

DER STAHLBAU

Schriftleitung:
 Professor Dr.-Ing. K. Klöppel, Darmstadt, Technische Hochschule
 Fernsprecher: Darmstadt 7711, Apparat 599
 Professor W. Rein, Breslau, Technische Hochschule. — Fernsprecher: Breslau 421 61
 Veröffentlichungsbeiträge an voranstehende Anschriften erbeten

Beilage
 zur Zeitschrift

DIE BAUTECHNIK

Fachschrift für das gesamte Bauingenieurwesen

Preis des Jahrganges 10 RM und Postgeld

12. Jahrgang

BERLIN, 1. Dezember 1939

Heft 25/26

Alle Rechte vorbehalten.

Geschweißte Stahlrahmenkonstruktion für ein Kesselhaus.

Von Obering. Rudolf Ulbricht, Düsseldorf-Benrath.

Allgemeines.

Eingeengt von vorhandenen Bauwerken mußte auf sehr beschränktem Raum ein Gebäude für zwei neue Kesselanlagen errichtet werden. Die Unterbringung der zugehörigen Räume für Pumpenanlagen, Maschinen, Reparaturwerkstätten usw. erforderte sorgfältigste Planung und sparsamste Raumverwendung. Der Bauherr legte raumsparende Querschnitte und Vermeidung von raumsperrenden Verbänden usw. Die letzteren sollten auch vermieden werden, um eine ungehinderte Anordnung und Durchführung von zahlreichen Rohrleitungen im Gebäude zu ermöglichen. Dabei sollte aber möglichst an Werkstoff gespart werden. Diese Voraussetzungen führten zu der Wahl der nachstehend beschriebenen Haupttragkonstruktion aus Rahmen in geschweißter Ausführung. Gegen diese lehnen sich alle anderen Bauteile. Die vielen Verschiedenheiten der Nebenkonstruktionen für die oben angeführten Räume erforderten wohl eine Menge an konstruktiver und werkmäßiger Arbeit, sind aber sonst ohne besondere Bedeutung. Demgegenüber bieten die Haupttragwerke des Gebäudes, die Bild 1 in perspektivischer Darstellung zeigt, die Rahmen der Reihen 2, 6 und 10 sowie die Längsrahmen der Reihen D, E und G, eine Reihe von Besonderheiten in statischer und konstruktiver Hinsicht. Die Werkstattausführung ergab mancherlei neue Erkenntnisse, und die verschiedenen Glieder der geschweißten Konstruktion brachten praktisch verwertbare Vergleichsmöglichkeiten für andere Fälle. Die ungewöhnlichen Verhältnisse der Rahmen — kleine Breite, große Höhe — ergaben Formänderungen, deren Größe und Beziehung zu ähnlichen Fällen nicht ohne Interesse sind.

Abmessungen und Gewichte.

Nach Bild 2 — Übersicht der Anlage — ergibt sich bei einer Breite von 35,172 m und einer Länge von 32,625 m eine bebaute Grundfläche von rund

1150 m². Der gesamte umbaute Raum umfaßt rd. 29 500 m³. Davon entfallen auf

Abschnitt A (Nebenbauten) rd. 12 500 m³,
 Abschnitt B (Bau D, E, G) rd. 17 000 m³.

Bei einem Gesamtgewicht von 700 t Stahlkonstruktion (St 37) (ohne Bunker) ergibt sich je m² Grundfläche die an sich nicht besonders brauchbare Zahl von 608 kg/m². Zweckmäßiger für Vergleiche sind die Zahlen, bezogen auf 1 m³ umbauten Raum.

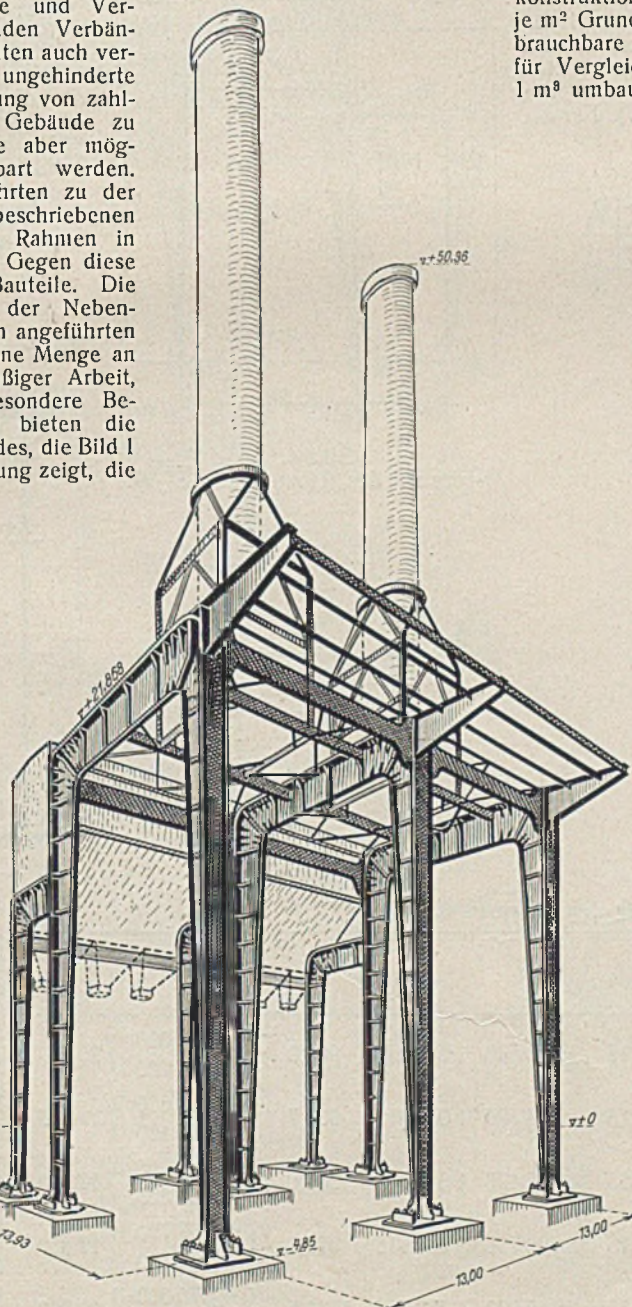


Bild 1. Haupttragwerk.

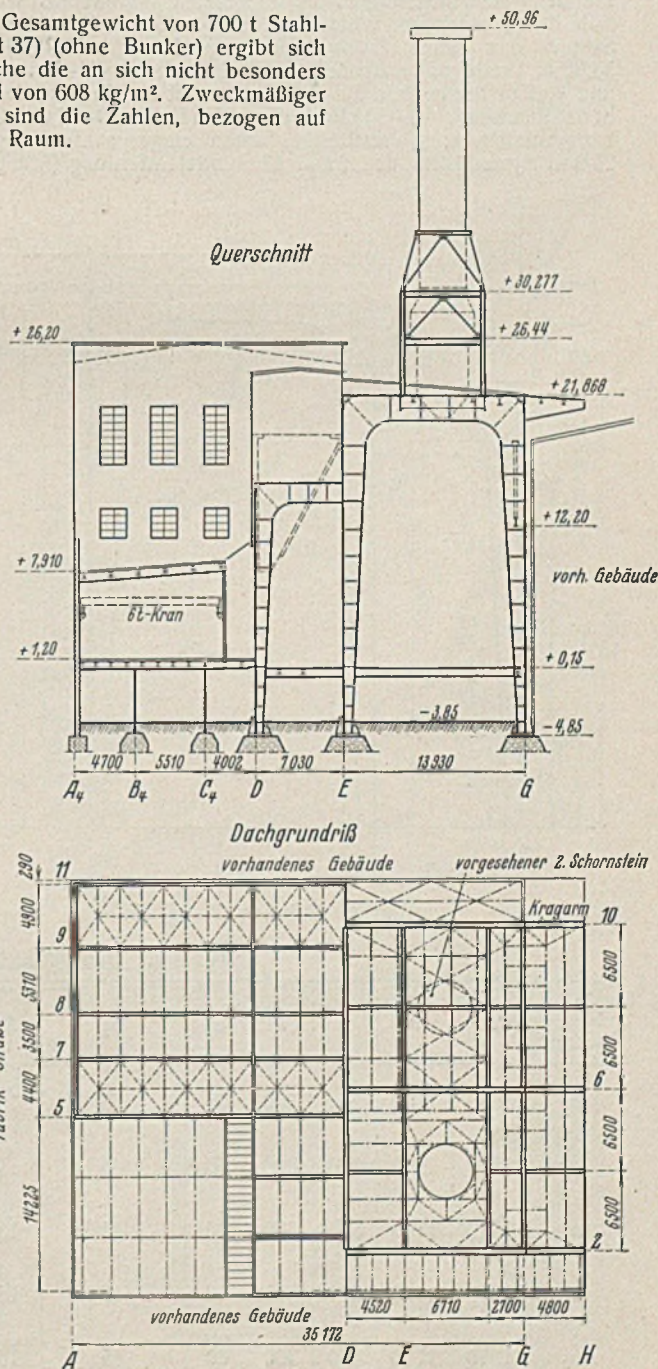


Bild 2. Übersicht.

Die vorstehend ermittelte waagerechte Verschiebung erscheint gering. Sie ist es auch nur deshalb, weil sich eine verhältnismäßig große Versteifung durch den Halbrahmen ergibt. Betrachtet man vergleichsweise den Einfluß der Kraft $W=1\text{ t}$ nur für den Zweigelenrahmen nach Bild 12, so zeigt sich folgendes:

Die seitliche Verschiebung des Kopfes ergibt sich aus

$$(5) \quad f = \frac{a M_1^2}{3 J_2 E} (1 + 2k)$$

$$K = \frac{h J_2}{a J_1}$$

$$J_1 = \text{rd. } 4\,000\,000 \text{ cm}^4$$

$$J_2 = \text{rd. } 4\,000\,000 \text{ cm}^4$$

$$K = \frac{25,74 \cdot 4000}{12,6 \cdot 4000} = 2,04$$

$$V = 1 \cdot \frac{25,74}{13,93} = \text{rd. } 1,85 \text{ t.}$$

Eckmoment:

$$M_1 = \frac{1}{2} \cdot 25,74 - 1,85 \cdot 0,655 = 12,87 - 1,21 = 11,66 \text{ tm}$$

$$f' = \frac{12,6 \cdot 11,66^2}{3 \cdot 4\,000\,000 \cdot 2100} (1 + 2 \cdot 2,04) \cdot 100^3 = \frac{1720}{12 \cdot 2100} \cdot 5,08$$

$$= \frac{8750}{25\,200} = 0,347 \text{ cm.}$$

Ohne den seitlichen Halbrahmen würde sich der Hauptrahmen um $\frac{0,137 \cdot 100}{0,21} = 65\%$ mehr durchbiegen.

Bei der vorstehenden Ermittlung ist für das System die Mittellinie der Querschnitte als Systemlinie wie üblich eingeführt, wodurch sich die Schräge der Pfosten im Bilde 12 ergibt. Es ist nicht ohne Reiz, noch festzustellen, welche Fehlergröße auftritt, wenn man, wie es für Übersläge schon getan wird, diese Neigung vernachlässigt. Setzt man in Gl. (5) den Wert $a=1$ ein, so ergibt sich eine waagerechte Verschiebung f , die um 24% größer ist, ein Wert, der nicht unbeachtet bleiben sollte.

Konstruktive Gestaltung, Gewichtsverteilung, Schweißvolumen.

Mit Rücksicht auf das Schweißen der Rahmen wurde besondere Sorgfalt auf die Wahl der Profile gelegt und beachtet, daß die Überleitung der großen Kräfte stets allmählich erfolgte. Die z. B. an den Füßen vorgesehenen Aussteifungen dienen zur Aufnahme der Abtriebskräfte und zur Verhinderung der Querverbiegung der breiten Gurte. Die Anordnung der Baustellenstöße ergab die Versand- und Transportmöglich-

keit, die der Werkstattstöße ergab sich aus arbeitstechnischen Gründen. Die ersteren wurden am Bau genietet, die anderen im Werk geschweißt. Die konstruktive Gestaltung ist aus Bild 13 ersichtlich. Links ist der Halbrahmen D_6-E_6 und rechts der Hauptrahmen E_6-G_6 dargestellt mit dem oberen Längsriegel $E_{10}-E_6-E_2$. Die in Klammern () eingetragenen Profile gelten für die Außenrahmen in den Reihen 2 und 10. Die durch Nietlöcher entstandene Querschnittsverminderung wurde durch aufgeschweißte Verstärklaschen ausgeglichen. In den Eckpunkten der Rahmen sind Universalstöße vorgesehen, um ein leichtes Einsetzen der Hauptriegel zu erreichen.

Nach früherem Brauch wurden an den geschweißten Stößen zur Erhöhung des Widerstandsmoments zusätzlich Laschen angeordnet. Die Lamellenkanten sind durch reichlich angeordnete, geschweißte Aussteifungen gegen Knicken gehalten (s. Bild 17). Um die Fertigmaße genau einzuhalten, waren Diagonalmäße — auf meßbare Punkte bezogen — ermittelt und der Werkstatt in den Zeichnungen angegeben.

Die Rahmen wurden im Werk auf Maß zusammengelegt und dann die Stöße durchgebohrt.

Um eine Kontrolle der Schweißnähte zu ermöglichen, wurden diese nicht mit Farbe gestrichen, sondern nur mit einem leichten Leinölüberzug versehen.

Weitere Einzelheiten sind aus Bild 13 ersichtlich.

Die Endanschlüsse der Träger (Tafel III) waren, wie üblich, mit aufgeschweißten Flachstählen versehen. Um einem Verziehen beim Schweißen vorzubeugen, mußten sie für das Schweißen in entgegengesetzter Richtung vorgebogen werden. Für diese Anschlüsse eignen sich besser halbe

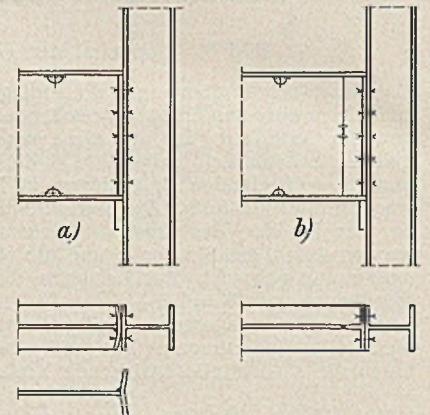


Bild 14. Trägeranschlüsse.

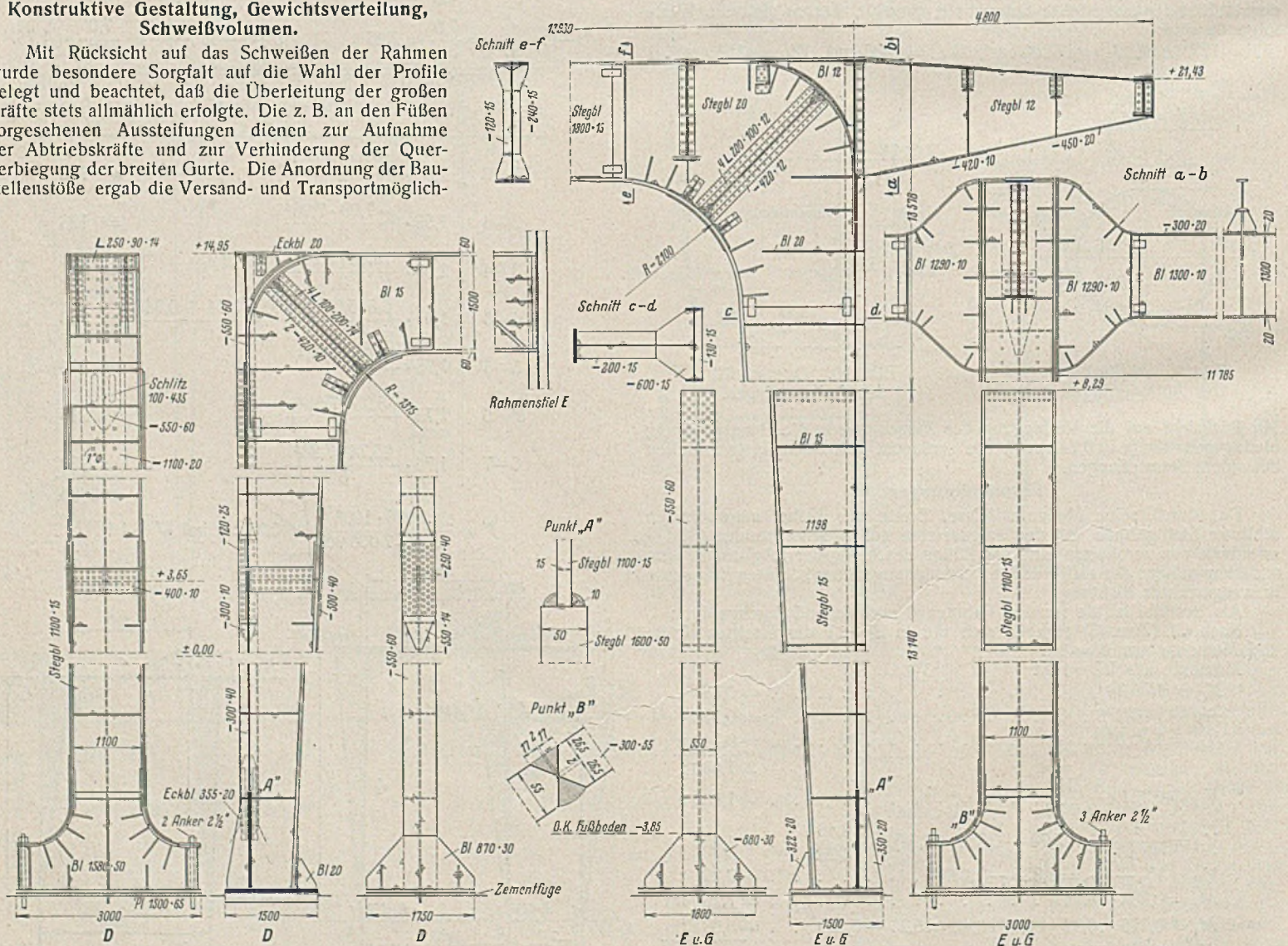


Bild 13. Einzelheiten zur konstruktiven Gestaltung der Rahmen.

I-Profile¹⁾. Sie sind nicht nur zweckmäßiger, sondern auch billiger und nach Vorschlag des Verfassers schon wiederholt ausgeführt (Bild 14).

Im einzelnen verteilen sich die Gewichte der verschiedenen Konstruktionen, wie in Tafel II angegeben. In dieser sind auch die für die Einzelteile, wie Dächer, Wände, Stützen usw., erforderlichen Stückzahlen der Werkstattniete, Baustellenniete und Schrauben für eine Tonne Konstruktion angegeben, da diese bis zu einem gewissen Grade einen Vergleich der Kosten für Werkstatt- und Baustellenarbeiten ermöglichen.

Durch Anwendung der Schweißung ließen sich etwa 12% des Gewichts dieser Konstruktionen sparen.

¹⁾ Bautechn. 1931, Heft 18, S. 263/264; Heft 33, S. 497 bis 498; Elektroschweißung 1932, Heft 1, S. 12/13.

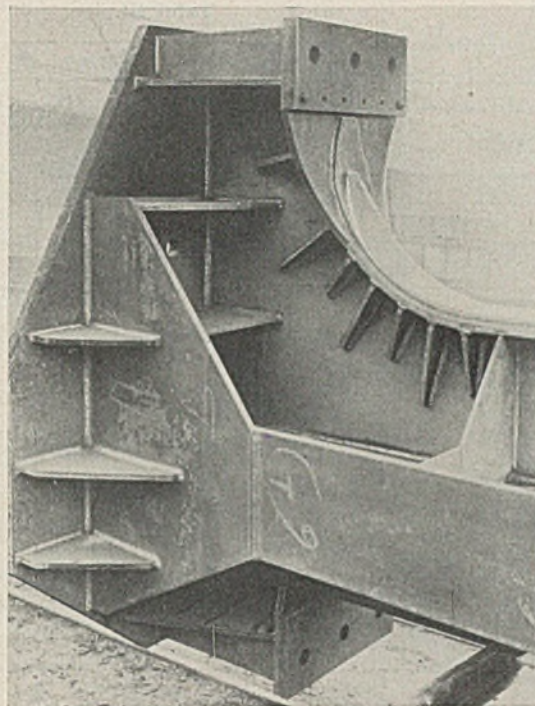


Bild 15. Fuß des Rahmenstieles G_2 .

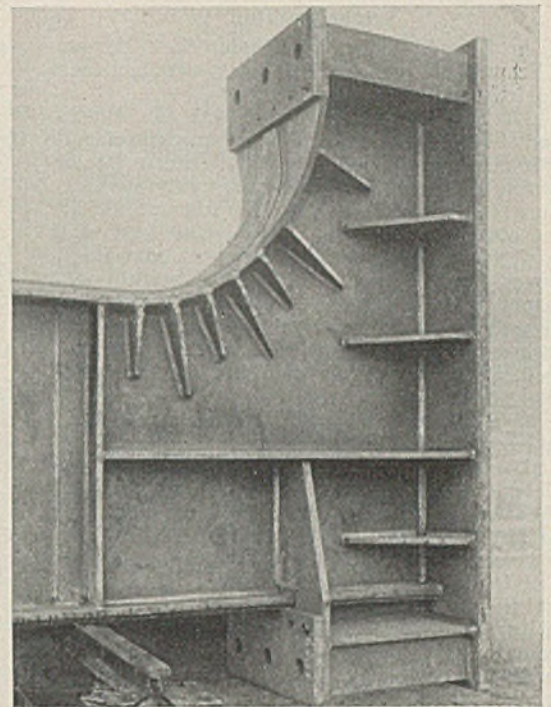


Bild 16. Rahmenfuß.

Tafel II.

Es waren erforderlich:	Gewicht t	Werkstatt- Niete je t	Baustellen- Niete je t	Schrauben je t
Abschnitt A: Nebenbauten.				
Dächer mit Pfetten und Verbänden	24	43	—	145
Wände	18	91	—	80
Bühnen, Kranbahn, Rahmen	149	21,5	—	38
Stützen mit Anker	51	81,7	10,7	16,7
Treppen und Geländer	6	58,3	—	75
	248	i. M. 42,4	2,0	48,2

Insgesamt 92,6 Stück/t.

Abschnitt B: Hauptbau.				
Dach mit Pfetten und Verbänden	75	23,4	15,3	40,0
Wände	4	—	—	38,0
Hauptrahmen 2 und 10	102	0,5	22,0	2,2
Hauptrahmen 6	73	1,8	10,9	7,0
Anbaurahmen 2 und 10	44	6,6	27,3	10,2
Anbaurahmen 6	33	3,6	12,1	11,5
Längsrahmen <i>D</i>	17	6,5	14,7	—
Längsrahmen <i>E</i> und <i>G</i>	28	5,0	13,5	16,0
Verankerung	6	—	—	45,0
Bühnen und Laufstege	40	11,2	—	68,0
	422			
Schornsteinaufbau	30	16,6	54,0	3,0
	452	i. M. 7,9	17,7	18,3

Insgesamt 43,9 Stück/t.

Insgesamt ergaben sich im Durchschnitt für das ganze Gebäude für eine Tonne Konstruktion:

a) Werkstattniete 20,0 Stück, b) Baustellenniete 12,1 Stück, c) Schrauben 27,9 Stück, zusammen 60,0 Stück = 42 000 Stück.

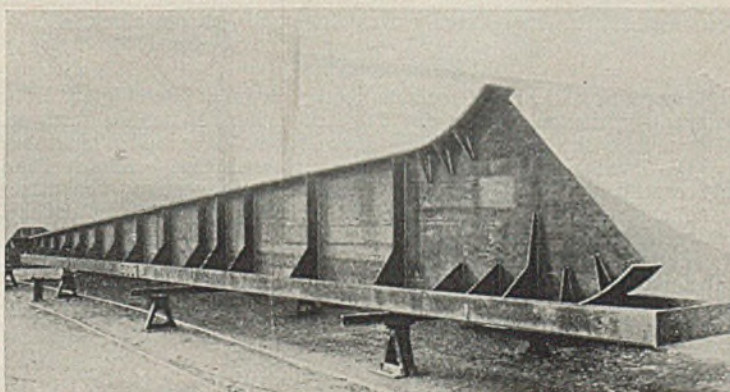


Bild 17. Rahmenstiel G_2 .

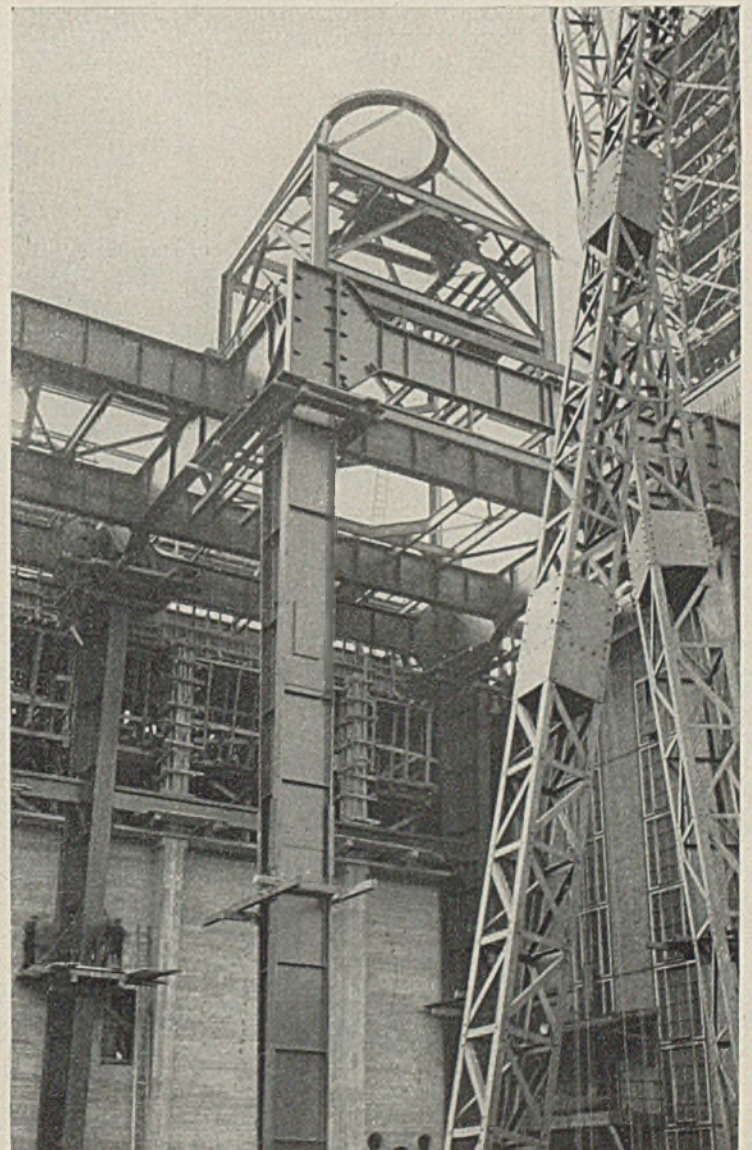


Bild 19. Aufstellung der Stahlkonstruktion.

Schweißnähte.

In Tafel III sind die erforderlichen Mengen an Schweißgut für eine Reihe von verschiedenen Konstruktionsteilen aufgeführt:

Nach vorstehendem ergibt sich, im Durchschnitt gerechnet, ein theoretischer Schweißgutverbrauch von 10,6 kg/t = 1,06%. Hierzu ist zur Ermittlung des tatsächlichen Verbrauchs an Elektroden noch hinzuzuschlagen für Abbrand, Abfall usw. etwa 3 bis 4 kg/t = 0,30 bis 0,40%, so daß im allgemeinen mit einem Verbrauch von 1,5% Schweißgut je Tonne Konstruktionsgewicht gerechnet werden kann. Insgesamt wurden geschweißt etwa 8500 lfdm Naht oder für eine Tonne geschweißte Konstruktion 24,65 m Naht. In der Spalte 3 sind die größten Dicken der Schweißnähte genannt.

Die Bilder 15, 16 u. 17 zeigen Einzelheiten der Konstruktionen.

Die Schweißung der einzelnen Konstruktionsteile erfolgte soweit wie möglich in Drehgestellen. Dabei wurden für waagerechte Nähte Manteldrähte und für schwerer zugängliche blanke Seelendrähte verwendet.

Für die schwereren Rahmenteile (Nr. 1 bis 4, Tafel III) wurde eine Schrumpfung von 0,6 mm auf 1 m berücksichtigt, während sich für die leichteren (Nr. 5 bis 15, Tafel III) 0,4 mm für 1 m als ausreichend ergab. Die Teile wurden, entsprechend der zu erwartenden Schrumpfung länger ausgeführt und nach dem Schweißen auf genaues Maß bearbeitet.

Baustelleneinrichtung und Aufstellung.

Die an drei Seiten von Gebäuden umgebene Baustelle (Bild 18), ein beschränkter Lagerplatz, die große Höhe der Konstruktion, eine vorhandene tiefe Baugrube usw. erforderten sorgfältige Planung des Montagevorganges sowie Auswahl der Geräte und Mannschaften; zu beachten war auch, daß das Gleis 1 für die Durchfahrt frei bleiben mußte.

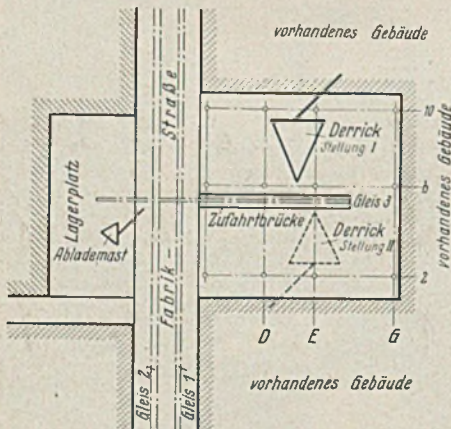


Bild 18. Lageplan.

Vom Gleis 2 wurden die ankommenden Stücke mit einem Schwenkmast entladen, später nach Bedarf auf Zufahrtgleis 3 und auf der Brücke vor den Mast gebracht. Aufgestellt wurde mit einem Derrick von 26 m Bockhöhe mit einem Ausleger von 32 m Länge (Bild 19). Die Basis des Gerätes war 12 m Länge und 8 m Breite, gehoben wurden Stücke bis zu 20 t Gewicht. Der Derrick selbst hatte ein Eigengewicht von rd. 40 t. Er arbeitete erst in Stellung I bis zur Mitte der Baustelle, wurde dann gedreht und in Stellung II gebracht. Auf der Baustelle wurde nichts Wesentliches geschweißt.

Unter Berücksichtigung der obenerwähnten erschwerenden Umstände und der ungünstigen Jahreszeit (November 1935 bis März 1936) kann die Montagezeit von 18 Wochen nicht als ungünstig bezeichnet werden. Bild 19 zeigt das Bauwerk im Ausschnitt während der Aufstellung.

Besonderes.

Die Besonderheit der gestellten Aufgabe zeigt sich vor allem auch in den besonderen Aufwendungen. Außer einer statischen Untersuchung von rd. 300 Seiten waren rd. 70 Blatt Werkzeichnungen i. M. 1:10 und 1:15

Tafel III.

Schweißnähtlängen, Volumen u. Gewichte											
Nr.	Gegenstand	Gewicht t	lfdm Schweißnaht	lfdm Schweißnaht	theoret. Volumen cm ³	mit 26-30% Zuschlag cm ³	Gewicht kg	cm ³ /t	lfdm/t	Gewicht/l kg	v. Hundert
1	1 Rahmen E ₆ -G ₆	72,900	15 55	1350	68 600	89 000	698,0	1221	18,6	9,6	0,96
2	2 " E ₂ -G ₂ E ₁₀ -G ₁₀	101,700	15 30	2703	108 040	140 400	1102,0	1381	26,7	11,0	1,10
3	1 Halbrahmen D ₆ -F ₆	32,650	15 40	628	37 940	49 300	387,0	1510	19,2	11,85	1,19
4	2 " D ₂ -E ₂ D ₁₀ -E ₁₀	43,830	18 25	1304	63 170	82 000	644,0	1870	29,7	14,7	1,47
5	4 Längsriegel Bl 10 300-20 11765	17,000	10 10	516	22 290	28 500	224,0	1676	30,4	13,2	1,32
6	4 Schornsteinträger Bl 12 450-15 13000	17,100	8 15	437	11 720	15 240	120,0	891	25,5	7,0	0,70
7	1 Längsträger Bl 1600-16 220-35 300-35 260-35 13000	8,300	12	210	9346	12 150	95,4	1469	25,4	11,5	1,15
8	1 Längsträger Bl 1600-12 300-24 260-12 13000	4,700	12	135	5910	7680	60,3	1634	28,8	12,8	1,28
9	1 Unterzug Bl 1300-12 300-30 260-13 11630	4,000	6	109	2771	3500	27,5	875	27,3	6,9	0,69
10	1 Unterzug Bl 1399-15 300-35 14200	6,200	10	160	5272	6700	52,5	1080	25,9	8,5	0,85
11	1 Unterzug Bl 1353-15 330-22 380-30 14050	6,900	7	183	5190	6540	51,4	950	26,6	7,5	0,75
12	1 Unterzug Bl 1330-15 320-35 14050	5,700	7	146	4190	5280	41,5	930	25,7	7,3	0,73
13	1 Unterzug Bl 1350-15 320-25 9650	3,500	10	117	3710	4700	36,9	1340	33,5	10,55	1,05
14	1 Pumpenhausrahmen Bl 850-15 400-25 2783 11424	4,400	8 10	84	2436	3100	24,4	705	19,1	5,5	0,55
15	3 Pumpenhausrahmen Bl 820-10 200-10 200-10 11424	6,000	10	196	3465	4360	34,7	726	32,7	5,8	0,58
16	45 m Kranbahn Schiene 50-30 I P22	3,950	4	90	1440	1810	14,2	458	22,7	3,6	0,36
17	Schornsteinring mit Streben 3640 510 6710 8000-510	5,200	6	128	2710	3400	26,7	654	24,6	5,13	0,51
Gesamt		344,030		8496	358200	463660	3640,5				
Im Durchschnitt								1348	24,65	10,6	1,06

anzufertigen. Die Verwendung von ungewöhnlich breiten und dicken Lamellen brachte zusätzliche Kosten für das Richten und erforderte besondere Einrichtungen zum einwandfreien Biegen derselben.

Zusammenfassung.

Durch verständnisvolle Zusammenarbeit aller Beteiligten ist ein Bauwerk geschaffen worden, das als geschweißter Rahmenbau durch seine Form und konstruktive Gestaltung über das gewöhnliche Maß hinausweist. Die Zweckmäßigkeit der Ausführung ist durch eine bereits dreijährige Ingebrauchnahme der Anlage bewiesen. Die Verwendung von dickeren Lamellen aus St 37 hat hier keine Nachteile gebracht; es ist keine Schweißnaht gerissen.

Entwurf, Ausführung und Aufstellung erfolgte durch die Firma Hein, Lehmann & Co. Aktiengesellschaft, Düsseldorf-Oberbilk.

Zuschrift an die Schriftleitung

(Ohne Verantwortung der Schriftleitung)

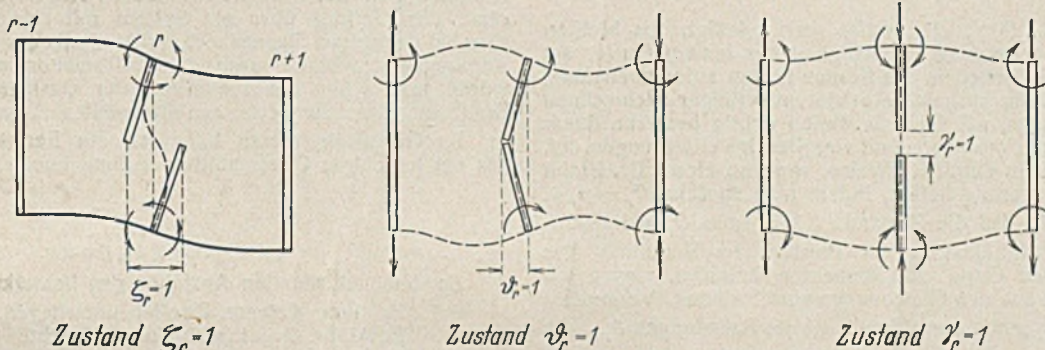
zum Aufsatz „Ein Annäherungsverfahren zur Berechnung des Vierendeelträgers, gültig für beliebige Querschnittsverhältnisse und Belastung der Gurte auch außerhalb der Knotenpunkte“ von Dr.-Ing. O. Braun, Augsburg. Stahlbau 1939, Heft 9, S. 69; Heft 11, S. 86.

In der obengenannten Abhandlung gibt Herr Dr.-Ing. Braun ein Annäherungsverfahren zur Berechnung des Vierendeelträgers an. Die von ihm gemachte Annahme eines Hauptsystems mit starren Pfosten ist zweifellos recht zweckmäßig, weil dann die Verformung der einzelnen Felder voneinander unabhängig wird und das Hauptsystem nur wenig vom wirklichen System abweicht.

Auf den Übergang zum wirklichen System unter Berücksichtigung der Elastizität der Pfosten kommt man aber einfacher, wenn man im Hauptsystem nicht einfach starre Pfosten annimmt, sondern sich die elastischen Pfosten durch mit ihnen nur an der Einspannungsstelle verbundenen starren Pfosten überdeckt denkt. Es ergeben sich dann für die weitere Anwendung des Formänderungsgrößenverfahrens (diese Bezeichnung wurde von Hertwig an Stelle von Deformationsmethode eingeführt) für jeden Pfosten einfach die hier skizzierten drei Zustände, wobei die Verbiegung bzw. Verlängerung des elastischen Pfostens (punktliert gezeichnet) Beiträge zur Belastung der Knoten liefert. Die weitere Lösung erfolgt nach den Regeln des Formänderungsgrößenverfahrens, wobei im allgemeinen nur die Zustände $\xi=1$ berücksichtigt zu werden brauchen. Es ist dabei nicht erforderlich, zu Annäherungsverfahren zu greifen; als Arbeitsgleichungen ergeben sich leicht lösbare Gleichungen der Clapeyron'schen Form.

bleibendes Trägheitsmoment, so wird man sich mit der wohl genügend genauen Näherungsrechnung unter Annahme des wechselnden Pfosten-trägheitsmoments begnügen müssen* und spricht dann weiter von der etwaigen Möglichkeit einer Berichtigung durch „Abbau“, was aber nochmalige Aufstellung und Auflöser neuer Gleichungen erfordert.

Es läßt sich leicht beweisen, daß die mit diesem Satz ausgesprochene Vermutung nicht zu Recht besteht. Bei stark verschiedenen Gurten liefert diese Näherungsrechnung keine ausreichend genauen Werte mehr. Nimmt man nämlich an, die Bedingungen bezüglich des veränderlichen Trägheitsmoments der Pfosten seien erfüllt, so ergibt sich von selbst, daß die Verschiebungen ϑ zu Null werden (allerdings nur unter der Voraussetzung, daß die Lasten ausschließlich an den Knotenpunkten angreifen). Es sind dann nur die Zustände $\xi=1$ zu berücksichtigen, wie es auch in der Zuschrift erwähnt ist. Infolge $\xi=1$ treten beim Parallelträger in den Gurten keine Querkräfte auf. Die Querkräfte werden also bei Berücksichtigung der Verschiebungen ξ nicht berichtigt; d. h. der Rechnungsgang liefert dieselbe Verteilung der Querkräfte auf Ober- und Untergurt, wie sie der Träger mit starren Vertikalen aufweist, während sich in Wirklichkeit bei Pfosten mit gleichbleibendem Trägheitsmoment der stärkere Gurt auf Kosten des schwächeren beträchtlich entlastet, wie ich auch am Schluß meines Aufsatzes betont habe. So betrug bei dem von mir in Heft 11 angegebenen Zahlenbeispiel im Feld 4, wo der Träger nahezu als Parallelträger wirkt, für Last an Punkt 2, wie aus Tabelle 1, S. 88, zu entnehmen, $Y = +0,368$, aber $Y + Y' = +0,602$ (Tabelle 6, S. 91). Die Änderung der Querkraft des Obergurts beträgt also hier



Dieses Verfahren habe ich in der Schrift „Der Einfluß der Gurtsteifigkeit in ebenen Tragwerken“ 1933, Verlag von Robert Noske in Leipzig, durchgeführt und dabei auch beliebige Querschnittsverhältnisse und Belastungen der Gurte außerhalb der Knotenpunkte berücksichtigt. Dabei wurden zunächst die Einflußlinien des Hauptsystems als Biegelinien entwickelt und später nach den Ergebnissen der Arbeitsgleichungen für ξ, ϑ, ψ berichtigt. Das Formänderungsgrößenverfahren kommt dabei klarer zum Ausdruck.
Dr.-Ing. Krabbe.

Erwiderung.

Der von Herrn Oberreichsbahnrat Dr.-Ing. Krabbe angegebene Rechnungsgang benutzt den exakten Weg nach dem Formänderungsgrößenverfahren (Deformationsmethode), wobei zur Ableitung der Gleichungen sehr geschickt zwei nebeneinanderliegende Pfosten, ein zugefügter starrer und daneben der vorhandene elastische benutzt wurden. In dem allgemeinen Fall, für den der von mir veröffentlichte Aufsatz geschrieben wurde, also bei beliebigen Querschnittsverhältnissen der Stäbe, führt dieses genaue Verfahren zu sehr umständlichen vielgliedrigen Elastizitätsgleichungen. Die in der Zuschrift erwähnten dreigliedrigen Gleichungen, die ich übrigens, wie weiter unten bemerkt, auch erhalten würde, treten nur unter ganz bestimmten, bei verschiedenen steifen Gurten im allgemeinen nicht erfüllten Voraussetzungen auf. Diese Voraussetzungen sind: Gleiches Steifigkeitsverhältnis des Obergurts zum Untergurt in allen Feldern des Trägers und Abnahme des Trägheitsmoments jedes Pfostens nach dem schwächeren Gurt hin. Diese Abnahme muß nach der in der Zuschrift erwähnten Schrift so erfolgen, daß die im Ver-

hältnis $\frac{J_o}{J_u}$ geteilten Pfosten im oberen und unteren Teil verschiedene Trägheitsmomente besitzen, die sich verhalten wie $\frac{J_o^2}{J_u^2}$. Mit anderen

Worten: Ist der Untergurt doppelt so stark wie der Obergurt, so muß das Trägheitsmoment der Pfosten im oberen Drittel $\frac{1}{4}$ von dem in den unteren zwei Dritteln sein. (Bei nicht parallelen Gurten ändert sich die Bedingung wegen der verschiedenen Gurtablängen ein wenig.) Während die erste Bedingung des gleichbleibenden Steifigkeitsverhältnisses der Gurte einigermaßen leicht zu erfüllen sein wird, ist die für die Pfosten geltende Bedingung bei stark verschiedenen steifen Gurten schwer zu erfüllen, besonders, wenn es sich um einen Parabelträger mit seinen nach den Enden sehr kurz werdenden Vertikalen handelt. Auf jeden Fall gelten die Gleichungen nicht allgemein. Für den Fall aber, daß die Bedingungen nicht erfüllt sind, schreibt Herr Oberreichsbahnrat Dr.-Ing. Krabbe in seiner Schrift (S. 41) wörtlich: „Haben die Pfosten gleich-

rd. 63% oder bezogen auf den richtigen Wert würde die Querkraft um 39% zu klein ermittelt. Ähnlich ist die Abweichung bei den Momenten.

In diesem Zusammenhang möchte ich noch auf etwas anderes hinweisen. Angenommen, es läge ausnahmsweise ein Träger zur Berechnung vor, bei dem sich dreigliedrige Gleichungen für ξ ergeben würden, der also die oben angegebenen Voraussetzungen alle erfüllen würde. Dann wären bei Lastangriff in den Knotenpunkten sämtliche $\vartheta=0$ oder was dasselbe ist, nach der von mir gewählten Bezeichnungswiese sämtliche $\delta_m=0$. Verfolgt man nun in meinem Aufsatz in Heft 9, S. 72, die Ableitung der Gleichungen (12) und sieht man vom Einfluß der Normalkräfte ab, so zeigt sich, daß nicht nur die Verbesserungen Y' , sondern auch noch die Z' verschwinden und die erste der Gleichungen (12) lautet:

$$\delta_{xx} X' = [(Q + Q') \delta'_{qq}]_l + [-(Q + Q') \delta'_{qq}]_r.$$

Da Q' nur von den X' abhängt, so sind das dreigliedrige Gleichungen für X' . Man könnte also unmittelbar die Verbesserungen X' aus dreigliedrigen Gleichungen berechnen, ohne wie bei dem Verfahren von Herrn Oberreichsbahnrat Dr.-Ing. Krabbe die Verschiebungen ξ als neue Unbekannte in die Berechnung einführen zu müssen. Auf die Möglichkeit der Entstehung dreigliedriger Gleichungen bei bestimmten Verhältnissen habe ich auf S. 73 zwar hingewiesen, aber davon weiter keinen Gebrauch gemacht, weil ich Wert darauf legte, ein Verfahren anzugeben, das es bei allen Verhältnissen gestattet, sich dem endgültigen Spannungszustand beliebig zu nähern. Sind die Verhältnisse günstig, so wird der betreffende Statiker schon beim ersten Lastfall merken, daß das Verfahren rasch konvergiert bzw. für Y' und Z' keine Verbesserungen liefert und wird für die weiteren Untersuchungen die entsprechenden Konsequenzen ziehen. Allerdings ist es bei Verzicht auf diese dreigliedrigen Gleichungen nicht mehr möglich, die Einflußlinien aus Biegelinien zusammensetzen. Das ist aber bei einem so hochgradig statisch unbestimmten System ohne Belang.

Dieser Gedankenaustausch hat nochmals bestätigt, daß bei Vierendeelträgern mit Gurten von stark verschiedener Steifigkeit die Ausbildung der Pfosten von sehr fühlbarem Einfluß auf die Querkraft- und Momentenverteilung ist, eine Tatsache, die ich ursprünglich auch nicht erwartet hatte und die erst die Zahlenrechnung ergab. Will man den schwächeren Gurt entlasten, so hat man nur zwei Möglichkeiten, und zwar entweder die Vertikalen sehr steif zu machen, was aber wegen des unschönen Aussehens oft nicht möglich ist, oder sie nach dem schwächeren Gurt zu weniger steif auszubilden, was aber auch nur bis zu einem gewissen Grad und vor allem bei den längeren Pfosten möglich sein wird.

Dr.-Ing. Braun.

Entgegnung.

Meine Zuschrift sollte dreierlei zeigen:

1. daß es zweckmäßig ist, den vorhandenen elastischen Pfosten durch einen starren Pfosten zu überdecken. Das ist in allen Fällen zu empfehlen, unabhängig von der Art des Übergangs vom Hauptsystem zum wirklichen System;
2. daß die Einflußlinien, anstatt durch Belastung der einzelnen Knoten, anschaulicher, dem Formänderungsgrößenverfahren angepaßt als Biegelinien dargestellt werden können;
3. daß hierbei auf Annäherungsverfahren im allgemeinen verzichtet werden kann.

Auch das unter 2. und 3. Gesagte trifft zweifellos dann zu, wenn die Steifigkeit der beiden Gurte nicht wesentlich verschieden ist. Eine dementsprechende Bauweise des Trägers ist immer durchführbar, wenn nicht ausnahmsweise der Lastgurt auch zwischen den Knoten belastet ist, denn sonst besteht ja kein Anlaß, die Trägheitsmomente beider Gurte verschieden oder gar wesentlich verschieden zu machen. Ich habe also bei dem von Herrn Dr. Braun wiedergegebenen Satz meiner Abhandlung nicht an Verhältnisse wie 1:2 gedacht, bei denen die entsprechende Ausbildung des Pfostens allerdings Schwierigkeiten bereiten würde, sondern an Verhältnisse etwa 4:5 bis höchstens 3:4, wobei meine Forderung hinsichtlich der Abstufung der Trägheitsmomente im Pfosten mit 16:25 bis 9:16 jedenfalls ohne Schwierigkeit erfüllt werden kann. Meine Entwicklungen zeigen aber, daß die Zustände ϑ recht unliebsame Gegenkrümmungen herbeiführen müssen, welche dem ohnehin wegen des verwickelten Kraftlinienverlaufs in den Knoten statisch reichlich unklaren Vierendeelträger keinesfalls nützlich sein können. Man sollte sie also durch entsprechende Ausbildung des Trägers unter allen Umständen vermeiden.

Damit sind zweifellos 90% aller Fälle glatt erledigt. Es bleiben die Ausnahmefälle stark verschiedener Steifigkeit der beiden Gurte, sei es, daß der Lastgurt auch zwischen den Knoten Lasten aufnehmen muß, oder daß man unzweckmäßig ausgebildete Vierendeelträger nachrechnen muß. Dann treten allerdings, wie Herr Dr. Braun richtig bemerkt, durch Hinzukommen der Zustände ϑ unbequeme viergliedrige Gleichungen auf. Hier kann man sich aber in ähnlicher Weise, wie von Herrn Dr. Braun gezeigt wurde, durch Annäherung helfen, indem man zunächst $\vartheta_r = \mu_r \zeta_r$ annimmt und μ_r wählt, daß die Zustände $\zeta_r = 1$ und $\vartheta_r = 1$ zusammen die beiden Anschlußknoten des Pfostens im Verhältnis der Steifigkeit der zugehörigen Gurte mit Momenten belasten, womit die Unbekannten ϑ_r vorläufig aus den Gleichungen verschwinden. Vermutlich ist diese erste Annäherung schon ausreichend, da die Belastungen ϑ_r , die der Bemessung von μ_r zugrunde gelegt wurden, gegenüber $\vartheta_{(r-1)r}$ und $\vartheta_{(r+1)r}$ sehr stark überwiegen; sie betragen mindestens das sechsfache.

Dieser Gedankenaustausch hat wohl nicht nur bestätigt, daß bei Vierendeelträgern mit Gurten stark verschiedener Steifigkeit die Ausbildung der Pfosten von sehr fühlbarem Einfluß auf die Querkraft- und Momentenverteilung ist, sondern er hat darüber hinaus die wertvolle Erkenntnis gebracht, daß derartige Träger in recht ungünstiger Weise beansprucht werden und darum überhaupt nichts mehr taugen, insbesondere auch, daß der Vierendeelträger zur Aufnahme von Lasten zwischen den Knoten durchaus ungeeignet ist. Ich habe diese Möglichkeit der Vollständigkeit halber nachträglich nebenbei behandelt; ich halte es aber nicht für angebracht, diesem Ausnahmefall zuliebe, in welchem ich die Zweckmäßigkeit des Annäherungsverfahrens zugebe, solche Annäherungsverfahren in den 90% der übrigen Fälle anzuwenden; ich halte ein Verfahren, welches von vornherein im wesentlichen diesen Fällen angepaßt ist, für empfehlenswerter, zumal sich ja auch hierbei die Möglichkeit der Annäherungsrechnung für Ausnahmefälle ohne weiteres ergibt, und zwar auch ohne auf die Darstellung der Einflußlinien als Biegelinien verzichten zu müssen. Dr.-Ing. Krabbe.

Erwiderung.

In der Zuschrift von Herrn Oberreichsbahnrat Dr.-Ing. Krabbe stellt dieser im wesentlichen die Behauptung auf, daß Vierendeelträger mit Gurten von stark verschiedener Steifigkeit und Lastangriff zwischen den Knotenpunkten unbrauchbar seien.

Meine Ansicht ist gerade entgegengesetzt. Zu ihrer Begründung diene folgende Überlegung: Zum Bau einer Brücke mit untenliegender Fahrbahn möge zunächst ein Vierendeelträger mit gleich steifen Gurten und Lastangriff nur in den Knotenpunkten gewählt werden. Um den

Träger nicht zu schwerfällig erscheinen zu lassen, ist man meist gezwungen, den Obergurt und bei gleichen Gurten damit auch den Untergurt in der Höhe zu drücken. Querkräfte und Momente verteilen sich je zur Hälfte auf beide Gurte. Beide Gurte haben gleiche Biegelinie. Nun stehe aber unter der Fahrbahn genügend Raum für einen hohen Untergurt zur Verfügung. Nutzt man diesen Raum aus und macht den Untergurt höher und steifer, so werden die Momente im Obergurt kleiner, wenn auch nicht entsprechend dem neuen Steifigkeitsverhältnis. Mit den kleineren Momenten nehmen auch die Krümmungen der Biegelinie des Obergurts ab. Beim steiferen Untergurt nehmen die Krümmungen der neuen Biegelinie noch stärker ab als beim Obergurt. Der Träger ist in seiner Gesamtheit steifer und damit besser geworden. Beim Vergleich ist eben zu berücksichtigen, daß die über der Fahrbahn liegenden Teile, also insbesondere der Obergurt mit Rücksicht auf das Aussehen gedrückt werden müssen, während beim Untergurt dieser Zwang nicht besteht. Aus diesem Grunde behaupte ich, daß Träger mit Gurten von stark verschiedener Steifigkeit zweckmäßig sind. Was aber die Zwischenauflagerung von Querträgern anbelangt, so hat sich bei dem Zahlenbeispiel in Heft 11 gezeigt, daß hierdurch keine großen zusätzlichen Eckmomente entstehen. Man erhält in erster Linie ein großes Feldmoment in Gurtmitte, also an einer Stelle, wo dieser gewöhnlich nicht ausgenutzt ist. Ich habe daraus geschlossen, daß auch die Zwischenauflagerung der Querträger zweckmäßig ist, soweit sich das Ergebnis des Zahlenbeispiels verallgemeinern läßt. Wegen der zusätzlichen kleinen Eckmomente, die sich rechnerisch einwandfrei erfassen lassen, sind Bedenken nicht berechtigt.

Nach Angabe von Herrn Oberreichsbahnrat Dr.-Ing. Krabbe sind die meisten Vierendeelträgerbrücken so ausgebildet, daß Ober- und Untergurt gleiche Biegelinie aufweisen. Derartige Träger würde man wohl nicht nach dem Formänderungsgrößenverfahren berechnen, sondern nach der Kraftmethode. Diese liefert bei solchen Trägern dreigliedrige Gleichungen ohne den Umweg über ein System mit starren Pfosten. Wollte man aber bei beliebigen Querschnittsverhältnissen das in der Zuschrift erwähnte Annäherungsverfahren nach der Deformationsmethode durchführen, so würde man schon bei Aufstellung der Elastizitätsgleichungen, d. h. bei Ermittlung ihrer Beiwerte, auf die größten Schwierigkeiten stoßen.

Im Gegensatz hierzu habe ich ein Iterationsverfahren angegeben, das bei beliebiger Querschnittsverteilung immer zum Ziele führt.

Dr.-Ing. Braun.

Entgegnung.

Zu den vorstehenden Ausführungen bemerke ich:

1. Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß das Auftreten der Zustände $\vartheta = 1$ recht unerwünschte Gegenkrümmungen und Beanspruchungen im Vierendeelträger erzeugt, und dieses ohnehin statisch schon reichlich unklare Gebilde noch unklarer macht.
2. Die Ermittlung der Beiwerte ist für die Zustände $\zeta = 1$ und $\vartheta = 1$ in ganz einfacher Weise möglich, wobei ich nur auf meine Abhandlung zu verweisen brauche.
3. Wenn Herr Dr. Braun die Einfügung der starren Pfosten für einen Umweg hält, so übersieht er, daß er bei dem Kraftgrößenverfahren den Umweg über Gelenke oder Durchschneiden der Gurte gehen muß, der hier umständlicher ist.

Dr.-Ing. Krabbe.

Erwiderung.

Zu Punkt 2 bemerke ich, daß bei verschiedenen steifen Gurten die Momentenflächen der Zustände $\zeta = 1$ sowie $\vartheta = 1$ und damit die Beiwerte der Elastizitätsgleichungen nur dann leicht zu ermitteln sind, wenn, wie schon früher erwähnt, das Trägheitsmoment eines jeden Pfostens im

Verhältnis $\frac{J_o^2}{J_u^2}$ veränderlich gemacht wird. Ist das nicht der Fall, so ist die Ermittlung dieser Beiwerte für die Gleichungen des Formänderungsgrößenverfahrens sehr umständlich.

Zu den übrigen Punkten erübrigt sich eine nochmalige Stellungnahme, da ich hierauf in der zweiten Erwiderung ausführlich eingegangen bin.

Dr.-Ing. Braun.

Wir schließen hiermit die Aussprache, nachdem in Anbetracht der Wichtigkeit der angeschnittenen Fragen für die praktische Statik ausnahmsweise das Wort jeweils dreimal erteilt wurde.

Die Schriftleitung.



BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej

P.769/1939

Druk: Drukarnia Gliwice, ul. Zwycięstwa 27, tel. 230 49 50