

WISSENSCHAFTLICHE BEILAGE ZUM JAHRESBERICHT DER OBERREALSCHULE
MIT GYMNASIUM (IN ENTW.) ZU BONN.

ELEMENTARE
DARSTELLUNG DES BRÜCKENBAUES

MIT BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DES BAUES

DER

BONNER RHEINBRÜCKE,

VON

DR. MAX KORTEN,
OBERLEHRER.



BONN,
UNIVERSITÄTSBUCHDRUCKEREI VON CARL GEORGI.

1898.

1898, Prog.-Nr. 512.

960
7 (1898)

512-6



Vorwort.

Die vorliegende Abhandlung soll die Grundlagen und die Entwicklung des Brückenbaues einem nicht fachverständigen Leserkreise, im besonderen den Schülern der oberen Klassen höherer Lehranstalten vorführen. Veranlassung hierzu gab die Erbauung der Bonner Strassenbrücke, welche in unmittelbarer Nachbarschaft der städtischen höheren Schule gegründet und unter den Augen der Schüler fast vollendet, in allen Zuständen ihrer Erbauung dauernd das Interesse der heranwachsenden Jugend auf sich zog. Gegenüber solchem Interesse an einem technischen Meisterwerke soll aber die Schule, soweit sich die Möglichkeit bietet, Verständnis für die dem Bauwerke zu Grunde liegende Idee, die Hauptteile, deren Aufgabe, Konstruktion und Zusammenwirken erwecken. Dieses Verstehen eines Bauwerkes, wenn es nicht auf eine rein äusserliche ästhetische Betrachtung hinauslaufen soll, wird sich allein dadurch ermöglichen lassen, dass der Leser vorher mit der Entwicklung des betreffenden Zweiges der Baukunst, d. h. in unserem Falle mit der statischen und geschichtlichen Entwicklung des Brückenbaues überhaupt, bekannt gemacht wird. Hieraus ergeben sich für diese Abhandlung drei Hauptteile, nämlich:

- I. Die statische Entwicklung des Brückenbaues.
 - II. Die geschichtliche Entwicklung des Brückenbaues.
 - III. Der Bau der Bonner Rheinbrücke.
- In diesen drei Teilen werde ich mich

meines Leserkreises, aber auch des Raumes wegen auf die einfachsten statischen Verhältnisse beschränken und die ganze Elasticitätslehre ihrer Schwierigkeit wegen ausschliessen; meine Arbeit wird deshalb einem Fachmanne nichts Neues bieten. Ebenso wenig konnte ich den verschiedenen Methoden, welche man beim eigentlichen Aufbau der Brücken, namentlich bei der Pfeilergründung anwendet, so interessant und lehrreich dieselben oft sind, aus Raummangel eine eingehendere Besprechung widmen. Der darzustellende Gegenstand musste aber trotzdem, namentlich im ersten Teile, einige Sätze als bekannt voraussetzen, da deren Ableitung mich zu weit geführt hätte und dieselben ausserdem in den betreffenden Lehrbüchern leicht aufgesucht werden können. Um den Gang der Abhandlung möglichst ungestört zu erhalten und zugleich den mathematisch-physikalischen Standpunkt des ersten Teiles zu kennzeichnen, habe ich dieselben in den Eingang gestellt. Sollte der erste Teil mangels der nötigen Vorkenntnisse einem Leser zu schwer verständlich erscheinen, so möge er sich dem zweiten und dritten Teile zuwenden, da deren Lektüre auch unter diesen Umständen nicht ohne Nutzen sein wird.

Den dritten Teil der Abhandlung konnte ich natürlich nicht ohne direkte Unterstützung der Leiter des Bonner Brückenbaues abfassen. Dieselbe ist mir aber auch in der liebenswertesten Weise zu teil geworden, und ich spreche an dieser Stelle den Herren Regierungs-Bau-

meister Frentzen und Regierungs-Bauführer Jührens meinen aufrichtigen Dank aus für die Förderung, die sie meinem Unternehmen haben zu teil werden lassen.

A. Für den ersten Teil der Abhandlung werden an mathematischen Kenntnissen vorausgesetzt:

1. Aus der Algebra: die Buchstabenrechnung bis zur Bildung von Quadraten und Quadratwurzeln; die einfachen Gleichungen I. Grades mit einer Unbekannten. — Ausserdem ist für § 6 noch folgender Satz erforderlich: Die Summe aller ganzen Zahlen von 1 bis n ist gleich $\frac{1}{2}n(n+1)$ [Beispiel: Die Summe aller ganzen Zahlen von 1 bis 100 ist gleich $\frac{1}{2}100.101=5050$].

Beweis: Bezeichnet S die gesuchte Summe, so schreiben wir:

$$\begin{aligned} S &= 1 + 2 + 3 + \dots + (n-2) + (n-1) + n \\ S &= n + (n-1) + (n-2) + \dots + 3 + 2 + 1 \\ \hline 2S &= (n+1) + (2+n-1) + (3+n-2) + \dots + (n-2+3) + (n-1+2) + (n+1) \\ &= (n+1) + (n+1) + (n+1) + \dots + (n+1) + (n+1) + (n+1) \\ &= n(n+1); \quad S = \frac{1}{2}n(n+1). \end{aligned}$$

2. Aus der Planimetrie: die Sätze vom Parallelogramm; der pythagoräische Lehrsatz; die Formel des Kreisumfanges ($2r\pi$); die Proportionalität von Bogen (b) und zugehörigem Centriwinkel (φ), nämlich $b : \varphi = 2r\pi : 360$.

3. Aus der Trigonometrie: die Funktionen am rechtwinkligen Dreiecke.

B. Aus der Physik werden hauptsächlich folgende Sätze benutzt:

1. Kräfte werden ihrer Grösse und Richtung nach durch Strecken dargestellt und nach den für diese geltenden Sätzen behandelt.

2. Verschiebung, Vereinigung und Zerlegung von Kräften, die einen Punkt angreifen:

a) Kräfte lassen sich zu neuen Angriffspunkten verschieben, wenn diese Angriffspunkte jedes Mal in der Richtung der Kraft liegen und mit dem ursprünglichen fest verbunden sind. [Ob

ein Wagen auf ebener Erde an einem langen oder kurzen Zugseil vorwärts bewegt wird, ist im allgemeinen gleichgültig.]

b) (Parallelogramm der Kräfte). Zwei einen Punkt P angreifende Kräfte k_1 und k_2 lassen sich nach Grösse und Richtung durch die Diagonale R des aus k_1 , k_2 und $\sphericalangle(k_1 k_2)$ gebildeten Parallelogramms ersetzen (Fig. 1 *). Hierbei kann $\sphericalangle(k_1 k_2)$ alle Werte von 0° bis 180° annehmen. Ist $\sphericalangle(k_1 k_2) = 90^\circ$, so ist $R = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$; ist dagegen $\sphericalangle(k_1 k_2) = 0$ oder gleich 180° , so ist das Parallelogramm jedes Mal zur Linie geworden. Im ersteren Falle aber fällt die Diagonale mit der Summe, im zweiten mit der Differenz von k_1 und k_2 zusammen, und es ist dann $R = k_1 + k_2$ bzw. $R = k_1 - k_2$ oder $= k_2 - k_1$. Ist im letzten Falle $k_1 = k_2$, so ist $R = 0$, und wir haben daraus den Satz: Zwei gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete Kräfte heben sich auf.

c) Durch mehrfache Anwendung des vorigen Satzes lassen sich mehrere, einen Punkt angreifende Kräfte k_1, k_2, \dots, k_n zu einer einzigen Resultante R vereinigen. (Fig. 2.)

d) Jede Kraft (R) kann nach dem Kräfte-Parallelogramm in zwei und mehr Seitenkräfte, Komponenten, zerlegt werden. (Fig. 1 u. 2.)

3. Hebel und statische Momente.

a) Ein Hebel ist eine um einen festen oder beweglichen Punkt drehbare Linie (Strecke, Stange, Balken, Körper), die von Kräften angegriffen wird.

b) Der Hebelarm (l) einer Kraft (k) ist die Länge der vom Drehpunkte (D) auf die Kraft-Richtung gefällten Senkrechten. (Fig. 3.)

c) Das Produkt von Kraft (k) und Hebelarm (l) heisst das statische Moment (m). Es ist also $m = k l$.

*) Die hier und im folgenden mit den Nummern 1, 2 u. s. w. angeführten Figuren finden sich auf den Tafeln am Schlusse der Abhandlung vor, während sich die Nummern I, II u. s. w. auf Figuren im Texte beziehen.

d) Das Drehvermögen einer Kraft wächst sowohl mit der Grösse der Kraft, als auch mit der des Hebelarmes und daher mit dem statischen Moment, und zwar gibt uns das statische Moment selbst die Grösse des Drehvermögens.

e) Man unterscheidet positive und negative Drehung; die letztere entspricht meist der Uhrzeiger-Drehung. Demgemäss unterscheidet man auch positive und negative statische Momente.

4. Hebelgesetz (Gleichgewicht gegen Drehung). Soll ein Körper (Hebel) trotz der angreifenden Kräfte keine Drehung erleiden, so muss die Summe aller positiven und negativen statischen Momente gleich Null sein.

Beispiel: (Fig. 4.) Es sei AB ein Hebel mit dem festen Drehpunkte D . Der Vereinfachung wegen sollen hier alle Kräfte senkrecht zum Hebel wirken. Im positiven Sinne drehen die Kräfte 7, 1, 4, 3 an den Hebelarmen 5, 1, 3, 8; im negativen Sinne die Kräfte 12 und 4 an den Hebelarmen 3 und 9. Dann ist die Summe der statischen Momente $7 \cdot 5 + 1 \cdot 1 + 4 \cdot 3 + 3 \cdot 8 - 12 \cdot 3 - 4 \cdot 9 = 0$. Mithin können die angreifenden Kräfte keine Drehung bewirken. Ebenso wenig können sie aber, so lange D fest ist, eine Verschiebung des ganzen Hebels herbeiführen.

Ersetzen wir jetzt noch die Festigkeit des Drehpunktes durch eine in D wirkende Kraft X , welche dem bisher in D wirkenden Drucke gleich und entgegengesetzt sein soll, so wird auch diese Kraft keine Drehung um D hervorrufen, weil ihr statisches Moment mangels eines Hebelarmes gleich Null ist. Mithin ist dann auch ohne festen Drehpunkt das Gleichgewicht gewahrt.

5. Gleichgewicht gegen Verschiebung:

Soll ein Körper keine Verschiebung nach einer bestimmten Richtung erleiden, so muss die Summe der positiven und negativen Kräfte, die in dieser Richtung wirken, bzw. die der entsprechenden Kraftkomponenten gleich Null sein.

Beispiel: Als es sich um Drehung handelte (Fig. 4), nahmen wir die der Uhrzeiger-Drehung entsprechende als negativ. Hier, wo es

sich um Verschiebung handelt, wollen wir die nach unten gehende und also der Schwerkraft folgende als negativ und entsprechend die nach oben gerichtete als positiv nehmen. Dann sind im Sinne der Verschiebung positiv die Kräfte 12, 4, 3 und negativ 4, 1, 7. Ausserdem aber hatten wir noch an Stelle der Festigkeit von D eine noch unbekannte Kraft X eingeführt, welche so gross sein sollte, dass das Gleichgewicht gegen Verschiebung dadurch erreicht und also die Summe aller positiven und negativen Kräfte gleich Null sei. Mithin $12 + 4 + 3 - 4 - 1 - 7 + X = 0$, woraus $X = -7$; d. h. in D ist eine nach unten wirkende Kraft 7 erforderlich, um das Gleichgewicht zu bewahren, wenn D nicht fest ist. Die Festigkeit des Punktes D hatte mithin bisher eine nach unten gerichtete Kraft 7 zu leisten. Nach Einfügung der Kraft -7 und Beseitigung der Festigkeit von D ist also Gleichgewicht gegen Verschiebung erreicht, und auch die Summe der statischen Momente der wirkenden Kräfte ist jetzt für jeden beliebigen Punkt z. B. den Punkt A gleich Null. Ist nämlich $AD = 10$, so drehen jetzt im positiven Sinne um A die Kräfte 12, 4, 3 an den Hebelarmen 7, 13, 18, im negativen Sinne 7, 1, 7, 4 an den Hebelarmen 5, 9, 10, 19 und die Summe der statischen Momente ergibt: $12 \cdot 7 + 4 \cdot 13 + 3 \cdot 18 - 7 \cdot 5 - 1 \cdot 9 - 7 \cdot 10 - 4 \cdot 19 = 0$.

Aus (4) und (5) ergibt sich die Folgerung:

6. Soll ein Körper weder eine Verschiebung noch eine Drehung nach einer bestimmten Richtung erleiden, so muss:

a) die Summe der nach dieser Richtung wirkenden Kraftkomponenten gleich Null sein,

b) die Summe der statischen Momente derselben Komponenten für einen beliebigen Drehpunkt gleich Null sein.

7. Vom Schwerpunkte:

In jedem Körper gibt es einen Punkt, durch dessen Unterstützung der Körper gegenüber der Schwerkraft in jeder Lage im Gleichgewicht ist. Dieser Punkt heisst der Schwerpunkt. Wegen

der Gleichgewichtsbedingung (6a) muss die unterstützende Kraft, falls nur die Schwerkraft oder Gewichte der einzelnen Teile des Körpers in Betracht kommen, gleich der Summe dieser Kräfte d. h. gleich dem Gewichte G des ganzen Körpers sein, und wegen der Gleichgewichtsbedingung (6b) muss für einen beliebigen Drehpunkt die Summe der (positiven und negativen) statischen Momente der einzelnen Schwerkraft gleich dem statischen Moment der Unterstützungskraft G sein. Da offenbar an dem ganzen vorhandenen Gleichgewichts-Zustand nichts geändert wird, wenn wir das Gewicht der einzelnen Teile im Schwerpunkte vereinigen, so haben wir die Folgerung: „Das Gewicht eines Körpers kann man im Schwerpunkte vereinigen, ohne dadurch den vorhandenen Gleichgewichts-Zustand zu verändern“. Bei Körpern, wie zylindrischen oder vierkantigen Balken, die nach Form und Material als regelmässig bezeichnet werden können, liegt natürlich der Schwerpunkt im Mittelpunkte.

8. Von der Festigkeit.

Die (relative) Festigkeit eines horizontalen Balkens oder Trägers gegen Zerschneiden nimmt der Erfahrung nach zu proportional der Breite und dem Quadrate der Höhe, und nimmt ab

proportional der Länge. Dieses Gesetz drückt sich durch die Formel $F = f \frac{b h^2}{l}$ aus, worin F

die Tragfähigkeit, b die Breite, h die Höhe und l die Länge des Balkens bezeichnet. f ist die Tragfähigkeit, die derselbe Balken haben würde, wenn b , h und l gleich 1 wären. Weil also die Höhe h einen grösseren Einfluss auf die Tragfähigkeit hat als die Breite, so gibt man den als Träger verwandten Holzbalken fast ausnahmslos eine grössere Höhe als Breite, jedoch darf die Breite nicht unter ein gewisses Mass sinken, wenn nicht die Tragfähigkeit dadurch erheblich vermindert werden soll. Soll z. B. aus einem zylindrischen Baumstamme vom Radius r ein rechteckiger Balken von grösster Tragfähigkeit geschnitten werden, so muss man, wie die

Maxima-Rechnung ergibt, $h = \frac{2}{3} r \sqrt{6}$ und $l = \frac{2}{3} r \sqrt{3}$

oder rund $h = 1,63 r$ und $b = 1,15 r$ nehmen. Bei eisernen Trägern nutzt man das zu verwendende Material dadurch noch besser aus, dass man dem Querschnitt eine Gestalt wie ein Γ , T , L oder \square gibt. Hierdurch spart man an Material und verringert zugleich das die Stützpunkte belastende Gewicht, ohne die Tragfähigkeit wesentlich zu verkleinern.

I. Teil.

Statische Entwicklung des Brückenbaues.

§ 1. Der wagrechte Balken.

Ein wagrechter, regelmässiger Balken AB (Fig. 5) von $l=4\text{m}$ Länge und $G=50\text{kg}$ Eigengewicht sei durch die Gewichte 72kg , 120kg und 158kg in Punkten belastet, die 1m , $2,5\text{m}$ und 3m von A entfernt sind.

Wenn nun der Balken in den Endpunkten A und B unterstützt wird, wie gross ist dann die Kraft, mit der er auf die Unterstützungspunkte drückt?

Berechnung: X und Y seien die Kräfte, die von den Unterstützungspunkten geleistet werden müssen, damit Gleichgewicht herrscht. Dann muss:

1. die Summe aller positiven und negativen Kräfte gleich Null sein. Positiv sind X und Y ; negativ 72 , 120 , 158 und das Gewicht des Balkens 50 . Daher ist

$$X + Y - 72 - 120 - 158 - 50 = 0; \text{ oder} \\ X + Y = 400 \text{ kg,}$$

2. die Summe aller statischen Momente in Bezug auf einen beliebigen Punkt gleich Null sein.

Nehmen wir dann A zum Drehpunkte, so sucht Y am Hebelarm 4 positiv, dagegen 72 , 120 , 158 sowie 50 an den Hebelarmen 1 , $2,5$, 3 und 2 negativ zu drehen. Daher ist dann

$$Y \cdot 4 - 72 \cdot 1 - 120 \cdot 2,5 - 158 \cdot 3 - 50 \cdot 2 = 0, \text{ woraus} \\ Y = 236,5 \text{ kg.}$$

Ebenso wenn B Drehpunkt ist, haben wir $-X \cdot 4 + 72 \cdot 3 + 120 \cdot 1,5 + 158 \cdot 1 + 50 \cdot 2 = 0$ und hieraus $X = 163,5 \text{ kg}$.

*) Die zu diesem Teile gehörenden Figuren finden sich, soweit sie nicht dem Texte eingefügt sind, auf den am Schlusse der Abhandlung angehefteten Blättern.

Die durch beide Gleichgewichts-Bedingungen gewonnenen Gleichungen $X + Y = 400 \text{ kg}$ und $X = 163,5 \text{ kg}$ $Y = 236,5 \text{ kg}$ stimmen mit einander überein. Die Unterstützungspunkte in A und B müssen mithin einem Drucke von $163,5$ bzw. $236,5 \text{ kg}$ widerstehen, wenn Gleichgewicht herrschen soll.

§ 2. Der schräge Balken, das Spreng- und Hängewerk.

Werden zwei gleichartige Balken mit den Köpfen so zusammengeneigt, dass durch die Verbindung der Fusspunkte ein vertikal gestelltes gleichschenkliges Dreieck A_1BA_2 entsteht, so ist klar, dass die Unterlage in A_1 und A_2 jedesmal das Gewicht G eines Balkens zu tragen hat und dass jede Unterlage also eine aufwärtsgerichtete Kraft G an jedem Punkte A_1 bzw. A_2 entwickeln muss, wenn die Balken nicht einsinken sollen. An diesem Gleichgewichts-Zustande wird auch in Bezug auf A_1B nichts geändert, wenn wir BA_2 wegnehmen und statt seiner eine senkrechte glatte Wand zur Stütze von A_1B anbringen, wie Fig. 6 es zeigt. Dann drückt B durch die Schwere des Balkens in wagrechter Richtung gegen die Wand, und diese antwortet mit der gleichen, aber entgegengesetzten Kraft. Nennen wir die letztere H und betrachten A_1 als Drehpunkt, so wirkt positiv drehend H am Hebelarm A_1D , negativ drehend G , welches, im Mittelpunkte von A_1B angreifend, den Hebelarm A_1F besitzt. Die Summe beider statischen Momente ist dann $H \cdot A_1D - G \cdot A_1F = 0$, woraus

$H = G \frac{A_1 F}{A_1 D}$. Da aber $A_1 D = CB = A_1 B \sin a$ und $A_1 F = \frac{1}{2} A_1 B \cos a$ ist, so ist $H = G \frac{\frac{1}{2} A_1 B \cos a}{A_1 B \sin a} = \frac{1}{2} G \operatorname{ctg} a$. Entferne ich jetzt auch noch die Wand, so kann ich ihre Wirksamkeit ersetzen durch die wagrechte Kraft $H = \frac{1}{2} G \operatorname{ctg} a$, ohne dass dadurch eine Gleichgewichts-Störung auftritt. Nun verlangt aber die zweite Bedingung des Gleichgewichts, dass die Summe der in einer Richtung wirkenden Kräfte gleich Null sei. Es wirkt aber im vertikalen Sinne das Gewicht des Balkens mit $-G$ und der Druck des Unterstützungspunktes A_1 mit $+G$. Beide geben zusammen Null und daher findet im vertikalen Sinne keine Verschiebung statt. Damit auch im horizontalen Sinne keine solche stattfindet, muss der in B wirkenden Kraft $-H$ irgendwo eine Horizontalkraft $+H$ entgegenwirken, um die Summe der Horizontal- oder Schubkräfte gleich Null zu machen. Aus der Praxis weiss auch jeder, dass ein schräger Balken BA_1 auf der Unterlage ausgleiten würde, wenn die Reibung oder irgend eine Vorkehrung ihn nicht daran hinderte. Mithin muss der in B wirkenden Schubkraft $-H = -\frac{G}{2} \operatorname{ctg} a$ in A_1 eine Schubkraft $+H = +\frac{G}{2} \operatorname{ctg} a$ entgegenwirken. Der Unterstützungspunkt A_1 hat also zwei Kräfte, nämlich $+G$ nach oben und $+\frac{G}{2} \operatorname{ctg} a$ nach rechts wirkend zu leisten, weil der Balken mit den Kräften $-G$ und $-\frac{G}{2} \operatorname{ctg} a$ auf ihn wirkt.

Bilden wir die Resultante $R = \sqrt{G^2 + \left(\frac{G}{2} \operatorname{ctg} a\right)^2} = \frac{G}{2} \sqrt{4 + \operatorname{ctg}^2 a}$, so wirken in A_1 Balken und Unterstützungspunkt mit den Kräften $\pm R$ einander entgegen.

Dasselbe, was wir hier von A_1 gesagt haben, gilt entsprechend von A_2 , nur dass hier die vom

Balken ausgeübte Schubkraft gleich $+\frac{G}{2} \operatorname{ctg} a$ ist. Die Vertikalkräfte G in A_1 und in A_2 muss der Unterstützungspunkt jedesmal tragen, die Schubkräfte $\pm \frac{G}{2} \operatorname{ctg} a$ können aber auf verschiedene Weise unschädlich gemacht werden. Ist a gross, und damit $\operatorname{ctg} a$ und H klein, so kann unter Umständen die Reibung am Boden genügen. Ist H aber zu gross hierfür, so können wir die Schubkraft durch besondere Stützpunkte oder Widerlager beseitigen; die Konstruktion heisst dann ein Sprengwerk. Wir können aber auch die nach aussen gerichteten Schubkräfte beider Balken sich gegenseitig aufheben lassen, indem wir A_1 und A_2 oder zwei andere Punkte der schrägen Balken durch ein Seil, eine Stange oder einen Balken mit einander verbinden. Diese Verbindung nennt man einen Unterzug, und die ganze aus den beiden Streben (Schrägbalken) und dem Unterzuge bestehende Konstruktion bezeichnet man als Hängewerk. Derartige Hängewerke kann man in mehr oder weniger komplizierter Gestalt als Dachstuhl bei Satteldächern beobachten, bei denen der Schub der (schrägen) Streben durch den Unterzug beseitigt werden muss, wenn nicht die Mauern des Gebäudes nach aussen weichen sollen. Bekannte Beispiele bieten auch die Dachkonstruktionen der Bonner Schwimmanstalten, sowie der Spielhalle unseres Schulhofes, von denen Fig. 7a u. b schematische Ansichten bieten. Die uns hier interessierende Verwendung des Hängewerkes aber liegt im Brückenbau.

§ 3. Das Hängewerk als Brückenträger.

Jede Brücke besteht im allgemeinen aus dem Unterbau (Pfeiler, Widerlager) und dem Überbau. Letzterer setzt sich abgesehen von den einfachsten Fällen zusammen aus den Brückenträgern und der Brückenbahn nebst Zubehör (Geländer etc.). Ist die zu überbrückende Weite d. h. die Spannung gering, so können als Brücken-

träger zwei oder mehrere neben einander gelagerte parallele Balken oder eiserne I-Träger dienen, deren Köpfe in entsprechend starken Lagern auf beiden Ufern ruhen; auf den Balken liegen dann die Bohlen oder Bretter der Brückenbahn. Wird aber die Spannung zu gross für einen Balken und will man zugleich den Horizontalschub vermeiden, so kann man sich zweier oder mehrerer Hängewerke als Brückenträger bedienen, wie Fig. 8a es zeigt. Der aus einem langen oder aus zwei in C zusammenstossenden Balken*) bestehende Unterzug $A_1 A_2$ dient hier zugleich als Auflager der Brückenbahn (Streckbaum). Die Verbindung von C und B heisst Hängesäule; sie unterstützt den Punkt C und überträgt den in C herrschenden Druck nach B und mit Hilfe der Streben BA_1 und BA_2 nach A_1 und A_2 auf das dort als Auflager dienende Mauerwerk. Stützt sich nun die ganze Brücke gleichmässig auf vier Punkte A_1, A_1', A_2 und A_2' , so ist von vorneherein klar, dass A_1 und A_2 zusammen die halbe Last der Brückenbahn und der beiden Brückenträger zu übernehmen haben. Dieser Umstand soll später als Probe auf die Rechnung dienen, die wir hier folgen lassen wollen.

Berechnung: Hat jede Strebe (AB) das Gewicht g_1 , so verursacht sie, wie wir soeben (§ 2) gesehen, in A_1 und A_2 die Druckkraft g_1 und die Schubkraft $\frac{g_1}{2} \operatorname{ctg} \alpha$. Denken wir uns ferner das Gewicht der Brückenbahn nebst den Unterzügen gleichmässig auf die Brückenlänge verteilt und bezeichnen es mit $4p$, so entfällt auf $A_1 C$ hiervon $1p$ und dieses p können wir im Schwerpunkte (Mittelpunkte) S_1 von $A_1 C$ angreifen lassen (Fig. 8b). Nehmen wir nun an, dass die Unterzugbalken unter einander und mit der Hängesäule drehbar verbunden seien, so können wir das statische Moment $p \cdot \frac{A_1 C}{2}$

*) Unter Balken sind hier und im Folgenden neben Holzbalken auch eiserne Träger zu verstehen.

ersetzen durch $\frac{p}{2} \cdot A_1 C$ d. h. an Stelle der in S_1 angreifenden Kraft p können wir in C die Kraft $\frac{p}{2}$ angreifen lassen, ohne dass das statische Moment geändert wird. Mithin trägt dann C die Hälfte von p , die andere Hälfte muss natürlich von A_1 getragen werden.

Ein Gleiches gilt von $A_2 C$, auch hier trägt C und A_2 jedesmal wieder $\frac{p}{2}$ von dem in S_2 angreifenden Gewicht p . Mithin tragen jetzt A_1 und A_2 vom Gewichte der Brückenbahn je $\frac{p}{2}$, C dagegen $\frac{p}{2} + \frac{p}{2} = p$. Aufgabe des Hängewerkes ist es jetzt, dieses p von C aus nach A_1 und A_2 zu übertragen. Der Gang hierbei ist folgender: Statt in C können wir p in B angreifen lassen (Phys. Einl. B. 2a) und das Gewicht der Hängesäule g_2 noch hinzufügen; dann greift in B jetzt $p + g_2$ an, und diese Kraft zerlegen wir durch das Kräfteparallelogramm in zwei in Richtung der Streben wirkende Kraftkomponenten $BE_1 = BE_2 = z$. Zur Berechnung von z ziehen wir $E_1 E_2$ parallel $A_1 A_2$ und hal-

bieren dadurch $p + g_2$. Dann ist $\sin \alpha = \frac{\frac{p+g_2}{2}}{z}$; $z = \frac{p+g_2}{2 \sin \alpha}$. Diese Kraftkomponenten versetzen wir

nach A_1 bez. A_2 und zerlegen sie dort wieder in Druck- und Schubkraft durch das Kräfte-Parallelogramm oder besser Kräfte-Rechteck. Da der von z und der Schubkraft eingeschlossene Winkel wieder gleich α ist, so ist $\sin \alpha = \frac{v}{z}$; $\cos \alpha = \frac{h}{z}$, worin v und h die Druck- und die Schubkraft bezeichnen.

Dann ist also $v = z \sin \alpha = \frac{p+g_2}{2 \sin \alpha} \sin \alpha = \frac{p+g_2}{2}$; $h = z \cos \alpha = \frac{p+g_2}{2} \operatorname{ctg} \alpha$. Nun hatten wir aber schon in A_1 und A_2 von der Brückenbahn her den Druck $\frac{p}{2}$ und von den Streben den Druck g_1

und den Schub $\frac{g_1}{2} \operatorname{ctg} \alpha$. Mithin beträgt jetzt der ganze Druck und Schub in A_1 (bezw. A_2) $V = g_1 + \frac{p}{2} + \frac{p+g_2}{2} = g_1 + p + \frac{g_2}{2}$; $H = \frac{g_1}{2} \operatorname{ctg} \alpha + \frac{p+g_2}{2} \operatorname{ctg} \alpha$
 $H = \frac{g_1+g_2+p}{2} \operatorname{ctg} \alpha$. Da jedes Brückenende zwei Auflagepunkte A_1 und A'_1 bzw. A_2 und A'_2 besitzt, so ist der Druck an jedem Ende $2V = 2g_1 + 2p + g_2$ und der Schub $2H = (g_1 + g_2 + p) \operatorname{ctg} \alpha$, und der Druck der ganzen Brücke auf beide Enden beträgt $4V = 4g_1 + 2g_2 + 4p$, worin $4g_1 + 2g_2$ das Gewicht der 4 Streben und 2 Hängesäulen, $4p$ das Gewicht der Brückenbahn nebst den beiden Unterzügen bezeichnet. Die Schubkräfte an beiden Ufern wirken einander entgegen, sie werden von den Unterzügen aufgenommen und entziehen sich, wenn die Verbindung in C stark genug ist, unserer weiteren Beobachtung.

Ist die zu überwindende Spannweite noch zu gross, um die Verwendung nur zweier Balken im Unterzuge zu gestatten, so kann man, wie Fig. 9 schematisch zeigt, mit Hilfe des Spannriegels $B_1 B_2$ zwei Hängesäulen und 3 Balken im Unterzuge verwenden. Möge die gleichmässig verteilte Belastung einer jeden Strecke $A_1 C_1$, $C_1 C_2$, $C_2 A_2$ mit p bezeichnet werden, so können wir das p jedesmal im Mittelpunkte der Strecken angreifen lassen, und dann verteilt es sich wieder genau wie vorher so, dass A_1 und A_2 je $\frac{p}{2}$, C_1 und C_2 dagegen je p tragen. [Vom Gewichte der Hängesäulen, Spannriegel und Streben sehen wir dieses Mal ab.] Dann können wir die nach B_1 bzw. B_2 versetzten Kräfte p nach Strebe und Spannriegel durch das Kräfte-Parallelogramm in z und h zerlegen, wobei $\sin \alpha = \frac{p}{z}$ und $\operatorname{ctg} \alpha = \frac{h}{p}$ und hieraus $z = \frac{p}{\sin \alpha}$; $h = p \operatorname{ctg} \alpha$ ist. Die beiden Kräfte h wirken einander im Spannriegel entgegen und

heben sich gegenseitig auf. Die Kräfte z versetzen wir nach A_1 bzw. A_2 und zerlegen sie dort in Druck- und Schub-Kräfte $v = z \sin \alpha = \frac{p}{\sin \alpha} \sin \alpha = p$, $h_1 = z \cos \alpha = \frac{p}{\sin \alpha} \cos \alpha = p \operatorname{ctg} \alpha$. Diese Schubkräfte h_1 heben sich auch hier auf, da sie im Unterzuge einander entgegen wirken. Die im Spannriegel und im Unterzuge wirkenden Kräfte h und h_1 sind einander gleich, aber während die im Spannriegel wirkenden einander entgegenstreben und den Spannriegel zu zerbrechen suchen, ist hier im Unterzuge ihr Bestreben, die Balken auseinander zu reissen. Daher sagt man, der Spannriegel, den wir weiterhin als Obergurt bezeichnen wollen, ist auf Druck, der Unterzug oder Untergurt auf Zug beansprucht. Da man bei Brückenbauten meist auch ungleichmässige Belastungen zu berücksichtigen hat, so beugt man einer gefahrdrohenden Verschiebung des Spannriegels und der Streben dadurch vor, dass man die Diagonalen $B_1 C_2$ und $B_2 C_1$ einfügt. Unser Hängewerk, welches von seiner Gestalt den Namen Trapez-Hängewerk bekommen hat, heisst dann versteift.

Bei noch grösseren Spannweiten kann man unter Vermehrung der Hängesäulen und Spannriegel auch noch ein einzelnes Hängewerk verwenden, jedoch nimmt man dann lieber noch ein zweites zur Unterstützung, wie Fig. 10 es schematisch zeigt. Tragen wieder die Punkte A je $\frac{p}{2}$ und die Punkte C je p , so muss, wie durch die Figur nach dem Vorigen leicht verständlich, am Schlusse der Rechnung jedes A wieder als Druck $2\frac{1}{2} p$ und als Schub $H = p \operatorname{ctg} \alpha_1 + p \operatorname{ctg} \alpha_2 = p(\operatorname{ctg} \alpha_1 + \operatorname{ctg} \alpha_2) = p \left(\frac{AC_1}{B_1 C_1} + \frac{AC_2}{B_2 C_2} \right) = p \frac{3AC_1}{B_1 C_1} = 3 p \operatorname{ctg} \alpha_1$ erhalten. Dieses H wirkt als Spannung oder Zug im Untergurt. Im Obergurt (Spannriegel) dagegen wirkt von B_1 aus zur Mitte hin $h_1 = p \operatorname{ctg} \alpha_1$ und ausserdem noch von B_2 aus $h_2 = p \operatorname{ctg} \alpha_2$. Mithin wirkt

im Mittelfeld des Obergurtes der Druck $h_1 + h_2 = p(\operatorname{ctg} a_1 + \operatorname{ctg} a_2) = 3p \operatorname{ctg} a_1$ (wie vorher), da die Aussenfelder des Obergurtes ihren Druck auf das Mittelfeld übertragen.

Auch hier muss man durch entsprechende Verbindungen und Diagonalen das Hängewerk gegen einseitigen Druck versteifen, wenn die Konstruktion genügende Sicherheit gewähren soll.

Betrachten wir den Weg, den wir bisher gegangen, so sehen wir, dass an die Stelle des für geringe Spannungen ausreichenden Holzbalkens oder vollwandigen eisernen I-Trägers das einfache und weiterhin das doppelte Hängewerk getreten ist. Das Hängewerk ist also ein Ersatz des natürlichen Balkens und könnte in dieser Beziehung als ein Kunstbalken oder besser noch als ein aus Ober- und Untergurt und dem Steg bestehender Träger bezeichnet werden, der den bekannten eisernen I-Trägern nachgebildet ist, nur mit dem Unterschiede, dass der beim I-Träger vollwandige Steg hier durch senkrechte und schräge Stäbe (Hängesäulen, Streben oder Diagonalen) ersetzt ist. Da wir die Höhe des Steges beliebig bestimmen können, die Tragfähigkeit aber (siehe physik. Einl. 8) mit dem Quadrate der Höhe wächst, so ist klar, dass die Hängewerke bei geringem Eigengewicht eine verhältnismässig hohe Tragfähigkeit besitzen. Aber auch sie leiden an dem Uebelstand, dass bei grösseren Spannweiten die Länge und damit das Gewicht der Streben ($A B_2$) schliesslich zu gross wird, um eine vorteilhafte Verwendung des Hängewerkes zuzulassen. Dieses wird vermieden, wenn wir die Strebe von B_2 aus nicht nach A , sondern nach C_1 führen. Ist dieses einmal geschehen, so steht auch nichts im Wege, die Zahl der Felder, wie $B_1 C_1 C_2 B_2$ ein solches darstellt, beliebig zu vermehren. Die hierdurch entstehende Konstruktion bezeichnet man als Fachwerk, und ihm soll der folgende Abschnitt gewidmet sein.

§ 4. Fachwerk-Konstruktionen.

Denken wir uns wieder das Gewicht der Brückenkonstruktion gleichmässig verteilt und nennen p die Belastung eines jeden der 5 Punkte

C , die eines der beiden Punkte A aber $\frac{p}{2}$ entsprechend dem Früheren, so stellt uns $C_2 B_3 C_2$ (Fig. 11) ein einfaches Hängewerk ohne Spannriegel dar, und der in C_3 wirkende Druck p wird (vgl. Fig. 8b) durch die Streben $B_3 C_2$ nach C_2 übertragen, so dass an jedem Punkte C_2 der neue Druck (vertikal) $\frac{p}{2}$ und der Schub (hori-

zontal) $x = \frac{p}{2} \operatorname{ctg} a$ nach aussen auftritt. Jetzt

ist $C_1 B_2 B_2 C_1$ ein Trapez-Hängewerk und, da in jedem Punkte C_2 die Kraft $\frac{p}{2} + p = \frac{3}{2}p$ nach unten

wirkt, so überträgt sich diese Kraft (siehe Trapezhängewerk Fig. 9) so, dass in jedem C_1 der Druck $\frac{3}{2}p$ und der nach aussen wirkende Schub $3x = \frac{3}{2}p \operatorname{ctg} a$ auftritt; ausserdem aber ist in B_2 derselbe, aber nach innen wirkende Schub $3x$ aufgetreten. Die Belastung in C_1 ist jetzt $p + \frac{3}{2}p = \frac{5}{2}p$, und betrachten wir wieder $A B_1 B_1 A$ als Trapez-Hängewerk, so überträgt sich der Druck $\frac{5}{2}p$ einfach von C_1 bzw. B_1 nach A , und zugleich tritt in A ein nach aussen und in B_1 ein nach innen wirkender Schub $5x = \frac{5}{2}p \operatorname{ctg} a$ auf. Jeder Stützpunkt A trägt jetzt $3p$, d. i. die Hälfte der auf den einen Träger entfallenden Brückenlast und zwar durch die ursprüngliche Belastung $\left(\frac{p}{2}\right)$ und durch die

Uebertragung $\left(\frac{5p}{2}\right)$. Der Untergurt ist, da die Schubkräfte nach aussen wirken, auf Zug, der Obergurt dagegen bei den nach innen wirkenden Schubkräften auf Druck beansprucht. Da durch die Uebertragungen der Schub in A gleich $5x$, in C_1 gleich $3x$ und in C_2 gleich x ist, diese Kräfte aber in derselben Richtung wirken und sich deshalb addieren, so

ist das Mittelstück C_2C_2 durch die Kraft $9x = \frac{3}{2}p \operatorname{ctg} a$, C_1C_2 dagegen nur durch $8x = 4p \operatorname{ctg} a$ und endlich AC_1 durch $5x = \frac{5}{2}p \operatorname{ctg} a$ in Anspruch genommen. Mithin nimmt die Beanspruchung des Untergurtes nach der Mitte hin zu. Genau dasselbe gilt vom Obergurte, wo in B_1B_2 der Schub $5x$, in B_2B_3 dagegen $8x = 4p \operatorname{ctg} a$ wirkt. Die Schubkräfte des Ober- und des Untergurtes gleichen sich selbstverständlich in jedem Gurte gegenseitig aus und treten deshalb, solange die Gefahr des Zerreißens im Untergurte oder des Einknickens im Obergurte nicht vorliegt, nicht in die Erscheinung. Die auf Zug beanspruchten Teile, nämlich den Untergurt und die senkrechten Stäbe, kann man, wenn eiserne Träger verwandt werden, aus Flacheisen bilden, dagegen wird man den Obergurt und die Schrägstäbe, die hier auf Druck beansprucht werden und deshalb der Gefahr des Einknickens ausgesetzt sind, gerne aus Winkeleisen von I- oder E- oder 7-förmigem Querschnitte herstellen.

Den Fig. 11 dargestellten Fachwerk-Träger nennt man auch Parallelträger mit zur Mitte steigenden Schrägstäben, wogegen Fig. 12 einen Parallelträger mit zur Mitte fallenden Schrägstäben darstellt. Lassen wir bei letzterem vorläufig B_3C_3 fort und bezeichnen wieder die ursprünglichen Belastungen eines jeden Punktes C mit p , so müssen wir uns das in C_3 wirkende p in zwei Komponenten z nach den Schrägstäben B_2C_3 zerlegen; dann ist $z = \frac{p}{2 \sin a}$. Diese z , nach B_2 versetzt und dort nach Obergurt und Vertikale in die Komponenten x und v_1 zerlegt, geben $x = z \cos a = \frac{p}{2} \operatorname{ctg} a$ als Schub im Obergurt und $v_1 = z \sin a = \frac{p}{2 \sin a} \sin a = \frac{p}{2}$ als Druck in der Vertikale. Mithin haben wir in C_2 jetzt $\frac{3p}{2}$ als Vertikal-Druck. Diesen Druck zerlegen wir nach dem Untergurte und dem Schrägstabe B_1C_2

und erhalten $\frac{3}{2}p \operatorname{ctg} a = 3x$ und $\frac{3p}{2 \sin a} = 3z$.

Fahren wir so weiter fort, so finden wir bei B_1 im Obergurte $3x = \frac{3}{2}p \operatorname{ctg} a$, in der Vertikale $\frac{3}{2}p$ und also bei C_1 wieder $\frac{5p}{2}$ als Vertikal-Druck. Der letztere liefert wieder $5x = \frac{5}{2}p \operatorname{ctg} a$ im Untergurte und $\frac{5p}{2 \sin a} = 5z$ im Schrägstabe BC_1 ; bei B wirkt dann im Obergurte $5x = \frac{5}{2}p \operatorname{ctg} a$, im Vertikalstabe $\frac{5}{2}p$, und also bei A jedes Mal $3p$, die halbe Last des einen Trägers. Im Obergurte herrscht in BB_1 der nach innen wirkende Schub $5x$, in B_1B_2 desgleichen der Schub $8x$ und endlich in B_2B_3 der Schub $9x$, wobei $x = \frac{p}{2} \operatorname{ctg} a$ ist; im Untergurte findet sich der Zug $5x$ in C_2C_1 , und $8x$ in C_3C_2 vor. Die Schrägstäbe sind dieses Mal auf Zug beansprucht, und zwar wachsen diese Zugkräfte, wenn wir von den inneren zu den äusseren Stäben fortschreiten, im Verhältnis 1:3:5. Die Vertikalstäbe sind dagegen vorwiegend auf Druck beansprucht, und die Druckkräfte wachsen auch hier von innen nach aussen. Auch hier muss man die Konstruktion durch Diagonalen und den mittleren Vertikalstab gegen ungleichmässige Belastungen noch versteifen.

Ausserdem muss man bei allen Brücken, bei denen die Höhe der Träger nicht ganz gering ist, die in den Gurten verhältnismässig schmalen Träger unter einander verbinden und so das Ganze zu einem hohlen Balken vereinigen, damit nicht seitliche Kräfte den einzelnen Träger umwerfen können. Diese Verbindungen bestehen meist aus geraden und schrägen Stäben, welche die beiden Obergurte und ebenso die beiden Untergurte mit einander verbinden. Dem Auge stellen sie sich als Rechtecke mit Diagonalen dar. Sie tragen, weil die seitlichen Kräfte vielfach im Winddruck bestehen, den Namen Windverband.

Statt der Fachwerkträger mit geraden Gur-

ten, wie wir sie hier besprochen haben, verwendet man auch solche mit gebogenen Gurten. Dieselben werden uns später (§ 8) beschäftigen.

§ 5. Das Sprengwerk als Brückenträger.

Kehren wir auf kurze Zeit nochmals zu unserem Hängewerk (Fig. 7, 8) zurück, lassen aber den, den Horizontalschub aufnehmenden, Unterzug weg, so muss das Widerlager den Schub aufnehmen, und wir haben statt des Hängewerkes ein Sprengwerk*). Nach dem, was wir vorher besprochen haben, bietet das Sprengwerk nichts wesentlich Neues und Fig. 13 wird auch ohne Erklärung verständlich sein. Auch die Verbindung von Hänge- und Sprengwerk, wie manche Dachstuhl-Konstruktion sie bietet, enthält kaum etwas Neues. Interessanter wird für uns das Sprengwerk, wenn wir es als Ueberleitung zum Gewölbe benutzen. Denken wir uns nämlich BC sowie den Spannriegel BB durch Steinbalken ersetzt und diese dann zu keilförmigen Steinen verkürzt, so entsteht (Fig. 14) ein Gewölbe von drei Steinen, deren mittelster der Schlussstein, deren seitliche an die Widerlager anstossende die Kämpfer genannt werden. Wir wollen hier dieses nicht weiter verfolgen, da wir uns dem Gewölbe von einer anderen Seite her nähern werden.

§ 6. Das Seil-Vieleck und die Hängebrücke.

In A und B (Fig. 15) sei ein Seil angeknüpft, welches in den Punkten P_1, P_2 bis P_6 durch die Gewichte $G_1, G_2 \dots G_6$ gespannt werde. Gegenüber den angehängten Gewichten sei die Schwere des Seiles selbst so unbedeutend, dass wir sein Gewicht vernachlässigen und das Seil als schwerelos betrachten dürfen, dann

*) Man unterscheidet auch wohl Hänge- und Sprengwerk je nachdem, ob die Brückenbahn am Träger hängt oder auf dem Träger liegt, und hat dann weiter Hänge- und Sprengwerke mit oder ohne Unterzug.

sind die Verbindungen AP_1, P_1P_2 etc. gerade Strecken. Ersetzen wir jetzt die Festigkeit von A und B durch entsprechende Kräfte S_1 und S_6 (vgl. Einleit. B4), so müssen diese Kräfte, wenn der vorhandene Zustand erhalten bleiben soll, in der Richtung P_1A bzw. P_6B wirken, und wir können sie daher auch (vgl. Einl. B2a) von A bzw. B nach P_1 bzw. P_6 verschieben, ohne dadurch eine wesentliche Veränderung hervorzurufen. Denken wir uns jetzt S_1 bzw. S_6 in die Vertikalkomponenten V_1 und V_6 und die Horizontalkomponenten H_1 und H_6 zerlegt, so können wir G_1 und G_6 ohne Gleichgewichtsstörungen beseitigen, wenn wir zugleich V_1 und V_6 um dieselben Kräfte G_1 und G_6 vermindern; es sei dann $V_2 = V_1 - G_1$ und $V_5 = V_6 - G_6$. Die aus H_1 und V_2 bzw. aus H_6 und V_5 gebildeten Resultanten S_2 und S_5 müssen dann wieder in die Richtung von P_2P_1 bzw. P_5P_6 fallen, und wir können deshalb wieder S_2 und S_5 nach P_2 bzw. P_5 verschieben. Zerlegen wir auch hier wieder S_2 in H_1 und V_2 , S_5 in H_6 und V_5 und beseitigen G_2 und G_5 , indem wir zugleich V_2 und V_5 um G_2 bzw. G_5 verkleinern, so bleibt auch hier das Gleichgewicht ungestört. Wieder sei $V_3 = V_2 - G_2$ und $V_4 = V_5 - G_5$. Die Komponenten V_3 und H_1 geben S_3 in Richtung P_3P_2 und ebenso V_4 und H_6 geben S_4 in Richtung P_4P_5 , und daher lassen sich S_3 und S_4 nach P_3 bzw. P_4 verschieben. Zerlegen wir in Anbetracht unserer Figur jetzt nur S_4 in V_4 und H_6 , beseitigen G_4 unter gleichzeitiger Verminderung von V_4 um G_4 , wobei $V_3 = V_4 - G_4$ sei, so muss die aus V_3 und H_6 gebildete Resultante S_3 in die Richtung P_3P_4 fallen und deshalb S_3 sich nach P_3 versetzen lassen. Jetzt wirken am Punkte P_3 die Kräfte S_3, S_3^1 und G_3 ; zerlegen wir die ersten in V_3 und H_1 bzw. V_3^1 und H_6 , so müssen V_3 und V_3^1 , die nach oben wirkenden Vertikalkomponenten, zusammen gleich dem nach unten wirkenden G_3 und ebenso H_1 und H_6 einander gleich sein, weil sonst P_3 nicht in

Ruhe bleiben könnte. Mithin haben wir gefunden:

1. Da die Horizontalkomponenten durch die Verlegung der Angriffspunkte der Kräfte nicht beeinflusst worden waren und $H_1 = H_6$ ist, so ist die Horizontalspannung H des Seiles in allen Punkten dieselbe.

2. Da $V_2 = V_1 - G_1$; $V_3 = V_2 - G_2$ und ebenso $V_5 = V_6 - G_6$; $V_4 = V_5 - G_5$; $V_3 = V_4 - G_4$ und endlich $V_3 + V_3 = G_3$, so ist auch $V_1 + V_6 = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6$. Die Summe der Vertikal-komponenten der beiden, an den Enden des Seiles auftretenden Zugspannungen ist gleich der Summe der Belastungen.

3. Bezeichnet α_1 den von S_1 und H oder den von P_1A und der Horizontale gebildeten Winkel und entsprechend α_p den von S_p und H gebildeten Winkel, so ist $\text{tg } \alpha_1 = \frac{V_1}{H}$; $\text{tg } \alpha_p = \frac{V_p}{H}$.

Nehmen wir jetzt an, dass A und B horizontal in derselben Höhe lägen, die Gewichte alle einander gleich wären und gleiche Horizontalabstände von einander besäßen, so wird das Seilvieleck aus zwei symmetrischen Hälften bestehen, und deshalb $V_1 = V_6 = 3G$ sein. Nennen wir dann den tiefsten Punkt P_0 , bezeichnen von dort aus die symmetrischen Punkte mit gleichen fortlaufenden Ziffern 1, 2 . . . u. s. w., denken uns ferner die Zahl der Gewichte sehr vermehrt und mit $2n$ bezeichnet, so ist die Vertikalkomponente einer jeden Zugspannung an den Seilenden $V_n = nG$, und für den p ten Punkt von der Mitte aus gerechnet ist $V_p = pG$ und $\text{tg } \alpha_p = \frac{V_p}{H} = p \frac{G}{H}$. Setzen wir dann noch (s. Fig. 16)

$AB = 2w$; $AM = w$, nennen den Angriffspunkt des p ten Gewichtstückes P , des $(p+1)$ ten P_1 und fällen PQ und P_1Q_1 senkrecht MP_0 , ebenso PF und P_1F_1 senkrecht AM , so ist $FF_1 = P_1R_1 = PR = \frac{w}{n}$ und $\sphericalangle P_1PR = \alpha_p$. In dem Dreiecke P_1PR

haben wir jetzt $\text{tg } \alpha_p = \frac{P_1R}{RP}$ und, wie vorher, $\text{tg } \alpha_p$

$= \frac{V_p}{H}$. Hieraus ist $\frac{P_1R}{PR} = \frac{V_p}{H}$ oder $P_1R = PR \frac{V_p}{H}$.

Nun ist aber $PR = \frac{w}{n}$ und $V_p = pG$, und deshalb P_1R

$= \frac{w}{n} p \frac{G}{H}$ oder $PR_1 = \frac{p}{n} w \frac{G}{H}$. In diese Gleichung

führen wir noch $G = \frac{V_n}{n}$ (aus $V_n = nG$) ein, dann

ist $PR_1 = \frac{p}{n^2} w \frac{V_n}{H}$. Was wir hier für den p ten Teil-

punkt durchgeführt haben, denken wir uns für alle Teilpunkte von P_0 aus vollzogen, dann zerfällt die Strecke P_0Q in p Strecken von der Art PR_1 bzw. QQ_1 , nur dass in der Formel für PR_1 der Reihe nach statt p die Zahlen 1, 2, 3 p auftreten. Die Formeln lauten

dann der Reihe nach $1. \frac{w}{n^2} \frac{V_n}{H}$, $2. \frac{w}{n^2} \frac{V_n}{H}$,

$p. \frac{w}{n^2} \frac{V_n}{H}$ und, wenn P_0Q mit x bezeichnet wird,

so ist $x = (1 + 2 + 3 + \dots + p) \frac{w}{n^2} \frac{V_n}{H} =$

$p \frac{(p+1)w}{1 \cdot 2 \cdot n^2} \frac{V_n}{H}$ (s. Einl. A 1.) oder $2wx = \frac{pw^2}{n}$.

$\frac{(p+1)w}{n} \frac{V_n}{H}$. Nun ist aber $\frac{pw}{n} = MF$ und $\frac{(p+1)w}{n}$

$= MF_1$ und, wenn wir n sehr gross, $\frac{w}{n}$ also sehr

klein setzen, so ist der Unterschied von MF und MF_1 so klein, dass wir sie beide einander gleich setzen und mit y bezeichnen können, ohne einen wesentlichen Fehler zu begehen. Dann lautet also unsere Gleichung:

$2wx = y \cdot y \cdot \frac{V_n}{H}$ oder $y^2 = 2w \frac{H}{V_n} x$. Hierin bezeich-

net x die Strecke P_0Q , y die Strecke QP oder MF , und die ganze Gleichung ist die Gleichung einer Kurve oder gekrümmten Linie, die man Parabel nennt. Eine solche Kurve erhält man z. B. [allerdings in umgekehrter Lage d. h. die Hohlseite nach unten gekehrt], wenn man einen Wasserstrahl schräg nach oben richtet.

Übersetzen wir das, was wir soeben ge-

funden haben, in die Praxis, so lautet es folgendermassen: Hängen wir eine horizontale, allenthalben gleich schwere Brückenbahn mit Hilfe von sogenannten Hängeeisen, die in gleichen Abständen zu beiden Seiten der Brückenbahn angebracht sind, an eine Kette oder ein Seil, dessen höchste Punkte in derselben Horizontale liegen, so nimmt die Kette bzw. das Seil die Form einer Parabel an, wenn die Schwere des Trägers (Seiles) gegenüber dem Gewichte der Brückenbahn als gering angesehen werden kann. Diese Art der Brückenkonstruktion wird als Hängebrücke bezeichnet. Figur 17 bietet die Ansicht einer solchen. Ist aber das Gewicht der Kette zu gross gegenüber dem Gewicht der ganzen Brücke, als dass man es vernachlässigen dürfte, so hängt die Kette nicht in einer Parabel, sondern in einer Kurve, die von der Parabel um so mehr abweicht, je geringer das Gewicht der allenthalben gleich schweren Brückenbahn gegenüber dem Träger ist. Hängt das Seil endlich ganz ohne weitere Belastung und ist es in allen Teilen gleich schwer, so nimmt die Kurve eine Gestalt an, die man als Kettenlinie bezeichnet. Die Behandlung dieser geht aber über die Grenzen hinaus, die dieser Abhandlung gesteckt sind.

§ 7. Kräfte-Polygon (-Dreieck).

Das Seilvieck hat uns gelehrt, dass, wenn das mit gleichen, symmetrisch verteilten Gewichten belastete Seil in gleichen Horizontalhöhen A und B angeknüpft ist, die an diesen Endpunkten auftretenden Spannungen S_n ihrer Grösse und Richtung nach als Diagonalen von Rechtecken erhalten werden, deren Vertikal-seite V_n gleich nG , deren Horizontal-seite gleich H ist. Da aber das Rechteck aus zwei rechtwinkligen Dreiecken besteht, so ist auch S_n die Hypotenuse eines solchen Dreiecks, dessen Katheten nG und H sind, und entsprechend ist S_p die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks mit den Katheten pG und H . Diese Dreiecke,

deren Seiten Kräfte darstellen, nennt man Kräfte-dreiecke; dieselben sind nur dann rechtwinklig, wenn die in Betracht kommenden Krafrichtungen auf einander senkrecht stehen, wie es hier mit V und H der Fall ist. Benutzen wir nun noch den Umstand, dass die Kräfte S mit entsprechenden Seilstrecken der Richtung nach übereinstimmen, so können wir mit Hilfe der Kräfte-dreiecke die entsprechenden Seilviecke konstruieren. Ein Beispiel wird dieses am besten erläutern: Sollen 13 gleiche Gewichte G mit gleichen Horizontalabständen an einem Seile angeknüpft werden, dessen Endpunkte A und B in gleicher Höhe liegen, so legen wir (Fig. 18a) eine vertikale Strecke $P_0P_{13} = 13G$ hin, errichten in ihrem Mittelpunkt D eine Senkrechte $DE = H$ und verbinden E der Reihe nach mit den Endpunkten $P_0P_1 \dots P_{13}$ der einzelnen G . Jetzt teilen wir (Fig. 18b) AB in 14 gleiche Teile $AQ_1 = Q_1Q_2 = \dots = Q_{13}B$, errichten in den Punkten Q auf AB Senkrechte und ziehen durch A und B Parallele zu EP_0 bzw. EP_{13} bis zum Schnittpunkt mit der ersten bzw. 13^{ten} Senkrechten; von diesem aus dann Parallelen zu EP_1 (EP_{12}) bis zur 2^{ten} (12^{ten}) Senkrechten u. s. w.; schliesslich treffen sich die von beiden Seiten fortschreitenden Parallelen auf der 7^{ten} Senkrechten, und wir haben so ein Seilvieck erhalten, welches bei weiterer Vermehrung der verwendeten gleichen Gewichte allmählich in eine Parabel übergehen würde.

Ist uns umgekehrt ein Seilvieck gegeben, so können wir dazu ein Kräftevieck konstruieren, dessen Seiten uns die Verhältnisse der auftretenden Spannungen (S) sowie der Vertikal (V)- und Horizontal (H)-Komponenten ergeben. Diese Kräftefigur wird nur dann ein Dreieck sein, wenn die am Seil angreifenden Kräfte einander parallel sind.

§ 8. Gewölbe-Konstruktionen.

Nachdem wir im Vorigen das Seil- und Kräfte-Vieck kennen gelernt, wenden wir uns

jetzt zum Gewölbe-Bogen, mit dessen einfachster Form wir uns schon bei Besprechung der Sprengwerke beschäftigt haben. Bei Verwendung zahlreicher Steine wäre unsere dreiseitige Fig. 14 in eine vielseitige übergegangen, welche sich irgend einer Kurve angeschmiegt hätte, wie sich das soeben konstruierte offene Vieleck der Parabel einfügt. In der Baukunst werden die unteren und oberen Gewölbe-Flächen innere und äussere Laibung genannt. Die Bezeichnung Gewölbe-Bogen könnte vielleicht zu der Ansicht verleiten, dass diese Laibungen gekrümmte Flächen sein müssten; es gibt jedoch auch Gewölbe [z. B. an den oberen Fensterbrüstungen mancher Häuser], deren Laibungen ebene Flächen darstellen (Fig. 19a). Das Gewölbe trägt sich dann durch die Keilform der Steine. Das Charakteristische des Gewölbes haben wir deshalb nicht in der Wölbung der Laibungen, sondern nur in der Divergenz bez. Convergenz der mehr oder weniger radialen Fugen zwischen den Gewölbesteinen zu sehen.

Die steinernen Brückenbogen werden entweder nach einem Halbkreise (Rundbogen Fig. 19b) oder nach einem Kreisbogenstück (Stich- oder Flachbogen Fig. 19c) oder nach einer Ellipse (Fig. 19d) oder nach einem Korbbogen (Fig. 20) konstruiert. Der Horizontalschub der im Altertume und Mittelalter zu Brückenbauten viel verwandten Rundbogen ist nicht sehr gross. (Näheres § 9.) Heute wendet man diesen Bogen im Brückenbau fast nur noch dort an, wo man grössere Höhen erzielen will, z. B. bei Aquädukten und Viadukten im engeren Sinne. Für Brückenbauten unter normalen Verhältnissen benutzt man ihn kaum noch, da sein Pfeilverhältnis (Höhe des Bogens zur Spannung) nur gleich $\frac{1}{2}$ ist. Infolgedessen müsste man bei nicht sehr hohen Ufern und wagrechter Brückenbahn viele stromverengende Bogen und Pfeiler oder bei wenigen Bogen eine stark ansteigende Fahrbahn banen.

Die Stichbogen geben, namentlich wenn sie sehr flach sind, einen bedeutenden Horizontal-

schub und erfordern deshalb, soweit nicht der Schub eines Bogens durch den der Nachbarn aufgehoben wird, starke Widerlager, aber sie haben ein sehr günstiges Pfeilverhältnis, beugen daher das Flussbett am wenigsten und werden aus diesem Grunde mit Vorliebe bei schiffbaren Strömen verwandt.

Die elliptischen Bogen stehen ihren Eigentümlichkeiten nach zwischen den beiden vorigen, werden aber im Brückenbau nur selten verwandt, sondern meistens durch die ihnen sehr ähnlichen Korbbögen ersetzt. Diese setzen sich aus einer Reihe von Kreisbögen zusammen, deren Radien vom Kämpfer her gegen den Scheitel zu wachsen. Figur 20 bietet eine schematische Darstellung der Hälfte eines solchen aus 9 Kreisbogenstücken zusammen gesetzten Korbbogens. Der Mittelpunkt M_1 des ersten Kreisbogenstückes AP_1 liegt auf der Kämpfer-Verbindungsline; der mittelste M_5 auf der Scheitelvertikalen BC ; die Mittelpunkte M_2, M_3, M_4 leiten von der ersten zur letzten Krümmung über und sind in unserem Beispiele so gewählt, dass ihre gegenseitigen Entfernungen einander gleich (d) sind. Die Centriwinkel der Kreisbogenstücke erfüllen hierbei die Gleichungen $\varphi_5 = \frac{1}{2}\varphi_4 = \frac{1}{3}\varphi_3 = \frac{1}{4}\varphi_2 = \frac{1}{5}\varphi_1$ und, da die Summe der φ gleich 90° ist, so ist $\varphi_5 = 6^\circ$. Durch die verschiedenen φ sind auch die Winkel $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ und durch φ, a, r_1 und d die Strecken $AR_1, P_1R_2, \dots, P_4R_5$, sowie P_1R_1 bis BR_5 gegeben und, da die Summe der ersteren die halbe Spannung, die der letzteren die Höhe h ergibt, so erhalten wir nach einigen Rechnungen hieraus die Gleichungen $d = 0,8913(w-h)$; $r_1 = 1,6643h - 0,6643w$. Hiermit sind dann auch r_2, r_3, r_4, r_5 gegeben und somit alles bestimmt.

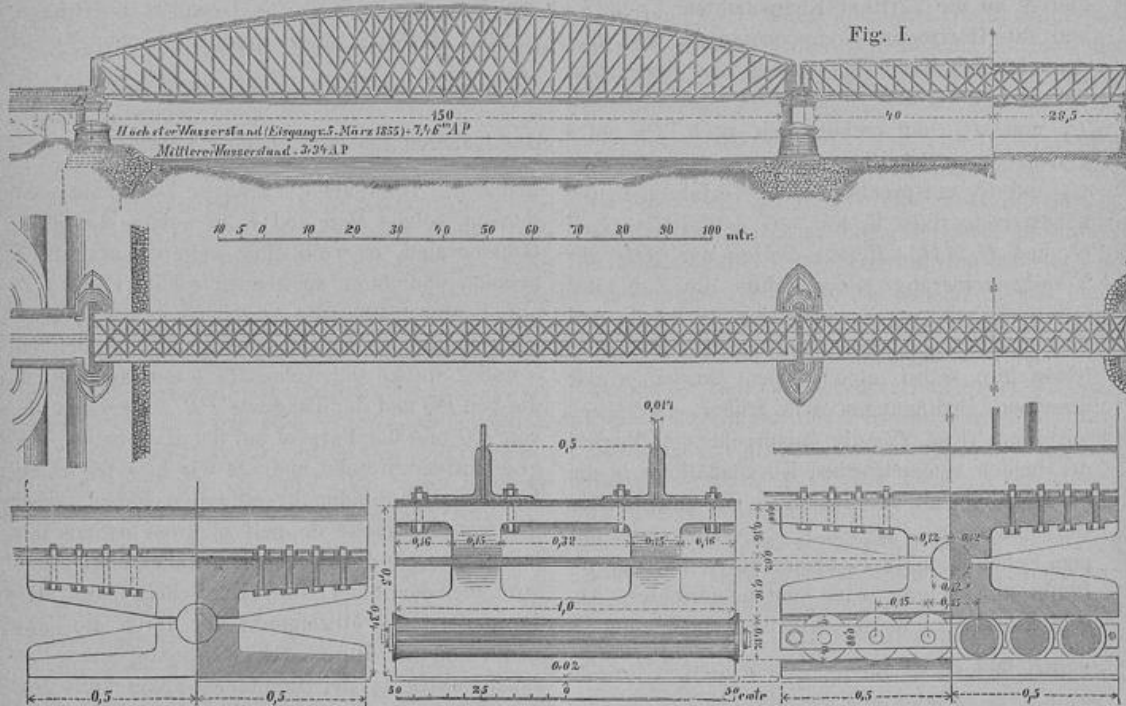
Ausser den genannten Gewölbebogen wird namentlich bei Eisen-Brücken gerne der Parabelbogen angewandt. Denken wir uns, um dessen Theorie kennen zu lernen, wir hätten ein Gewölbe, welches selbst schwerelos in gleichen Horizontalabständen von gleichen Schwer-

kräften angegriffen würde, so hätten wir abgesehen von der Krümmungsrichtung des Trägers wieder dieselben Bedingungen wie § 6 und, wie wir dort eine nach unten gekrümmte Parabel als Krümmungslinie erhielten, so können wir uns auch hier eine nach oben gekrümmte, aus entsprechend starken Stäben oder Platten gebildete Parabel als Brückenträger konstruiert denken. Eines der bekanntesten Beispiele dieser Art ist die Fachwerkbrücke über den Leek bei Kuilenburg in der Eisenbahnlinie Utrecht-Her-

der Untergurt aber gerade ist, so bezeichnet man diese Art der Träger als Halb-Parabel-Träger.

Da es wegen Uebertragung der Theorie des Seil- und Kräftevielecks auf die Gewölbelehre nicht unzweckmässig erscheint, wenigstens an einem Beispiele das Zutreffende dieser Uebertragung nachzuweisen, so wollen wir hier die Rechnungen von § 6 mit den erforderlichen Abänderungen für einen Gewölbobogen nochmals durchführen:

Ein offenes Fünfeck P_1 bis P_5 (Fig. 21),



zogenbusch, deren Spannung (150m) längere Zeit die grösste mit Balkenträgern *) erzielte war. Fig. 1 stellt die genannte Brücke dar (Näh. s. § 14 u. Fig. 23). Da hier nur der Obergurt gekrümmt,

*) Balkenträger nennt der Ingenieur diejenigen Brückenträger, welche nur einen senkrechten Druck auf die Widerlager, aber keinen Zug, wie die Hängebrücken oder Schub, wie die Stützbrücken (Sprengwerke und Bogenbrücken) ausüben.

welches aus vier schwerelosen, unbiegsamen, aber in den Endpunkten gelenkig verbundenen Stäben besteht, werde in einer Vertikalebene, die Wölbung nach oben, aufgestellt und in den Punkten P mit den Gewichten G_1 bis G_5 belastet. Gegen Verschiebungen aus der Vertikalebene soll unsere Figur auf irgend eine Weise gesichert sein.

Wir geben jetzt den Winkeln P_2, P_3, P_4

eine solche Lage und Grösse, dass das ganze System sich mit Hilfe zweier in P_1 und P_5 schräg nach oben wirkender Kräfte S_1 und S_5 im Gleichgewicht hält. Denken wir uns dann noch zwei, den vorigen entsprechende Stäbe hinzugefügt und geben diesen die Richtung von S_1 und S_5 , so können wir diese Kräfte an diesen Stäben beliebig verschieben, ohne das Gleichgewicht zu stören. Wir wählen die Angriffspunkte A und B jetzt so, dass ihre Verbindungslinie horizontal läuft, und zerlegen S_1 und S_5 in die Vertikal-Komponenten V_1 und V_5 und die Horizontal-Komponenten H_1 und H_5 ; dann können wir durch schrittweise Versetzung der Kräfte S_1 und S_5 nach P_1 und P_5 , nach P_2 und P_4 und schliesslich nach P_3 unter gleichzeitiger Beseitigung von G_1 und G_5 bezw. G_2 und G_4 entsprechend dem Verfahren in § 6 nachweisen, dass $V_1 + V_5 = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5$ und $H_1 = H_5 = H$ ist. Setzen wir jetzt zur Verallgemeinerung voraus, dass die Zahl der Gewichte sehr gross und gleich $2n$ würde und dass die Horizontalabstände sowie die Kräfte (Gewichte) selbst gleich seien, so haben wir dieselben Bedingungen wie früher. Versehen wir dann (Fig. 22) die entsprechenden Punkte der beiden symmetrischen Kurvenhälften, in die unser Seilvieleck übergegangen ist, mit gleichen Bezeichnungen $P_0 P_1 P_2 \dots P_n$, indem wir mit dem Scheitelpunkte P_0 beginnen, so hat der p^{te} Punkt die schräg nach unten gerichtete Angriffskraft S_p mit der Vertikalkomponente $V_p = pG$, und es ist $\text{tg } \alpha_p = \frac{V_p}{H} = \frac{pG}{H} = \frac{pV_n}{nH}$, da ja $V_n = nG$ und also $G = \frac{V_n}{n}$ ist. Füllen wir jetzt $PQ = y$ senkrecht auf die mittlere Vertikale MP_0 , verlängern S_p bis zum Schnittpunkte mit MP_0 in R und setzen $QR = z$, so ist $\text{tg } \alpha_p = \frac{z}{y} = \frac{pV_n}{nH}$, und daher $y \frac{p}{n} = \frac{H}{V_n} z$. Da aber $AB (= 2w)$ in $2n$ gleiche Teile geteilt und P der p^{te} Teilpunkt von P_0 aus ist, so ist $y = p \frac{w}{n}$

und $\frac{p}{n} = \frac{y}{w}$, und somit geht unsere Gleichung

$$y \frac{p}{n} = \frac{H}{V_n} z \text{ über in } y \frac{y}{w} = \frac{H}{V_n} z \text{ oder } y^2 = \frac{wH}{V_n} z;$$

dieses ist aber wieder die Gleichung einer Parabel. Hierdurch ist bewiesen, dass auch ein schwereloses Gewölbe, welches in gleichen Horizontalabständen von sehr vielen, gleichen Vertikal-Kräften angegriffen wird, die Gestalt einer Parabel annimmt, und zugleich ist für unser Beispiel nachgewiesen, dass die Beziehungen des Seilvielecks auf das Gewölbe übertragen werden dürfen. Aber unsere Gleichung $y^2 = \frac{Hw}{V_n} z$ sagt uns noch mehr, wenn wir sie mit der früheren Parabelgleichung $y^2 = 2 \frac{Hw}{V_n} x$ ver-

gleichen. Dass beide Parabeln kongruent sein müssen, sobald H, w und V_n in beiden dieselben Grössen sind, ist wohl ohne weiteres zuzugeben; nehmen wir dann auch noch solche Punkte P auf beiden, dass die zugehörigen y dieselben sind, so muss auch $z = 2x$ sein. Nun bezeichnen x und z Stücke der Achse MP_0 , und zwar ist z die von PQ und der Tangente PR , x dagegen die von PQ und der Parabel auf der Hauptachse abgeschnittene Strecke und, da wir hier für einen beliebigen Parabelpunkt gefunden haben, dass die erstere Strecke doppelt so gross ist, als die letztere, so gilt dieses für alle Parabelpunkte, und wir haben damit den Satz: „Der Scheitelpunkt der Parabel ist der Mittelpunkt der durch die Tangente und die Horizontale (Ordinate) eines Parabelpunktes, auf der Hauptachse abgeschnittenen Strecke“. Hieraus folgt, dass die in A angelegte Tangente AM_1 und die Horizontale AM auf der Mittel-Vertikalen eine Strecke $MM_1 = 2MP_0 = 2h$ herauschneiden, wenn h die Höhe des Scheitelpunktes der Parabel über der Kämpferlinie AB bezeichnet. Da aber die Tangente mit der Kraftrichtung S_n zusammenfällt und, wie diese, den Winkel α_n mit der Horizontalen bildet, so haben wir die beiden Glei-

chungen $\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{V_n}{H}$ und $\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{2h}{w}$ und hieraus

$H = V_n \cdot \frac{w}{2h}$. Nun bezeichnet V_n das Gewicht der an dem Parabelhalbbogen AP_0 hängenden Last, und wir brauchen dieses Gewicht somit nur noch mit einem Bruche, dessen Zähler die halbe Spannweite, dessen Nenner die doppelte Höhe des Bogens ist, zu multiplizieren, um den Horizontalschub zu erhalten.

Diesen Schub kann man nun auf die entsprechend stark konstruierten Widerlager (Pfeiler) nach Art der Sprengwerke wirken lassen, man kann ihn aber auch durch einen Unterzug wie bei den Hängewerken beseitigen. Gerne benutzt man in solchen Fällen als Unterzug den Streckbaum der Fahrbahn, der dann die gerade Verbindung von A und B darstellt. Diese Konstruktion wird als Bogensehnen-Träger bezeichnet. Beim Halb-Parabel-Träger (Fig. 23) liegt jedoch die Fahrbahn A_1B_1 unterhalb AB und, um sie trotzdem als Unterzug zu benutzen, bedürfen wir ausser den beiden Vertikalen noch der Streben AF bzw. BF_1 . Um die Spannung k , die in BF_1 , und den Druck d , der in BB_1 herrscht, zu berechnen, zerlegen wir k in die horizontale und vertikale Komponente $k \cos \beta$ und $k \sin \beta$, dann muss die Summe der Horizontalkräfte gleich Null sein, und hieraus ist $H = k \cos \beta$, $k = \frac{H}{\cos \beta}$. Als Ver-

tikalkomponenten haben wir zunächst V_n und dann $k \sin \beta = H \operatorname{tg} \beta$, so dass der in AA_1 und BB_1 herrschende Druck $d = V_n + H \operatorname{tg} \beta$ ist. Bei der Leckbrücke (Fig. I S. 15) sind von A und B je 3 Diagonalen zur Fahrbahn gezogen, die den Horizontalschub auf die Brückenbahn übertragen und dadurch beseitigen. Die übrigen Diagonalen dieses Trägers sind zum Ausgleich wechselnder ungleichmässiger Belastungen der Fahrbahn eingezogen und übertragen die Spannungen als nach innen wirkenden Schub auf den Obergurt und als nach unten wirkenden Druck auf die Vertikalen und wei-

terhin als nach aussen gerichteten Zug auf den Untergurt. Da aber im Ober- und Untergurt diese Kräfte nach der Mitte hin entsprechend den Verhältnissen beim Parallel-Fachwerkträger (§ 3) sich annähernd addieren, so sehen wir beide Gurte in unserer Abbildung nach der Mitte zu in zwei Absätzen entsprechend verstärkt.

§ 9. Stabilitäts-Untersuchung eines Gewölbe-Bogens.

Um ein Gewölbe auf seine Standfestigkeit zu untersuchen, bedient man sich am einfachsten der graphischen Methode, der auch wir hier folgen wollen:

Es sei ABB_1A_1 (Fig. 24a) die Hälfte eines Gewölbes mit der darauf ruhenden vertikal wirkenden Last. Wir teilen dann das Ganze durch Vertikalschnitte von gleichem Horizontal-Abstand in mehrere (hier 6) Abschnitte, bestimmen die Schwerpunkte der fast trapezartigen Teile und lassen in ihnen das jedesmalige durch Vertikal-Pfeile dargestellte Gewicht angreifen. Diese Gewichte, die sich annähernd verhalten wie die vertikalen Mittellinien der Trapeze, tragen wir der Reihe nach (von oben beginnend) auf einer vertikalen Geraden P_0P_6 (Fig. 24b) ab, errichten in P_0 eine Senkrechte, auf der wir (eine vorläufig noch nicht bestimmte Strecke) $P_0R = H$ abtragen. Den Endpunkt R verbinden wir dann der Reihe nach mit den Punkten P_1 bis P_6 und erhalten so das Kräfte-dreieck RP_0P_6 . Um hierzu das entsprechende Seilvieleck zu konstruieren, ziehen wir durch den Mittelpunkt M des Gewölbescheitels AB eine Horizontale bis zum Schnittpunkt C_1 mit der Richtung von G_1 ; sodann C_1C_2 parallel RP_1 ; C_2C_3 parallel RP_2 u. s. f., so dass die Punkte C_2, C_3, \dots, C_6 jedes Mal im Schnittpunkte mit der betreffenden Kraftrichtung G liegen. Geht bei dieser Konstruktion die letzte von C_6 zu RP_6 gezogene Parallele nicht durch die Mitte M_1 der Kämpferfläche A_1B_1 , so verkürzen oder verlängern wir $P_0R = H$ so weit,

bis dieses Ziel erreicht ist. Das Gewölbe gilt dann als richtig veranlagt, wenn das so gewonnene Seilvieleck mit allen seinen Strecken innerhalb des mittleren Drittels zwischen beiden Laibungen verläuft. Nähert es sich aber an einer Stelle der äusseren oder inneren Laibung mehr, tritt vielleicht gar aus einer Laibung heraus, so liegt die Gefahr vor, dass das Gewölbe an dieser Stelle nach aussen oder innen durchbreche, und der Baumeister wird dann dementsprechend flacher bzw. stärker wölben. Wünschenswert ist es natürlich, dass das Seilvieleck die Gewölbefugen und besonders die Kämpferfläche annähernd senkrecht treffe, weil sonst das Gewölbe das Bestreben zeigen wird, sich an den betreffenden Fugen zu verschieben. Bei den Rund- oder Halbkreisbogen ist es, wie eine einfache Ueberlegung lehren wird, unmöglich, das Seilvieleck senkrecht zur Kämpferfläche zu führen, weil sonst RP_6 (Fig. 24) vertikal und also parallel P_1P_6 sein müsste; dann würde aber entweder der Horizontalschub H gleich Null sein (und das ist unmöglich), oder es müsste P_0P_6 sehr gross, eigentlich unendlich gross sein, da sich Parallelen erst im Unendlichen schneiden. In den meisten Fällen wird es beim Rundbogen sogar unmöglich sein, mit dem Seilvieleck die Kämpferfläche zu erreichen, da das Seilvieleck meist schon früher aus der äusseren Laibung austreten wird. In diesen und ähnlichen Fällen hilft man sich dadurch, dass man dem Bogen schon oberhalb des Kämpfers ein Widerlager bietet, indem man z. B. bei zwei neben einander stehenden Bogen den Bogenzwickel d. h. den zwischen den äusseren Laibungen verbleibenden Raum durch Mauerwerk ausfüllt.

§ 10. Stabilität von Widerlagern.

Stellt uns der von lauter Rechtecken begrenzte, nur an der Kante DD_1 abgeschrägte

Körper AC_1 (Fig. 25) ein Widerlager dar, auf dessen schräger Fläche ein Gewölbe mit der Kraft S ruht, so wird diese Kraft bestrebt sein, das Widerlager um die Kante BB_1 mit dem Moment $S \cdot l$ zu drehen, wenn l die Länge der auf S und BB_1 stehenden Senkrechten bezeichnet. Andererseits setzt das im Schwerpunkt (Mittelpunkt) angreifende Gewicht G des Widerlagerkörpers dieser Drehung einen Widerstand entgegen, der von dem statischen Momente des Gewichtes G in Bezug auf BB_1 abhängt. Setzen wir die Länge der von der Kante BB_1 auf G gefällten Senkrechten gleich der halben Kantenlänge ($AB = a$), so ist das statische Moment von G in Bezug auf BB_1 gleich $G \cdot \frac{a}{2}$. Von der Grösse dieses statischen Momentes hängt offenbar die Standfestigkeit des Körpers ab, und man nennt kurz $G \cdot \frac{a}{2}$ selbst die Standfestigkeit und spricht den bezüglichen Satz in der Form aus: Ist die Standfestigkeit eines Körpers $G \cdot \frac{a}{2}$ in Bezug auf eine bestimmte Kante grösser als die Summe der statischen Momente der entgegenwirkenden Kräfte in Bezug auf dieselbe Kante, so vermögen diese Kräfte nicht, den Körper um diese Kante umzustürzen.

Auch hier ist es wie beim Gewölbe wünschenswert, dass die aus dem seitlichen Schub S und dem Gewichte G des Widerlagers gebildete Resultante R im mittleren Drittel des Körpers verläuft und also die Fundamentsohle im mittleren Drittel trifft, weil sonst der Verband des Materials über Gebühr in Anspruch genommen würde, mit anderen Worten EF (s. Fig. 25) muss kleiner als $\frac{1}{3} AB$ sein.

II. Teil.

Geschichtliche Entwicklung des Brückenbaues*).

§. 11. Begriff, Hauptbestandteile und Einteilung der Brücken.

Jede Vorkehrung, welche dazu dient, einen Weg (Strasse, Eisenbahn, Wasserlauf) über einen anderen Weg, ein stehendes oder fließendes Gewässer oder ein Thal hinwegzuführen, kann man im allgemeinsten Sinne als Brücke bezeichnen. Je nachdem dann Landwege (Strassen, Eisenbahnen) oder Wasserwege hinübergeführt werden, zerfallen die Brücken in Viadukte (Strom- und Kanalbrücken, Durchlässe, Ueberführungen) und Aquädukte (Brückenkanäle, Wasserleitungen).

Die Brückenkanäle findet man in Ländern wie Holland, wo das Kanalbett oft in Brückenform über die tiefer gelegene Landstrasse hinweggeführt wird, aber auch in Gebirgsgegenden, in denen die Eisenbahnlinien zuweilen gegen Ueberflutungen durch brückenartige Ueberführungen der Wasserläufe gesichert werden müssen. Die Aquädukte im engeren Sinne, die Wasserleitungen, sind Bauten, welche im Altertume dazu dienten, oft aus weiter Ferne Wasser auf einer schiefen Ebene über Berg und Thal zu den Städten und Lagern zu führen. Sie sind oft bewunderungswürdige, aber fast immer sehr kostspielige Werke, welche in moderner Zeit durch die sich dem Boden anschmiegenden, meist unterirdischen Röhrenleitungen ersetzt sind, in denen das Wasser nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren dahinströmt.

Wenn wir von den aus einem einzelnen

*) Die dem Texte eingefügten Figuren sind mit den Ziffern I, II... bezeichnet, während sich die Nummern 1, 2... auf Figuren beziehen, die sich am Schlusse der Abhandlung vorfinden.

Baumstamme, einem Brette, einer Steinplatte u. s. w. gebildeten Uebergängen absehen, so besteht fast jede Brücke (Viadukt) aus folgenden drei Hauptteilen:

1. den Pfeilern, welche den Brückenträgern die nötigen Unterstützungspunkte bieten und dabei oft neben dem Drucke derselben auch ihren Zug oder Schub in besonders konstruierten Widerlagern aufnehmen. Zugleich haben sie dem Drucke der hinterlagernden Erdmassen (bei Landpfeilern) bzw. des Stromes, der Wellen und des Eises (bei Strompfeilern) Widerstand zu leisten.

2. den Brückenträgern, die mindestens doppelt vorhanden sind und mittels Quer- und Zwischenverbindungen (Windversteifung) gegen Umfallen durch seitlichen Druck gesichert werden. Ihre Aufgabe ist es, die Fahrbahn zu tragen.

3. der Brücken- oder Fahrbahn, welche den Verkehr aufzunehmen hat und meist aus dem Streckbaum und den darauf gelagerten Balken, Bohlen, Brettern oder Platten besteht. Bei grösseren Brücken wird die Fahrbahn im engeren Sinne von einer besonderen Fahrbahnkonstruktion getragen, die sich ihrerseits auf die Brückenträger stützt.

Träger und Fahrbahn vereinigt man wohl unter der Bezeichnung Ueberbau gegenüber den Pfeilern als Unterbau.

Als das Wichtigste der ganzen Brücke betrachtet man die Brückenträger, und das Material, aus dem sie gebildet, dient zur Bezeichnung der ganzen Brücke, so dass z. B. eine Brücke, deren Pfeiler aus Stein, deren Fahrbahn aus Holz, deren Träger aber aus Eisen gebildet sind, eine eiserne Brücke genannt wird.

Bei grösseren Brücken, für deren Spannweite nicht mehr die einfache Länge eines Balkens ausreicht, wird der Träger aus horizontalen, schrägen und senkrechten Stäben, Balken oder Platten zusammengesetzt, wie Fig. 8—12 im Anhang dieses zeigt. Die horizontalen Teile nennt man die Gurte (Ober- und Untergurt), die schrägen und senkrechten Stäbe bilden den Steg (vergl. S. 9).

Man unterscheidet ferner feste und bewegliche Brücken. Zu den beweglichen gehören namentlich die Schiffbrücken und fliegenden Brücken (Ponten, Fähren), deren einfacher, billiger Aufbau und Abbruch sie besonders verkehrsarmen Gegenden oder kriegerischen Zeiten empfahl. Ferner rechnen hierher die Zug-, Dreh-, Roll- und Hubbrücken; erstere meist an Zugängen zu Verteidigungswerken, die anderen vornehmlich mit Rücksicht auf den Wasserverkehr, die Durchfahrt von Schiffen etc. konstruiert. Die einfachsten beweglichen Brücken, die auch im Kriege oder in unkultivierten Ländern zu vorübergehenden Zwecken gerne benutzt werden, sind die Flossbrücken. Ein bekanntes Beispiel bietet die nach Xenophons Erzählung von einem Griechen projektierte, aber wegen der Nähe des Feindes nicht ausgeführte Brücke über den Tigris (Anabasis III, 5) deren Träger aufgeblasene schwimmende Tierfelle sein sollten.

Die festen Brücken teilt man der Konstruktion der Brückenträger nach ein

a) in Hängebrücken (s. § 6), wenn die Brückenbahn an Drahtseilen oder Ketten aufgehängt ist und die Widerlager und Pfeiler mithin auf Druck und Zug beansprucht werden.

b) in Stützbrücken, wenn Sprengwerke (s. § 5) oder Bogen und Gewölbe (s. § 8, 9) zur Unterstützung der Fahrbahn dienen und somit auf die Widerlager sowohl ein Druck als auch ein Schub ausgeübt wird.

c) in Balkenbrücken, wenn die Brückenträger auf die Widerlager nur mit senkrechtem

Drucke wirken. Die Brückenträger können hierbei einfache gerade Balken oder geradlinige, balkenartig ausgebildete Hängewerke oder Fachwerke (Parallelwerke; s. § 3 und 4) sein. Sie können aber auch einen gekrümmten Obergurt bei geradem Untergurt (Bogensehnenträger und Halbparallelträger s. § 8 Fig. I) oder umgekehrt einen gebogenen Untergurt bei geradem Obergurt (Fischbauchträger) besitzen; oder endlich sind beide Gurtungen gekrümmt, und der Träger zeigt linsenförmige Gestalt (s. Fig. IX). Das Charakteristische für alle Balkenträger ist aber, dass der Schub im Obergurte und der Zug im Untergurte sich gegenseitig aufheben, so dass die durch den Windverband zu einem hohlen Balken vereinigten Träger an den Enden fast nur senkrechten Druck ausüben.

Die vorstehend gemachten Unterscheidungen lassen sich in der Praxis nicht überall streng durchführen, da manche Brückenkonstruktionen als Kombinationen der genannten Gattungen sich darstellen.

§ 12. Der Brückenbau im Altertum.

Die älteste Holzbrücke mit festen Pfeilern, von der uns (abgesehen von Ost-Asien) die Geschichte Kunde gibt, ist die Euphratbrücke bei Babylon mit Trägern aus beschlagenen Cedern- und Cypressenbalken, die wahrscheinlich zur Sicherung gegen nächtlichen feindlichen Ueberfall zum Teil als Zugbrücke eingerichtet war. Herodot, der die Brücke selbst gesehen, erzählt, dass die Steinpfeiler im Flussbette aufgemauert seien, nachdem dieses durch Ableitung zeitweise trocken gelegt war.

Als erste Steinbrücken des Westens haben wir die Kragsteinbrücken in Aegypten und Griechenland anzusehen, von der unsere Abbildung (Fig. 26) ein Beispiel aus Sparta (Eurotas-Fluss) bietet. An Stelle der erst später in den Brückenbau eingeführten Gewölbe finden wir hier den zu überbrückenden Zwischenraum durch überkragende Steinschichten trichterförmig

geschlossen. (Es ist dasselbe System wie bei dem Löwenthor zu Mykene). Neben diesen festen Brücken finden wir in historischer Zeit andere Brücken erwähnt, wie die Schiffbrücken des Darius und Xerxes über Bosporus und Donau bezw. über den Hellespont (Herodot IV 88, 89; VII 33—36), desgleichen Pfahlbrücken wie Pons sublicius (Liv. I 33, II 10) und die Rheinbrücken Caesars (Bell. Gall. IV 17; VI 9).

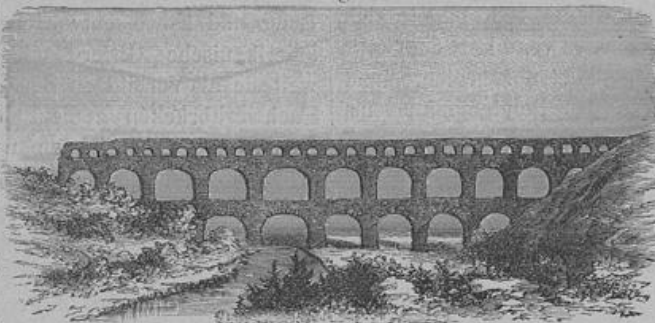
Einen mächtigen Aufschwung nahm der Brückenbau durch die namentlich bei den Römern erfolgte Einführung des Gewölbebogens*). Ihr verdankt man Steinbrücken, welche trotz ihres hohen Alters heute noch benutzt werden, wie die Aemilius-, Fabricius- (s. Fig. 27) und Aelius-(Engels)-Brücke in Rom über den Tiber und die schöne Marmorbrücke des Augustus zu Rimini, die 72 m lang mit 5 Bogen die Marecchia überspannt. Die Brücken dieser Zeit benutzen sämtlich den nach jetziger Auffassung nicht sehr günstigen Halbkreisbogen. Daher haben sie und namentlich die Pfeiler für unser Auge meist etwas Schwerfälliges, da die Spannweite gegenüber der Bogenhöhe (2:1) nur gering ist. Eines der interessantesten Bau- und Denkmäler im Brückenbau jener Zeit ist die Donaubrücke des Trajan, erbaut von Apollodor im Dakerkriege in 18 Monaten unterhalb der Stromschnellen von Orsova. Die von Apollodor gelieferte Beschreibung ist verloren gegangen, dagegen eine, wenn auch verkürzte, Abbildung

*) Bei den Gewölben unterscheidet man die meist gekrümmten äusseren und inneren Begrenzungsflächen als äussere und innere Laibung; die an die Widerlager anschliessenden Steine des Gewölbes heissen Kämpfer, der im Scheitel befindliche ist der Schlussstein (vergl. § 5 u. 8).

auf der Trajan-Säule uns erhalten geblieben. Die riesigen Pfeiler, 160 Fuss hoch und 60 Fuss dick, wurden unter zeitweiliger Trockenlegung des Flussbettes mittels Fangdamm gegründet; sie bestehen im Inneren aus mächtigen Eichenstämmen, aussen aus Quadern und dazwischen Mörtel. Die Reste einiger sind noch jetzt erhalten. Die Bogen, hölzerne Sprengwerke, waren aus Balken mit der bedeutenden Spannweite von 110 Fuss hergestellt.

Eine sehr ausgedehnte Anwendung fand der Gewölbebogen in den zahlreichen Wasserleitungen (Aquädukten), die oft mehrere Bogenreihen über einander aufweisen. Unsere Abbildung (Fig. II) zeigt den wahrscheinlich von dem Feldherrn Agrippa (63—13 v. Chr.) errichteten Aquädukt von Nîmes (Pont du Gard), welcher als eines der kühnsten und architektonisch schönsten Bauwerke der Römer angesehen wird. Er besteht aus zwei höheren und einem niederen Stockwerk; seine grösste

Fig. II.



Bogenweite beträgt 24,4, seine grösste Höhe über der Flusssohle 48 bis 49 m.

§ 13. Bau von Holz- und Steinbrücken in Mittelalter und Neuzeit.

Mit der Zertrümmerung der abendländischen Kultur durch die Zerstörung des weströmischen Reiches verfällt auch die Baukunst und mit ihr der Brückenbau; zwar rühren von den Goten noch einige Aquädukte her, wie der durch Theoderich in Umbrien bei Spoleto erbaute, welcher sich durch eine bei seiner gewaltigen Höhe (77 m) geringe Pfeilerstärke (sie nimmt ab von 12,3 bis 9,6 m) auszeichnet und deshalb wohl mit Recht die Bezeichnung „kühn“ verdient. Ebenso wurden auch im Mittelalter in den auf-

blühenden Städten viele Gewölbe-Brücken gebaut z. B. die alte Moselbrücke bei Coblenz (1334 vollendet), die berühmte Rialto-Brücke in Venedig (1587—91 erbaut). Es ist sogar ein bedeutender Fortschritt darin zu erblicken, dass man von dem früher ausschliesslich benutzten Halbkreisbogen zu flacheren Bogen überging, deren Pfeil-Verhältnis*) wie bei der Fleischbrücke in Nürnberg selbst bis 1:8 geht, und deren Pfeiler sich durch bei weitem schlankere Gestalt auszeichnen, aber dieser Fortschritt ist doch, namentlich in Anbetracht der langen Zeit und der Weiterentwicklung der übrigen Architekturzweige, ein sehr geringer zu nennen.

Ein Aufblühen der gesamten Ingenieurwissenschaften geht von Frankreich und besonders von Colbert aus. Dort wurde 1671 die Akademie der Baukunst gegründet, 1720 bildete sich durch staatliche Massnahmen veranlasst das Corps der wissenschaftlich gebildeten Ingenieure, und 1794 bzw. 95 wurde das Polytechnikum ins Leben gerufen, dem Frankreich es verdankt, wenn es lange Zeit an der Spitze der mathematisch-technischen Entwicklung Europas stand**).

Von den vielen Brückenbauten dieser Zeit gilt als die hervorragendste Steinbrücke die 1768—74 von Peronnet bei Neuilly über die Seine erbaute (s. Fig. 28), deren fünf Korbbogengewölbe (s. § 8 u. Fig. 20) an den Ecken mit Abschrägungen, sogenannten Kuhlhörnern versehen sind. Das Pfeilverhältnis beträgt hier 1:4, bei der Brücke zu St. Maixent (1774—84) mit 3 Segmentbogen sogar 1:12. Die weiteren in

*) Unter Pfeilverhältnis versteht man das Verhältnis von Höhe des Bogenseitels über der Verbindungslinie der Widerlager zu der Länge dieser Linie.

***) Der Einfluss dieser Schule zeigt sich noch heute in Frankreich einmal in der grossen Zahl ehemaliger Schüler, die leitende Staatsämter bekleiden, und zum anderen in dem Stolz, womit diese sich *élève ancien de l'école polytechnique* (z. B. Präsident Carnot) nennen.

dieser Zeit in den übrigen europäischen Staaten gebauten Brücken müssen wir hier übergehen.— Auch die Holzbrücken zeigen von dieser Zeit an einen bedeutenden Fortschritt einmal in der Vergrösserung der Spannung bei geraden Balkenträgern (Limmat-Brücke in der Schweiz mit 118—119 Fuss Spannung) und zum anderen in der Anwendung der aus Holzbalken gebildeten Bogen als Träger der Fahrbahn. Die Abbildung (Fig. 29) zeigt als Beispiel eine hölzerne Eisenbahnbrücke, Cascade-Brücke genannt, in der Erie-Bahn (Amerika), erbaut 1848/49 von Brown. Die Anregung zu diesen hölzernen Bogenbrücken war von deutschen Ingenieuren (Wiebeking) ausgegangen.

Die wichtigste Art der Holzbrücke aber ist die Town'sche Lattenbrücke bezw., die von Long und Howe entworfene und ausgebildete amerikanische Gitter- oder Fachwerkbrücke, weil sie als Vorbild zu den eisernen Gitter- und Fachwerkbrücken gedient haben, die wir als Parallelwerke bezeichnen und die eine grosse Bedeutung im Brückenbau besessen haben und noch besitzen. Die Abbildung (Fig. 30) zeigt die Howesche Fachwerkbrücke über den Chikapöe in der Connecticutbahn. Die Träger dieser Holzgitterbrücken bestehen aus dem horizontalen Ober- und Untergurt und einem vertikalen aus geraden und schrägen nach Art des gleichschenkligen Dreiecks zusammengesetzten Stege (s. § 4).—Auch bei diesen Brücken können wir nicht lange verweilen, weil ihre Bedeutung für uns, wenn wir von ihrem historischen Werte absehen, gering ist. Für die Hauptteile definitiver Brücken in Eisenbahnlinien ist (für Deutschland wenigstens) seit dem bezüglichen Beschluss der Eisenbahn-Verwaltungen vom Jahre 1859 das Holz ausgeschlossen, und auch bei bedeutenderen Strassenbrücken wird man in Deutschland kaum noch das Holz als Brückenträger verwenden, seitdem die Technik der Eisenindustrie eine so bedeutende Höhe erreicht hat. Die Amerikaner allerdings bauen trotz der ge-

ringeren Betriebssicherheit noch fortgesetzt Holzbrücken, wo die örtlichen Umstände dadurch erhebliche Ersparnisse an den Baugeldern ermöglichen.

Die Eigenschaften der Holz-, Stein- und Eisenbrücken lassen sich im allgemeinen kurz folgendermassen charakterisieren:

Die Holzbrücken sind am schnellsten und in holzreichen Gegenden am billigsten zu bauen; aber ihre Betriebssicherheit namentlich gegen Feuersgefahr und Einbruch ist nicht sehr bedeutend.

Die Steinbrücken gewähren die grösste Sicherheit und Dauer, aber Bauzeit und Baukosten sind sehr beträchtlich.

Die Eisenbrücken vereinigen im allgemeinen die guten Eigenschaften beider, also Billigkeit und Schnelligkeit im Bau, Sicherheit und Dauer im Betrieb, und daher wendet sich der Brückenbau seit Beginn des Eisenbahnbaues in steigendem Masse dem Bau eiserner Brücken zu.

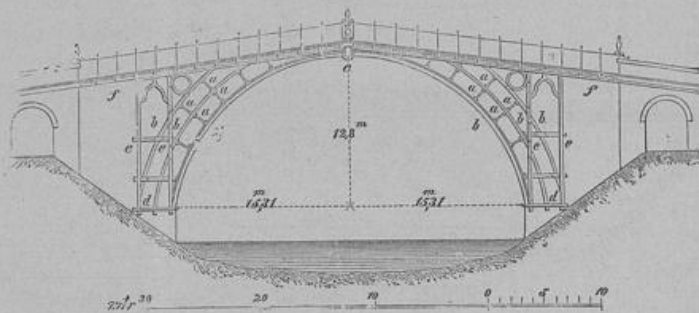
§ 14. Der Bau eiserner Brücken.

Die Entwicklung der eisernen Brücken ist aufs engste verknüpft mit der des Eisengewerbes. Solange die erzeugten Eisenmengen (und zwar war es zuerst das Schmiedeeisen, welches im Altertum und Mittelalter im sogenannten Rennverfahren*) gewonnen wurde), noch gering waren, konnte man nicht daran denken, das Eisen für grössere Brücken in Anspruch zu nehmen. Erst als man ungefähr seit 1740 gelernt hatte, im Hohofenprocess unter Verwen-

*) Das Rennverfahren bestand darin, dass man die Eisenerze mit Holz- oder Steinkohlen gemischt in einem Windofen erhitzte und die sich dabei bildende schwammige Masse von Schmiedeeisen ausschüttete. Dasselbe Verfahren (im wesentlichen) fand Livingstone im Innern Afrikas; es ist aber nur in kleinem Massstabe und mit reichen Erzen ausführbar.

dung von Steinkohlen grosse Mengen Roh- oder Gusseisen herzustellen, und namentlich, seitdem durch Einführung des Cylindergebläses um 1760 die Feuerungsmethode bedeutend verbessert war, waren die Vorbedingungen für den Bau eiserner Brücken geschaffen. Daher sehen wir, dass kaum 13 Jahre nachher die ersten Eisenbrücken hergestellt werden und zwar aus Gusseisen, welches für die nächsten 70 Jahre das Hauptbaumaterial der Eisenbrücken blieb. Wir können diese Periode deshalb als die Zeit der Gusseisenbrücken bezeichnen. — Der Hohofenprocess liefert im allgemeinen zwei Sorten Gusseisen,

Fig. III.



das weisse und das graue. Ersteres enthält den Kohlenstoff, der das Roheisen leichter schmelzbar macht, in chemischer Verbindung, letzteres zum Teil wenigstens nur als Beimengung (Graphit). Das weisse Gusseisen ist spröde und für die Technik wenig verwendbar, aber aus ihm kann das Schmiedeeisen hergestellt werden, welches fast reines Eisen darstellt und schwer schmelzbar ist. Das graue Gusseisen dagegen zeigt genügende Festigkeit und Elasticität, um zu technischen Zwecken Verwendung zu finden, solange die Ansprüche in dieser Beziehung mässig sind. Daher sind auch die ersten Eisenbrücken aus diesem grauen Gusseisen hergestellt.

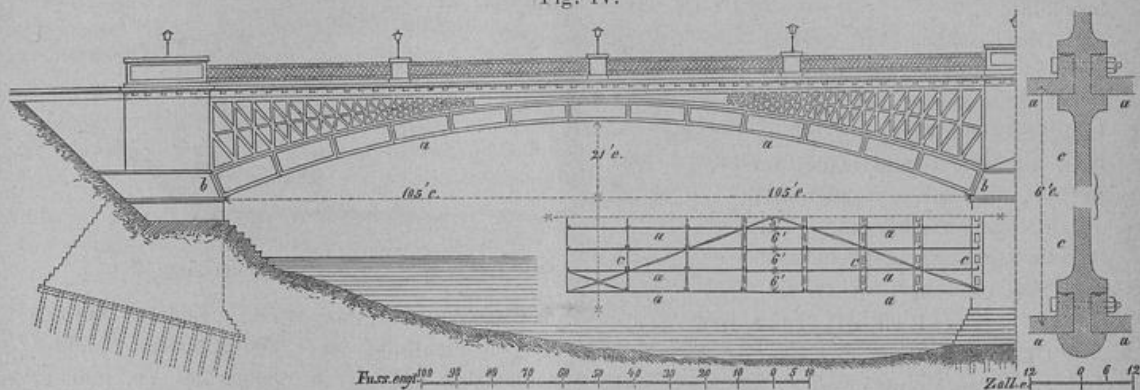
Als erste gusseiserne Brücke gilt die 1773—79 von den englischen Hüttenmeistern John Wilkinson und Abraham Darley nach eigenen Entwürfen über den Severn zu Coalbrookdale

mit 30,62 m Spannweite und 12,8 m Bogenhöhe nach dem Principe der Gewölbebrücken ausgeführt. Wie unsere Abbildung (Fig. III Seite 23) zeigt, besteht der Träger aus drei parallelen Bogen, die durch senkrecht zur Bogenfläche verlaufende Bolzen verbunden und versteift sind. Der mittelste Bogen besteht aus zwei im Scheitel zusammenstossenden und in einem Gusse hergestellten Stücken. Die im Gusse so grosser Stücke liegende Schwierigkeit umging man später dadurch, dass man die Bogen aus einzelnen Segmentplatten zusammensetzte, die an den Enden an besondere, die Bogen senkrecht durchschneidende Gusseisenplatten angeschraubt wur-

bedeutendste Vertreterin der Gusseisenbrücken in Deutschland war die Eisenbahnbrücke über die Kinzig bei Offenburg mit 5 Bogen zu 12,66 m Spannweite und 0,12 m Pfeilhöhe. Dieselbe stürzte jedoch in Folge Unterwäsung der Fundamente im Jahre 1851 ein.

Auch in den übrigen Ländern Europas wurden zahlreiche gusseiserne Bogensprengwerkbrücken, ähnlich den vorher erwähnten, erbaut. Von diesen wollen wir nur die Louvre-, die Austerlitz- und die Carousselbrücke zu Paris anführen, da man sie wohl in Beschreibungen der französischen Hauptstadt erwähnt findet. Selbst in den Jahren 1858/59 bzw. 1860/61

Fig. IV.



den. Auf diese Weise ist die bei London über die Themse führende Southwarkbrücke gebaut, die unsere Abbildung (Fig. IV) zeigt. Die Brücke wird getragen von 8 Bogen, von denen jeder aus 13 Segmentplatten besteht. Unsere Abbildung gibt in der Hauptfigur nur einen Bogen, die beigefügten Zeichnungen zeigen aber die Verbindung der Segmentplatten (a) mit den, allen Bogen gemeinschaftlichen, Verbindungsplatten (c) sowie die Diagonal-Versteifungen der Bogen unter sich. Die erste Gusseisenbrücke auf deutschem Boden ist die über das Striegauer Wasser zu Laasen in Schlesien, welche 1794 erbaut wurde und, abgesehen von einer viel geringeren Pfeilhöhe, in der Konstruktion viel Aehnlichkeit mit der oben abgebildeten Severn-Brücke hat. Die

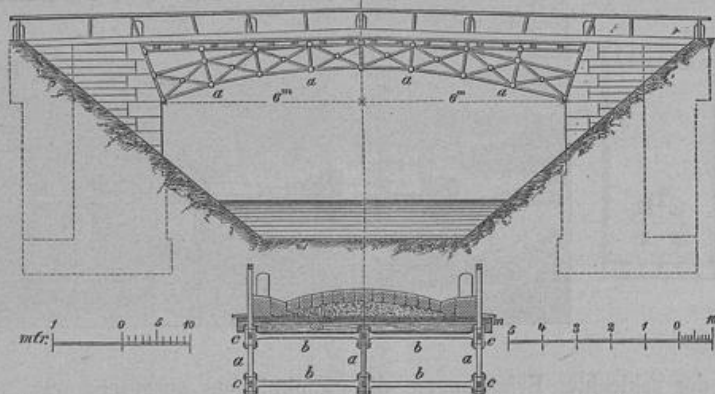
wurden in Paris noch zwei Gusseisen-Brücken, die Solferino- und St. Louis-Brücke, letztere mit 64 m Spannweite, erbaut. Neben den Bogensprengwerkbrücken finden wir aber auch zahlreiche kleinere Eisenbahnbrücken und Uebergänge, deren Träger gerade oder an der Unterseite gewölbte gusseiserne Balken sind, sowie auch Hänge- und Hängsprengwerkbrücken.

Es zeigte sich aber bald, dass das Gusseisen unter den Stößen, wie sie ein grösserer Verkehr, und namentlich der Eisenbahnverkehr mit sich bringt, eine Umwandlung in seiner Struktur erleidet, welche am meisten in den auf Zug beanspruchten Teilen, also besonders im Untergurt, die Tragfähigkeit in kurzer Zeit wesentlich vermindert. Daher ging man schon

zu Beginn der dreissiger Jahre dazu über, die auf Zug beanspruchten Teile der Brückenträger aus dem eine hohe Zugfestigkeit besitzenden Schmiedeeisen herzustellen, und würde diese Kombination von Gusseisen für die auf Druck, und von Schmiedeeisen für die auf Zug beanspruchten Brückenteile noch lange benutzt haben, wenn nicht die ungleichmässige Längenausdehnung beider Eisensorten bei Temperaturveränderungen, sowie die beim Giessen leicht auftretenden Fehler allmählich dazu gedrängt hätten, von dem Gusseisen überhaupt abzusehen und sich ganz dem Schmiedeeisen zuzuwenden. Wir können daher die Zeit der gemischteisernen Brücken — für Europa wenigstens — als eine Uebergangsperiode betrachten, während der ameri-

Frischprozess in reines Eisen (Schmiede- oder Schweisseisen) umgewandelt, indem man es wiederholt durch ein Holzkohlenfeuer niederschmelzen und dabei durch einen Windstrom hindurchtropfen liess, in dem vornehmlich die Beimengungen, besonders der Kohlenstoff, verbrannt wurden. Der Ersatz der durch den wachsenden Bedarf immer seltener werdenden Holzkohle durch Steinkohle oder Koks hatte sich bei diesem Verfahren als unthunlich erwiesen, da die eigenen Verunreinigungen der letzteren eine Reinigung des Eisens nicht zulieszen. Nachdem von Henry Cort angegebenen Verfahren erzielte man jedoch die Verbrennung der Nebenbestandteile des Roheisens und dadurch die gewünschte Bildung der Schlacke, indem man nur die Flam-

Fig. V.



kanische Brückenbau noch längere Zeit sich des besseren Gusseisens, das nur aus den reichsten und besten, z. T. im Raubbau gewonnenen Erzen erschmolzen wurde, bediente.

Den Uebergang von den gusseisernen zu den schmiedeeisernen Brücken finden wir vorbereitet in den Fortschritten, die das Eisengewerbe inzwischen durch die Ausbreitung und Verbesserung des 1784 von Henry Cort angegebenen Puddelverfahrens gemacht hatte. Nachdem das alte Rennverfahren verlassen, hatte man nämlich das Roheisen im sogenannten

mengase von Steinkohlen- oder Koks-Feuern im Puddelofen auf die geschmolzenen Roheisenmassen einwirken liess, ohne dass mangels einer direkten Berührung zwischen Feuermaterial und Eisen eine neue Verunreinigung des letzteren stattfinden konnte. Die Darstellung des Schmiedeeisens wurde dadurch viel billiger und bei dem Ueberfluss an Steinkohlen bzw. Koks konnte man jetzt beliebig grosse Mengen Schmiedeeisen darstellen.

Es war also im wesentlichen eine Verbesserung der Feuerungstechnik, welche die Her-

stellung von schmiedeeisernen Brücken und damit die zweite Periode des Baues eiserner Brücken ermöglichte.

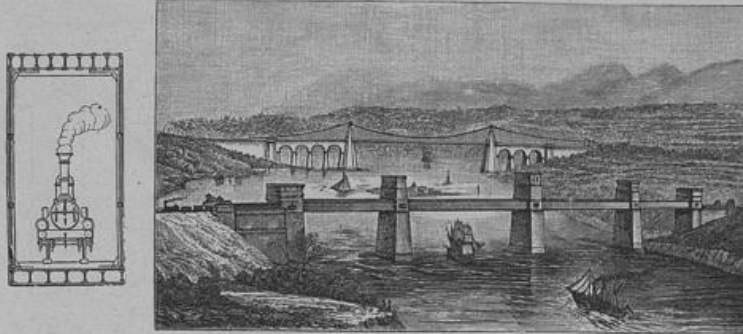
Die eigentliche Triebfeder zu diesem Uebergange aber haben wir im Eisenbahnbau und in den grossen Anforderungen zu suchen, die der Bahnbetrieb an die Technik des Brückenbaues sowohl in Bezug auf die Zahl und Grösse, als auch die Sicherheit der Brücken stellt. Zu keiner Zeit hat ja der Brückenbau einen solchen Aufschwung genommen wie bei der Ausbreitung der Eisenbahnen.

Als erste Schmiedeeisen-Brücke gilt die 1808 über den Crou bei St. Denis gebaute kleine Brücke (s. Abbildung Fig. V S. 25). Man hatte bei ihr das Gusseisen ganz ausgeschlossen, ver-

die ganz aus Kesselblech und zwar in Form einer Röhre oder eines Tunnels von rechteckigem Querschnitte auf Grund eingehender Festigkeits-Untersuchungen gebaut wurde, ist die Britannia-Brücke, und sie verdankt demselben Stephenson ihre Erbauung, dessen 1829 preisgekrönte Lokomotive das Zeitalter des Eisenbahnbaues eröffnete.

Die Brücke liegt in der Chester-Holyhead-Eisenbahn und überschreitet die die Insel Anglesey von Nordwales trennende Menai- Meerenge mit drei Strompfeilern (s. Abbild. Fig. VI), deren mittelster, auf dem Britannia-Felsen erbaut, der ganzen Brücke den Namen „Britannia-Brücke“ gegeben hat. Die auf Druck beanspruchte Decke (Obergurt) der Röhre, welche der Gefahr des

Fig. VI.

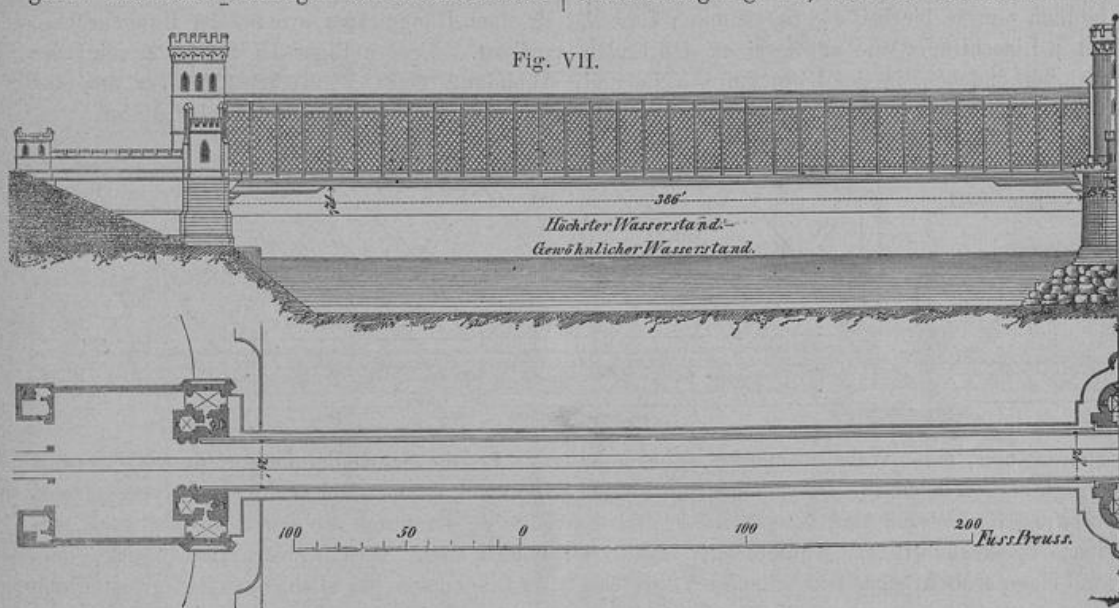


mutlich wegen der schlechten Erfahrungen, die man mit diesem beim Bau der Austerlitzbrücke durch Bruch und Senkung einiger gusseiserner Wölbstücke gemacht hatte. Dieses Beispiel blieb jedoch lange ohne Nachfolge, und erst als 1846 englische Ingenieure erklärt hatten, dass das Schmiedeeisen in der Form der Kesselbleche nicht nur mehr Sicherheit, sondern auch wegen der Materialersparnis gegenüber den grossen Gusseisenbarren in Folge der erwähnten Verbesserung der Eisentechnik grössere Billigkeit gewähre, begann man kleinere, namentlich bewegliche Eisenbahn-Uebergänge aus Kesselblech herzustellen. Die erste grosse Brücke,

Einknickens ausgesetzt war, sowie der auf Zug beanspruchte und in erster Linie durch den Eisenbahnverkehr belastete Boden (Untergurt) der Röhrenbrücke ist, wie der der Abbildung beigefügte Querschnitt zeigt, doppelt und durch vertikale Zwischenwände oben in acht, unten in sechs Röhren von annähernd quadratischem Querschnitte geteilt von einer Weite, dass ein Mann gerade hindurchkriechen kann; die Seitenbleche (Steg) wurden durch aufgenietete, die Fugen bedeckende T-Eisen gegen Einknickern gesichert. Ausserdem brachte man noch über den Pfeilern zur Versteifung gusseiserne Rahmen im Inneren der Röhre an. Die mittleren Oeff-

nungen haben eine lichte Spannweite von 139,5 m, die Seitenöffnungen von 70,5 m bei einer Höhe des Kastens von (rund) 9 und einer Breite von 4,5 m. Die Röhren wurden für jede Oeffnung am Lande erst zusammengesetzt, auf Schiffen an Ort gebracht und durch hydraulische Pressen an ihre Stelle gehoben. Um die durch Temperatureinflüsse bedingten Längenänderungen ungestört sich vollziehen zu lassen, liess man ein Ende jeder Röhre frei beweglich auf Kugeln bezw. Rollenstühlen (s. Fig. I unten S. 15) aufliegen. Die Pfeiler überragen den Brückenkasten

stäbe, welche den Tunnelbrücken gegenüber eine grosse Ersparnis an Material ermöglichten, und führte statt der Verdoppelung von Decke und Boden mit ihrer Röhreneinteilung flache Gurte und zwischen den beiderseitigen Trägern als Windversteifung horizontale Stäbe und Zugstangen ein. Nach diesem System, welches bald in eine bewusste Nachbildung der amerikanischen (Townsend) Holz-Lattenbrücke überging, wurde (1850—57) die Dirschauer Weichselbrücke (6 Oeffnungen zu 121,13 m Spannung s. Abbildung Fig. VII) als erste Gitterbrücke in



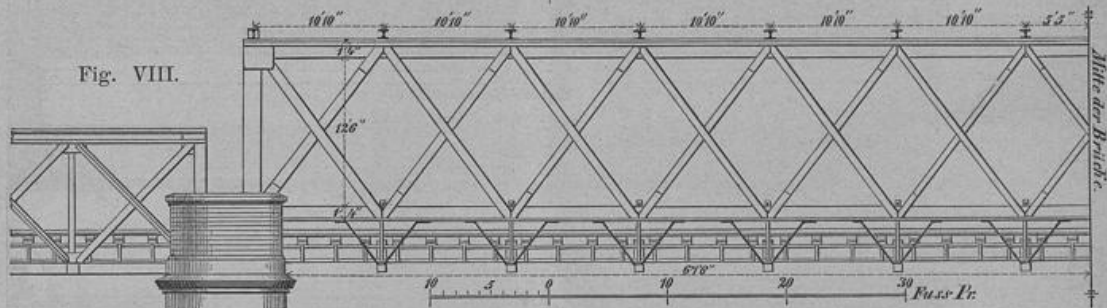
um ein Beträchtliches, da sie als Pilonen (Pfeiler) für eine Tragkette vorgesehen waren für den (nicht eingetretenen) Fall, dass die Tragfähigkeit des hohlen Balkens, denn einen solchen stellt die Röhre dar, nicht ausreichen sollte. Die Bauzeit hatte sich von April 1846 bis August 1850 erstreckt.

Diese Brücke fand, wie nicht anders zu erwarten, zahlreiche Nachahmungen, aber man ersetzte bald die vollwandigen Vertikalträger durch zahlreiche, unter sich vernietete Gitter-

Deutschland und neben mehreren anderen die Kölner Rheinbrücke mit 4 Oeffnungen zu 98,2 m Spannung gebaut. Aber der Mangel an Berechnung für die auftretenden Spannungen in dem engmaschigen Gittersystem, die Verbiegungen der unter sich vernieteten Gitterstäbe veranlasste schon in den fünfziger Jahren die Einführung der Fachwerkträger mit weiten Maschen und gekreuzten, teils winkligen (profilirten), teils flachen, unter sich wenig oder nicht verbundenen Stäben. (Näheres s. § 4.) Eine Fachwerkbrücke,

deren Stäbe nach dem System des gleichschenkligen Dreiecks zusammengestellt sind, ist die Eisenbahnbrücke über die Lahn bei Oberlahnstein (s. Abbild. Fig. VIII). Die Gitterbrücken und auch die ersten sehr zahlreichen Fachwerkbrücken sind fast ausschliesslich mit parallelen, geradlinigen Gurtungen konstruiert; bald aber ging man dazu über, die Gurte als Vielecke bzw. gekrümmte Linien zu gestalten, zumal sich durch deren Anwendung ganz bedeutende Material-Ersparnis erzielen liess. Diese beträgt z. B. bei den Parabelträgern 18—20%. Vorbildlich waren hierbei die sogenannten Laweschen Linsenträger, die aus zwei an den Enden fest verbundenen, in der Mitte durch Keile und Stäbe auseinander gehaltenen Holzbalken be-

Krümmung weicht der günstigeren Spannungs-Verhältnisse wegen etwas von der Parabelform ab. Da der nach oben gekrümmte Obergurt auf Druck beansprucht ist und deshalb einen nach aussen wirkenden Horizontalschub erzeugt, während der auf Zug beanspruchte, nach unten gekrümmte Untergurt einen nach innen wirkenden Zug bewirkt, so müssen sich beide Schubkräfte an den Kämpfern im wesentlichen aufheben. Dem Laien wird die Konstruktion wohl am leichtesten dadurch verständlich, dass er den Obergurt wie einen Bogenträger, den Untergurt als einen Hängeträger, wie bei der Hängebrücke, auffasst. Unsere Figur IX Seite 29 zeigt die Abbildung eines Paulischen Trägers aus der 1860/62 erbauten Rheinbrücke bei Mainz.



stehen und eine verhältnismässig sehr hohe Tragfähigkeit besitzen. Die am meisten hierbei verwendeten Formen sind die schon § 8 erwähnten: Fischbauchträger, Linsenträger, Parabel- und Halbparabelträger. Die bekannte Vertreterin der letzten Trägerart, die 1867/69 erbaute Leckbrücke, haben wir schon oben S. 15 erwähnt. Die dort befindliche Fig. I zeigt in ihrem unteren Teile die mittelst Rollenstuhl und Drehwalze sich auf die Pfeiler stützenden Brückenteile (Näheres S. 30).

Einige besondere Systeme der Fachwerkbrücken sind die folgenden, die nach ihren Erfindern, deutschen Ingenieuren, genannt werden:

1. Der Paulische Träger, der die Linsenform zeigt. Beide Gurte sind durch vertikale und schräge Stäbe mit einander verbunden; die

2. Der Schwedler-Träger, dessen Obergurt aus zwei symmetrisch gelegenen Hyperbeln besteht, die durch ein gerades Mittelstück verbunden sind. Diese Konstruktion bewirkt, dass die Diagonalen bei allen, auch den grössten einseitigen Belastungen stets nur auf Zug beansprucht werden und dass diese Zugkraft wohl zu Null werden, niemals aber in negativen Zug d. h. Druck übergehen kann. Die Materialersparnis beträgt bei diesem Träger 10 Procent gegenüber den Parabelträgern. Die Abbildung (Fig. X Seite 29) stellt die Weser-Brücke bei Corvey nebst ihrem Gelenk dar. (Ueber Gelenk s. S. 30.)

3. Der Loose-Träger hat Aehnlichkeit mit dem Paulischen, nur sind beide bogenförmige Gurtungen doppelt vorhanden und jeder Doppel-

gurt durch Diagonalkreuze so in sich versteift, dass beide das ganze Biegeelement aufnehmen. Hierdurch werden die Diagonalen zur Fahrbahn überflüssig, und diese hängt daher

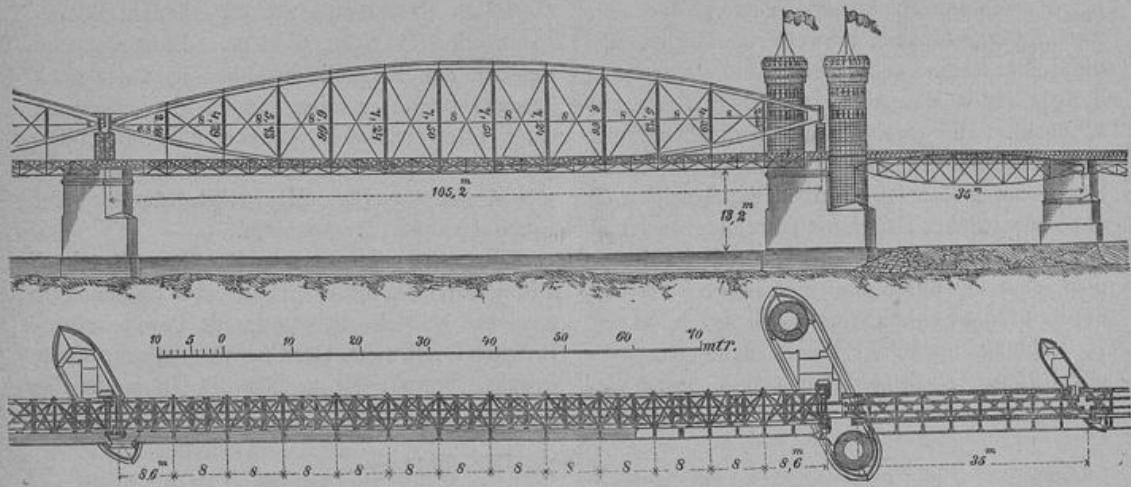
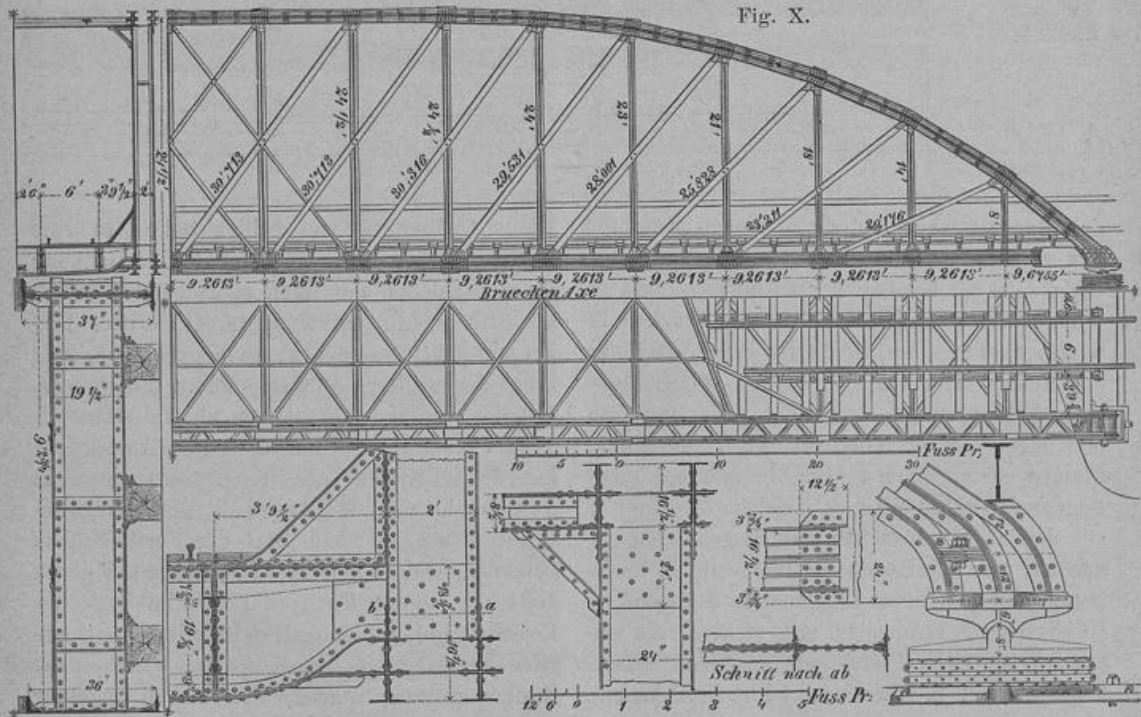


Fig. X.



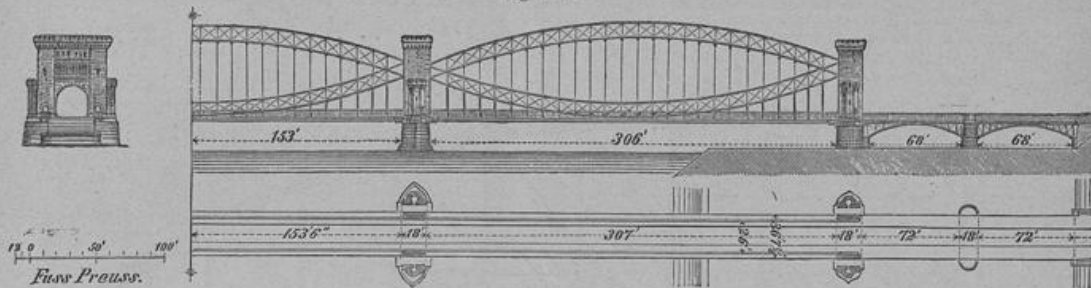
nur an vertikalen Hängeeisen. Fig. XI zeigt den Loose-Träger in der Hamburger Elbbrücke.

Früher konstruierte man gerne die Parallelträger als zusammenhängende Bauwerke über mehrere Pfeiler-Oeffnungen hinweg. Als Beispiel dient die Kölner Rheinbrücke, bei der ein einheitlicher Träger jedes Mal über zwei Oeffnungen hinübergeht. Hierdurch erzielte man einmal eine grosse Material-Ersparnis (10 bis 20 %) und konnte zum anderen Male den Aufbau der Brücke z. T. ohne eigentliches Baugerüst betreiben, aber man musste den Uebelstand dabei in den Kauf nehmen, dass die durch ungleichmässige Belastung, durch Pfeiler-Senkung und auch durch Sonnenbestrahlung bedingten Spannungen ungünstig einwirkten. Dieselben Uebelstände treten bei

Beide Einrichtungen verdanken ihre wesentliche Ausgestaltung dem deutschen Ingenieur Gerber. Die Kämpfergelenke finden sich in Deutschland zuerst an der alten, 1862/64 erbauten Bogen-Fachwerk-Brücke zu Coblenz. Entsprechende Gelenke am Scheitel, die aber jetzt nur noch wenig verwandt werden, finden sich zuerst an einer österreichischen Brücke über die Wien (1864) und an der Unterspree-Brücke (1865). Unsere Abbildung (Fig. XII) zeigt Kämpfer und Scheitelgelenke der letzteren.

Die Ausleger-, Krag- oder Cantilever-Brücken, mit denen man bisher die grössten Spannungen erreicht, wurden zuerst nur als Parallelträger-Brücken konstruiert. Das Charakteristische dieser Brücken besteht darin, dass die Träger zweier

Fig. XI.



den Bogenbrücken auf, deren Enden (Kämpfer) fest verankert sind. Daher suchte man, dem Brückenträger beweglicher zu machen, und erreichte dieses bei den Parallelträger-Brücken dadurch, dass man die Enden der Träger frei oder mit Rollen sich auf die Pfeiler stützen lässt (Fig. I unten) und dort, wo ein Pfeiler mit fortlaufendem Träger überbaut wird, bewegliche Stützen (Pendelstützen Fig. 31) anbringt. Die Bogenträger lässt man zu gleichem Zwecke sich mit den fast halbkreisförmig ausgekehrten Enden auf eine Eisenwalze stützen, die in einem ebenso ausgehöhlten Lager des Stützpunktes (Widerlagers) ruht oder mit diesem fest verbunden ist. Dieses nennt der Techniker ein Gelenk (s. Leck- u. Weserbrücke Fig. I u. X unten).

Pfeiler-Oeffnungen von beiden Seiten in eine dritte zwischen ihnen gelegene Pfeiler-Oeffnung hineinragen und mit ihren überragenden Teilen die Stützpunkte darbieten für ein drittes Trägerpaar, welches den verbleibenden Zwischenraum der mittleren Pfeiler-Oeffnung überbrückt. Letztere werden heute vielfach als Halb-Parabel-Träger konstruiert. Seine grossartigste Anwendung hat dieses System der freien Stützpunkte in Verbindung mit der Ausleger- oder Kragarm-Konstruktion bei dem Bau der Forth-Brücke gefunden, welche den an der Ostküste gelegenen 1631,5 m breiten Firth of Forth im Zuge der Eisenbahnlinie Edinburg-Dundee mit 521 m Spannung überschreitet. Die Kragarme bestehen aus riesigen Röhren, welche, wie unsere ungefähr

die Hälfte der Brückenlänge zeigende Fig. XIII lehrt, von den gemauerten Pfeilersockeln aus in leicht nach oben gewölbter Linie aufsteigen. Hierbei halten sie sich, da sie symmetrisch angeordnet und unter einander verbunden und versteift sind, gegenseitig im Gleichgewicht und bieten andererseits der Brückenbahn und dem verbindenden Halb-Parabel-Träger die nötigen Stützpunkte. Von der erwähnten Spannung der Mittelöffnungen (521 m) entfallen 107 auf den Mittelträger und 207 m auf jeden der längsten Kragarme. Für eine oberflächliche Betrachtung zeigen die Kragarmbrücken eine weitgehende Aehnlichkeit mit den Hängebrücken. Das Konstruktionssystem der freien Stützpunkte verdankt man im wesentlichen dem schon erwähnten Ingenieur Gerber.

Interessant ist es, die Baukosten einzelner hervorragender Brücken zu vergleichen; jedoch

Fig. XII.

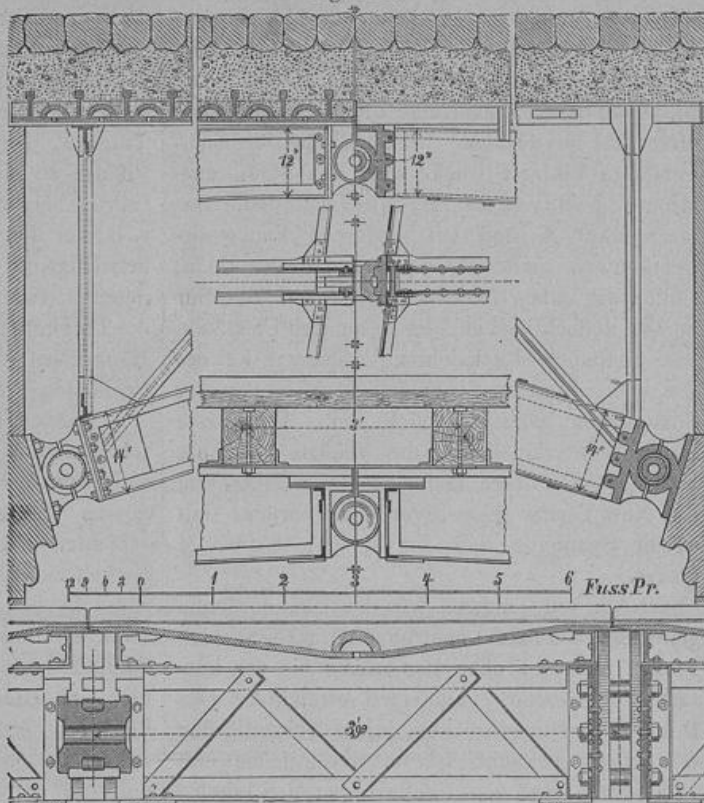
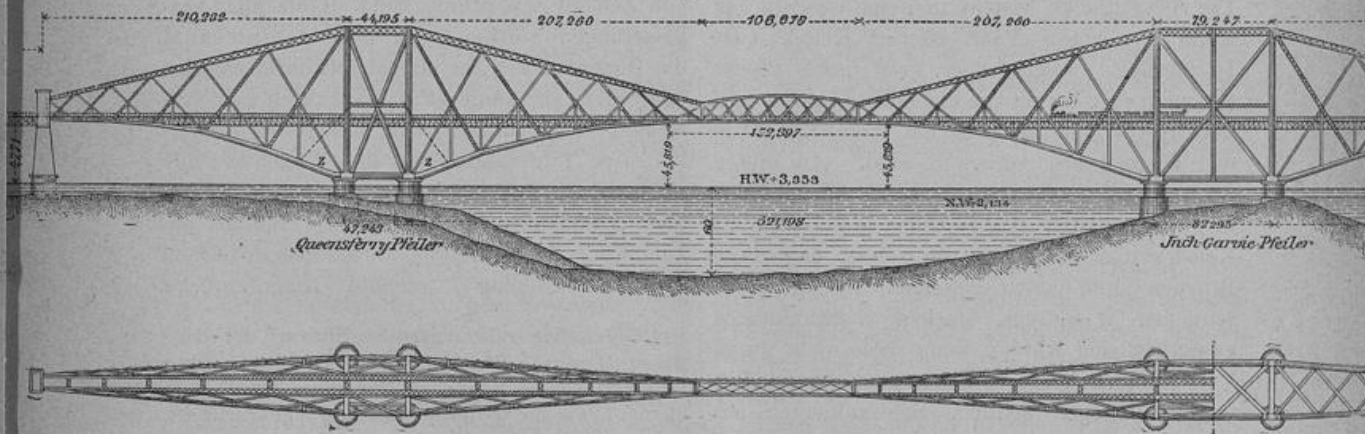


Fig. XIII.



muss man sich hüten, zu weitgehende Schlüsse aus deren Verhältnis zu ziehen, da hier zu viele Umstände mitsprechen: Die Britannia-Brücke (1. schmiedeeiserne) kostete pro laufenden Meter (d. h. die ganze Bausumme dividiert durch die Meterzahl ihrer Länge) 18 000 M, die ihr nachgebildete Viktoria-Brücke über den St. Lorenzstrom (Canada) 12 000 M; die Leekbrücke nur noch 6300 M und bei modernen Fachwerkbrücken von mittlerer Spannung (etwa 60 m) sinken die entsprechenden Kosten auf 3200 M herab. Jedoch wirken hier besondere Umstände wie Schönheits-Rücksichten, Anpassen an die Umgebung und nicht zuletzt besonders grosse Spannungen ganz erheblich ein. Das beste Beispiel hierfür bietet die soeben erwähnte Forth-Brücke, deren laufender Meter 20 000 und die New-Yorker (East-River) Hängebrücke mit 518 m Spannung, bei der er gar 35 000 M kostet.

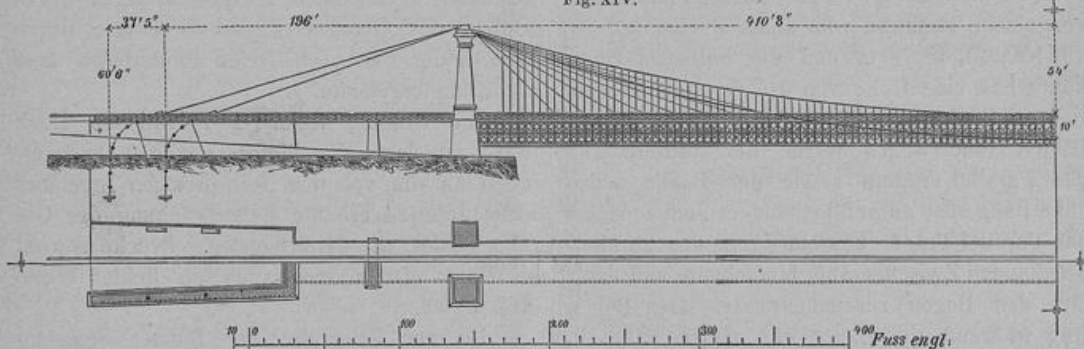
Noch kurz müssen wir der Hängebrücken gedenken, durch die man ohne stromverengende Pfeiler und fast ohne Baugerüste bis vor kurzem die grössten Spannungen erreichte. Das Princip der Hängebrücken, schon frühzeitig den Ost-Asiaten bekannt, ist im wesentlichen erst 1796 durch eine vom Findlay über den Jakobs-Kanal erbaute Brücke in Amerika und von dort aus auch in Europa in Aufnahme gekommen. Die Hängebrücke besteht in ihrem wesentlichen Teile aus einem Paar eiserner Ketten oder Drahtseilen, welche über zwei hohe Pfeiler (Pilonen) oder Türme von einem Ufer zum andern geführt sind und meistens mit ihren Enden in den Ufern selbst verankert sind. An diesen Ketten bzw. Seilen ist dann die ebene Fahrbahn aufgehängt. Es versteht sich bei dieser Konstruktion eigentlich von selbst, dass diese Brücken durch ungleichmässige Belastungen oder seitlichen Winddruck starken Schwankungen ausgesetzt sein würden, wenn diese nicht durch Versteifungen und Verankerungen vermindert würden. Gegen seitliche Schwankungen hat

man wohl einzelne Punkte der Brückenbahn und der Ufer durch annähernd horizontale, schräg geführte Drähte verbunden. Dasselbe Princip wandte man auch gegen die Längsschwankungen an, indem man ausser dem Tragseil noch dünnere Drähte von den Pilonen zu einzelnen Punkten der Brückenbahn führte. Da aber dieses Gewirre von Drähten z. B. bei der East-River-Brücke ästhetisch nicht befriedigt, so hat man dasselbe Ziel zu erreichen gestrebt, indem man die Tragkette in sich oder die Tragkettenwand (d. i. die aus der Kette, den Hängeeisen und dem Rand der Brückenbahn gebildeten Trapeze) durch Diagonalen versteifte. Als grossen Uebelstand empfand man es von jeher, dass man die Verankerungen der Drahtseil- bzw. Ketten-Enden, die vielfach eingossen und auch noch durch mächtige Steinschichten eingemauert wurden, auf ihre Haltbarkeit nicht kontrollieren konnte. Dieser Uebelstand ist bei einer 1893 erbauten Hängebrücke zwischen Blasewitz und Löschwitz bei Dresden dadurch beseitigt worden, dass man die Kette nicht im Ufer, sondern an den Enden zweier künstlich erschwerter Seitenspannungen verankert hat, welche als Gegengewicht die Spannung der Mittelöffnung ausgleichen. Hierdurch hat man erreicht, dass man die in den Ankern am meisten gefährdete Haltbarkeit der Kette von Zeit zu Zeit prüfen kann. Trotz aller Verbesserungen vertraut man aber der Stabilität der Hängebrücken im allgemeinen nicht so sehr, dass man sie gerne zu Eisenbahnbrücken verwendet oder man hält doch wenigstens die Lokomotive fern und lässt die Wagen mittels Drahtseil hinüberziehen. Trotzdem gibt es aber auch Ausnahmen von dieser Regel und am bekanntesten ist die 1853—55 von dem deutschen Ingenieur Röbling*) erbaute Niagarabrücke

*) Von ihm rührt auch der Entwurf der East-River (New-York-Brooklyner) Hängebrücke, deren Bau von seinem Sohne weitergeführt wurde und die mit 518 m die weitgespannteste Hängebrücke ist.

(s. Abbild. Fig. XIV), die in zwei Stockwerken oben den Eisenbahn- und unten den Strassenverkehr mit einer Spannung von 250 m (rund) über den Fluss führt. Im Augenblick ist man übrigens beschäftigt, diese altberühmte Hängebrücke durch eine schon im Bau befindliche Bogenbrücke von rund 167 m Spannung zu ersetzen. Auch in Europa wurde unter Versteifung der Tragketten eine Eisenbahn-Hängebrücke über den Donaukanal geführt.

Im Stromgebiete des Rheines finden wir eine Hänge-Strassenbrücke als „eisernen Steg“ über den Main zwischen Frankfurt und Sachsenhausen, erbaut von Schmick 1868/69, die durch je ein Gelenk in den höchsten und tiefsten Punkten interessant ist.



wie Culmann, Schwedler, Mohr, Winkler und deren Nachfolger verdankt, durch die es möglich geworden ist, die einzelnen, im ganzen Bau wirksamen Kräfte in ihren Wechselwirkungen aufs genaueste zu berechnen und danach die notwendige Stärke des zu verwendenden Materials zu bestimmen. Jedoch wirkte dieser wissenschaftliche Fortschritt auch schon in der früheren Periode der Fachwerk-Balkenbrücken mit. Als neues Moment kam wieder hinzu ein bedeutender Fortschritt der Eisenindustrie, welche in dem Fluss- oder Thomaseisen und dessen Verarbeitung (s. Näheres § 17) dem Brückenbau ein bisher unerreichtes und fast einwandfreies Baumaterial darbot. Hierdurch war es möglich, die Spannungen von Bogenbrücken, die bis

Fig. XIV.

Verlassen wir nach dieser kurzen Betrachtung die Hängebrücken und wenden uns dem neuesten, ungefähr das letzte Jahrzehnt umfassenden Abschnitt des deutschen Brückenbaues zu, so können wir diesen als die Epoche der weitgespannten Bogen-Stützbrücken bezeichnen, im Gegensatz zu dem Ende der fünfziger Jahre begonnenen Abschnitt der Brücken mit Parallel- und Pauli-Schwedler-Loose-Träger, die wir im Grossen und Ganzen die Periode der Fachwerk-Balkenbrücken nennen können. Der grossartige Aufschwung, der in diesem neuesten Abschnitt des Brückenbaues zu Tage tritt, wird einmal der Entwicklung der technischen Wissenschaften, besonders der der Statik durch Männer

dahin 100 m nur wenig überschritten, bis zu 200 zu führen.

Den Reigen der weitgespannten Bogenbrücken eröffnete auf deutschem Boden die Levensauer (163,34 m) und die Grünthaler Brücke (156,5 m) über den Kaiser-Wilhelm-Kanal. Ihnen folgte die Müngstener Kaiser-Wilhelm-Brücke mit 150 m Spannweite und die noch im Bau begriffenen Strassenbrücken zu Worms (106 m), Bonn (188 m), Düsseldorf (zwei Bogen zu je 181 m) und die ebenfalls noch unvollendete Eisenbahnbrücke (117 m) zu Worms. Da der letzte Teil dieser Abhandlung sich mit der Bonner Rheinbrücke beschäftigen soll, die Wormser und Düsseldorfer Brücken (Fig. 37) im Bau

aber viel Uebereinstimmendes zeigen, so wollen wir zum Schlusse dieses Teiles noch einige Zeilen der Kaiser-Wilhelm-Brücke widmen, die nicht weit von uns bei Müngsten in der Eisenbahnlinie Solingen-Remscheid das Wupperthal überschreitet und sowohl durch ihre Höhe über der Thalsohle und die Weite ihrer mittleren Spannung, besonders aber durch den fast ohne Gerüst erfolgten Aufbau unser Interesse auf sich zieht.

Die Brücke, welche am 14. Juli 1897 feierlich dem Verkehr übergeben wurde, besteht im wesentlichen aus einem 465 m langen Parallelfachwerk, welches sich an jeder Thalseite auf 3 Fachwerkpfiler und in der Mitte auf den Scheitel eines Fachwerkbogens stützt (Fig. 31 im Anhang). Die lichten Spannungen von einem Thalrand zum anderen sind 30, 30, 45, 150, 45, 45, 30 m und die Schienen-Oberkante hat eine Höhe von 107,63 m über dem tiefsten Punkte der Thalsohle. Dieser bedeutenden Höhe wegen wurde der mittlere Teil des Parallel-Trägers sowie der Bogen selbst ohne Baugerüst ausgeführt, indem man zunächst den Parallel-Träger konsolartig in den zu überbrückenden Zwischenraum hineinbaute und unter ihm den Bogen zusammensetzte. Den Bogen trug während des Baues ein starkes Zugseil, welches am Obergurt des Parallel-Trägers oberhalb des inneren Pfeilers befestigt war, während ein gleiches am Lande verankertes Drahtseil

eine Verschiebung des ganzen Parallel-Trägers verhinderte. Dem durch das grosse Uebergewicht hervorgerufenen Kippmoment der inneren Thalpfiler wirkte man ausserdem dadurch entgegen, dass man unter Erhöhung der thalseitigen Füsse die ganzen Pfeiler und Bogenstücke etwas rückwärts legte. Hierdurch konnte man auch die Wirkung der an den freien Enden notwendig auftretenden Durchbiegungen und Senkungen ausgleichen. Nach dem Ausbau des Bogenuntergurtes beseitigte man, indem man die Pfeiler mittels hydraulischer Pressen noch weiter rückwärts legte, die den Pfeilerfüssen untergeschobenen Keile, liess dann die Bogenhälften mit den Untergurtenden zusammenschliessen, verwandelte den so entstandenen Dreigelenkbogen in einen Zweigelenkbogen durch Einbau des Obergurtes und beseitigte durch Befestigung der noch freien Pfeilerfüsse auch die Kämpfergelenke.

Die Brücke, welche $2\frac{3}{4}$ Millionen Mark (5914 pro laufenden Meter) gekostet hat, erinnert an die von dem französischen Ingenieur Eiffel 1880/84 erbaute Ueberbrückung des Garabit-Thales, die der Münstener Brücke sowohl an Höhe (122 m) als auch an lichter Weite (165 m) überlegen ist.

Bis zur Erbauung der Bonner Strassenbrücke war die weitest gespannte Bogenbrücke die Strassenbrücke Luiz I über den Douro zu Oporto (Portugal), die 172 m Spannung besitzt.

III. Teil.

Die Bonner Rheinbrücke und ihre Erbauung.

§ 15. Vorgeschichte des Brückenbaues.

Seit den sechziger Jahren unseres Jahrhunderts ist eine grössere Zahl von festen Eisenbrücken über den Rhein erbaut worden. Sie dienen aber zum grössten Teile dem Eisenbahnverkehre, für den sich naturgemäss das Bedürfnis zuerst als unabweisbar herausstellte. Die Zahl der festen Strassenbrücken war gering: Mannheim, Mainz, Köln waren bisher glückliche Besitzer solcher Bauten. Und doch bildet der schöne Strom zeitweise besonders bei Eisgang ein bedeutendes Verkehrshindernis. Aber auch Hochwasser, Schiffsverkehr u. s. w. lassen es wünschenswerth erscheinen, überall dort, wo ein reger Landverkehr den Rhein überschreitet, die unsicheren Ueberfahrts-Gelegenheiten als Schiffbrücken, Ponten, Fähren durch feste Brücken zu ersetzen. Deshalb beschäftigte sich in mehreren grösseren Rheinstädten wie Worms, Bonn, Düsseldorf und Köln (wo die Schiffbrücke durch eine zweite feste Brücke ersetzt werden sollte), die öffentliche Meinung seit Jahren mit Brückenprojekten. In Bonn wurde die Gelegenheit zuerst spruchreif.

Der erste Entwurf für eine Bonner Rheinbrücke rührt von Hrn. Wasserbau-Inspektor Isphording her. Er ist ein Vorentwurf mit Kostenüberschlag, welcher als Grundlage für die Verhandlungen mit den Behörden diente. Am 10. Juli 1894 schrieb dann die Stadtverwaltung Bonn einen Wettbewerb für Entwürfe zu dieser Brücke aus und setzte Prämien im Betrage von 8000, 6000, 4000 und 3000 Mark für die vier besten Arbeiten aus. Das Preisgericht bestand aus den Herren:

Oberbürgermeister Spiritus-Bonn, Regierungs- und Baurat Mehrtens-Aachen, Professor Müller-Breslau, Geheimer Baurat Dr. Zimmermann-Berlin, Wasserbau-Inspektor Isphording-Bonn.

Da man schon damals als sicher annehmen konnte, dass andere Rheinstädte dem Beispiele Bonns bald folgen würden und dass früheren Erfahrungen nach die Ergebnisse des Bonner Wettbewerbs auf die spätere Behandlung der entsprechenden Aufgaben einwirken würde, so war dieses Preisausschreiben ein Ereignis, dessen Tragweite über den gerade vorliegenden Fall weit hinaus ging. Diese Einwirkung hat sich fast sofort gezeigt bei dem Wettbewerb um die Strassenbrücke bei Düsseldorf (Fig. 37). Denn diese Brücke, ursprünglich geplant mit drei Oeffnungen zu 100 m, wird jetzt nach dem Beispiele der Bonner Brücke mit zwei Stromöffnungen zu 181 m lichter Weite, die eine Wiederholung des Mittelbogens der Bonner Brücke darstellen, seit Sommer 1897 gebaut. Sie wird voraussichtlich gleichzeitig mit unserer Brücke, Ende 1898, fertig gestellt. Auch bei dem Wettbewerb um die Strassenbrücke bei Worms, ausgeschrieben Juli 1895, lässt sich diese Einwirkung nachweisen, wenn sie hier auch nicht so sehr in die Augen springt.

Auf das Preisausschreiben der Stadt Bonn gingen 16 Entwürfe mit 331 Zeichenblatt ein. Von diesen verwendeten fünf den Bogenträger, sechs den Auslegerträger, den wir von der Forth-Brücke her kennen und den der Laie leicht mit dem Hängeträger verwechselt, und endlich vier den eigentlichen Hängeträger. Ausserdem war ein Entwurf zu einer gewölbten

Steinbrücke mit drei Oeffnungen von 89, 160 und 89 m Lichtweite eingereicht.

Drei von den vier preisgekrönten Entwürfen sind Bogenbrücken [I. und IV. Preis zeigt einen Zweigelenk-, der III. Preis einen Dreigelenkbogen]*) und einer (II. Preis) ist eine Hängebrücke. Des verfügbaren Raumes wegen können wir uns nur mit dem an erster Stelle preisgekrönten Entwurfe beschäftigen, welcher von der Gutehoffnungshütte in Oberhausen, dem Baugeschäft R. Schneider und dem Architekten Bruno Möhring-Berlin herrührt. Dieser Entwurf ist es nämlich, welcher mit geringen Aenderungen zur Ausführung gelangt bzw. gelangen soll.

Ueber die Schwierigkeiten, welche in dem Projekte des Baues der Bonner Brücke lagen, äusserte sich der Direktor der Gutehoffnungshütte Herr Prof. Krohn in einem Vortrage im Verein deutscher Ingenieure folgendermassen: „Das Programm des Wettbewerbs für die Bonner Brücke verlangte eine freie Schifffahrts-Strasse von 150 m Breite und zwar nicht in der Mitte des Stromes, sondern näher dem Bonner Ufer liegend. Durch diese Vorschrift wurden die Bearbeiter der Entwürfe vor die Wahl gestellt, die Brücke in ihrer Pfeilerstellung entweder unsymmetrisch zur Strommitte auszubilden, oder mit der Spannweite der Mittel-Oeffnung über das vorgeschriebene Mass noch ganz wesentlich, nämlich bis auf nahezu 200 m hinauszugehn. Dass eine Rheinbrücke bei Bonn in unmittelbarer Nähe des Siebengebirges ein schöner grossartiger Bau werden müsse und daher, wenn irgend möglich, symmetrisch auszubilden sei, unterlag von vornherein wohl keinem Zweifel.

*) Unter einem Dreigelenkbogen versteht man einen Bogenträger, der an seinen Enden und im Scheitel dadurch beweglich ist, dass seine beiden Hälften sich hier auf runde Eisenwalzen stützen, und sich um diese zur Ausgleichung von Temperatur- und Belastungsspannungen drehen können. Den Zweigelenkbogen fehlt das Scheitelgelenk. (Näheres s. Fig. I, X, XII im Texte und Fig. 32 im Anhange.)

Die Schwierigkeit, eine Mittelöffnung von 200 m Spannweite zu überbrücken, machte sich nach zwei Richtungen hin geltend. In erster Linie kam es natürlich darauf an, die Kosten des eisernen Ueberbaues, die im allgemeinen mit wachsender Spannweite in sehr gesteigertem Masse zunehmen, in solchen Grenzen zu halten, dass die Ausführung nicht durch die erforderlichen Geldmittel in Frage gestellt wurden. Des Ferneren galt es, bei den beschränkten Höhenverhältnissen eine Trägerordnung zu finden, die durch ihre Linienführung einen schönen befriedigenden Eindruck hervorbringen würde, bei der also eine Durchschneidung des Bogens und der Fahrbahnlinie, die immerhin die Wirkung der Bogenform beeinträchtigt, vermieden wird. Die im preisgekrönten Entwurfe gegebene Lösung ist nach beiden Seiten hin wohl als eine glückliche zu bezeichnen. Der Obergurt des Mittelbogens ist vollständig oberhalb der Fahrbahn angeordnet, so dass die Bogenlinie klar und ungebrochen zur Erscheinung kommt. Die durch die Anordnung ermöglichte grosse Pfeilhöhe des Bogens gestattete eine vorteilhafte sparsame Ausbildung des Tragwerkes.“

Die Brücke war im Wettbewerb-Entwurf auf den alten Zoll ausmündend geplant; diese Lage war wegen der Höhenlage der Conviktstrasse und auch wegen der hier geringeren Breite des dem Hochwasser ausgesetzten Beueler Gebietes vom technischen Standpunkte aus zweifellos die günstigste. Rücksichten auf örtliche Verhältnisse führten jedoch zu dem am 3. Mai 1895 mit Einstimmigkeit gefassten Beschluss der Stadtverordneten-Versammlung, die Brücke auf den Vierecksplatz münden zu lassen. Dieser Entscheidung entsprechend wurde der an erster Stelle preisgekrönte Entwurf unter Mitwirkung des von Seiten der Stadtverwaltung mit der Leitung des Brückenbaues betrauten Herrn Regierungs-Baumeisters Frentzen den veränderten Umständen angepasst. Es wurde nämlich in Rücksicht auf den hier, im Gegensatz

zum alten Zoll, erheblichen Wertverkehr zu den geplanten drei Stromöffnungen eine Werftbrücke von 35 m Spannung hinzugefügt, dafür aber die Spannungen der Stromöffnungen auf (rund) 94, 188 und 94 m ermässigt, während sie zu 109, 195, 109 m geplant waren.

Nachdem die für die Ausführung des Baues erforderlichen Genehmigungen der zuständigen Behörden erteilt waren, konnten städtischerseits die mit den Firmen Gutehoffnungshütte und R. Schneider eingeleiteten Verhandlungen zu Ende geführt werden. Danach wurde diesen Firmen die Ausführung des Brückenbaues für die Gesamtsumme von M 2 700 000 (rund) mit der Massgabe übertragen, denselben bis zum Schlusse des Jahres 1898 in allen wesentlichen Teilen zu vollenden. Die Gutehoffnungshütte übernahm die Ausführung des eisernen Ueberbaues, während der Firma Schneider das Übrige, also namentlich der Unterbau (Pfeiler etc.), zugeteilt wurde.

Zur Deckung bezw. Verzinsung der Kosten, welche man, den Grunderwerb eingeschlossen, auf 4 000 000 M veranschlagen muss, übertrug der Staat der Stadtverwaltung Bonn das Recht, einen Brückenzoll zu erheben, nachdem die Stadt der bis dahin die Fährgerechtmächtige ausübenden Gesellschaft ihre Rechte abgekauft hatte.

Es wird nicht ohne Interesse sein, aus einzelnen Projekten der Preisbewerbung die berechneten Kosten für die ganze Brücke, sowie die für den laufenden Meter (in Klammern) anzuführen. Die betreffenden Summen sind:

I. Preis (Zweigelenkbogen)	2813641 M.	(6693)
II. „ (Kabelbrücke)	2589997 „	(6094)
III. „ (Dreigelenkbogen)	2459941 „	(6857)
IV. „ (Zweigelenkbogen)	3500000 „	(9007)
Elastischer Bogen	2595121 „	(6208)
Ausleger-Brücke in Hängeform	3700000 „	(8894)

§ 16. Der Unterbau.

Der Bau der Brücke begann mit der Herstellung der Strompfeiler. Die mittels Bohr-

maschine ausgeführte Untersuchung des Untergrundes des Flussbettes, welche bis auf 17 m Tiefe unter der Sohle sich erstreckte, hatte groben und feinen Kies, gemischt mit wechselnden Mengen Sandes, ergeben. Der Untergrund war also, wenn man tief genug hinabging, der Pfeilergründung günstig. Nachdem dann von einer auf eingerammten Pfählen hergestellten Plattform aus die Pfeilerachse genau bestimmt und festgelegt war, ging man (April 96) an die Herstellung des Fangdammes d. h. eines Dammes, der, wie eine Röhre den Platz des zukünftigen Pfeilers umschliessend, eine Trockenlegung der Baugrube ermöglichen sollte. Zu dem Zwecke wurde zunächst mittels schwimmender Rammten eine feste Rammrüstung d. h. ein die Baustelle umlaufender Schienenstrang oberhalb der Wasseroberfläche hergestellt, auf dem sich die eigentlichen Rammten bewegen sollten. Als äussere Wandung des Fangdammes dienten starke Holzpfähle, welche 2,50 m tief in den Boden eingerammt wurden. Wegen des erheblichen Widerstandes, den der Untergrund ihrem Eindringen entsetzte, hatte man die Enden mit zugespitzten Eisenschuhen versehen. Die innere Spundwand wurde aus eisernen I-Schienen hergestellt, welche 9 m tief in den Boden eingerammt wurden. Beide Fangdämme zeigten einen viereckigen stromaufwärts zugespitzten (horizontalen) Querschnitt; die Länge des Innenraumes betrug 32,5 m. Um auch einen Abschluss der Baugrube nach unten hin zu erzielen und zugleich dem Pfeiler ein tiefreichendes sicheres Fundament zu geben, wurde, bevor der Fangdamm auch flussabwärts geschlossen wurde, mittels Schwimmbagger der Grund bis auf 5 m unter der Flusssohle in dem von den Schienen umschlossenen Innenraume ausgebagert, und dann nach Entfernung des Baggers der Fangdamm geschlossen, und die entstandene Vertiefung bis zur Flusssohle mit Beton d. h. einem im Wasser schnell erhärtendem Gemisch von Kies, Sand, Cement und Trass gefüllt. Jetzt wurde auch noch der Raum

zwischen den beiden Spundwänden mit Kies und Erde ausgefüllt, und auf diese Weise die Baugrube gegen das Eindringen des Wassers von allen Seiten gesichert. Nachdem dann das vorhandene Wasser mittels Centrifugal-Dampfpumpe entfernt war, konnte der Aufbau des Pfeilers beginnen. Derselbe wurde am 15. Oktober mit einer feierlichen Grundsteinlegung eröffnet, zu der sich die Mitglieder des Stadtverordneten-Kollegiums, der städtischen Baukommission, der Bauleitung und Vertreter der Baufirmen an der Baustelle d. h. auf dem Boden des Rheines im Fangdamm des linksseitigen Strompfeilers versammelt hatten.

Die Pfeiler selbst bestehen im Inneren aus Bruchsteinen, aussen aus Haustein-Verblendung. Letztere, an den Seiten zum teil als cyklopisches Mauerwerk ausgeführt, ist meist Basaltlava, im oberen Teil der Vorköpfe aber Sandstein. Die cyklopische Basaltlava-Verblendung war vorher am Lande probeweise aus passend zugehauenen Steinen zusammengesetzt, und die einzelnen Steine in ihrer gegenseitigen Lage durch Ziffern fixiert worden. Ein durch den Pfeiler geführter Horizontalschnitt zeigt als Grundfigur ein längliches Rechteck, dessen Schmalseiten (flussauf- und -abwärts) Halbkreise, die am Scheitel in eine Spitze auslaufen, vorgelagert sind. Die, wie erwähnt, aus Beton hergestellte Fundamentplatte hat eine Breite von 14, eine Länge von 32,5 m und ist begrenzt und gestützt von dem unteren Teile der die innere Spundwand bildenden I-Schienen. Der obere, das Fundament überragende Teil der Schienen wurde nach Vollendung des Pfeilerbaues zunächst mittelst elektrisch betriebener Bohrmaschinen abgebohrt und schliesslich abgebrochen. Die äussere Spundwand konnte durch einfaches Ausziehen der Holzpfähle beseitigt werden.

Der eigentliche Pfeiler besitzt einen 11,8 m hohen Sockel, dessen Breite sich von 10,6 bis 9 m verjüngt (Fig. 35). Der obere Teil hat eine gleich-

mässige Breite von 6 m und wird von zwei im neuromanischen Stile ausgeführten Türmen gekrönt, die portalartig ausgebildet und durch einen Gewölbebogen über der Fahrbahn mit einander verbunden sind. Zwischen dem Sockel und dem oberen Teile des Pfeilers befindet sich die Zone, in der sich die vier Auflager der Bogen befinden. Dieser Teil zeichnet sich durch stärker geneigte, den Pfeiler wie einen Gürtel umziehende Flächen aus und ist an den Vorköpfen mit Wappen aus Basaltstein geziert. Die Höhe des Pfeilers von der Fusssohle bis zur Fahrbahn beträgt ungefähr 25 m.

Die erwähnten Auflager sind aus Eisenguss im Gewichte von ungefähr 11 Tonnen hergestellt. Sie stellen im allgemeinen vierseitige Pyramiden von quadratischer Grundfläche dar; an Stelle der Spitze aber finden wir eine cylindrische Rinne mit wagrechter Achse. Dieselbe Rinne findet sich am Kämpfer (Ende) des Bogens vor. Beide Rinnen schliessen zwischen sich eine kräftige Eisenwalze ein. Da aber von dieser Walze auf jeder Seite ein Streifen von einigen Centimeter Breite zwischen den Rändern der Rinnen frei bleibt, so kann sich der Bogen um die Walze etwas drehen und dadurch die durch Temperatur und Belastung hervorgerufenen Spannungen ausgleichen. Der Bogen wird also nur durch sein eigenes Gewicht und das der Fahrbahn gegen die Walze und weiterhin gegen den Pfeiler gedrückt und ist im übrigen mit dem Pfeiler weder verschraubt noch vernietet. Die ganze Anordnung nennt der Techniker ein Gelenk. Fig. 32 (Anhang) gibt einen schematischen Querschnitt durch ein solches Gelenk nebst Auflager. (Vergl. auch Abbildung I, X, XII im Text). Das Gewicht eines Strompfeilers beträgt rund 10000 Tonnen (die Tonne gleich 1000 kg).

Da man schon der Schifffahrts-Interessen wegen nicht zu gleicher Zeit alle drei Stromöffnungen überbrücken konnte, so überbaute man an erster Stelle die Mittelöffnung, weil

deren Bau nur die Fertigstellung der beiden Strompfeiler erforderte, während der der beiden Seitenöffnungen auch noch die beiden Landpfeiler zur Voraussetzung gehabt hätte. Hierdurch war es aber unvermeidlich, dass die Strompfeiler längere Zeit hindurch einem einseitigen von der Strommitte zum Ufer gerichteten Drucke ausgesetzt waren. Deshalb hat man die Fundamente beider Strompfeiler von vorneherein so angelegt, dass jeder Pfeiler mit seinem Sockel nicht mitten auf der Fundamentplatte steht, sondern um 90 cm der Strommitte näher gerückt ist. Infolgedessen ragt die Fundamentplatte nach dem Lande zu 2,6 m, zur Strommitte aber nur 0,8 m unter dem Sockel hervor. Da nun, wie in § 20 berechnet, die aus Pfeilergewicht und dem Schub und Druck der Mittelöffnung resultierende Kraft die Fundamentsöhle nur 1,5 m von der Mitte entfernt trifft, so ist die Gefahr, dass durch den einseitigen Druck das Fundament nach dem Ufer zu sich senken könnte, sehr gering. — Der Bau der beiden Strompfeiler, dessen Vorbereitung April 96, dessen Ausführung 15. Oktober begann, konnte trotz Eisgang und Winter-Hochwasser, welches den Fangdamm überflutet und die Baugrube gefüllt hatte, Ende April 97 vollendet werden. Die Landpfeiler wurden in entsprechender Weise mit Fangdamm und Betonboden bzw. -Fundament gegründet; ihre Fahrbahn-Oberkante ist aber wegen der zur Strommitte hin stattfindenden Steigung der Fahrbahn ungefähr um 2,50 m niedriger, und ihr Gewicht entsprechend geringer.

An Maschinen waren neben einer stationären Dampfmaschine nebst Dynamo, durch welche die zur Lichterzeugung und zum Betriebe der Arbeitsmaschinen nötige elektrische Kraft erzeugt wurde, gewöhnlich sechs Lokomobilen zum Betriebe der Pumpen, Rammen, Bagger und Krane in Thätigkeit. Um die Baugerüste sowohl, wie auch die durchfahrenden Segelschiffe und Flösse vor Beschädigungen, die bei

der Einengung des Fahrwassers leicht eintreten konnten, zu sichern, waren 3 bis 6 Dampfer als Schlepper eingestellt. Dieselben versahen auch den Schleppdienst bei den Bauarbeiten. Da man nicht nur die Fundamentgrube ausheben, sondern auch die Fahrrinne vertiefen musste, so waren die bewegten Kiesmassen ganz beträchtlich, und man benutzte sie zur Weiterführung der Werftanlagen von der Mehlerschen Fabrik (II. Fährgasse) bis unfern des Wasserwerkes. Ausser den genannten Maschinen und Dampfern war einige Zeit hindurch ein Tauchschacht der Strombauverwaltung thätig, durch den schwierigere Schiffahrts- und Bauhindernisse auf der Sohle des Rheines beseitigt wurden.

§ 17. Die Gestaltung des Überbaues (vergl. Fig. 36 im Anhang).

Während die Strompfeiler ihrer Vollendung entgegengingen und die Landpfeiler in Angriff genommen wurden, begann man schon mit der Herstellung des Gerüstes für den Überbau der Mittelöffnung. Als Fundament des Baugerüstes wurden (Mitte April 97) an drei Stellen und zwar in der Mitte und an den Seiten der Mittelöffnung zahlreiche Pfähle in den Boden des Flusses gerammt, auf denen sich das den ganzen Pfeiler-Zwischenraum erfüllende und überragende Baugerüst erhob. Auf dem obersten Stockwerke desselben, in einer Höhe von 49,5 m über der Flusssohle befanden sich zwei Laufkrane und ein fester Mittelkran, durch die das Baumaterial aufgewunden und an Ort und Stelle gebracht wurde. Für die Zusammensetzung (Montage) der Eisenteile von Bogen und Fahrbahn wurden diesen entsprechende Bahnen aus Holz hergestellt, auf der die Eisenteile zusammengefügt und vernietet wurden; jedoch ruhten die fertig gestellten Stücke mit dem Untergurt nicht unmittelbar auf der Holzbahn, sondern auf kleinen Winden, die an allen Punkten, wo jedesmal ein senkrechter Pfosten den

Untergurt durchschneidet, angebracht waren. Diese Winden gestatteten eine genaue Aufstellung und ermöglichten den fertigen Bogen gleichmässig von seinen bisherigen Stützen zu befreien und somit auf den Pfeiler abzulassen. Während alle übrigen Eisenteile in den aus den Zeichnungen und Berechnungen sich ergebenden Grössen auf der Gutehoffnungshütte hergestellt waren, wurden die Mittelstücke erst nach den am Bau selbst abgenommenen Massen hergestellt, weil hier alle die kleinen, aber doch unvermeidlichen Abweichungen zwischen den berechneten und den hergestellten Grössenverhältnissen der einzelnen Teile zusammenwirken und bei der beträchtlichen Länge des Eisenbaues eine nicht zu vernachlässigende Grösse ergeben mussten. Der Bau von Bogen und Fahrbahn begann, nachdem das Baugerüst Mitte Juni 97 fertig gestellt, gleichzeitig von beiden Strompfeilern aus, und schon am 13. September desselben Jahres konnten die Mittelstücke eingefügt, und damit die Eisenkonstruktion selbständiger und namentlich unabhängiger gemacht werden von der Unterstützung des den Gefahren eines z. Z. herrschenden Hochwassers ausgesetzten Holzgerüsts. Die Verbindungen der einzelnen Eisenteile unter sich sind durch Niete hergestellt. Diese, welche vorläufig nur an einem Ende abgeplattet waren, wurden in kleinen Feldschmieden glühend gemacht und, nachdem sie in die Nietlöcher eingeschoben, auch am glatten Ende durch wuchtige Hammerschläge mit einem zweiten Kopfe versehen. Die Zahl der Niete soll gegen 180 Tausend allein für die Mittelöffnung betragen. Das Gewicht der ganzen Eisenkonstruktion der Mittelöffnung, und damit auch der senkrechte Druck derselben auf die Strompfeiler, beträgt ungefähr 1600 Tonnen, wovon rund 1300 auf die Bogen, 300 auf die Fahrbahn entfallen.

Die bogenförmig gekrümmten Träger der Brücke (Brückenträger) liegen in parallelen Vertikalebene; ein jeder besteht aus einem Ober-

und einem Untergurt und einem Stabwerk, das aus vertikalen Pfosten und nach der Mitte zu fallenden Schrägstäben zusammengesetzt ist. Letztere verbinden immer einen Schnittpunkt des Obergurtes mit dem benachbarten nach der Mitte zu gelegenen des Untergurtes. Die Bogenmitte nimmt ein Pfosten ein. — Die Gurte haben einen kastenartigen Querschnitt von beistehender Gestalt $\square \square$, und ein jeder ist durch zahlreiche Winkeleisen und nach Umständen besonders im Obergurt durch aufgelegte Platten bzw. Gitterstäbe versteift. Die Pfosten und Schrägstäbe sowie die Hängeeisen, durch welche die Fahrbahn an die Bogen gehängt ist, zeigen einen Γ -förmigen Querschnitt. Die vertikale Breite des Bogens im Scheitel beträgt 4,80 m, die lichte Höhe des Untergurtscheitels über der Kämpfer-Verbindungsline 30 und die Spannweite (Entfernung der Kämpfer) 187,2 m; das Pfeilverhältnis mithin 1 : 6,24. Der Obergurt, dessen einzelne Teile gegen die Mitte hin an Stärke und also auch an Schwere zunehmen, stützt sich nicht auf die Pfeiler, sondern überträgt seinen Vertikaldruck und Horizontalschub durch die senkrechten Pfosten (Vertikalen) und die Schrägstäbe auf den Untergurt. Dieser, dessen Teile gegen die Kämpfer hin schwerer werden, stützt sich mit seinen Kämpfern in der früher angegebenen Weise auf die Widerlagerplatten der Pfeiler. Die letzteren empfangen also den ganzen Druck und Schub des Ueberbaues der Stromöffnungen, und namentlich dient, um das gleich hier zu erwähnen, weder die Fahrbahn, noch irgend eine andere Vorkehrung als Zugband zur Beseitigung der Schubkräfte.

Im Gegenteil hat man es sorgfältig vermieden, selbst die durch Temperatur und Verkehrseinflüsse hervorgerufenen Dehnungen und Spannungen von der Fahrbahn aufnehmen zu lassen, und hat zu dem Zwecke dort, wo der Bogenuntergurt letztere durchschneidet, die Fahrbahnkonstruktion unterbrochen und die beiderseitigen Enden lose aufeinander gelagert. Weil

die Fahrbahn in allen ihren Teilen von den Hängeeisen bezw. Pfosten getragen wird, so konnte die Unterbrechung des Zusammenhanges keine Störungen hervorrufen. Da die Vertikalen im Obergurt beginnen, beim Durchschneiden des Untergurtes mit diesem vernietet sind und schliesslich als Hängeeisen am unteren Ende die Brückenbahn tragen, so verteilt sich der Druck des Bogens und der Fahrbahn auf die beiden Gurte und schliesslich auf den Untergurt nach Massgabe der aus der Elasticität des verwendeten Materials resultierenden Kräfte, die in den Vertikalen, den Schrägstäben und den Gurten hervorgerufen werden. In Folge dessen ist der ganze Bogen ein elastischer und damit ein statisch unbestimmter d. h. das Verhältnis der auftretenden Zug- und Druckspannungen lässt sich nicht einfach nach statischen Gesetzen erledigen. Dass der Obergurt ganz, der Untergurt zum grössten Teile über der Fahrbahn liegt, ist schon früher erwähnt.

Jede Brücke bedarf der Versteifung der Träger unter einander gegen seitlichen Druck (Wind). Diese erreicht man fast immer dadurch, dass man die Träger bezw. die unteren Ränder der Fahrbahn-Konstruktion durch senkrechte und schräge Stäbe meist in Form von Rechtecken mit Diagonalen unter einander verbindet. Wir können daher fast immer einen oberen und einen unteren Windverband unterscheiden. Das Gesagte trifft naturgemäss auch bei unserer Brücke zu, aber der obere Windverband, der von der Bogenmitte aus zunächst auf dem Obergurt liegt, musste dort, wo der Obergurt der Fahrbahn näher gekommen ist d. h. an den dritten Vertikalen von den Kämpfern aus, auf den Untergurt übergeführt werden, (der hier schon unter der Fahrbahn liegt,) um den Raum über der Fahrbahn nicht ungebührlich zu beschränken. Diese Ueberführung vom Ober- auf den Untergurt erfolgt mittels eines starken, vertikalen Blechrahmens (vgl. S. 10).

Bei den Seitenöffnungen haben die Träger

auch einen kreisbogenförmigen Untergurt mit zwei Kämpfergelenken, einer Spannweite von 93,6 m und einer lichten Scheitelhöhe von 8 m über der Kämpferlinie (Pfeil-Verh. 1 : 11,7). Der Obergurt dagegen bildet eine gerade Linie. Beide Gurte sind durch Vertikal- und Schrägstäbe mit einander verbunden, so dass der Druck und Schub des Obergurtes auch hier auf den Untergurt und dessen Kämpfer übertragen wird; in den 4 Mittelfeldern ist volle Blechwand. Die Herstellung des Ueberbaues der Seitenöffnungen wird in derselben Weise mittels eines auf dem Boden des Flusses ruhenden Gerüstes erfolgen. Das Eisengewicht beider Seitenöffnungen beträgt ungefähr 12—1300 Tonnen. Entsprechend den Seitenöffnungen ist auch die Werftbrücke gebaut, nur dass dieselbe 4 Bogenträger von 32,4 m Spannweite und annähernd das Pfeilverhältnis 1 : 10 besitzt. Die Rampe besteht auf Bonner Seite aus 2, auf Beueler aus 7 steinernen Gewölbebogen. Interessant ist die Art und Weise, wie die Abrüstung d. h. die Entfernung des den Bogen während des Aufbaues tragenden Lehrgerüstes geschah. Da nämlich ein ungleichmässiges Abrüsten das Gewölbe schädigen konnte, so hatte man die Vertikalstützen des Lehrgerüstes in eiserne Töpfe gestellt, die zum Teil mit trockenem Sande gefüllt waren. Am unteren seitlichen Rande waren die Töpfe mehrfach durchbohrt, die Löcher aber durch Holzpflocke vorläufig geschlossen. Beim Ablassen des Lehrgerüstes wurden nun gleichzeitig alle Holzpflocke entfernt und, während der Sand allenthalben herausran, senkte sich das Gerüst gleichmässig.

Die Fahrbahnbreite beträgt 8,5 m und die Steigung bis zu den Strompfeilern 1 : 30. In der Mittelöffnung geht die Fahrbahn in eine flache Parabel über, deren Scheitelpunkt etwa 1,2 m höher als die Enden liegt. Jedes Hängeeisen-Paar ist am unteren Ende durch einen horizontalen Querträger senkrecht zur Brückenachse verbunden. Der Abstand je zweier

benachbarten die Brückenbahn tragenden horizontalen Querträger sowie der Hängeeisen und Pfosten beträgt 7,8 m. Auf den Querträgern ruhen 5 Längsträger, wovon die drei mittleren volle Blechwand, die beiden seitlichen Fachwerkträger zeigen. Die vier von den fünf Längsträgern begrenzten Flächen werden durch Querträger (II. Ordnung) in lauter rechteckige Felder von 1,56 m Länge geteilt, und diese endlich durch verzinkte Buckelplatten geschlossen. Die so gebildete Fläche ist mit Beton und darüber mit 12 cm starkem Holzpflaster bedeckt. Die Fussgängerwege ruhen seitlich und ausserhalb der Bogenträger bezw. Hängeeisen auf Consolträgern, die mit den Hängeeisen bezw. Vertikalen der Bogen vernietet sind. Die Abbildung (Fig. 33) zeigt die Hälfte eines Querschnittes durch die Mitte des grossen Bogens.

Der Ueberbau ist in seinen Hauptteilen aus einer Eisenart hergestellt, die als Flusseisen bezeichnet wird. Dasselbe ist seit einem Decennium ungefähr in den Brückenbau eingeführt, und ihm verdankt, wie schon erwähnt, dieser Zweig der Technik zum Teil seinen grossartigen Aufschwung. Es verlohnt sich daher wohl, der Herstellung desselben einige Worte zu widmen:

Das im Hohofenprocess aus den Eisenerzen gewonnene und durch seinen hohen Kohlengehalt leicht schmelzbare, aber nicht schmiedbare Roheisen (vergl. § 14) muss von seinen Nebenbestandteilen, Silicium (d. i. Kieselstoff), Mangan, Phosphor und Schwefel, aber namentlich von dem grössten Teile des Kohlenstoffes befreit werden, wenn es in das schwerer schmelzbare aber durch Hammer oder Walze formbare Schmiedeeisen übergeführt werden soll. Im kleinen geschieht dieses meistens durch das Frischen im Frischherde, im Puddelofen oder Siemens-Martin-Ofen. Die genannten Nebenbestandteile werden hier durch überschlagende Flammen im Eisen verbrannt und teils in Gas, teils in Schlacke verwandelt. Das Eisen wird dadurch

reiner und zähflüssiger, und die dünnflüssige Schlacke kann schliesslich mittels des Hammers oder der Quetsche aus dem knetbaren reinen Schmiedeeisen herausgepresst werden, wie Wasser aus einem Schwamme. Im grossen erzielt man dasselbe durch das 1855 von Bessemer erfundene Verfahren, bei dem die Nebenbestandteile mittels eines starken, durch das flüssige Roheisen geblasenen Luftstromes verbrannt werden. Der ganze Bessemer-Process spielt sich in einem eisernen, birnenförmigen, um eine horizontale Achse drehbaren Gefässe ab, dessen Wände mit Quarz- oder Chamottesteinen ausgemauert sind. Das meist sofort aus dem Hohofen flüssig eingeführte Roheisen hat gewöhnlich ein Gewicht von 10—16 Tonnen. Die durch den Luftstrom bewirkte Verbrennung des Siliciums, des Mangans und weiterhin des Kohlenstoffes ruft eine Wärmesteigerung von mehreren hundert Grad hervor, und lässt das Eisen eine Temperatur von ungefähr 2000° erreichen, wobei es trotz seiner Verwandlung aus Roheisen in Schmiedeeisen oder Stahl so flüssig bleibt, dass es bei entsprechender Neigung der Birne ausfliessen kann. — So gross auch der durch diese Methode hervorgerufene Fortschritt war, so vermochte man doch nicht hierdurch aus phosphorhaltigem Eisen (und die deutschen Eisenerze sind fast alle phosphorreich) den Phosphor auszutreiben, weil die im Roheisen und auch in der Ausmauerung der Birne vorhandene Kieselsäure der schon gebildeten Phosphorsäure den Sauerstoff immer wieder entriss und dadurch den Phosphor aufs neue an das Eisen band. Der Phosphorgehalt ist aber so schädlich, dass schon 0,1 bis 0,2% genügt, um Stahl spröde und kaltbrüchig zu machen. Die Entfernung des Phosphors gelang erst durch das von Thomas und Gilchrist (1878) erfundene Verfahren, bei dem Silicium bezw. Kieselsäure dadurch möglichst vermieden wurde, dass die Ausmauerung der Birne an Stelle des Quarzes mit Dolomit (kohlensaurem Kalk und Magnesia) erfolgte.

Jetzt verband sich die Phosphorsäure, wenn der durchgeblasene Luftstrom den Phosphor im glühenden Eisen verbrannt hatte, mit dem Dolomit der Schlacke und der Ausmauerung, lieferte dadurch die für die Landwirthschaft so überaus wichtige Thomasschlacke (Phosphatmehl) und ein phosphorfrees Eisen.

Neuerdings stellt man dasselbe Eisen in den schon erwähnten Siemens-Martin-Oefen her, die mit Dolomit ausgemauert sind und durch vorgewärmte Gase sehr stark erhitzt werden. Die Eisenteile unserer Brücke sind z. B. auch in solchen Oefen hergestellt, die eine genauere Regulierung der Verbrennung ermöglichen und deshalb ein besseres Eisen liefern. — Das auf diese Weise gewonnene Eisen wird Fluss- oder Thomaseisen genannt; es wird zunächst in Form viereckiger Blöcke gegossen und aus diesen durch Walzen oder durch Hämmern zu Flach- Γ - oder \sqcap - etc. Eisen gepresst. Das Flusseisen gehört zum Schmiedeeisen, gestattet aber eine Belastung von 1500 kg gegen 750 kg beim alten Schmiedeeisen auf 1 qm. Durch Verwendung des Flusseisens spart man an Material und besonders auch an Baukosten. Eine schmiedeeiserne Brücke an Stelle der flusseisernen würde etwa 30 bis 40% Mehrkosten verursachen haben. Dass man Eisen und nicht den noch tragfähigeren Stahl verwendet, liegt in dem Mangel an Schmiegsamkeit des letzteren gegenüber den durch Verkehrs-Belastungen und Temperaturänderungen hervorgerufenen Biegungen und Dehnungen; rufen doch die Temperatur-Unterschiede, wenn wir -10° und $+50^{\circ} C$ als Grenzen annehmen, schon allein bei der Fahrbahn der Mittelöffnung eine Längenänderung von 11 cm hervor.

§ 18. Berechnung der Druck- und Schubkräfte in der Mittelöffnung.

Wie schon erwähnt, sind die Hauptträger der Mittelöffnung elastische Bogen und entziehen sich als solche der einfachen sta-

tischen Berechnung. Wollen wir trotzdem dieselben nach statischen Gesetzen behandeln, so müssen wir von den elastischen Kräften absehen und dann den Bogen als ein um die beiden Kämpfergelenke drehbares, aber im übrigen starres Gewölbe betrachten. Denken wir uns dann den Bogen durch einen vertikalen Mittelschnitt in zwei gleiche Hälften geteilt, so können wir nach Beseitigung der einen Bogenhälfte bei der anderen durch eine Horizontalkraft H , die in der Mitte des Scheitelschnittes angreifen möge, das vorher bestandene Gleichgewicht bewahren (s. § 2). Diese Kraft H ist dann bestrebt, den Halbbogen gegen den Kämpfer hin zu schieben, bezw. um denselben aufwärts zu drehen. Ausserdem wirkt auf unseren Halbbögen noch das Eigengewicht und das Gewicht der Fahrbahn, von der wir ein Viertel auf jede Bogenträgerhälfte in Anrechnung zu bringen haben. Bezeichnen wir dieses ganze Gewicht mit V und denken uns dasselbe im Schwerpunkte konzentriert, so ist es bestrebt, den Bogen nach unten zu schieben bezw. um den Kämpfer abwärts zu drehen.

Das Widerlager muss stark genug sein, um der Horizontalkraft H und Vertikalkraft V zu widerstehen, und die Drehmomente von H und V müssen einander gleich aber entgegengesetzt sein, wenn sie sich zur Erhaltung des Gleichgewichts aufheben sollen. Sind nun h und l die Hebelarme von H und V d. h. die Längen der vom Kämpferdrehpunkte auf die Kraftrichtungen gefällten Senkrechten, so sind die statischen oder Drehmomente $H \cdot h$ und $V \cdot l$, und aus deren Gleichung $H \cdot h = V \cdot l$ folgt $H = \frac{Vl}{h}$. Sind V , l und h bekannt, so ist hieraus H zu berechnen.

Die wirkliche Lage des Schwerpunktes des ganzen Halbbogens mathematisch zu bestimmen, würde für uns sowohl wegen der Gestalt als auch der ungleichen Schwere der einzelnen Teile des Bogens sehr mühsam, ja fast unmög-

lich sein. Wären uns die Gewichte und die Lage der Schwerpunkte der einzelnen von zwei benachbarten Pfosten und den zugehörigen Gurtstücken begrenzten trapezförmigen Flächen bekannt, so könnten wir mit Hilfe des Kräfte-dreiecks (Kräftepolygons) nach Art der in § 9 (Fig. 24) angegebenen Methode uns das Seilvieleck oder die Drucklinie verschaffen. Die Horizontalkraft H ergäbe sich dann aus der Bedingung, dass das erste und letzte Stück des Seilvielecks durch den Scheitelmittelpunkt bzw. das Kämpfergelenk gehen müsste und dass die aus V und H als Komponenten am Drehpunkte gebildete Kraft S der Richtung nach mit dem letzten Stück des Seilvielecks bzw. der Tangente der Drucklinie zusammen fielen. Diese Drucklinie würde eine Parabel sein nach dem, was § 8 gesagt ist, wenn der Trägerbogen selbst keine Schwere hätte, sondern nur durch die Brückenbahn mit gleichen Gewichten für gleiche Horizontal-Längen belastet wäre, und sie würde eine sogenannte Kettenlinie sein, wenn wir für gleiche Längen der Drucklinie gleiche Gewichte annehmen dürften. Beide Annahmen treffen hier nicht zu, aber, da es sich für uns doch nur um eine angenäherte Rechnung handelt, so wollen wir uns hier der Anschaulichkeit wegen beider Annahmen nach einander bedienen. Da aber die Kettenlinie ausscheiden muss, wie schon früher angegeben, so werden wir statt ihrer annehmen, die Drucklinie sei ein Kreisbogenstück, gelegt durch die Kämpfergelenke und den Scheitelmittelpunkt und gleiche Bogenlängen desselben hätten gleiche Schwere.

I. Annahme: Die Drucklinie sei eine Parabel. Die aus H und V als Komponenten im Drehpunkte gebildete Kraft S ist Tangente an die Parabel in ihrem Endpunkte (vgl. S. 16).

Denken wir uns nun diese Tangente in A (Fig. 22a) an die Parabel gelegt und bezeichnen ihren Schnittpunkt mit der durch den Scheitelpunkt P_0 gelegten Hauptachse mit M_1 , so ist nach dem, was in § 8 bewiesen wurde, P_0 der

Mittelpunkt von MM_1 und also $MM_1 = 2MP_0 = 2h$. Als Scheitelwinkel sind ferner die von den Kräften S u. H bzw. von AM_1 und AM gebildeten Winkel einander gleich, und deshalb $\operatorname{tg} a_n = \frac{V}{H} = \frac{2h}{w}$;

$H = V \frac{w}{2h}$. Das Gewicht der Mittelöffnung, welches auf den vier Kämpfern lastet, beträgt nun für jeden Kämpfer $V = 546$ Tonnen. Nehmen wir für diese Berechnung als Spannweite die Entfernung der äussersten, Ober- und Untergurt verbindenden Vertikalen $2w = 187,2$, und als Höhe des Scheitelmittelpunktes über der Kämpferlinie $h = 32,4$ m, so ist $H = 546 \cdot \frac{93,6}{64,8} = 789$ Tonnen. Der richtige Wert beträgt 771 Tonnen, und diesen würden wir durch die vorstehende Rechnung fast genau erhalten haben, wenn wir P_0 nicht in die Mitte des Querschnittes, sondern an das obere Ende des mittleren Drittels gelegt und also $h = 33,2$ m gesetzt hätten.

II. Annahme: Die Drucklinie sei ein Kreisbogenstück, bei dem gleiche Bogenlängen gleiche Schwere (Gewicht) haben.

Würden wir auch hier annehmen, die Tangente des Kreisbogenstückes in A fielen mit der Richtung der Kraft S zusammen, wie es sein müsste, wenn die Drucklinie wirklich das durch die Kämpfer und den Scheitelmittelpunkt gelegte Kreisbogenstück AA_1 (s. Fig. 34) wäre, so würde der Fehler der in dieser Annahme steckt, sich sehr stark bemerklich machen und uns den Wert $H = 694$ Tonnen liefern. Diesen Fehler könnten wir dadurch verringern, dass wir statt des Kreisbogens einen Korbbogen annahmen oder noch einfacher, dass wir den Untergurt des Bogens selbst als Kreisbogen-Drucklinie betrachteten. Alsdann ergäbe sich nach einigen Rechnungen $H = 764$ Tonnen. Der Einfluss der Krümmung der gewählten Kurve und damit der in unserer Annahme steckende Fehler macht sich aber viel weniger geltend, wenn

wir die Berechnung von H mit Hilfe der statischen Momente und der Schwerpunktsbestimmung durchzuführen suchen:

Bezeichnet $AP_0 = b$ den halben Kreisbogen, wobei P_0 (Fig. 34) wieder Scheitelmittelpunkt sein soll, so denken wir uns b in sehr viele (n) gleiche Stücke geteilt, deren geringe Länge gestattet, sie trotz ihrer Krümmung als gerade Strecken anzusehen. CD sei ein solches Stück, welches durch eine senkrechte und eine wagrechte Kathete in das rechtwinklige Dreieck CDE gebracht sei. $FI = p$ sei vom Mittelpunkt von CD senkrecht auf MP_0 gefällt, und endlich $OF = r$ gezogen. Dann ist $\varepsilon \cdot p$ das statische Moment von CD in Bezug auf P_0M und, da $\sphericalangle CDE = \sphericalangle OFI$ und $\cos CDE = \frac{DE}{\varepsilon}$, sowie $\cos OFI = \frac{p}{r}$, so ist $\frac{DE}{\varepsilon} = \frac{p}{r}$ oder $p \cdot \varepsilon = r \cdot DE$. Denken wir uns nun die statischen Momente aller einzelnen Strecken ε und die entsprechenden rechtwinkligen Dreiecke CDE gebildet und bezeichnen die Katheten DE mit q_1, q_2, \dots, q_n so ist $p_1 \varepsilon_1 + p_2 \varepsilon_2 + \dots + p_n \varepsilon_n = r q_1 + r q_2 + \dots + r q_n = r(q_1 + q_2 + \dots + q_n)$. Da aber die Summe der Katheten DE gleich der Höhe $P_0M = h$ ist, so ist $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = h$, und die Summe der statischen Momente der einzelnen Bogenstücke und damit das statische Moment des ganzen Bogens in Bezug auf MP_0 gleich $r \cdot h$. Denken wir uns aber den ganzen Bogen $AP_0 = b$ im Schwerpunkte konzentriert und bezeichnen dessen Abstand von P_0M mit x , so ist das statische Moment des ganzen Bogens b auch gleich $b x$, und somit $b x = r \cdot h$; $x = \frac{r h}{b}$. Um b zu berechnen, benutzen wir $\sphericalangle AOP_0 = \varphi$ oder $\sphericalangle MAP_0 = \frac{\varphi}{2}$; es ist nämlich $\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{h}{w} = \frac{32,4}{93,6}$ und hieraus $\varphi = 38^\circ 11' 14'' = 38,187$. Nun findet aber (s. math. Einleitung) eine Proportionalität zwischen Bogen und Winkel statt $b : \varphi = 2 r \pi : 360$ $b = r \frac{\pi \varphi}{180} = r \frac{\pi \cdot 38,187}{180} = 0,6665 r = \frac{2}{3} r$. Setzen

wir dieses in $x = \frac{r h}{b}$ ein, so ist $x = \frac{3}{2} h = \frac{3}{2} \cdot 32,4 = 48,6$ m. Mithin ist der Horizontalabstand des Schwerpunktes von P_0M gleich 48,6 m, und somit der Horizontalabstand desselben vom Kämpfer gleich $w - x = 93,6 - 48,6 = 45$ m.

Denken wir uns jetzt in diesem Schwerpunkte das einen jeden Kämpfer belastende Gewicht $V = 546$ Tonnen konzentriert, so ist dessen statisches oder Dreh-Moment in Bezug auf den Kämpfer gleich 546.45. Das entgegengewirkende Dreh-Moment der in P_0 d. h. 32,4 m über dem Kämpfer angreifenden Horizontalkraft H ist dagegen gleich $32,4 \cdot H$. Da Gleichgewicht besteht, so müssen beide Momente gleich sein, $32,4 H = 546 \cdot 45$, und daher $H = 546 \cdot \frac{45}{32,4} = 758$ Tonnen.

Die durch beide Methoden gefundenen Werte 789 und 758 Tonnen kommen dem wahren Werte des Horizontalschubes $H = 771$ näher, als unsere willkürlichen Annahmen eigentlich erwarten liessen.

Da beide Bogen der Mittelöffnung sich mit zwei Kämpfern auf jeden Pfeiler stützen, so wirken sie auf jeden Pfeiler mit den Schub- und Druckkräften $2H$ und $2V$, welche sich nach dem Parallelogramm (Rechteck) der Kräfte zu einer Resultante $2S = \sqrt{(2H)^2 + (2V)^2} = 1890$ Tonnen vereinigen. Hierbei ist der richtige Wert $H = 771$ Tonnen eingesetzt. Lassen wir diese Kräfte $2S$ bzw. $2H$ und $2V$ in der Mitte zwischen beiden Auflagern desselben Pfeilers angreifen und bezeichnen den von $2S$ und $2H$ gebildeten Winkel mit φ_1 , so ist $\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{V}{H}$ und $\varphi_1 = 35^\circ 18' 18''$.

Zum Schlusse dieses Abschnittes wollen wir dann noch untersuchen, wie der Strompfeiler gegen diesen, während eines Teiles der Bauzeit einseitigen Druck des Mittelbaues sich verhält: Stellt Figur 35 einen vertikalen Querschnitt durch die Mitte des Pfeilers dar, so erhalten

wir das Drehmoment der Kraft $2S$ in Bezug auf die durch A gehende untere Fundament-Längskante, wenn wir $2S$ mit AI multiplicieren. AI bezeichnet hierbei die Länge der von A auf die Richtung von $2S$ gefällten Senkrechten. Schneiden sich dann die Verlängerungen von $2S$ und A_1A in T , so ist auch $\sphericalangle PTL = \varphi_1 = 35^\circ 18' 18''$ und $PL = 17,4$ m (rund). Da aber $\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{V}{H} = \frac{PL}{TL}$, so ist $TL = PL \cdot \frac{H}{V} = 17,4 \cdot \frac{771}{546} = 24,6$ m (rund) und, da $AL = 11,9$ m (rund), so ist $AT = 12,7$ m. Ferner ist aber $\sin \varphi = \frac{AI}{AT} = \frac{V}{S}$ und daher $AI = AT \cdot \frac{V}{S}$. Mithin hat $2S$ das Drehmoment $AI \cdot 2S = AT \cdot \frac{V}{S} \cdot 2S = 2AT \cdot V = 13868,4$.

Diesem Dreh- oder Kippmoment wirkt das statische Moment des Pfeilergewichtes, bezogen auf dieselbe durch A gehende Längsachse, entgegen. Dieses 10000 Tonnen (rund) betragende Gewicht lassen wir der Einfachheit wegen in der Mittellinie des Pfeilers und zwar im Schnittpunkte M derselben mit der Richtung von $2S$ angreifen. Dann ist der Hebelarm AM_1 gleich 7,9 m, und daher das statische Moment gleich 79000. Die Standfestigkeit des Pfeilers ist also fast 6 Mal so gross als das Kippmoment, mit dem der Mittelbogen auf den Pfeiler wirkt.

Eine Bestätigung dieses Resultates können wir darin erblicken, dass der in Fahrbahnhöhe gelegene Teil der mittleren Vertikalachse sich nur um 3 mm verschob, als der Mittelbau Mitte Oktober 1897 auf die Pfeiler durch Niederschrauben der Winden abgelassen wurde.

Eine noch bessere Vorstellung von dem Zusammenwirken der Kräfte G und $2S$ bzw. $2H$ und $2V$ erhalten wir dadurch, dass wir $2S$ von seinem Angriffspunkte P nach M verschieben, dort $2V$ mit dem Pfeilergewichte G vereinigen und dann nach dem Parallelogramm (Rechteck) der Kräfte die Resultante von $(G+2V)$

und $2H$ suchen. Hierdurch erhalten wir $R = \sqrt{(G+2V)^2 + (2H)^2} = 11200$ Tonnen. Um den Punkt zu finden, wo diese in M angreifende Kraft R die Fundamentbasis AA_1 trifft, bezeichnen wir den von R und $(G+2V)$ gebildeten Winkel mit β , dann ist $\operatorname{tg} \beta = \frac{2H}{G+2V} = \frac{QM_1}{MM_1}$ oder $QM_1 = MM_1 \cdot \frac{2H}{G+2V} = 14,6 \cdot \frac{2 \cdot 771}{11092} = 2,03$ m. Mithin trifft die aus Bogendruck und -schub und Pfeilergewicht gewonnene Resultante die Fundamentsohle ungefähr 2 m von der mittleren vertikalen Längsebene des Pfeilersockels oder ungefähr 1,10 m von der Fundament-Mittellinie entfernt, da der Pfeiler, wie früher erwähnt, nicht auf der Mitte der Fundamentplatte steht. Das mittlere Drittel der Fundamentsohle würde sich, da ihre Breite 14 m beträgt, bis $2\frac{1}{3}$ m von der Mittellinie erstrecken, somit verläuft auch hier die Drucklinie im mittleren Drittel des Pfeilers, ein Resultat, das hier gerade wie beim Gewölbebau (vergl. § 9) sehr erwünscht ist, weil der Zusammenhang des Pfeilermaterials um so mehr gefährdet ist, je mehr sich die Richtung der Kraft R der Fundament- bzw. Pfeilerkante nähert. Wie wir gesehen, bringt also selbst die einseitige Belastung durch den Überbau der Mittelöffnung den Pfeilern keine Gefahr.

Es würde uns zu weit führen, wollten wir dieselben Rechnungen an den Seitenöffnungen und der Werftbrücke durchführen wie am Mittelbau. Die Verhältnisse liegen bei diesen nur noch günstiger als bei der Mittelöffnung, da den 1600 Tonnen Eisengewicht der letzteren 600—700 Tonnen einer Seitenöffnung gegenüberstehen.

§ 19. Schluss.

Um ein Urteil von berufener Seite über den Bonner Brückenbau anzuführen, wollen wir noch einmal an den Wettbewerb um dieselbe anknüpfen. Hierüber sagt Professor Landsberg-Darmstadt im Centralblatt der Bauverwaltung:

„Das Ergebnis des Wettbewerbs kann als erfreulich und sehr befriedigend bezeichnet werden, zunächst für die Stadtverwaltung Bonn, dann aber auch und in noch höherem Masse für die Fachwelt. Der Wettbewerb hat gezeigt, welche hohe Stufe unsere Ingenieurkunst auf dem Gebiete des Brückenbaues erreicht hat, welcher grosser Fortschritt im letzten Jahrzehnt gemacht ist, und mit welcher hohen praktischen Sachkenntnis und gediegenen Wissenschaftlichkeit in unseren Brückenbauanstalten gearbeitet wird. Wieder einmal ist der Beweis geführt, dass unsere deutsche Brückenbaukunst trotz Forth- und East-River-Brücke derjenigen aller anderen Länder, bescheiden ausgedrückt, mindestens ebenbürtig zur Seite steht, ein Ergebnis, welches schon bei Gelegenheit der Weltausstellung in Amerika festgestellt war.“

Versuchen wir jetzt, uns die Brücke, wie sie nach ihrer Vollendung sich dem schauenden Auge darstellen wird, aus dem schon Vorhandenen mit Hilfe der Zeichnung (Fig. 36) vorzustellen, so werden wir auch an ihr das Wort Wallots, des Erbauers des Reichstags-Palastes, bewahrt finden, dass zu den drei Schwesterkünsten: Malerei, Bildhauerkunst und Architektur, neuerdings auch die Ingenieurkunst getreten ist. Wollen wir aber den richtigen Eindruck von unserer Brücke gewinnen, wie sie gedacht und gebaut, so müssen wir sie von der Seite betrachten, welche uns das Siebengebirge und die benachbarten linksrheinischen Berge zum Hintergrunde giebt. Dieser Hintergrund in Verbindung mit dem Stadtbild von Bonn war ja bestimmend für die gewählte Form der Brücke. Lassen wir daher den Beschauer mit dem Dampfschiffe von Köln her sich Bonn nähern, so erscheint die Brücke als das Thor, welches den Eingang zum herrlichen Rheinpanorama gewährt. Leicht geschwungen, wie die Berge des Hintergrundes, überzieht die Brücke den Strom und gewährt Durchfahrtsöffnungen, welche den Grössenverhältnissen des Hintergrundes an-

gepasst scheinen. Und, wie die Berge auf vorlagerndem Hügel land zur alles überragenden Kuppe sich aufbauen, so erhebt sich auch hier über die niederen Seitenöffnungen der das ganze Bauwerk beherrschende und bestimmende Mittelbogen. Wie wichtig dieser Aufbau zur Mitte hin für das Schönheitsgefühl ist, lehrt ein Vergleich unserer Brücke mit der Düsseldorfer (Fig. 37). Dort wird der Strom mit zwei Öffnungen überspannt, die unserem Mittelbogen entsprechen, aber dem Auge gewährt das Bild nicht die ästhetische Befriedigung wie hier, da dort der Mittelpunkt des Bildes fehlt und die einfache aus Schiffsfahrtsrücksichten gebotene Wiederholung des Hauptbogens mehr praktisch als schön erscheint*). Als ein besonderer Vorzug unserer Brücke ist es zu betrachten, dass trotz der überhöhenden Mittelbrücke dem Auge der einheitliche Charakter des Ganzen dadurch gewahrt bleibt, dass alle Bogen mit ihren Kämpfern in gleicher Höhe an die Strompfeiler ansetzen. War diese Bedingung für die Einheitlichkeit des Bildes, so erwuchs hieraus andererseits die Gefahr, dass die den Mittelbogen in Folge dieser Anordnung durchschneidende Fahrbahn durch Störung der Bogenlinie diesen Eindruck nachträglich wieder verdarb. Das ist durch den, die ganze Fahrbahn überragenden, mittleren Obergurt glücklich vermieden, da dieser die Aufmerksamkeit des Beschauers durch seine imponierende Höhe auf sich lenkend, den Bogencharakter kräftig hervorhebt. Daneben macht die ganze Brücke trotz ihrer grossen Spannung, trotz ihrer gewaltigen Lasten einen leichten und gefälligen Eindruck. An diesem sind nicht am wenigsten die schlank aufstrebenden Pfeiler beteiligt, deren neu-romanische Türme und Portale sich in harmonischer Weise dem Stadtbilde anpassen.

Ist auch unsere Brücke schon jetzt nicht mehr die weitgespannteste Bogenbrücke, da

*) Stahl und Eisen, Neuere deutsche Brückenbauten, Förster-Dresden September 97.

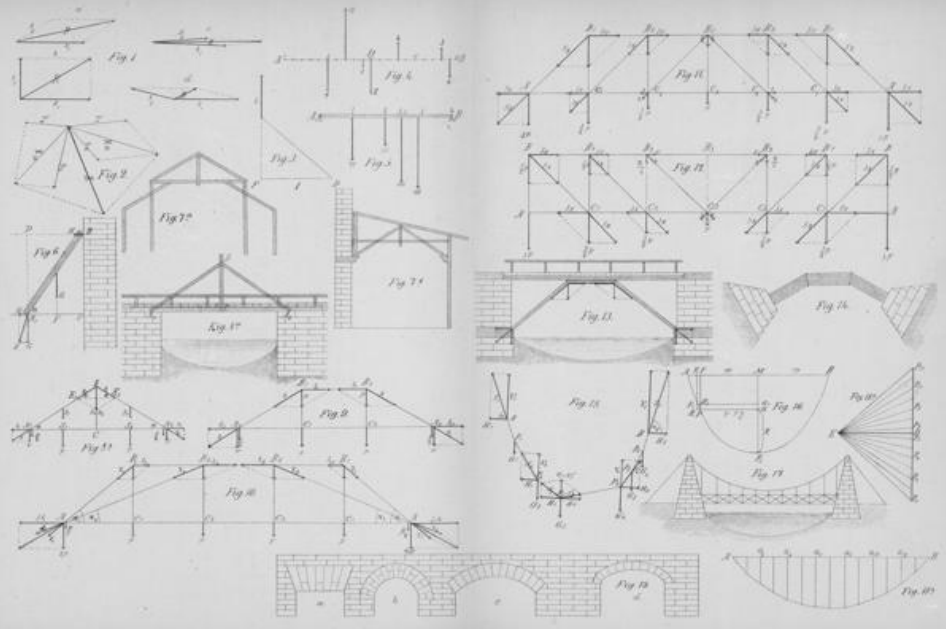
der noch im Bau befindliche Viar-Viadukt im südlichen Frankreich mit 220 m Spannung und 117 m Höhe ihr diesen Ruhm noch vor der Vollendung entrissen, so bedeutet die Bonner Brücke doch eine Stufe in dem Abschnitte des deutschen Brückenbaues, der mit der Levensauer und Grünthaler-Brücke am Kaiser-Wilhelm-Kanal beginnend zur Müngstener, Bonner, Düsseldorf und den beiden Wormser Brücken führt. Für unsere Stadt und ihre Entwicklung aber bedeutet die Vollendung der Brücke einen

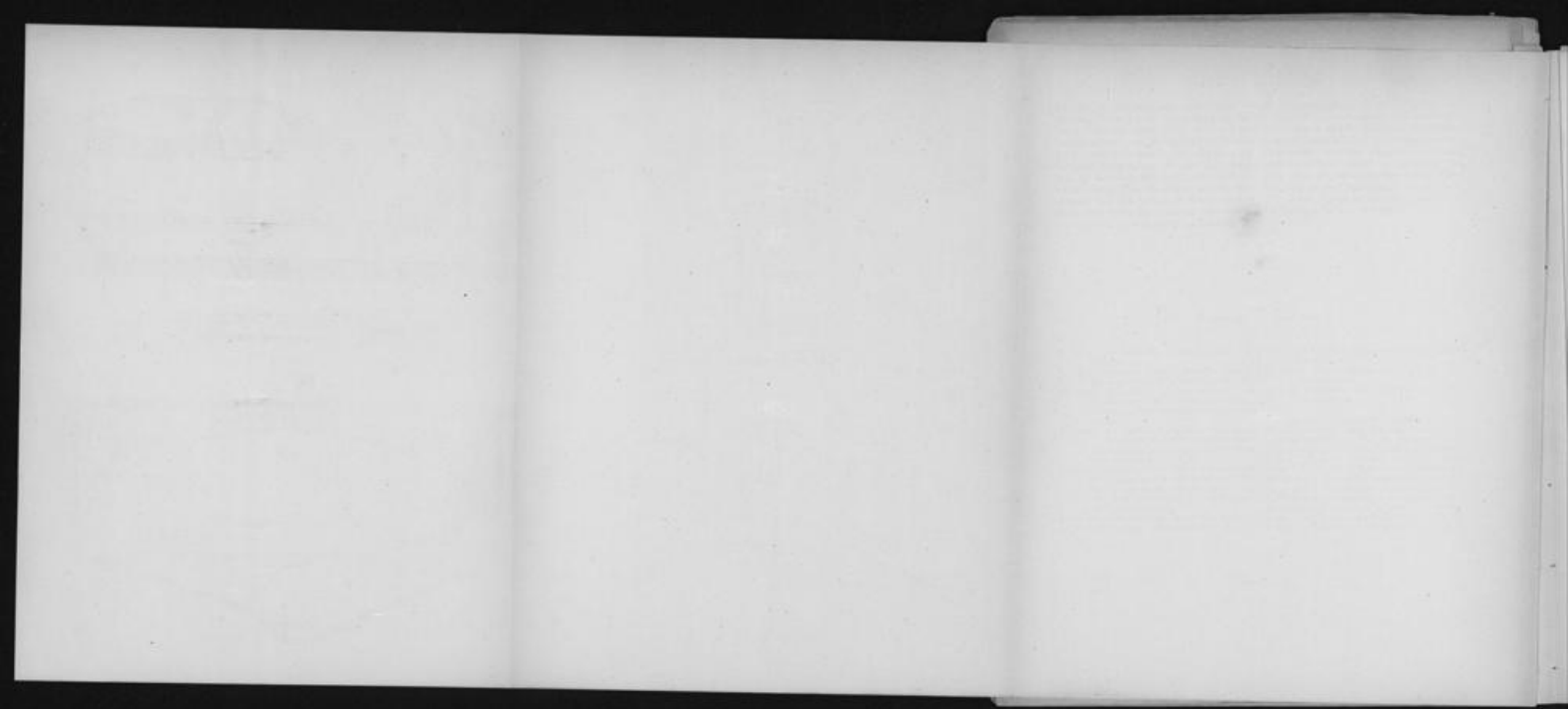
neuen Lebensabschnitt, der ihr ermöglichen soll, nicht nur die alten Beziehungen mit dem rechtsrheinischen zu gleicher Zeit durch Kleinbahnen aufgeschlossenen Uferland zu behaupten, sondern auch weiter rückwärts gelegene, schon fast verlorene Gebiete wieder zu gewinnen. So möge denn die Erbauung der Brücke einen Merkstein in der Entwicklung unserer Stadt bilden, der Gegenwart und den kommenden Geschlechtern zu Heil und Segen.

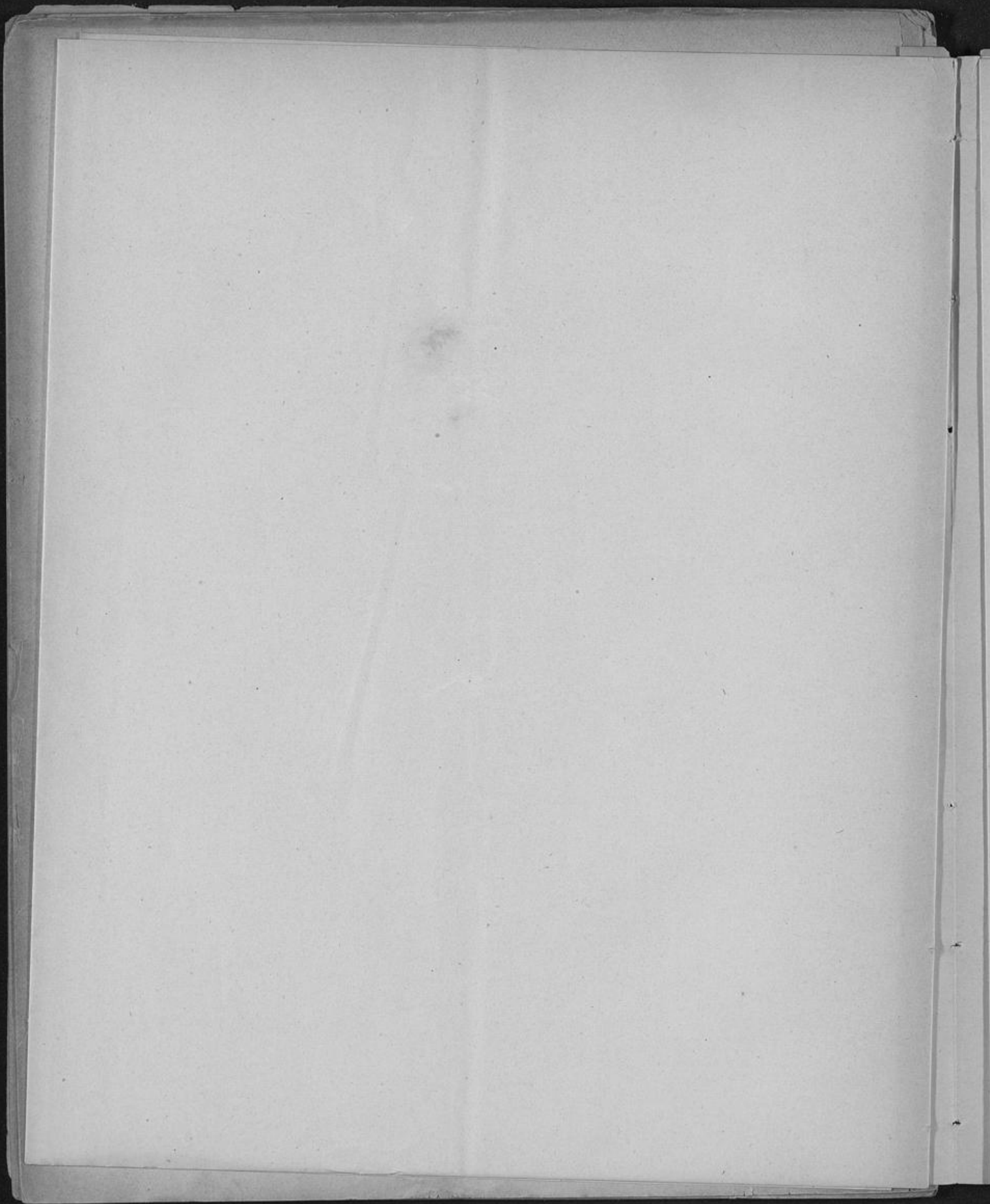
Benutzte Litteratur.

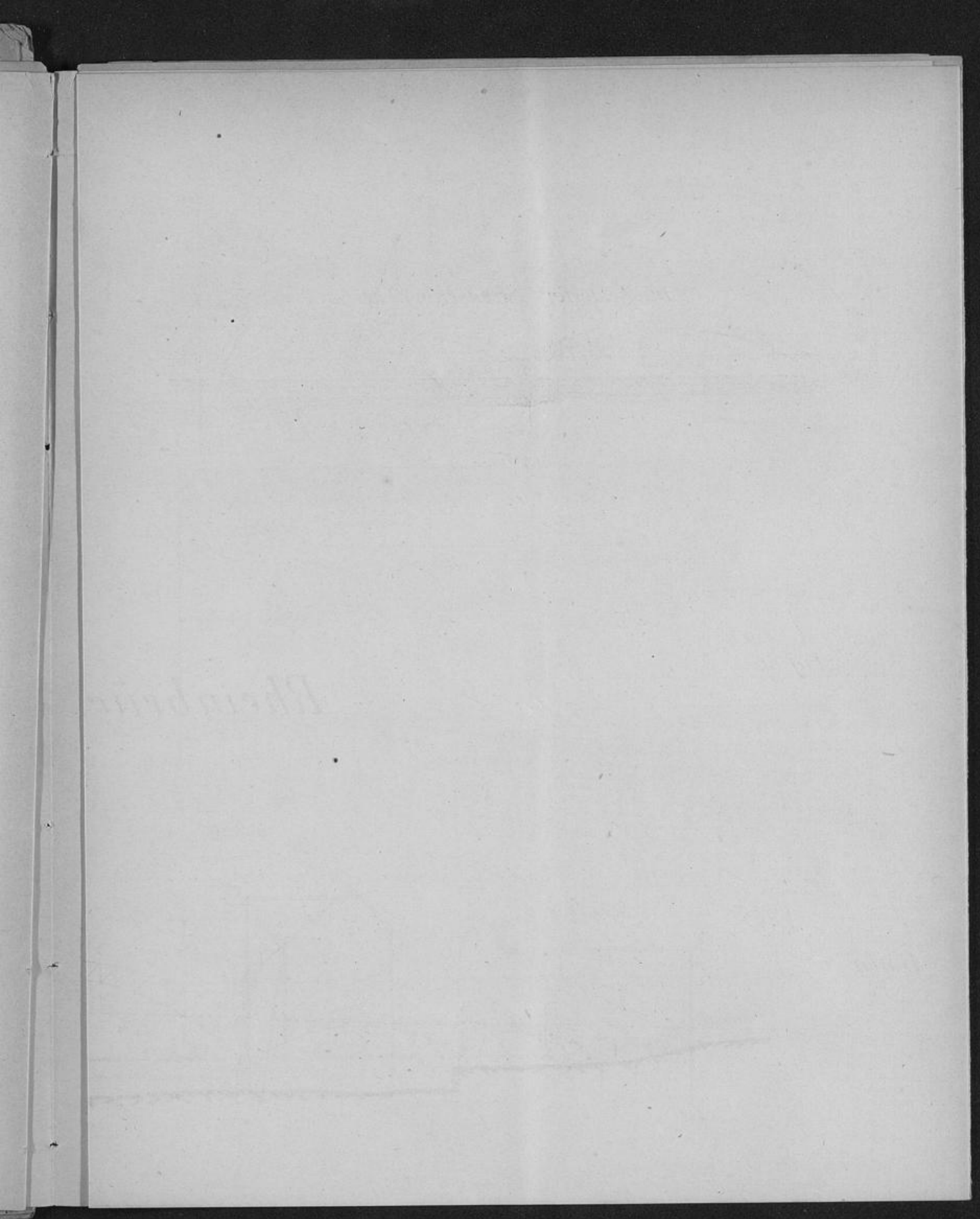
- | | |
|--|--|
| Baumeister-Karlsruhe: Architektonische Formenlehre. | Weisbach-Freiberg: Ingenieur- und Maschinenmechanik. |
| Förster-Dresden: Neuere deutsche Brückenbauten (Zeitschrift: Stahl und Eisen Sept. 97). | Winkler-Berlin: Vorträge über Statik der Baukonstruktionen. |
| Heinzerling-Aachen: 1. Handbuch der Ingenieurwissenschaften. 2. Der Bau eiserner Brücken. 3. Die eisernen Brücken der Gegenwart. | Witzel-Remscheid: Die Kaiser-Wilhelm-Brücke bei Müngsten. |
| Holz Müller-Hagen: 1. Ingenieur-Mathematik. 2. Beziehungen des mathematischen Unterrichts zum Ingenieur-Wesen und zur Ingenieur-Erziehung. | Die dem Texte eingefügten Bilder I, III—V, VII—XII u. XIV sind durch Clichés der Verlags-Buchhandlung Toeche-Berlin und die Nummern II, VI, XIII mit solchen der Firma Brockhaus-Leipzig hergestellt. Von den im Anhange befindlichen Zeichnungen sind Nr. 26, 27 „Baumeister-Formenlehre“, Nr. 28, 29, 30 „Meyers Konversations-Lexikon“ und Nr. 31, 33 u. 37 der Zeitschrift „Stahl und Eisen“ mit Bewilligung der Verlagsbuchhandlungen entnommen. Nr. 36 verdanke ich der Leitung des Bonner Brückenbaues. Die übrigen Zeichnungen sind für die Zwecke der Abhandlung entworfen. |
| Krohn-Sterkrade: Mittheilungen über neuere Brückenbauten (Centr.-Bl. d. Bauverw. 1896). | |
| Landsberg-Darmstadt: Der Wettbewerb für eine feste Rheinbrücke bei Bonn (Centr.-Bl. d. Bauverw. 1895). | |
| Verein der Eisenhüttenleute: Darstellung des Eisenhüttenwesens. Bagel-Düsseldorf. | |

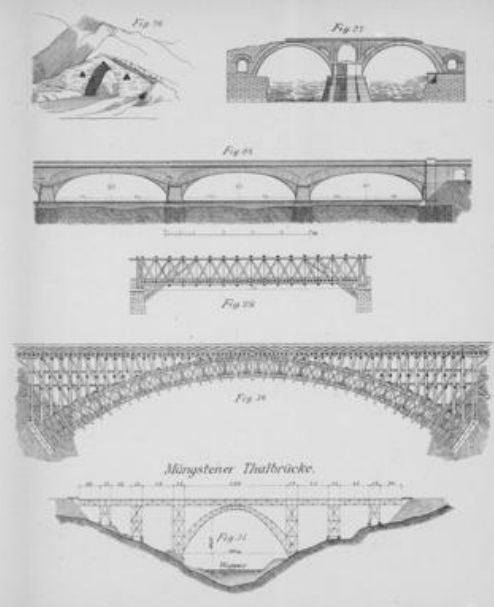
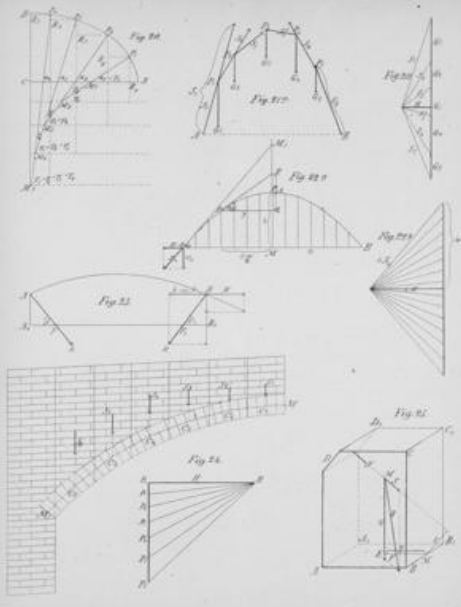








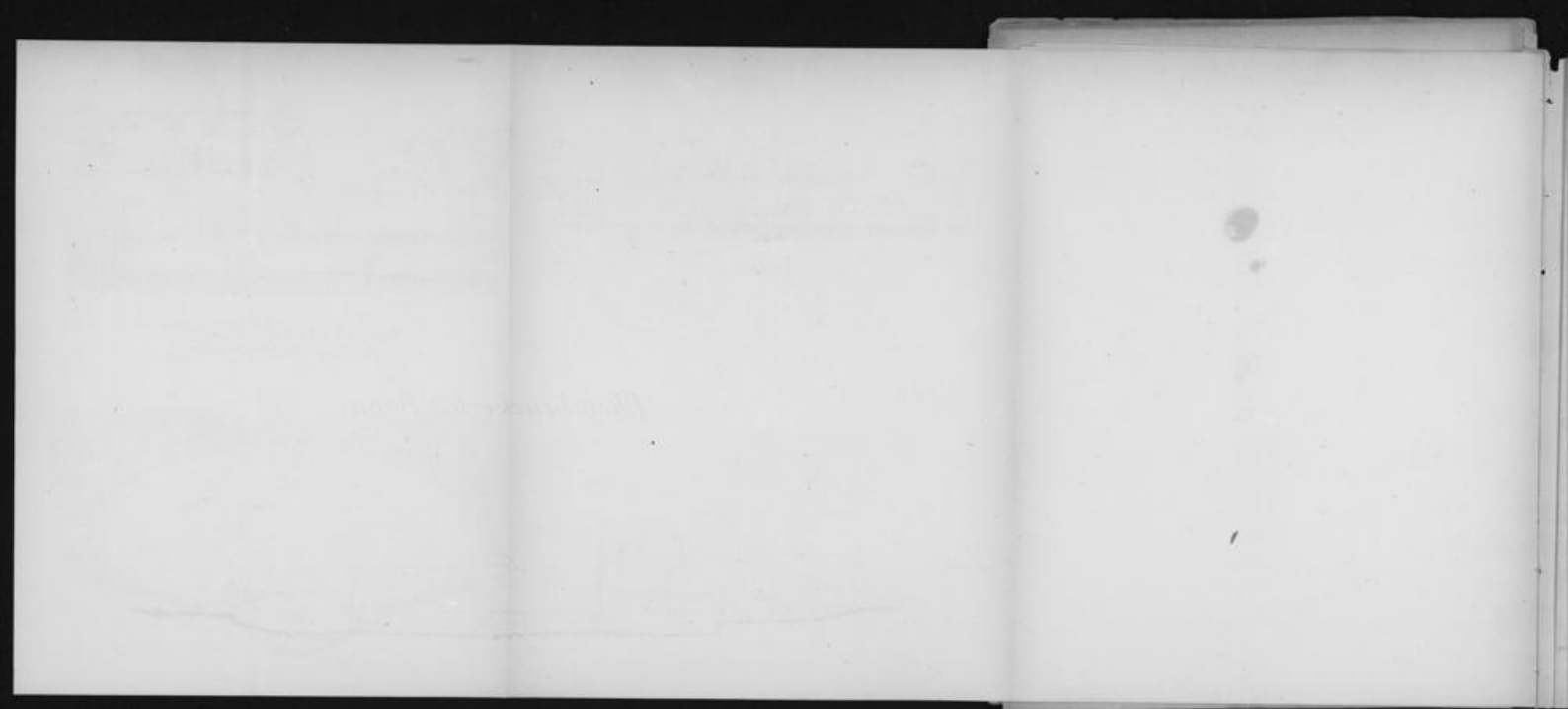




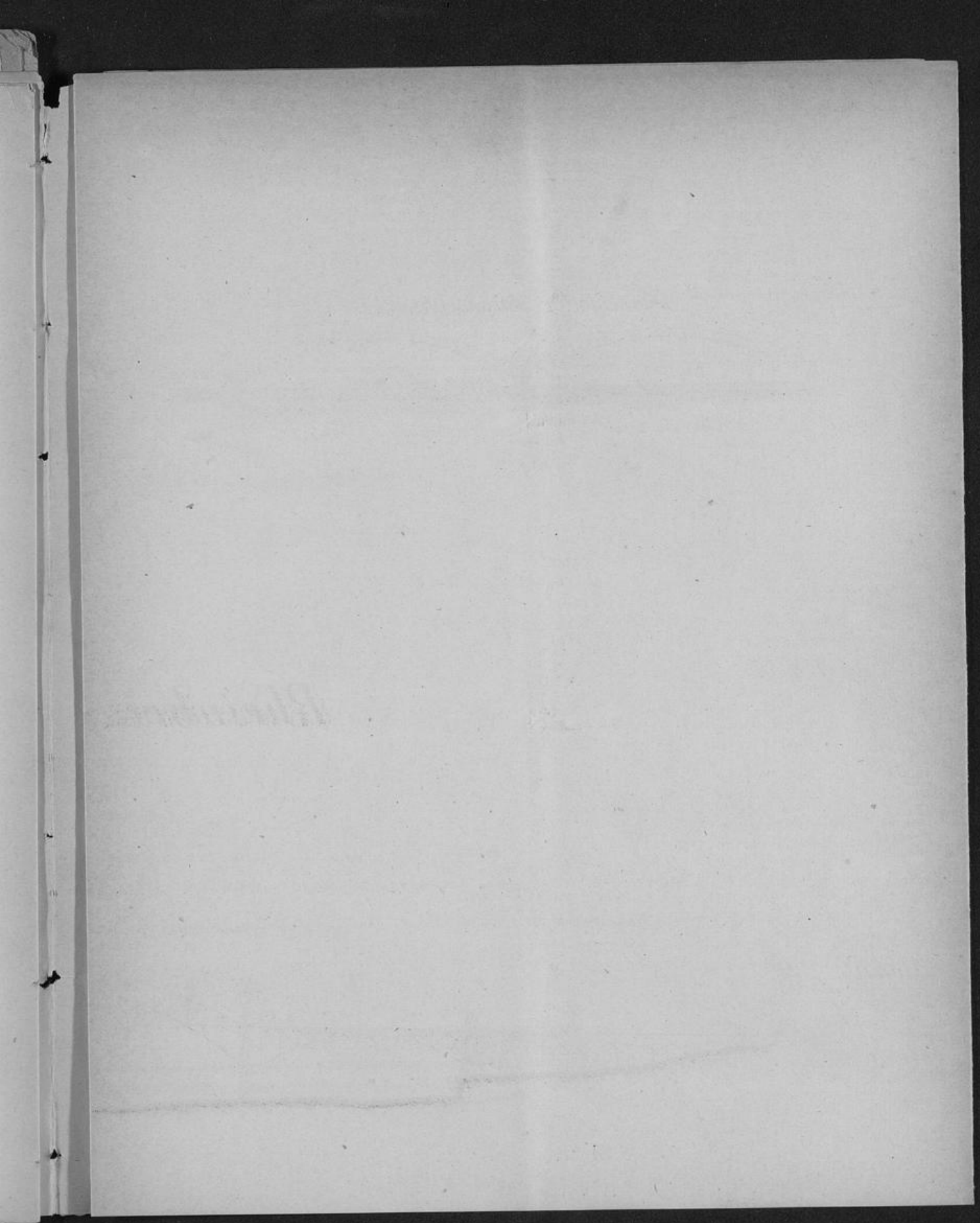
Mürstener Thalbrücke.

Fig. 31









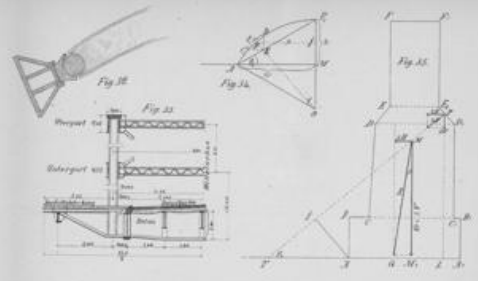


Fig. 36

Rheinbrücke bei Bonn.

