 0$ folgt (Figur 5)

$$Y_c = Y_a - 2Y_b.$$

Die Scheitellasten sind

$$\left. \begin{aligned} \text{am Bogen } ae: & Y_{ae} = 2Y_a, \text{ aufwärts pos.,} \\ \text{" } bf: & Y_{bf} = 2Y_b, \text{ abwärts "} \\ \text{" } cg: & Y_{cg} = 2Y_a - 4Y_b, \text{ abwärts pos.} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

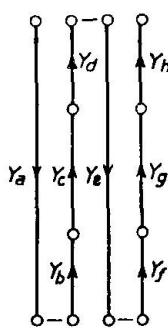


Fig. 5.

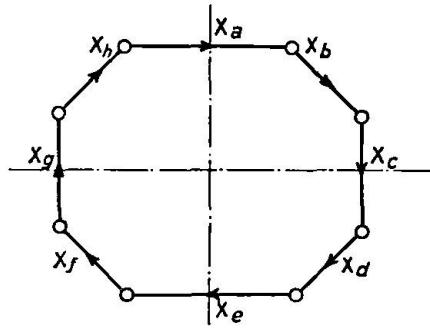


Fig. 6.

Figur 6 zeigt die Zusammensetzung der Horizontalkräfte im Scheitel mit

$$\begin{aligned} X_b &= X_d = X_f = X_h, \\ X_c &= X_g, \\ X_a &= X_e. \end{aligned}$$

Die Scheitellasten X_{ae} , X_{bf} , X_{cg} sind gleich Null, weil nach Herausnehmen der Kräfte X_a und X_e die übrigen wieder ein geschlossenes Polygon bilden mit der Summenkraft Null, ebenso bleibt ohne X_b und X_f ein geschlossenes Polygon usw.

Für das Polygon der Momentenvektoren $Z_a \dots$ gilt dasselbe, wenn man Figur 6 um 90° herumdreht, daher sind auch die Scheitellastmomente

$$Z_{ae} = 0, Z_{bf} = 0, Z_{cg} = 0.$$

Auf die drei Bogen wirken nur lotrechte Scheitellasten. Daher gilt für alle Seitenrippen $V = Y$ und $H = X$.

3. Gleichgewicht am Fußring.

Am Fußring halten sich die Horizontalschübe der Bogen $H_a \dots$ mit den 4 Lagerwiderständen W das Gleichgewicht, bilden also ein geschlossenes Polygon, Figur 7. Zerlegt man H_a nach T_{ab} und T_{ha} , H_c nach T_{bc} und T_{cd} , entsprechend H_e und H_g , so entsteht der vollständige Kräfteplan. Durch T_{ab} und T_{bc} sind alle Punkte des Kräfteplans bestimmt, es lassen sich daher die H und W durch diese beiden Größen ausdrücken. Mit dem halben Zentriwinkel ε findet man

$$H_a = 2T_{ab} \sin \varepsilon, \quad (2a)$$

$$H_c = 2T_{bc} \sin \varepsilon, \quad (2b)$$

und aus

$$T_{ab} - T_{bc} = \frac{W}{\cos \varepsilon},$$

und

$$H_b + W \tan \varepsilon = 2T_{ab} \sin \varepsilon$$

folgt

$$H_b = (T_{ab} + T_{bc}) \sin \varepsilon, \quad (2c)$$

$$W = (T_{ab} - T_{bc}) \cos \varepsilon. \quad (2d)$$

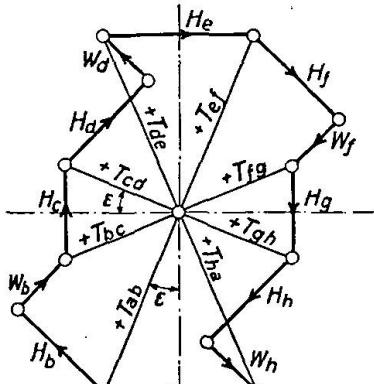


Fig. 7.

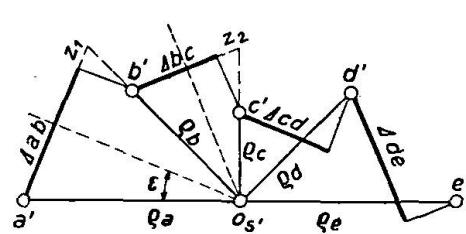


Fig. 8.

4. Verschiebungsplan des Fußrings.

Die Punkte a' b' c' d' e' des Verschiebungsplanes Figur 8 sind durch die radial gerichteten Lagerverschiebungen $\varrho_a = 0 - a'$, $\varrho_b = 0 - b'$ usw. und durch die Längenänderungen der Ringstäbe

$$\Delta ab, \Delta bc, \Delta cd = \Delta bc \text{ und } \Delta de = \Delta ab$$

gegeben. Die Lage aller Punkte ist durch ϱ_a und die Δ bestimmt. Mit den Hilfsstrecken z_1 und z_2 wird

$$\varrho_b = \varrho_a - \frac{z_1}{\sin \varepsilon}, \quad z_1 = 2\varrho_a \sin \varepsilon - \Delta ab,$$

hieraus

$$\varrho_b = \frac{\Delta ab}{\sin \varepsilon} - \varrho_a. \quad (3a)$$

$$\varrho_c = \varrho_b - \frac{z_2}{\sin \varepsilon}, \quad z_2 = 2\varrho_b \sin \varepsilon - \Delta bc,$$

hieraus

$$\varrho_c = \frac{\Delta bc}{\sin \varepsilon} - \varrho_b \quad \text{oder} \quad \varrho_c = \frac{\Delta bc - \Delta ab}{\sin \varepsilon} + \varrho_a. \quad (3b)$$

5. Hilfsbelastungszustände am einfachen Balken.

Der Bogen oder Rahmen, dessen Gestalt noch beliebig sein kann, wird als einfacher Balken gestützt und mit $H = 1$, $Y_{ae} = 1$ und den Lasten $P = 1$ be-

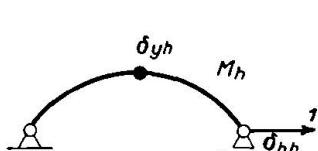


Fig. 9.

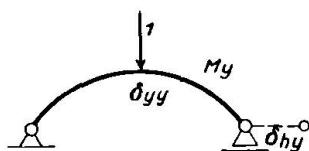


Fig. 10.

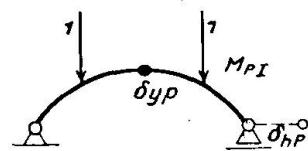


Fig. 11.

lastet. Es entstehen die Momente M_h M_y M_{Pl} . Dann wird die waagerechte Verschiebung δ_h des beweglichen Lagers und die lotrechte Verschiebung δ_y des Scheitels für alle drei Fälle bestimmt.

$$\left. \begin{aligned} \delta_{hh} &= \int_0^l M_h^2 \frac{ds}{EJ}, & \delta_{yy} &= \int_0^l M_y^2 \frac{ds}{EJ}, & \delta_{yh} &= \delta_{hy} = \int_0^l M_h M_y \frac{ds}{EJ} \\ \delta_{hP} &= \int_0^l M_h M_{PI} \frac{ds}{EJ}, & \delta_{yP} &= \int_0^l M_y M_{PI} \frac{ds}{EJ}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Meistens wird man auf die sehr geringen Beiträge der Normalkräfte zu diesen Verschiebungsgrößen verzichten können, nur bei sehr flachen Bogen könnte es nötig sein, das Glied

$$\int_0^l N_h^2 \frac{ds}{EF} \text{ in } \delta_{hh} \text{ zu berücksichtigen,}$$

es geschieht dies dann in bekannter Weise durch einen Faktor $\nu > 1$, der zu dem Momentengliede hinzutritt.

6. Aufstellung der Elastizitätsgleichungen.

Die Figuren 12, 13, 14 zeigen die Belastungszustände der drei Bogen. Die Pfeilrichtungen der $Y_{ae} \dots$ sind positiv eingetragen, wie sie sich aus Fig. 5

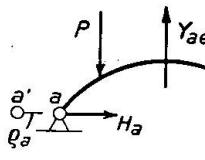


Fig. 12.

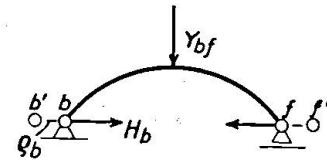


Fig. 13.

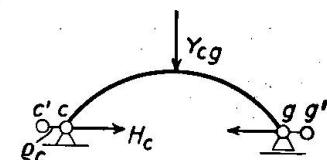


Fig. 14.

ergeben haben. Es wird nun an jedem Bogen die Scheitelsenkung η_s — abwärts positiv — und die Längenänderung der Bogensehne Δl — Zunahme positiv — durch die unter 5. erläuterten Hilfswerte ausgedrückt.

Bogen $a'e$:

$$\eta_s = P \delta_{yP} - Y_{ae} \delta_{yy} - H_a \delta_{yh}, \quad (5a)$$

$$\Delta l = 2 \varrho_a = P \delta_{hP} - Y_{ae} \delta_{hy} - H_a \delta_{hh}. \quad (5b)$$

Bogen $b'f$:

$$\eta_s = Y_{bf} \delta_{yy} - H_b \delta_{yh}, \quad (6a)$$

$$2 \varrho_b = Y_{bf} \delta_{hy} - H_b \delta_{hh}. \quad (6b)$$

Bogen $c'g$:

$$\eta_s = Y_{cg} \delta_{yy} - H_c \delta_{yh}, \quad (7a)$$

$$2 \varrho_c = Y_{cg} \delta_{hy} - H_c \delta_{hh}. \quad (7b)$$

Die Scheitellasten $Y_{ae} \dots$ werden nach den Gl. (1) durch die Scheitelerkerkräfte $Y_a \dots$ ausgedrückt, die H nach den Gl. (2) durch T_{ab} und T_{bc} . Dann erhält man durch Gleichsetzen von (5 a) und (6 a):

$$P \delta_{yP} - 2 Y_a \delta_{yy} - 2 T_{ab} \sin \varepsilon \delta_{yh} = 2 Y_b \delta_{yy} - (T_{ab} + T_{bc}) \sin \varepsilon \delta_{yh}. \quad (8)$$

(5 a) = (7 a) gibt

$$P \delta_{yP} - 2 Y_a \delta_{yy} - 2 T_{ab} \sin \varepsilon \delta_{yh} = (2 Y_a - 4 Y_b) \delta_{yy} - 2 T_{bc} \sin \varepsilon \delta_{yh}. \quad (9)$$

Die Gleichungen (5 b), (6 b), (7 b) lauten mit Beachtung der Gl. (1), (2), (3) zunächst folgendermaßen:

$$2 \varrho_a = P \delta_{hP} - 2 Y_a \delta_{hy} - 2 T_{ab} \sin \varepsilon \delta_{hh}. \quad (5b)$$

$$\frac{2 T_{ab} a}{E F_t \sin \varepsilon} - 2 \varrho_a = 2 Y_b \delta_{hy} - (T_{ab} + T_{bc}) \sin \varepsilon \delta_{hh}. \quad (6b)$$

$$\frac{2(T_{bc} - T_{ab})a}{EF_t \sin \varepsilon} + 2\varrho_a = (2Y_a - 4Y_b) \delta_{hy} - 2T_{bc} \sin \varepsilon \delta_{hh}. \quad (7b)$$

Hierbei ist die Länge der Ringseiten mit a , der Querschnitt des Zugrings mit F_t eingeführt worden.

Wir bilden aus (5 b) + (6 b)

$$\frac{2T_{ab}a}{EF_t \sin \varepsilon} = P\delta_{hp} - 2(Y_a - Y_b)\delta_{hy} - (3T_{ab} + T_{bc}) \sin \varepsilon \delta_{hh}, \quad (10)$$

aus (5 b) — (7 b) :

$$\frac{2(T_{ab} - T_{bc})a}{EF_t \sin \varepsilon} = P\delta_{hp} - 4(Y_a - Y_b)\delta_{hy} - 2(T_{ab} - T_{bc}) \sin \varepsilon \delta_{hh}, \quad (11)$$

aus (6 b) + (7 b) :

$$\frac{2T_{bc}a}{EF_t \sin \varepsilon} = 2(Y_a - Y_b)\delta_{hy} - (T_{ab} + 3T_{bc}) \sin \varepsilon \delta_{hh}. \quad (12)$$

Wir schreiben Gl. (8)

$$Y_a + Y_b = \frac{1}{2}P \frac{\delta_{yp}}{\delta_{yy}} - \frac{1}{2}(T_{ab} - T_{bc}) \sin \varepsilon \frac{\delta_{yh}}{\delta_{yy}},$$

und Gl. (9)

$$Y_a - Y_b = \frac{1}{2}P \frac{\delta_{yp}}{\delta_{yy}} - \frac{1}{2}(T_{ab} - T_{bc}) \sin \varepsilon \frac{\delta_{yh}}{\delta_{yy}}.$$

Dann wird

$$Y_a = \frac{3}{8}P \frac{\delta_{yp}}{\delta_{yy}} - \frac{1}{2}(T_{ab} - T_{bc}) \sin \varepsilon \frac{\delta_{yh}}{\delta_{yy}}, \quad (13)$$

$$Y_b = \frac{1}{8}P \frac{\delta_{yp}}{\delta_{yy}}. \quad (14)$$

Ebenso lassen sich zwei Gleichungen für $T_{ab} + T_{bc}$ und $T_{ab} - T_{bc}$ aufstellen.

Gl. (10) + (12) :

$$(T_{ab} + T_{bc}) \left(2\delta_{hh} + \frac{a}{EF_t \sin^2 \varepsilon} \right) = \frac{P\delta_{hp}}{2 \sin \varepsilon}, \quad (15)$$

und $Y_a - Y_b$ in Gl. (11) eingesetzt, gibt:

$$(T_{ab} - T_{bc}) \left[\left(\delta_{hh} + \frac{a}{EF_t \sin^2 \varepsilon} \right) \delta_{yy} - \delta_{yh}^2 \right] = \frac{P}{2 \sin \varepsilon} (\delta_{hp} \delta_{yy} - \delta_{yp} \delta_{hy}) \quad (16)$$

Wir führen alle Verschiebungsgrößen EJ_c -fach ein und setzen

$$\frac{aJ_c}{F_t \sin^2 \varepsilon} = z. \quad (17)$$

$$T_{ab} + T_{bc} = \frac{P}{2 \sin \varepsilon} \cdot \frac{\delta_{hp}}{(2\delta_{hh} + z)},$$

$$T_{ab} - T_{bc} = \frac{P}{2 \sin \varepsilon} \frac{(\delta_{hp} \delta_{yy} - \delta_{yp} \delta_{hy})}{[(\delta_{hh} + z) \delta_{yy} - \delta_{yh}^2]}.$$

Der Bruch des Ausdrucks für $T_{ab} - T_{bc}$ erlaubt eine einfache statische Deutung. Der Bogen sei nach Fig. 15 im Scheitel noch durch ein Rollenlager gestützt, die Enden durch ein gerades Zugband von der Länge l und dem Querschnitt $F_t \sin \varepsilon$ verbunden. Dann lauten die Elastizitätsgleichungen zur Berechnung von Y' und H' bei der gegebenen Belastung:

$$Y' \delta_{yy} + H' \delta_{yh} = P \delta_{yP}$$

$$Y' \delta_{hy} + H' \left(\delta_{hh} + \frac{J_c l}{F_t \sin \varepsilon} \right) = P \delta_{hP}.$$

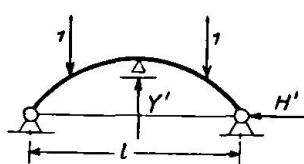


Fig. 15.

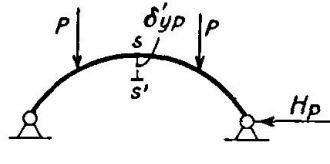


Fig. 16.

Da $l = a : \sin \varepsilon$, so ist $\delta_{hh} + \frac{J_c a}{F_t \sin^2 \varepsilon} = \delta_{hh} + \varkappa$. Die Auflösung ergibt

$$Y' = \frac{\delta_{yP}(\delta_{hh} + \varkappa) - \delta_{hP} \delta_{yh}}{\delta_{yy}(\delta_{hh} + \varkappa) - \delta_{hy}^2},$$

$$H' = \frac{-\delta_{yP} \delta_{yh} + \delta_{hP} \delta_{yy}}{\delta_{yy}(\delta_{hh} + \varkappa) - \delta_{hy}^2}. \quad (18)$$

Wir können daher schreiben

$$T_{ab} - T_{bc} = \frac{P}{2 \sin \varepsilon} H',$$

$$T_{ab} + T_{bc} = \frac{P}{2 \sin \varepsilon} \cdot \frac{\delta_{hP}}{(2 \delta_{hh} + \varkappa)}.$$

$$T_{ab} = \frac{P}{4 \sin \varepsilon} \left(\frac{\delta_{hP}}{2 \delta_{hh} + \varkappa} + H' \right), \quad (19a)$$

$$T_{bc} = \frac{P}{4 \sin \varepsilon} \left(\frac{\delta_{hP}}{2 \delta_{hh} + \varkappa} - H' \right). \quad (19b)$$

Damit kann man alle übrigen Werte ausdrücken, aus (13)

$$Y_a = \frac{P}{8 \delta_{yy}} (3 \delta_{yP} - 2 H' \delta_{yh}), \quad (20a)$$

$$Y_c = Y_a - 2 Y_b = \frac{P}{8 \delta_{yy}} (\delta_{yP} - 2 H' \delta_{yh}). \quad (20b)$$

Die Horizontalschübe sind nach den Gl. (2)

$$H_a = 2 T_{ab} \sin \varepsilon = \frac{P}{2} \left(\frac{\delta_{hP}}{2 \delta_{hh} + \varkappa} + H' \right), \quad (21a)$$

$$H_b = (T_{ab} + T_{bc}) \sin \varepsilon = \frac{P}{2} \frac{\delta_{hP}}{(2 \delta_{hh} + \varkappa)}, \quad (21b)$$

$$H_c = 2 T_{bc} \sin \varepsilon = \frac{P}{2} \left(\frac{\delta_{hP}}{2 \delta_{hh} + \varkappa} - H' \right), \quad (21c)$$

$$W = (T_{ab} - T_{bc}) \cos \varepsilon = \frac{P}{2} \operatorname{cotg} \varepsilon H'. \quad (21d)$$

Die lotrechten Auflagerkräfte sind, vgl. Fig. 12, 13, 14:

$$V_a = P - Y_a, \quad V_b = Y_b, \quad V_c = Y_c.$$

Damit sind alle äußeren Kräfte an den drei Bogen bekannt und es können alle $M N Q$ berechnet werden. Die lotrechte Scheitelverschiebung folgt aus einer der Gl. (5 a), (6a), (7 a), die Lagerverschiebungen kann man aus den Gl. (5 b), (6 b), (7 b) berechnen.

Man erhält z. B. aus Gl. (6 a):

$$E J_c \eta_s = Y_{bf} \delta_{yy} - H_b \delta_{yh}. \\ Y_{bf} = 2 Y_b = \frac{1}{4} P \frac{\delta_{yP}}{\delta_{yy}}, \quad H_b = \frac{P}{2} \frac{\delta_{hP}}{(2 \delta_{hh} + \alpha)}.$$

Wäre der Zugring starr ($F_t = \infty$), so wäre $\alpha = 0$ und man erhielte

$$E J_c \eta_s = \frac{P}{4} \delta_{yP} - \frac{P}{4} \frac{\delta_{hP}}{\delta_{hh}} \delta_{yh}.$$

Der Horizontalschub des fest gelagerten Bogens $a - e$ ist mit Beachtung der Verschiebungsgrößen in Fig. 12 und 14:

$$H_P = P \frac{\delta_{hP}}{\delta_{hh}},$$

daher kann man schreiben:

$$E J_c \eta_s = \frac{P}{4} (\delta_{yP} - H_P \delta_{yh}).$$

Die Klammer stellt die Scheitelsenkung $\delta_{yP}^{(1)}$ des fest gelagerten, einfach statisch unbestimmten Bogens dar,

$$E J_c \eta_s = \frac{P}{4} \delta_{yP}^{(1)} \quad (22)$$

bedeutet also, daß für starren Zugring die Scheitelsenkung der Kuppel bei Belastung eines Bogens gleich dem vierten Teil der Scheitelsenkung des ebenso belasteten Einzelbogens ist. Dies gilt für jede Laststellung.

Für die Lagerverschiebungen erhält man mit $\alpha = 0$ aus den Gl. (5 b), (6 b), (7 b) nach Einsetzen von Y_{ae} , H_a usw. aus den Gl. (20) und (21) mit Beachtung von (18)

$$\varrho_a = \frac{P}{8 \delta_{yy}} (\delta_{hP} \delta_{yy} - \delta_{yP} \delta_{hy}) = -\varrho_b = +\varrho_c = -\varrho_d = +\varrho_e \text{ usw.} \quad (22a)$$

Die Lagerverschiebungen werden alle gleich groß mit abwechselnd umgekehrtem Vorzeichen, wie es bei einem radial geführten Fußring von gerader Seitenzahl zu erwarten ist. Bei einem räumlichen Gelenkfachwerk würde dies Beweglichkeit des Fußrings bedeuten, für ein solches ist unsere Lagerung bekanntlich unbrauchbar.

C. Antimetrischer Belastungsfall II.

1. Gleichgewicht der äußeren Kräfte.

An denselben Punkten wie im Falle I wirkt jetzt links wieder eine abwärts, rechts dagegen eine aufwärts gerichtete Kraft P .

$$V_e = -V_a, V_d = -V_b, V_c = 0, \Sigma V = 0.$$

Die Führungskräfte W auf jeder Seite halten sich nach Fig. 18 das Gleichgewicht.

$$W_c = W_b \sqrt{2}. \quad (23)$$

2. Gleichgewicht am Scheitelknoten.

$$Y_e = -Y_a, Y_d = -Y_b, Y_c = 0.$$

Die Scheitellasten Y_{ae}, Y_{bf}, Y_{cg} werden sämtlich = 0, weil die seitlich eines Bogens wirkenden Kräfte Y sich stets in sich aufheben, Fig. 19. Für die Scheitelkräfte X gilt

$$X_e = -X_a, X_d = -X_b, X_c = 0.$$

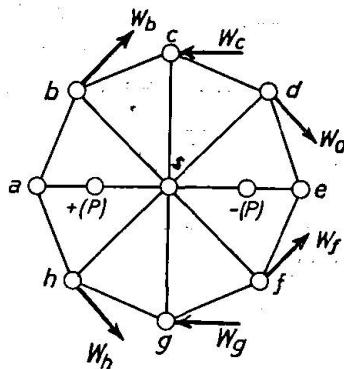


Fig. 17.

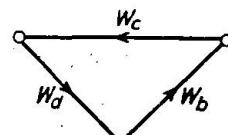


Fig. 18.

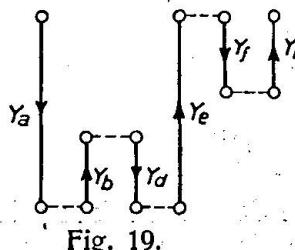


Fig. 19.

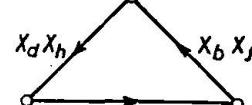


Fig. 20.

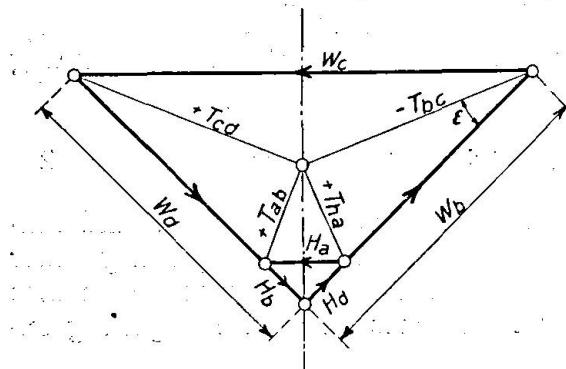


Fig. 21.

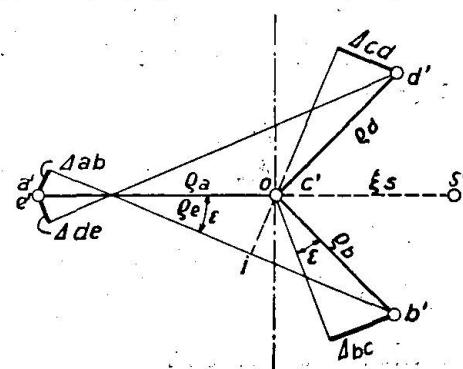


Fig. 21a.

Das Gleichgewicht der Kräfte liefert nach Fig. 20:

$$X_b = X_d = X_f = X_h = X_a \cdot \frac{1}{2} \sqrt{2}. \quad (24)$$

Scheitellasten:

$$X_{ae} = \sum X_{bdhf} = 2X_a, \text{ Richtung } ea \quad (25a)$$

$$X_{bf} = \sum X_{adeh} = 2X_a \frac{1}{2} \sqrt{2}, \text{ Richtung } bf. \quad (25b)$$

Für die Scheitelbiegungsmomente $Z_a \dots$ und die Scheitellastmomente Z_{az}, Z_{bf} gelten dieselben Beziehungen, da Fig. 20 auch für die Vektoren der Z gilt, wenn man es um 90° herumdreht, also

$$Z_{ae} = 2Z_a \quad (26\text{a})$$

$$Z_{bf} = Z_a \sqrt{2}. \quad (26\text{b})$$

3. Gleichgewicht am Fußring.

$T_{cd} = -T_{bc}$, $T_{de} = -T_{ab}$, Fig. 21, zeigt den Kräfteplan. Die äußeren Kräfte H_a , H_b , W_b , W_c , W_d , H_d bilden ein geschlossenes Polygon, das sich dann für die übrigen wiederholt. Alle Kräfte lassen sich durch eine einzige Größe, z. B. H_a ausdrücken.

$$\left. \begin{aligned} T_{ab} &= \frac{H_a}{2 \sin \varepsilon}, & T_{bc} &= T_{ab} \cot \varepsilon = \frac{H_a \cot \varepsilon}{2 \sin \varepsilon}, \\ H_b &= \frac{H_a}{2} \sqrt{2}, & W_c &= 2 T_{bc} \cos \varepsilon = H_a \cot^2 \varepsilon, \\ W_b &= \frac{1}{2} W_c \sqrt{2} = \frac{H_a}{2} \cot^2 \varepsilon \sqrt{2}. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Diese Formeln setzen die Pfeilrichtungen in Fig. 21 voraus, T_{bc} ist diesmal eine Druckkraft.

4. Verschiebungspunkt des Fußringes.

Die radialen Verschiebungen ϱ der Fußpunkte sind

$$\varrho_e = -\varrho_a, \quad \varrho_d = -\varrho_b, \quad \varrho_c = 0.$$

Aus der Projektion

$$0 - i = \varrho_a \sin \varepsilon - \Delta ab = \varrho_b \sin \varepsilon$$

folgt

$$\varrho_b = \varrho_a - \frac{\Delta ab}{\sin \varepsilon}$$

$$\varrho_b = \varrho_a - \frac{T_{ab} a J_c}{\sin \varepsilon F_t} = \varrho_a - \frac{H_a}{2} \chi.$$

Aus $\Delta bc = \varrho_b \sin \varepsilon$ folgt

$$T_{bc} a \frac{J_c}{F_t} = \left(\varrho_a - \frac{H_a}{2} \chi \right) \sin \varepsilon$$

und nach Einsetzen von T_{bc} aus (27):

$$\varrho_a = \frac{H_a}{2} \chi (1 + \cot \varepsilon), \quad (28\text{a})$$

$$\varrho_b = \frac{H_a}{2} \chi \cot \varepsilon \text{ und mit } \cot \varepsilon = 1 + \sqrt{2},$$

$$\varrho_a = \frac{H_a}{2} \chi (2 + \sqrt{2}), \quad (28\text{a})$$

$$\varrho_b = \frac{H_a}{2} \chi (1 + \sqrt{2}) = \varrho_a \cdot \frac{1}{2} \sqrt{2}. \quad (28\text{b})$$

5. Hilfsbelastungszustände am einfachen Balken.

Der Bogen oder Rahmen wird nacheinander mit einer waagerechten Scheitellast 1, einem Lastmoment 1 und den Lasten $P = \pm 1$ belastet. Hierbei entstehen die Momente M_x , M_z , M_{PII} . Damit der erste Zustand auch anti-

symmetrisch wird, lassen wir die Horizontalschübe $\pm \frac{1}{2}$ wirken. Mit Beachtung der symmetrischen Belastungszustände nach Fig. 9 und 10 wird

$$\begin{aligned} E J_c \delta_{hx} &= \int M_h M_x ds' = 0 \\ E J_c \delta_{yx} &= \int M_y M_x ds' = 0 \\ E J_c \delta_{hz} &= \int M_h M_z ds' = 0 \\ E J_c \delta_{yz} &= \int M_y M_z ds' = 0, \end{aligned}$$

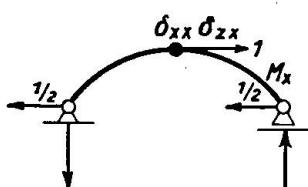


Fig. 22.

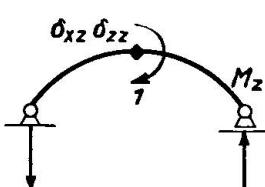


Fig. 23.

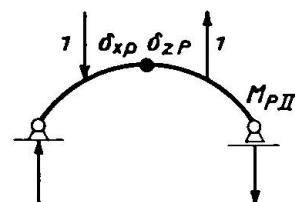


Fig. 24.

es bleibt nur

$$\left. \begin{aligned} E J_c \delta_{xx} &= \int M_x^2 ds' = \text{waagerechte Verschiebung des Scheitels,} \\ E J_c \delta_{zz} &= \int M_z^2 ds' = \text{Verdrehung des Scheitelquerschnittes,} \\ E J_c \delta_{xz} &= \int M_x M_z ds' = \text{Scheitelverdrehung bei (22) oder Scheitelverschiebung bei (23).} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Da der Belastungszustand (24) ebenfalls antimetrisch ist, so wird

$$\left. \begin{aligned} E J_c \delta_{hPII} &= \int M_h M_{PII} ds' = 0, \text{ daher auch } H_{PII} = 0, \\ E J_c \delta_{yPII} &= \int M_y M_{PII} ds' = 0, \text{ es bleiben} \\ E J_c \delta_{xP} &= \int M_x M_{PII} ds' = \text{waagerechte Scheitelverschiebung,} \\ E J_c \delta_{zP} &= \int M_z M_{PII} ds' = \text{Scheitelverdrehung bei (24).} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

6. Aufstellung der Elastizitätsgleichungen.

Bogen $a'e$, das Kräftepaar P erzeugt keinen Horizontalschub, ebensowenig das Lastmoment Z_{ae} , daher

$$X_{ae} = H_a + H_e, \quad H_a = \frac{1}{2} X_{ae}.$$

Die waagerechte, nach rechts gerichtete Verschiebung des Scheitelpunktes s ist ξ_s , die Verdrehung des Scheitelquerschnitts im Uhrzeigersinne = ζ_s .

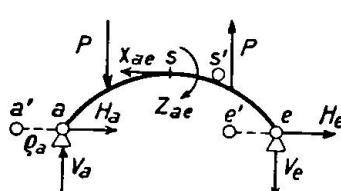


Fig. 25.

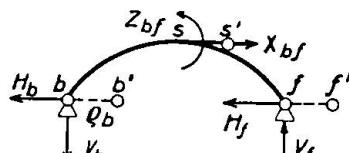


Fig. 26.

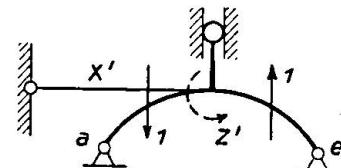


Fig. 27.

Wir bilden eine Arbeitsgleichung aus dem Belastungszustand (22) und dem Formänderungszustand (25):

$$1 : \xi_s + \frac{1}{2} \varrho_a + \frac{1}{2} \varrho_e = \int M_x M ds'$$

und mit

$$\begin{aligned} M &= P M_{PII} - X_{ae} M_x + Z_{ae} M_z, \quad \varrho_e = \varrho_a, \\ \xi_s + \varrho_a &= P \delta_{xP} - X_{ae} \delta_{xx} + Z_{ae} \delta_{xz}. \end{aligned} \quad (31a)$$

Ebenso erhält man aus (23) \times (25):

$$\begin{aligned} 1 \cdot \zeta_s &= \int M_z (P M_{PII} - X_{ae} M_x + Z_{ae} M_z) ds' \\ \zeta_s &= P \delta_{xP} - X_{ae} \delta_{xz} + Z_{ae} \delta_{zz}. \end{aligned} \quad (31b)$$

Die Verschiebung des Scheitelpunktes s beim Bogen $b f$ in seiner Ebene ist

$$s - s' = \xi_s \cdot \cos 45^\circ = \xi_s \frac{\sqrt{2}}{2},$$

in demselben Verhältnis steht die Verdrehung des Scheitelquerschnitts von $b f$ zu der von $a e$.

Die Scheitellasten sind nach Fig. 20:

$$X_{bf} = X_{ae} \frac{1}{2} \sqrt{2}, \quad Z_{bf} = Z_{ae} \frac{1}{2} \sqrt{2}.$$

Arbeit (22) \times (26) gibt

$$1 \cdot \xi_s \frac{1}{2} \sqrt{2} - \frac{1}{2} \varrho_b - \frac{1}{2} \varrho_f = \int M_x M ds',$$

und mit

$$\begin{aligned} M &= X_{bf} M_x - Z_{bf} M_z, \\ \varrho_b &= \varrho_f, \quad \varrho_b = \varrho_a \cdot \frac{1}{2} \sqrt{2}, \\ \xi_s - \varrho_a &= X_{ae} \delta_{xx} - Z_{ae} \delta_{xz}. \end{aligned} \quad (32a)$$

Arbeit (23) \times (26) gibt

$$\begin{aligned} 1 \cdot \xi_s \frac{1}{2} \sqrt{2} &= \int M_z \left(X_{ae} \frac{\sqrt{2}}{2} M_x - Z_{ae} \frac{\sqrt{2}}{2} M_z \right), \\ \zeta_s &= X_{ae} \delta_{xz} - Z_{ae} \delta_{zz}. \end{aligned} \quad (32b)$$

Gl. (31 a) — (32 a) liefert

$$P \delta_{xP} - 2 X_{ae} \delta_{xx} + 2 Z_{ae} \delta_{xz} = 2 \varrho_a,$$

und Gl. (31 b) — (32 b)

$$P \delta_{zP} - 2 X_{ae} \delta_{xz} + 2 Z_{ae} \delta_{zz} = 0.$$

Wir setzen ein

$$\varrho_a = \frac{H_a}{2} \times (2 + \sqrt{2}) = \frac{X_{ae}}{4} \times (2 + \sqrt{2})$$

und erhalten das Gleichungssystem:

$$X_{ae} \left[\delta_{xx} + \frac{\gamma}{4} (2 + \sqrt{2}) \right] - Z_{ae} \delta_{xz} = \frac{1}{2} P \delta_{xP}, \quad (33a)$$

$$- X_{ae} \delta_{xz} + Z_{ae} \delta_{zz} = - \frac{1}{2} P \delta_{zP}. \quad (33b)$$

$$\text{Mit der Abkürzung } \frac{\gamma}{4} (2 + \sqrt{2}) = \gamma \quad (34)$$

erhält man die Lösungen:

$$X_{ae} = \frac{1}{2} P \cdot \frac{(\delta_{xP} \delta_{zz} - \delta_{zP} \delta_{xz})}{[(\delta_{xx} + \gamma) \delta_{zz} - \delta_{xz}^2]}, \quad (35a)$$

$$Z_{ae} = \frac{1}{2} P \cdot \frac{[\delta_{xP} \delta_{xz} - \delta_{zP} (\delta_{xx} + \gamma)]}{[(\delta_{xx} + \gamma) \delta_{zz} - \delta_{xz}^2]} \quad (35b)$$

Auch diese Ausdrücke erlauben eine einfache statische Deutung. Man denke sich den Zweigelenkbogen $a - e$ im Scheitel s durch ein waagerechtes Zugband gehalten und durch einen starren, lotrecht geführten Arm an Verdrehungen

verhindert. Die Spannkraft im Zugband sei X' , das Einspannungsmoment am Anschluß des Kragarms Z' . Dann bedeuten die Fig. 22, 23, 24 die Zustände $X' = -1$, $Z' = -1$, $X'Z' = 0$.

Die Elastizitätsgleichungen lauten

$$\begin{aligned} X' \delta_{xx} + Z' \delta_{xz} &= \delta_{xP}, \\ X' \delta_{zx} + Z' \delta_{zz} &= \delta_{zP}. \end{aligned}$$

Es ist dabei ohne Belang, ob in Fig. 23 und 24 rechts ein bewegliches oder ein festes Auflager angenommen wird (statisch bestimmtes oder unbestimmtes Hauptsystem), weil $H = 0$. Ist das Zugband elastisch, so tritt zu δ_{xx} der Zusatzwert γ . Die Lösung ergibt:

$$X' = \frac{\delta_{xP} \delta_{zz} - \delta_{zP} \delta_{xz}}{(\delta_{xx} + \gamma) \delta_{zz} - \delta_{xz}^2} \quad (36a)$$

$$Z' = \frac{-\delta_{xP} \delta_{xz} + \delta_{zP} (\delta_{xx} + \gamma)}{(\delta_{xx} + \gamma) \delta_{zz} - \delta_{xz}^2} \quad (36b)$$

Mit Einführung dieser Hilfswerte wird

$$X_{ae} = \frac{1}{2} P X', \quad Z_{ae} = -\frac{1}{2} P Z'. \quad (37)$$

Mit den Scheitellasten des Hauptbogens sind auch die der Seitenbogen nach (25) gegeben:

$$X_{bf} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} X_{ae}, \quad Z_{bf} = \frac{1}{2} \sqrt{2} Z_{ae}.$$

Die waagerechten Scheitelkräfte der Einzelbogen (hier X_{ae} und X_{bf}) ergeben sich gleich Null für ungernadels n , d.h. beim Sechseck, Zehneck, usw.

Die Horizontalschübe sind gleich den halben Scheitellasten, die Zugbandspannkräfte T und Lagerwiderstände W folgen aus den Gl. (27), worin $H_a = \frac{1}{2} X_{ae}$.

Die lotrechten Lagerkräfte sind:

$$V_a = V_P + X_{ae} \frac{f}{l} - \frac{Z_{ae}}{l}, \quad V_e = -V_a; \quad (38a)$$

$$V_b = -X_{bf} \frac{f}{l} + \frac{Z_{bf}}{l}, \quad V_f = -V_b. \quad (38b)$$

Die Lagerverschiebungen sind durch (28) gegeben, für die Scheitelverschiebungen kann man je eine der Gl. (31) und (32) benutzen. Man erhält für ξ_s und ζ_s einfache Formeln.

Aus (32 a) folgt mit Rücksicht auf (28 a) und (36):

$$\xi_s - \frac{1}{2} P X' \frac{z}{4} (2 + \sqrt{2}) = \frac{1}{2} P X' \delta_{xx} + \frac{1}{2} P Z' \delta_{xz}.$$

$$\xi_s = \frac{1}{2} P [X' (\delta_{xx} + \gamma) + Z' \delta_{xz}].$$

Setzt man hierin X' und Z' ein, so bleibt

$$\xi_s = \frac{1}{2} P \delta_{xP}. \quad (39a)$$

Aus (32 b)

$$\zeta_s = \frac{1}{2} P X' \delta_{xz} + \frac{1}{2} P Z' \delta_{zz}$$

folgt:

$$\zeta_s = \frac{1}{2} P \delta_{zP}. \quad (39b)$$

Die Scheitelverschiebungen ξ und ζ sind also halb so groß wie für den belasteten Einzelbogen nach Fig. 24, unabhängig vom Querschnitt des Zugrings.

Um die Wirkung einer einseitig stehenden Last zu erhalten, werden die Ergebnisse der Fälle I und II addiert und halbiert. Dabei ist darauf zu achten, daß die positiven Vorzeichen der Kraft- und Verschiebungsgrößen durch die Kräftepläne, Verschiebungspläne und Belastungsbilder der Bogen in I und II gesondert festgelegt sind und nicht immer übereinstimmen, z. B. ist

$+T_{bc}$ in I (Fig. 7) Zug, $+T_{bc}$ in II (Fig. 21) Druck.

Bei einem sehr großen Querschnitt des Zugrings kann man $F_t = \infty$ setzen, dann werden α und $\gamma = 0$ und die Formeln vereinfachen sich entsprechend. Die Ergebnisse des Zahlenbeispiels werden allerdings zeigen, daß der Einfluß des Zugrings recht groß ist.

D. Rippenkuppel mit festen Fußpunkten.

Zum Vergleich sei noch der Fall behandelt, daß alle Fußpunkte fest gelagert sind.

1. Symmetrischer Belastungsfall I.

Alle unbelasteten Seitenbogen befinden sich in gleichem Spannungszustand, daher wird

$Y_b = Y_c = Y_d = Y_f = Y_g = Y_h = Y$, $Y_a = Y_e = 3Y$, und die Scheitellasten werden

$$Y_{ae} = 6Y, \quad Y_{bf} = 2Y.$$

2. Hilfsbelastungszustände am Einzelbogen.

Wir belasten den Zweigelenkbogen mit der Last $Y_{ae} = 1$ und erhalten aus Fig. 9 und 10

$$H_y = \frac{\delta_{hy}}{\delta_{hh}}, \quad \delta_{yy}^{(1)} = \delta_{yy} - H_y \delta_{yh}. \quad (40a)$$

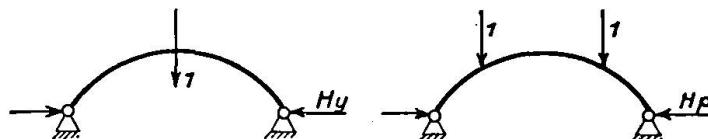


Fig. 28.

Fig. 29.

Durch die symmetrische P -Belastung (Fig. 29) entsteht

$$H_P = \frac{\delta_{hp}}{\delta_{hh}}, \quad \delta_{yp}^{(1)} = \delta_{yp} - H_P \delta_{yh}. \quad (40b)$$

Dann gilt für die Scheitelverschiebung η_s am Bogen $a - e$:

$$\eta_s = P \delta_{yp}^{(1)} - 6Y \delta_{yy}^{(1)},$$

und am Bogen $b - f$:

$$\eta_s = 2Y \delta_{yy}^{(1)},$$

hieraus folgt

$$Y = P \frac{\delta_{yp}^{(1)}}{8 \delta_{yy}^{(1)}}. \quad (41)$$

Damit ist der Belastungszustand der vier Bogen bekannt. Man beachte, daß dieser Gleichgewichtszustand nicht mit jenem übereinstimmt, den wir erhalten, wenn wir in B den Zugring starr annehmen, weil auch dann alle Lagerpunkte Verschiebungen φ ausführen. Die Scheitelsenkung η_s nach Gl. (22) ist aber dieselbe.

3. Antimetrischer Belastungsfall II.

Der Verschiebungsplan desselben Falles bei der Kuppel mit Fußring (Fig. 22) zeigt, daß der Auflagerpunkt c keine Verschiebung ausführt ($\varrho_c = 0$), weil Bogen $c-g$ spannungslos bleibt. Wäre der Zugring starr ($\Delta_{ab} = 0$, $\Delta_{bc} = 0$), so müßten auch ϱ_b und $\varrho_a = 0$ werden, d. h. die Auflagerpunkte der Rippenkuppel mit starrem Fußring verschieben sich beim Belastungsfall II nicht. Das Tragwerk verhält sich dann also wie ein solches mit festen Kämpferpunkten und wir erhalten für dieses die Scheitellasten

$$X_{ae} = \frac{1}{2}PX', \quad Z_{ae} = -\frac{1}{2}PZ', \quad (37)$$

wenn wir in den Formeln (36) für X' und $Z' \gamma = 0$ setzen.

Für die Bogen $b-f$ und $d-h$ gilt dann wieder:

$$X_{bf} = \frac{1}{2}\sqrt{2}X_{ae}, \quad Z_{bf} = \frac{1}{2}\sqrt{2}Z_{ae},$$

die Scheitellasten Y_{ae} sind = 0, da die Betrachtungen über das Gleichgewicht im Scheitel unter C auch hier gelten.

E. Beispiel und Zahlenrechnung.

1. Bogenkonstanten.

Die Bogen seien Parabeln mit der Spannweite l und der Pfeilhöhe f . Um einfache Formeln für die Hilfswerte und dadurch rasch ein Bild von der Wirkung des Tragwerks zu erhalten, setzen wir das Trägheitsmoment J des Bogens an der Stelle $x-y$

$$J = J_s : \cos \varphi,$$

wenn J_s das Trägheitsmoment im Scheitel und φ der Neigungswinkel im Punkte $x-y$ ist. Für die Hilfswerte ergeben sich dann sehr einfache Formeln.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Fig. 9: } EJ_s \delta_{hh} = \frac{8}{15}f^2 l, \\ \text{„ 10: } EJ_s \delta_{yy} = \frac{l^3}{48}, \\ EJ_s \delta_{hy} = \frac{5}{48}fl^2, \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Fig. 22: } EJ_s \delta_{xx} = \frac{f^2 l}{120}, \\ \text{„ 23: } EJ_s \delta_{zz} = \frac{l}{12}, \\ EJ_s \delta_{xz} = -\frac{fl}{48}. \end{array} \right\} \quad (29)$$

Der Horizontalschub H_y nach Fig. 28 wird

$$H_y = \frac{\delta_{hy}}{\delta_{hh}} = \frac{25}{128} \frac{l}{f}, \quad \left. \right\} \quad (40a)$$

die Scheitelsenkung $\delta_{yy}^{(1)}$ im statisch unbestimmten Bogen:

$$EJ_s \delta_{yy}^{(1)} = EJ_s \delta_{yy} - H_y EJ_s \delta_{yh} = \frac{l^3}{16 \cdot 128}. \quad \left. \right\} \quad (40a)$$

Hierbei ist, wie fast immer zulässig, die Wirkung der Normalkräfte im Bogen vernachlässigt worden, bei sehr flachen Bogen kann man sie in bekannter Weise durch einen Faktor $1:\nu$, der zum Werte δ_{hh} tritt, leicht berücksichtigen, ν etwa = 0,97.

2. Belastungsglieder.

$$\left. \begin{aligned} \text{Fig. 9, 10, 11: } E J_s \delta_{hPI} &= \frac{2}{3} \frac{f}{l^2} (l^3 - 2lx^2 + x^3), \\ E J_s \delta_{yPI} &= \frac{x}{24} (3l^2 - 4x^2). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Fig. 22, 23, 24: } E J_s \delta_{xPII} &= \frac{f}{24l^2} (l^3 - 8lx^2 + 8x^3), \\ E J_s \delta_{zPII} &= -\frac{x}{12l} (l^2 - 4x^2). \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Der Horizontalschub H_{PI} nach Fig. 29 wird

$$\left. \begin{aligned} H_{PI} &= \frac{\delta_{hPI}}{\delta_{hh}} = \frac{5}{4} \frac{x}{f l^3} (l^3 - 2lx^2 + x^3), \\ \text{hieraus die Scheitelsenkung des statisch unbestimmten Bogens} \\ E J_s \delta_{yPI}^{(1)} &= E J_s \delta_{yPI} - H_{PI} \delta_{yh} = -\frac{x}{8 \cdot 24 l} (l^3 - 18lx^2 + 25x^3) \end{aligned} \right\} \quad (40b)$$

3. Wir untersuchen eine Laststellung in $x = \frac{l}{4}$.

$$\begin{aligned} E J_s \delta_{hPI} &= \frac{57}{6 \cdot 64} f l^2. & E J_s \delta_{yPI} &= \frac{11}{16 \cdot 24} l^3. \\ E J_s \delta_{xPII} &= \frac{5}{32 \cdot 24} f l^2. & E J_s \delta_{zPII} &= -\frac{l^2}{64}. \\ H_{PI} &= \frac{5 \cdot 57}{16 \cdot 64} \frac{l}{f}. & E J_s \delta_{yPI}^{(1)} &= -\frac{17}{24 \cdot 32 \cdot 64} l^3. \end{aligned}$$

Die Rechnung ließe sich durchführen, ohne für l und f Zahlenwerte einzusetzen, nur zur Berechnung von α und γ muß dies geschehen.

$$\epsilon = \frac{45^\circ}{2} = 22^\circ 30', \quad \sin \epsilon = 0,38268, \quad \sin^2 \epsilon = 0,14644.$$

Die Seitenlänge im Grundriß ist dann

$$a = l \sin \epsilon = 7,65 \text{ m.}$$

Für $l = 20 \text{ m}$, $f = 5 \text{ m}$, $J_s = 10000 \text{ cm}^4$, $F_t = 40 \text{ cm}^2$

$$\text{wird } \frac{J_s}{F_t} = \frac{0,0001}{0,0040} = 0,025 \text{ m}^2, \quad z = \frac{7,65 \cdot 0,025}{0,14644} = 1,306,$$

$$\gamma = \frac{z}{4} (2 + \sqrt{2}) = 1,1147.$$

4. Symmetrischer Belastungsfall I.

Zur Berechnung des Hilfswertes H' aus (18) bilden wir

$$\delta_{hh} + z = \frac{8}{15} f^2 l \left(1 + \frac{15z}{8f^2 l} \right) = \frac{8}{15} f^2 l \cdot 1,0049.$$

Dann wird $H' = + 0,34463 \frac{l}{f}$ ($+ 0,41663$).

Die eingeklammerten Zahlen gelten für $x = 0$.

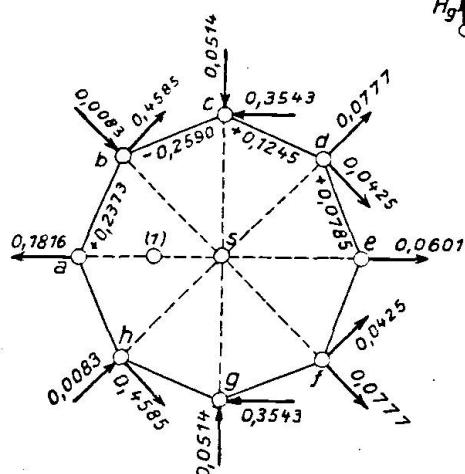


Fig. 30.

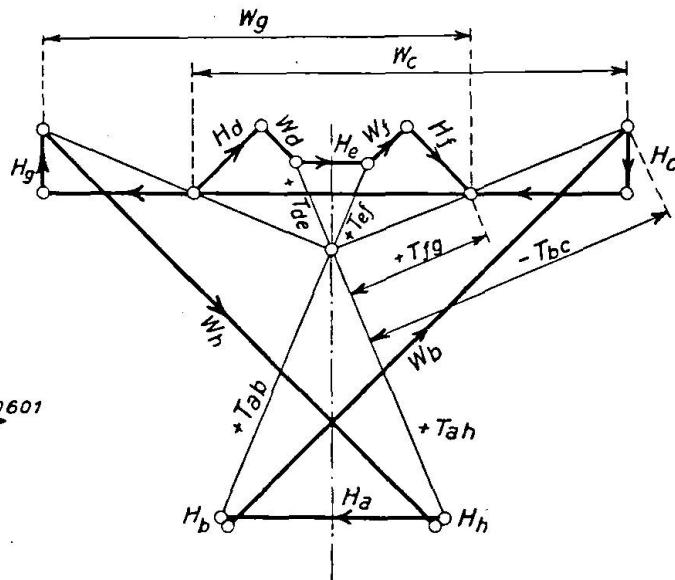


Fig. 31.

Kräfteplan
Polygone des forces
Diagram of forces

Gleichgewicht am Fußring. Einheit $P \frac{l}{f}$
Equilibre de la ceinture basse. Unité $P \frac{l}{f}$
Equilibrium at base ring. Unit $P \frac{l}{f}$

Aus den Formeln (19), (20), (21) erhält man dann

$H_a = + 0,24172$	$(+ 0,27789)$
$H_b = + 0,06941$	$(- 0,06958)$
$H_c = - 0,10290$	$(- 0,13873)$
$T_{ab} = + 0,31583$	$(+ 0,36309)$
$T_{bc} = - 0,13445$	$(- 0,18127)$
$Y_{ae} = + 0,16968 P$	$(- 0,01032)$
$Y_{bf} = + 0,34374 "$	$(+ 0,34374)$
$Y_{cg} = - 0,51782 "$	$(- 0,69782)$
$W = + 0,41600 P \frac{l}{f}$	$(+ 0,50291)$
$V_a = + 0,9152 P$	$(+ 1,0052)$
$V_b = + 0,1719 "$	$(+ 0,1719)$
$V_c = - 0,2589 "$	$(- 0,3489)$

Damit sind die an den 3 Bogen wirkenden Kräfte bekannt. Die lotrechte Verschiebung des Scheitels ergibt sich aus (6 a) (oder (5 a), (7 a)):

$$E J_s \eta_s = - 0,000068 P l^3 \quad (- 0,000086),$$

die Lagerverschiebungen aus (5 b), (6 b), (7 b):

$$E J_s 2 \varrho_a = +0,00185 P f l^2 \quad (+0,00130)$$

$$E J_s 2 \varrho_b = -0,00121 \quad " \quad (-0,00130)$$

$$E J_s 2 \varrho_c = +0,00094 \quad " \quad (+0,00130).$$

Für $\varkappa = 0$ hat sich die Scheitelverschiebung nach (22)

$$E J_s \eta_s = \frac{1}{4} P \delta_{yP}^{(1)} = -\frac{1}{4} P \cdot \frac{17 l^3}{49152} = -\frac{1}{4} P \cdot 0,000346 l^3 = -0,000086 P l^3$$

ergeben. Die Lagerverschiebungen sind für $\varkappa = 0$ nach (22 a) abwechselnd

$$\varrho = \pm \frac{P}{8 \delta_{yy}} (\delta_{hP} \delta_{yy} - \delta_{yP} \delta_{hy})$$

$$E J_s \varrho = \pm \frac{P 48}{8 l^3} \left(\frac{57}{6 \cdot 64} f l^2 \frac{l^3}{48} - \frac{11 l^3 5}{16 \cdot 24 \cdot 48} f l^2 \right) = \pm \frac{P f l^2}{24 \cdot 64}$$

$$E J_s \varrho = \pm \frac{P f l^2}{1536} = \pm 0,000651 P f l^2.$$

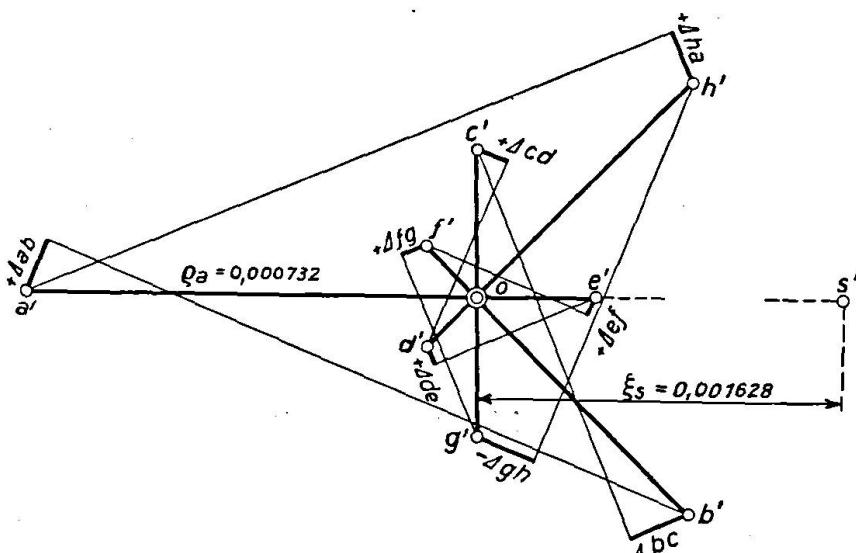


Fig. 32.

Verschiebungsplan. Einheit $\frac{P f l^2}{E J_s}$

Diagramme des translations. Unité $\frac{P f l^2}{E J_s}$

Diagram of displacements. Unit $\frac{P f l^2}{E J_s}$

5. Antimetrischer Belastungsfall.

Zur Berechnung der Hilfswerte X' und Z' aus (36) bilden wir

$$\delta_{xx} + \gamma = \frac{f^2 l}{120} \left(1 + \frac{120 \gamma}{f^2 l} \right) = \frac{f^2 l}{120} \cdot 1,26754.$$

Die Längenänderung der Fußringseiten macht sich also in diesem Belastungsfall sehr stark bemerkbar. Es ergeben sich

$$X' = +0,83324 \quad (+0,48630) \cdot l : f$$

$$Z' = +0,02085 \quad (-0,06592) \cdot l.$$

Dann erhält man aus den Formeln (37), (27), (38) die eingeklammerten Zahlen für $\varkappa = 0$, $\gamma = 0$:

$X_{ae} = + 0,24315 \text{ } Pl:f$	(+ 0,41662)
$Z_{ae} = + 0,03296 \text{ } Pl$	(- 0,01043)
$X_{bf} = + 0,17193 \text{ } Pl:f$	(+ 0,29459)
$Z_{bf} = + 0,02330 \text{ } Pl$	(- 0,00737)
$T_{ab} = + 0,15885 \text{ } Pl:f$	(+ 0,27224)
$T_{bc} = + 0,38349$	" (+ 0,65708) (Druck)
$W_b = + 0,50105$	" (+ 0,85851)
$W_c = + 0,70859$	" (+ 1,21412)
$V_a = + 0,71019 \text{ } P$	(+ 0,92705)
$V_b = - 0,14863$	" (- 0,30196).

Der große Unterschied in diesen Zahlen läßt den Einfluß der Längenänderung des Zugrings erkennen.

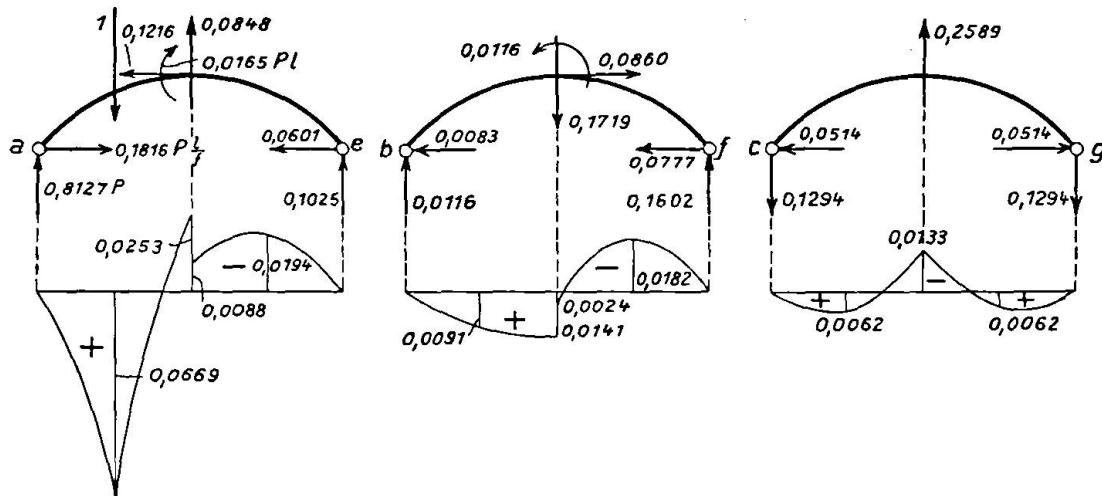


Fig. 33 a.

Fig. 33 b.

Fig. 33 c.

Einheit der Momente Pl . Unité des moments Pl . Unit of moments Pl .

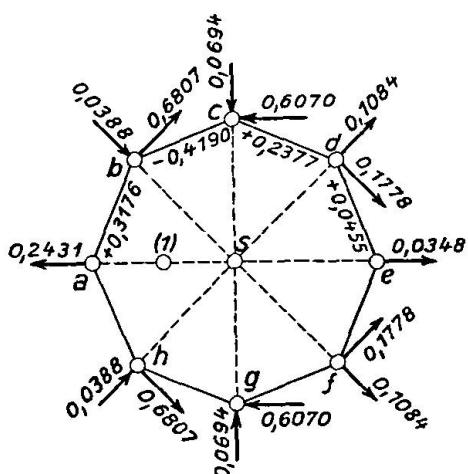


Fig. 34.

Gleichgewicht am Fußring. Einheit $\frac{Pl}{f}$

Equilibre de la ceinture basse. Unité $\frac{Pl}{f}$

Equilibrium at base ring. Unit $\frac{Pl}{f}$

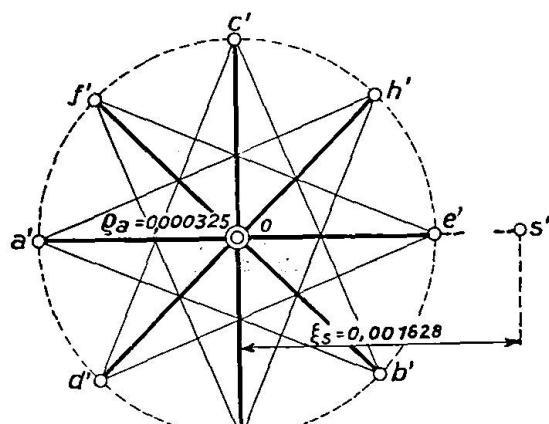


Fig. 36.

Verschiebungsplan. Einheit $\frac{Pfl}{EJ_s}$

Diagramme des translations. Unité $\frac{Pfl}{EJ_s}$

Diagram of displacements. Unit $\frac{Pfl}{EJ_s}$

Damit sind die an den drei Bogen angreifenden Kräfte bekannt. Die Scheitelverschiebungen folgen aus den Formeln (39) zu

$$E J_s \xi_s = \frac{1}{2} P \delta_{xP} = + 0,003255 P f l^2 \quad (0,003255)$$

$$E J_s \zeta_s = \frac{1}{2} P \delta_{zP} = - 0,007812 P l^2 \quad (- 0,007812),$$

sie sind unabhängig von den Längenänderungen des Zugrings.

Die Lagerverschiebungen aus (28) sind

$$E J_s \varrho_a = + 0,000542 P f l^2 \quad (0),$$

$$E J_s \varrho_b = + 0,000383 \quad " \quad (0),$$

sie sind mit starrem Fußring für diesen Belastungsfall = 0, vgl. D 3.

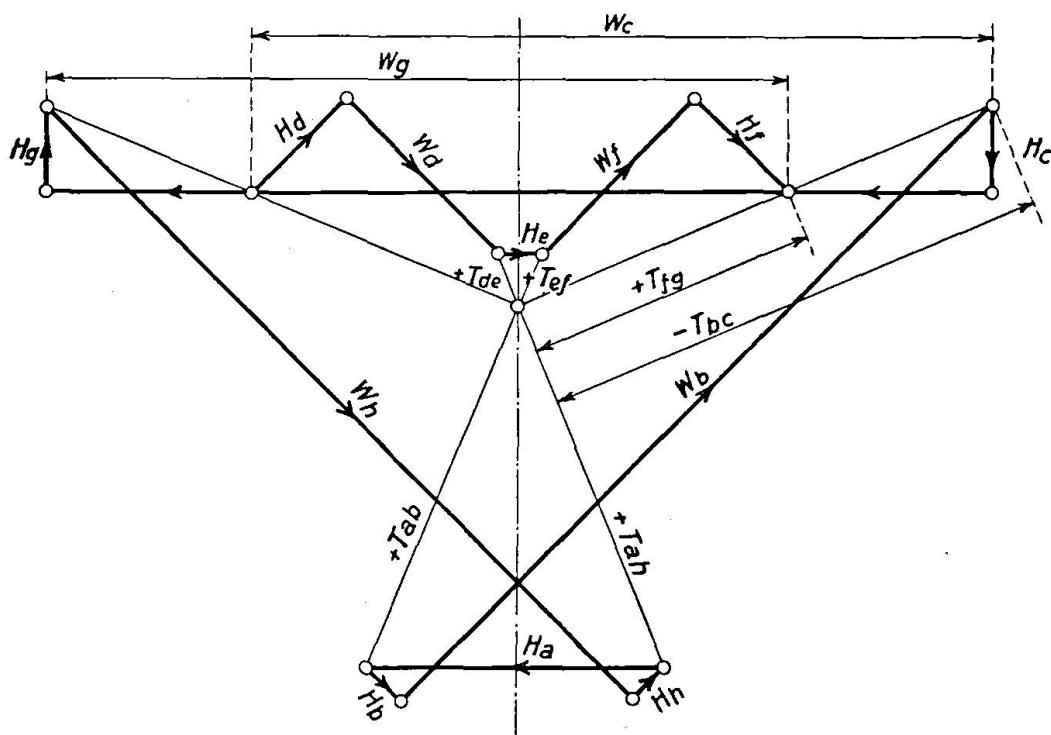


Fig. 35.
Kräfteplan. Polygone des forces. Diagram of forces.

6. Kuppel mit festen Fußpunkten.

Für den symmetrischen Teilbelastungszustand I braucht nur Y bestimmt zu werden, aus (41) folgt

$$Y = P \frac{\delta_{yP}^{(1)}}{8 \delta_{yy}^{(1)}} = \frac{-P \cdot 17 l^3 16 \cdot 128}{8 \cdot 24 \cdot 32 \cdot 64 \cdot l^3} = -\frac{17 P}{8 \cdot 24} = -0,08854 P.$$

Dann ergeben sich folgende Werte:

Bogen $a-e$	Bogen $b-f$	Bogen $c-g$
$Y_{ae} = -0,53125 P$	$Y_{bf} = -0,17708 P$	$Y_{cg} = -0,17708 P$
$H_a = +0,38208 P l : f$	$H_b = -0,03459 \text{,},$	$H_c = -0,03459 \text{,},$
$V_a = +1,26563 P$	$V_b = -0,08854 \text{,},$	$V_c = -0,08854 \text{,},$

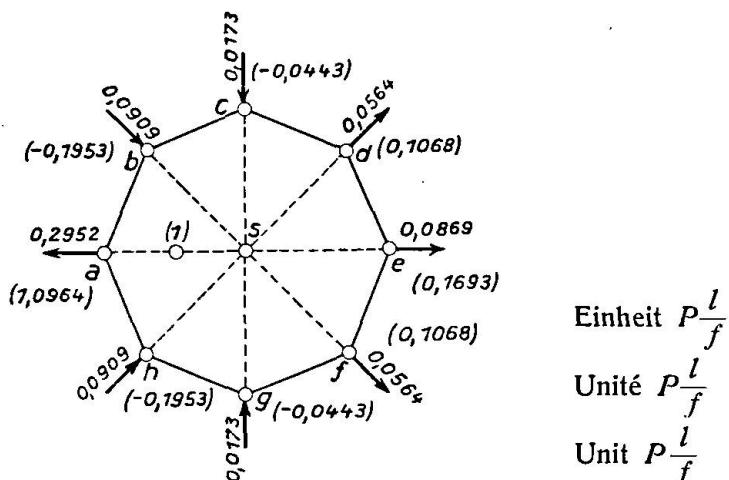
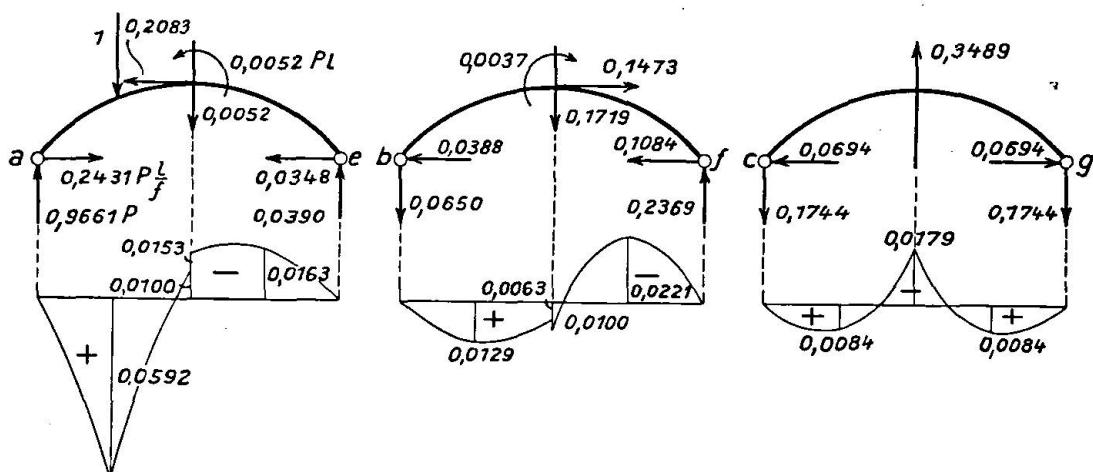
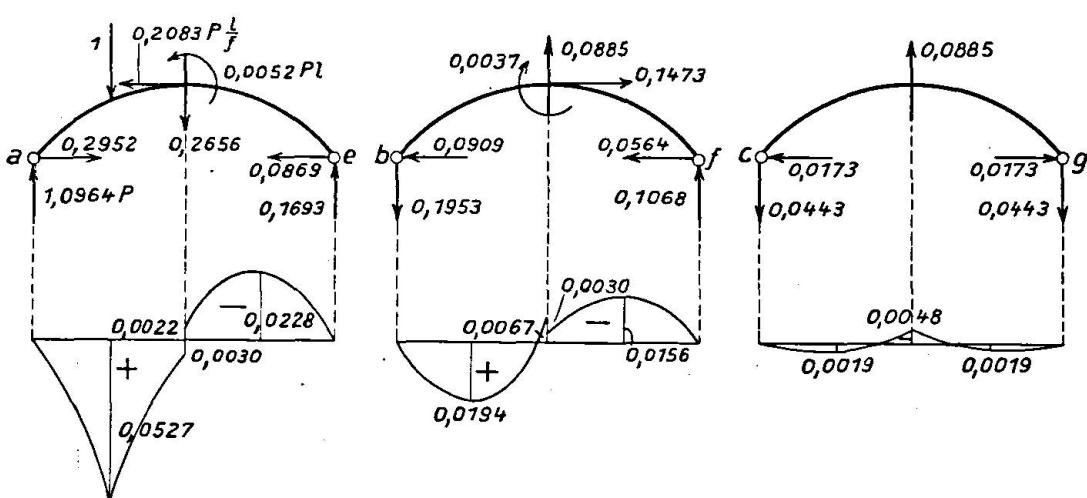


Fig. 38.



Hieraus die Biegunsmomente.

Scheitelsenkung $\eta_s = \frac{1}{4} P \delta_{yP}^{(1)} = -0,000086 P l^3$ wie unter E 4 für $z = 0$.

Der antimetrische Belastungsfall II stimmt mit dem unter E 5 für $z = 0$ berechneten vollkommen überein, da sich bei diesem die Stützpunkte ebenfalls nicht verschieben ($\varrho = 0$).

7. Der gegebene einseitige Belastungszustand

(mit P im Viertelpunkt des Bogens ae) wird erhalten, indem man bei allen drei untersuchten Systemen die Teilzustände I und II addiert und die Ergebnisse durch 2 dividiert.

Die endgültigen Ergebnisse dieses Belastungszustandes sind in den folgenden Figuren wiedergegeben.

a) für elastischen Fußring

Fig. 30: Am Fußring angreifende waagerechte Kräfte, Faktor $P \frac{l}{f}$.

„ 31: Kräfteplan hierzu.

„ 32: Verschiebungsplan der Stützpunkte, Faktor $P f l^2 : E J_s$. Es ist auch die waagerechte Scheitelverschiebung eingetragen, Punkt s' fällt mit $\xi_s = 0,001628 P f l^2 : E J_s$ weiter nach rechts.

„ 33 a, b, c: Belastung der einzelnen Bogen und Momentenflächen. Faktor der lotrechten Kräfte = P , der waagerechten $P l : f$, der Momente $P l$.

b) für starren Fußring gelten die Figuren 34 bis 37. Man erkennt aus den Größenverhältnissen des Kräfteplans, daß die waagerechten Kräfte — Horizontalschübe, Lagerwiderstände und Spannkräfte im Fußring —, die hier zur Entfaltung kommen, weit größer sind als bei elastischem Fußring. Alle Lagerverschiebungen sind jetzt gleich groß und abwechselnd nach außen und innen gerichtet (22 a), sie röhren nur vom symmetrischen Teilbelastungszustand I her, die Scheitelverschiebung ist dieselbe wie vor.

c) für feste Stützpunkte gelten die Figuren 38, 39.

Zusammenfassung.

Dem Zweigelenkbogen mit elastischem Zugband in der Ebene entspricht im Raum die Zweigelenkbogen-Rippenkuppel mit elastischem Fußring. Es wird die Berechnung einer achtseitigen Kuppel ($n = 4$) mit einer an beliebiger Stelle einer Rippe stehenden lotrechten Einzellast P zunächst allgemein für beliebige Bogenform durchgeführt. Hierbei erweist es sich als besonders zweckmäßig, eine symmetrische und eine antimetrische Teilbelastung einzuführen. Die Elastizitätsgleichungen ergeben sich durch Vergleich der drei Verschiebungsgrößen η ξ ζ des Scheitels für die drei Einzelbögen. Ein Zahlenbeispiel für Parabolbogen, das auch für starres Zugband ($z = 0$) durchgeführt ist, zeigt die starke Abhängigkeit der statischen Größen von der Dehnung des Zugbandes. Zum Vergleich werden auch die Ergebnisse für feste Lagerung der Bogenauflager angegeben. Die lotrechte Verschiebung des Scheitels ist von der Dehnung des Zugrings abhängig, für starren Zugring ist sie = $\frac{1}{4}$ der Durchbiegung des belasteten Einzelbogens. Die waagerechte Verschiebung des Scheitels und die Drehung der Scheiteltangente sind aber von der Längenänderung des Zugrings unabhängig und halb so groß wie die entsprechenden Werte des belasteten Einzelbogens. Die Ableitungen lassen sich leicht auf eine Kuppel mit anderer Seitenzahl übertragen.

Résumé.

A l'arc à deux articulations avec tirant élastique, dans le plan, correspond, dans l'espace, la coupole à nervures à arc à deux articulations, avec ceinture de base élastique. L'auteur effectue le calcul d'une coupole octogonale ($n = 4$) sous l'effet d'une charge unique verticale agissant à un endroit quelconque d'une nervure; le calcul, d'abord d'une signification générale, est valable pour une forme quelconque de l'arc. Il résulte de ce calcul qu'il est particulièrement utile d'introduire une charge partielle symétrique et une asymétrique. On obtient les équations de l'élasticité en comparant entre eux les 3 déplacements η , ξ , ζ du sommet pour les trois éléments de l'arc. Dans un exemple numérique, concernant un arc parabolique, et effectué aussi dans le cas d'un tirant rigide ($\alpha = 0$), l'auteur montre que la grandeur statique H dépend fortement de l'extension du tirant. A titre de comparaison il donne aussi les résultats obtenus dans le cas d'appuis fixes des arcs. Le déplacement vertical du sommet dépend de l'extension de la ceinture; pour une ceinture rigide, il est égal à $\frac{1}{4}$ de la flèche de l'élément d'arc chargé. Le déplacement horizontal du sommet et la rotation opérée par la tangente au sommet ne dépendent cependant pas de la variation de longueur de la ceinture; leurs valeurs atteignent la moitié des valeurs correspondantes de l'élément d'arc chargé. Les développements s'appliquent facilement à une coupole dont le nombre des côtés est différent.

Summary.

To the two-hinged arch with tie lying in a plane, corresponds in space a two-hinged, ribbed cupola with elastic base-ring. The calculation is given for an eight-sided cupola ($n = 4$) having a perpendicularly acting point load applied anywhere on one of the ribs. The shape of arch can have, to start with, any chosen form. The investigation is best carried through by introducing a symmetrical and an antimetrical part-loading. The elasticity equations are obtained by comparison of the three quantities of displacement η , ξ , ζ of the crown for the three single arches. A numerical example of a parabolic arch, carried out also for a rigid tie ($\alpha = 0$), shows clearly the strong dependence of the static quantities on the elongation of the tie. For the purpose of comparison the results for rigid supports of arch bearings are given. The vertical displacement of the crown is dependent on the elongation of the tension ring and amounts to $\frac{1}{4}$ of the displacement of a loaded single arch. The horizontal displacement of the crown and the turning of the tangent at the crown are independent of the longitudinal deformation of the tension ring, and amount to half of the corresponding values in case of the loading of a single arch. The deductions can easily be applied to cupolas of a different number of sides.