



UNIVERSITÄTS-  
BIBLIOTHEK  
PADERBORN

## **Eisenbauten**

**Meyer, Alfred Gotthold**

**Esslingen a. N., 1907**

Erstes Buch. Grundlagen.

---

[urn:nbn:de:hbz:466:1-84071](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:466:1-84071)

ERSTES BUCH.  
GRUNDLAGEN.

GRUNDLAGEN  
DES RECHENS

# I.

## DER NEUE BAUSTOFF.

«Die Reibung mit der strengen Ausschließlichkeit des Materials schlägt im Geiste des echten Arbeiters die Funken neuer Motive hervor.»

*Friedr. Theod. Vischer.*

Ein Steinbruch. Der Erde Kernbau liegt zu Tage. Mächtige Blöcke werden ihm abgerungen, abgesprengt: schwerfällig sinken sie herab. Der Hammerschlag trifft nur ihre Ränder und Außenflächen; die Hauptmasse scheint unzerstörbar; ihr Wesen bleibt Schwere. Wir sehen und empfinden ihre Kraft als die der Natur selbst. »In der Nähe des Gesteines« — sagt Goethe — »komme ich mir vor wie Antäus, der sich immer neu gestärkt fühlt, je kräftiger man ihn mit seiner Mutter Erde in Berührung bringt.«

Ein Eisenhüttenwerk. Seine Hauptgottheit ist das Feuer; zu immer neuer Glut schürt es der Wind. Unter ihrer Macht wird das Erz geschmolzen, zum fließenden Strom. Überall: Bewegung. Riesenhämmern und Walzen bringen sie wieder in feste Form; dann aber ist das rotglühende Leben für immer erstarrt.

Beide, Stein und Eisen, sind unorganische Stoffe, allein jener ist »der verhärtete Niederschlag großer Erdrevolutionen selbst«, dieses deren kluge Nachahmung durch Wissenschaft und Technik: dem Naturgebilde gegenüber ein Surrogat. In der Steinmasse scheinen noch lebendige Kräfte zu schlummern. Man kann zu ihnen hindurchdringen, sie erwecken und gestaltend beleben. Das Eisen aber ist tot. Wir wissen, daß seine Kraft gewaltig ist, aber in der Natur sehen wir sie nicht; wir haben sie aus dieser herausgeschmolzen und zusammengeschweißt, aber dabei schwand ihr auch jene geheimnisvolle Anziehungskraft der Erde, die selbst noch dem Gestein innewohnt. Im Stein spüren wir den natürlichen Geist der Masse. Das Eisen ist uns nur künstlich komprimierte Festigkeit und Zähigkeit.

Bei deren Ausnutzung gelangten Jahrtausende nicht über stammelnde Versuche hinaus. Die Geschichte des Eisens gliedert sich in völlig ungleiche Abschnitte<sup>1</sup>. Die größten Erfolge der Eisengewinnung und Eisenbearbeitung drängen sich erst in die letzten vier Menschenalter zusammen. Dem modernen Eisenhüttenwesen gegenüber ist die Eisengewinnung bis zum Schlusse des 15. Jahrhunderts gleichsam nur eine prähistorische Zeit. Denn bis dahin kannte man überhaupt nur das »schmiedbare Eisen« der »Rennarbeit«, das durch Ausschmelzung *unmittelbar* aus den Erzen ge-

<sup>1</sup> Die folgenden Zeilen können natürlich nur in Stichworten skizzieren, über deren Bedeutung aber jedes einschlägige Handbuch Auskunft gibt. Das maßgebende Werk ist Beck, Geschichte des Eisens. 3 Bde. Braunschweig 1893—95. Aus der Fülle von Handbüchern seien neben den betreffenden Abschnitten im »Buch der Erfindungen« (V. Bd., S. 382 ff.) genannt: G. Mehrrens, Eisen und Eisenkonstruktionen. Berlin 1887. (Handbuch der Baukunde. Abt. I. Bd. II. Heft I.) M. Förster, Die Eisenkonstruktionen der Ingenieur-Hochbauten. Leipzig 1893. (Ergänzungsband zum »Handbuch der Ingenieur-Wissenschaften«.)

wonnen wurde. Das primitive Gebläse der Handbälge ergab nur niedrige Hitzegrade; erst bei der Ausnutzung der Wasserkraft für die Blasebälge in den größeren »Blaseöfen« begann die für die gesamte Folgezeit maßgebende *mittelbare* Eisenerzeugung: die systematische Darstellung flüssigen Roheisens und dessen Umwandlung in schmiedbares Eisen.

Dieses liefert seitdem der Hochofen als Gußeisen, indem er dem Eisenoxyd den Sauerstoff nimmt (»Reduktion«) und die Schlacken ausscheidet, und aus diesem Gußeisen wird das *schmiedbare* Eisen erst mittelbar durch Entkohlung mittels Oxydation auf dem offenen Frischherd gewonnen. Der Verarbeitung seiner Eisenballen (»Luppen«) brachten die durch Wasser getriebenen Hammerwerke eine gewaltige Kraftsteigerung.

Das 18. Jahrhundert ersetzte die Holzkohle durch die Steinkohle und die Wasserkraft durch die Dampfkraft, eine neue Epoche der Eisengewinnung aber beginnt erst an seinem Ende durch den *Puddelprozeß*, der das im *Flammofen* durch die Steinkohlenflamme geschmolzene Roheisen dadurch in schmiedbares Eisen (»Schweiß-eisen«, »Schweißstahl«) umarbeitet, daß er Luft einrührt (»puddelt«). Die konstruktive Überlegenheit dieses Puddel- oder Schweißeisens über das Gußeisen konnte nicht lange verborgen bleiben.

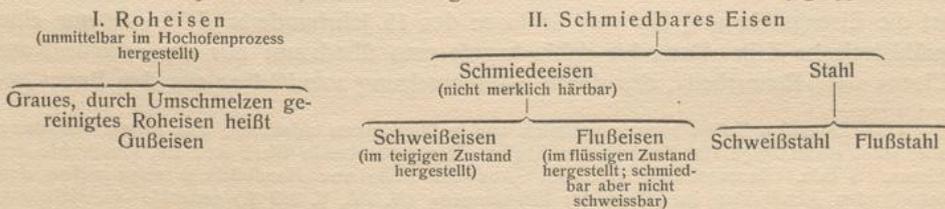
Gleichzeitig mit Verbesserungen dieses Puddelverfahrens durch Anwendung chemischer Prozesse, die der Eisenerzeugung zu gute kommen, bringen die *Walzwerke* der Eisenbearbeitung eine neue mechanische Gestaltungskraft von größter Tragweite: das Eisenblech verdrängt die gußeisernen Wandungen, und »die Schiene wird Vorläuferin des Formeisens«.

Die weitaus größten Wandlungen in der Geschichte des Eisens beginnen jedoch erst um die Mitte des 19. Jahrhunderts mit den völlig neuen Methoden der Eisendarstellung in den Hüttenwerken. Den Markstein bildet das *Bessemer-Verfahren* (Patent 1855), bei dem das geschmolzene Roheisen durch eingepreßte Luft im drehbaren, birnenförmigen Zylinderofen (»Birne«, »Konverter«) zu *schmiedbarem Flußeisen* entkohlt wird. Erst auf diesem Wege gelang es, auch im Flammofen »ohne Hilfe der Tiegel oder des Herdes« große Eisenmengen zu schmelzen.

Das nur auf Druck zu beanspruchende *Gußeisen* liefert heute im wesentlichen die Freistützen.

Für die eisernen Trägerkonstruktionen in der Raumüberdeckung und Überbrückung in der Gegenwart ist das Hauptmaterial das *Flußeisen*<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Die verschiedenen Darstellungsprozesse haben den ganzen Begriff »Eisen« bereits so weit vermehrfacht, daß sogar eine neue Benennung der Gattungen selbst notwendig wurde. Auf Grund der 1876 in Philadelphia vereinbarten Einteilung unterscheidet man heute als Hauptgruppen:



Das in Deutschland »Flußeisen« genannte Material, »das zwar stahlartigen Charakter zeigt, in seinen sonstigen Eigenschaften aber dem zähen Schweißeisen gleicht«, heißt in Frankreich gewöhnlich: »acier doux«, in Amerika: »soft steel« oder »medium steel«. Vergl. Mehrtens, Brücken a. a. O. S. 7.

Neuerdings findet für weitgespannte Brücken des geringen Eigengewichts wegen der *Nickelstahl* Verwendung.

\* \* \*

Eine ungeheure Summe von Erfahrung, Wissenschaft — insbesondere der Chemie — und Technik also war nötig, um dem Eisenbau des 19. Jahrhunderts überhaupt erst das Rohmaterial zu liefern: dieses Material selbst hat schon in seinen ersten hundert Jahren wesentliche Wandlungen erfahren — Gußeisen, Schweißeisen, Flußeisen — so daß heut dem Bauingenieur ein völlig anderer Baustoff zur Verfügung steht als vor etwa fünfzig Jahren. Das Tempo dieser Verbesserungen beschleunigt sich, und die ihnen gewidmete Arbeit der wissenschaftlichen Technik schreitet neben den Eisenbauten im internationalen Austausch rastlos bessernd vorwärts.

Das sind im Sinne geschichtlicher Betrachtung »Fermente« von beunruhigender Wandelbarkeit. Kein Baustoff bietet etwas auch nur annähernd Verwandtes. Man steht hier am Anfang einer mit rasender Schnelligkeit weiterstrebenden Entwicklung.

Für stilistische Erörterungen ist das der ungünstigste Boden. Selbst deren verhältnismäßig sicherer Teil, die »Materialstilistik«, die sich nur auf die technischen Bedingungen des Stoffes und seiner Bearbeitung stützt, versagt hier, denn eben diese Bedingungen verflüchtigen sich zu »unbegrenzten Möglichkeiten«.

Vor allem gerade in ihrem hier maßgebenden Einfluß auf die Formenbildung. Schon jetzt darf als Grundsatz ausgesprochen werden, daß das Eisen als Baumaterial überhaupt an keine durch seine Natur unabänderliche Form gebunden ist: es läßt sich schlechterdings keine beim »Bauen« verwendbare Form denken, in die es nicht zu bringen wäre.

Und es läßt sich schon heute mit Sicherheit voraussagen, daß der »Eisenstil« diese formale Bewegungsfreiheit bis aufs äußerste ausnutzen wird. Denn die unbedingt bleibenden Vorzüge des Eisens als Baumaterial vor Stein und Holz sind zu wesentlich, um überhaupt nur die Möglichkeit zuzulassen, daß es aus dem Dienste der Raumüberdeckung und Raumüberbrückung jemals wieder ausscheiden werde.

Das Eisen ist an Festigkeit dem Stein vierzigfach, dem Holz zehnfach überlegen und hat jenem gegenüber trotzdem nur das vierfache, diesem gegenüber nur das achtfache Eigengewicht. Ein Eisenkörper besitzt also im Vergleich mit einem gleichgroßen Steinvolumen bei nur viermal größerer Schwere eine vierzigmal größere Tragkraft. Diese statische Überlegenheit des Eisens vor allen anderen bisher verwandten Baumaterialien macht es zum besten Stoff jeder »rationalen Konstruktion«, die ein Höchstmaß von Tragfähigkeit mit einem Mindestmaß von Material erreichen will.

Von diesem rein technisch-konstruktiven »Willen« ist hier auszugehen.

Er beherrscht unter dem Einfluß äußerer Verhältnisse den gesamten Nutzbau. In der Baukunst dagegen hat seine Macht stark geschwankt, denn sie fand dort in dem allgemeinen »Formenwillen« oft einen starken Gegner.

Es gibt Stilepochen, die solche rationale Konstruktion überhaupt nicht aufkommen ließen. So die gesamte altorientalische Architektur. Ihr war der Aufwand an Baumaterial ein unentbehrlicher Teil der Monumentalität, wie der Aufwand an Menschenmaterial ein Zeichen der Macht. Ähnlich im kaiserlichen Rom. Von ihm lernte es

die italienische Hochrenaissance: sie liebte in der Masse den Überschuß an Kraft. Die gleiche Neigung, jedoch wiederum in anderer psychologischer Absicht, hat der Barock: »ein sichtliches Behagen an der dumpfen Ausbreitung der Masse«.

Dem konstruktiven Überschuß der altorientalischen Baukunst gegenüber bezeichnet die hellenische Baukunst eine Annäherung an jenes rationelle Konstruktionsprinzip. Allein sie reicht nur bis zum Gleichgewicht zwischen Mittel und Zweck. Der Gedanke an ein Minimum und Maximum bleibt ihr überhaupt fern, und gerade dadurch wirkt sie so vollendet. Die erste Störung dieses Gleichgewichtes bringt der Gewölbebau, und dabei sinkt naturgemäß die Seite der Mittel herab: bei den Widerlagern der Gewölbe war aus rein konstruktiven Gründen das »zu Wenig« so gefahrvoll, daß man ganz bewußt ein »zu Viel« vorzog. Die Ausglei chung zwischen beiden bestimmte in wesentlichem Grade die Entwicklung der römischen und weiter der romanischen Baukunst, und bei beiden spielte dann auch der fortifikatorische Zweck hinein. Bei beiden aber entscheidet endlich wiederum das psychologische Bedürfnis zu gunsten der Massigkeit.

Den Umschwung bewirkt erst die Gotik.

In den Kirchen ihrer Frühzeit: außen ein Aufwand von Mauermassen, der für den Eindruck des Innern selbst ästhetisch zu groß erscheint; in der Blütezeit: ein Gleichgewicht, ebenso köstlich wie im hellenischen Tempel, aber schon mit sichtlichem Streben, die tragenden Glieder nicht über das Notwendige hinauswachsen zu lassen; in der Spätzeit dann: die bedingungslose Herabminderung ihres Umfanges auf das Unerläßlichste. Damit ist die »rationelle Konstruktion« des Steinbaues an ihre äußerste Grenze gelangt.

Für die Gotik ist das Problem der Masse das ihres Wesens; es umschließt dieses auch im psychologischen Sinn. Sie löst es durch »Entmaterialisierung«. Schon dadurch tritt sie unter allen bisherigen Stilen der Steinarchitektur den Grundbedingungen des Eisenbaues am nächsten.

Allein der letztere ist seinem struktiven Wesen nach nicht dem Stein verwandt, sondern dem Holz: rationelle Konstruktion lehrte am frühesten und besten der Holzbau. Er kann nicht von der unerschöpflichen Masse ausgehen wie der Stein; das Stoffvolumen, mit dessen Tragfähigkeit er rechnet, ist durch die Natur selbst in unabänderliche Grenzen eingeschlossen; seinen Umfang bestimmt der Baumstamm. Das Bauwerk besteht also hier in einem »Zusammenfügen starrer, stabförmig gestalteter Teile zu einem in sich unverschiebbaren System«, wie Semper sagt, und diese »Tektonik« ersetzt die Masse durch zusammengefügte Einzelglieder. Bei ihrer Verwendung als Baustoff sind auch diese »tot«. Aber sie hatten organisches Leben; es ist nur »abgestorben«. Seine Spuren stehen im Laufe der Fasern, in den Jahresringen, in den Schnittstellen der Wurzeln und Zweige vor Augen. Wir werten sie als Erzeugnisse organischer Lebensenergie. Und sie haben eine bestimmte Richtung, die an die aufsteigende und in der Verzweigung sich ausbreitende Kraft des wachsenden Baumes erinnert. Auch das Holz ist dem Stein gegenüber konzentrierte Zähigkeit, aber bei ihm schuf diese unmittelbar die Natur selbst. Dem Eisen gleicht es nicht als tektonischer Stoff, sondern höchstens als tektonische Form.

Deren Wesen wird durch den Umfang des Balkens bestimmt: durch ein stabförmiges Gebilde. Der Blockbau aus wagrecht aufeinander geschichteten Balken und der Palisadenbau aus senkrecht aneinander gerückten Pfosten gibt feste Wände.

Mit ihm von mindestens gleichem Alter, aber von weit reicherer Entwicklung ist der Ständerbau. Schwelle, Ständer und Rahmstück bilden als Ganzes ein Fach; durch eingezogene Streben, die dasselbe schräg durchziehen, wird seine seitliche Verschiebung gehindert: es wird zum »Stabilrahmen«. Dieser versteifte Rahmen ist ein festes Gerüst. Der Hohlraum zwischen ihm kann offen bleiben oder durch Bretter, Blockhölzer, Bohlen und — im Fachwerkbau — durch Steine, Ziegel, Mörtel ausgefüllt werden: statisch bedeutet er im Verhältnis zum Rahmen ein Minimum von Kraft, und als solches wird er auch ästhetisch empfunden.

Dem Wunsch, einen Überfluß von materiellen Mitteln und einen Überschub an konstruktiver Kraft zu zeigen, kann ein Gerüst überhaupt nur sehr unvollkommen genügen, seine Ausdrucksmittel hierfür sind nicht Massen, sondern Linien. Ihre Vielheit übt ästhetisch und psychologisch eine ganz andere Wirkung aus als die Steigerung eines Massenvolumens: sie beruhigt nicht, sondern sie verwirrt. Die Geschichte des Holzbaues kennt daher solche Epochen, die, wie einzelne der Steinarchitektur, den Materialaufwand zur Stilbedingung machten, überhaupt nicht. Sie bewegt sich dauernd im Gebiete der rationellen Konstruktion. In wieweit sie erreicht wird, hängt beim Holzbau niemals vom Willen ab, sondern vom konstruktiven Können.

Die Festigkeit, mit der das letztere beim Holz zu rechnen hat, ist wesentlich größer als die des Steines, denn dieser ist nur druckfest, das Holz druck- und zugfest. Allein die Zugfestigkeit des Holzes läßt sich aus technischen Gründen nur in wenigen Fällen günstig ausnutzen, da die Bolzen, mit denen die Enden des statisch als Zugstange anzusehenden Holzbalkens gefaßt werden müssen, zu leicht ausreißen. In guten Steinkonstruktionen sollen füglich nur Druckspannungen<sup>1</sup>, in guten Holzkonstruktionen meist Druck- und Biegungsspannungen auftreten. Das Eisen dagegen leistet allen drei Gattungen der Beanspruchung — dem Druck, dem Zug und der Biegung — den größten Widerstand; es vereint und steigert also die statischen Vorzüge des Steines und des Holzes. Jeder Teil einer Eisenkonstruktion übertrifft einen gleichgroßen Holzbalken an Festigkeit zehnfach, kann statisch also das Gleiche wie dieser bei einem weit geringeren Volumen leisten. Und bei der unbeschränkten Bildsamkeit des Eisens wird es möglich, die statisch »rationellste« Form für diese Leistung in jeder Einheitlichkeit und Mannigfaltigkeit künstlich zu schaffen.

Diese Erkenntnis mag sehr alt sein: ihre Anwendung auf die Bauzwecke ist sehr jung. Jahrtausenden war das Eisen nur der Stoff für Werkzeuge und es trat in den Dienst des Bauwerkes nur bei der Zurichtung und Verbindung vom Stein und vom Holz. Sein Hauptbereich lag der Baukunst fern.

\* \* \*

»Das Eisen ist das beste Werkzeug im Leben und zugleich das schlimmste. Mit ihm durchfurchen wir die Erde, pflanzen Bäume, scheren die Hecken und schneiden die Reben; mit ihm bauen wir Wohnungen und behauen die Steine. Zu vielerlei Nützlichem brauchen wir es. Aber auch zum Krieg, zu Raub und Mord,

<sup>1</sup> Da bei der Biegung auf einer Seite Zug-, auf der anderen Druckspannung auftritt, ist auch die Biegefestigkeit des nur auf Druck zu beanspruchenden Steines nur gering.

und nicht nur Mann gegen Mann, sondern auch aus der Ferne, zu Wurf und Flug — nach meiner Ansicht die abscheulichste Hinterlist, die der menschliche Geist je ersann. Denn indem wir dem Eisen Schwingen gaben, haben wir dem Tode Flügel verliehen.«

So schrieb Plinius im ersten nachchristlichen Jahrhundert.

Dieser älteste Lob- und Bannspruch kennt die Macht des Eisens beim Bauen offenbar nur beim Werkzeug, Nagel und Klammer. — Das Baumetall des Altertums war die Bronze<sup>1</sup>. Vorwiegend aus Bronze war auch eine Reihe feinerer dekorativer Arbeiten, deren Bereich im Mittelalter dem Schmiedeeisen zufiel. Die Kunstschmiedearbeiten bilden seitdem ein Hauptgebiet aller angewandten Künste, überreich an Meisterwerken der Technik wie der Kunst, allein sie führen nur bis an die Grenzen der Baukunst: sie liefern selbst in ihren größten Schöpfungen höchstens raumtrennende Gitter ohne Tragefunktion, wie etwa die herrlichen Werke Lamours an der Place Stanislaus zu Nancy. Und das Gußeisen bleibt zunächst ganz zurück. Seine Kunstleistungen sind die in der Renaissance beginnenden derben Ofenplatten und Kaminböcke.

Noch viel langsamer aber entwickelte sich die Bedeutung des Eisens als konstruktive Hilfskraft des Baues. Als solche begleitet es den Gewölbebau des Mittelalters und der Renaissance, aber es war dabei selbst denen, die es benutzten, nur wenig willkommen. Man brachte dem Eisen ein gewisses Mißtrauen entgegen, eben weil es nicht unmittelbar von der Natur dargeboten, sondern als Bildstoff erst künstlich gewonnen wird. Das ist nur eine Sonderanwendung jenes allgemeinen Empfindens der Renaissance, dem Leo Battista Alberti<sup>2</sup> einmal mit den Worten Ausdruck gibt: »Nam est quidem cujusquis corporis pars indissolubilior, quae a natura concreta et cuncta est, quam quae hominum manu et arte conjuncta atque, compacta est.«

Die eisernen Zugstangen, welche den Gewölbeschub abfangen<sup>3</sup>, und die Eisenbänder, welche die Kuppeln als Ring umschließen, haben trotz ihrer für die Statik des Ganzen unerläßlichen Leistung in der baulichen Konstruktion keine andere Rolle als etwa die eisernen Klammern im Holzwerk und zwischen den Steinquadern und die eisernen Eckverschläuderungen des Mauerwerkes: sie halten die aus anderem Stoff gebildete Masse zusammen. Meist ersetzen sie dabei nur das Holz. Die Eisenringe, mit denen beispielsweise die Kuppel der Markuskirche schon 1523, und später, in mehrfacher Wiederholung, die Peterskuppel umgürtet wurden, bedeuten nichts anderes als der riesige hölzerne Verankerungsring, den schon Brunelleschi nach dem Muster des Florentiner Baptisteriums um den Fuß seiner Domkuppel legte. Ja diese Eisenringe sind noch nicht einmal als konstruktive Hauptmittel recht anerkannt, sie gelten vielmehr nur als Aus-

<sup>1</sup> Vergl. zum Folgenden: Gottgetreu, Lehrb. d. Hochbaukonstruktion. III. Eisenkonstruktionen. Berlin 1885. S. 5 f.

<sup>2</sup> De re aedificatoria. Ed. 1512 Paris. Lib. III, Cap. XIII, Fol. XLIV.

<sup>3</sup> Älteste wichtige Beispiele: die Nebenschiffe der Hagia Sophia in Konstantinopel und die Omar-moschee in Kairo (7. Jahrhundert). Leo Battista Alberti bemerkt in seiner Baulehre, daß nur der Flachbogen (»arcus comminutus«) einer solchen eisernen Zugstange (»catena ferrea«) bedürfe. (De re aedificatoria. Lib. III, Cap. XIII, Fol. XLIV.) Über die »architektonische Ignorierung« solcher Zugstangen im 19. Jahrhundert vergl. Baumeister a. a. O. S. 28 Anm. — Eiserne Träger erwähnt Merckel a. a. O. S. 266 bereits an antiken Tempelbauten Indiens.

hilfsmittel, welche lediglich durch unrichtige Steinkonstruktionen oder durch deren nachlässige Ausführung mit minderwertigem Materiale verschuldet sind. Sie werden möglichst verborgen, und die Zugstangen drängen sich dem Auge als roh eingefügte Fremdkörper störend auf. Die komplizierteste Verwendung des Eisens als Hilfskonstruktion an Monumentalbauten der Renaissance ist die Verankerung von *Peraults* Kolonnaden und Tympanon der Louvrefront<sup>1</sup> und Soufflots Portal von *Ste. Geneviève* in Paris. Sie sind »mit Eisenstangen förmlich durchspickt«, aber das läßt eine Betrachtung dieser klassischen Steinbauten von außen nicht ahnen<sup>2</sup>. Bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts ist von einem Eisenbau nicht die Rede. Man traute dem Eisen nicht einmal die von jedem Baustoff zu fordernde Haltbarkeit zu. Der kenntnisreiche Jacopo Lafri († 1620), der als Nachfolger Vasaris die Sicherung der Kuppel von Sa. Maria dell' Umiltà in Pistoja erfolgreich durchführte, sagt: »Il ferro è metallo imperfetto, massime stando all' acqua«: »Eisen ist kein Material für die Dauer«. Es war unter allen Baumaterialien auch weitaus das kostspieligste.

Die Überwindung dieser Hindernisse und Bedenken konnte nur durch einen Bund zwischen Wissenschaft und Technik gelingen, wie ihn erst die geistige und materielle Produktionsweise des 18. Jahrhunderts überhaupt ermöglichte. Und selbst dann blieb der Fortschritt des Eisenbaues zunächst nur langsam und ruckweise.

Bis zum Ende des 18. Jahrhunderts konnte er lediglich mit dem *Gußeisen* rechnen. Wann dieses zum ersten Male als selbständiges Konstruktionsmittel verwendet wurde, läßt sich mit Sicherheit kaum noch feststellen, denn dieser Anfang liegt im Dunkel außereuropäischer Überlieferung. Jedenfalls geschah er im Dienste der wegeverbindenden Raumüberbrückung: bei den Kettenbrücken. Um den Ruhm, bei diesen am frühesten die Hilfe des Eisens benutzt zu haben, streiten sich China und Amerika. Der Gedanke, Brücken aus Gußeisen zu konstruieren, soll schon im 16. Jahrhundert aufgetaucht sein<sup>3</sup>.

Die »wundersame« chinesische Kettenbrücke bei der Stadt Kingtung (Abb. 1) »mit Brettern auf zwanzig eisernen Ketten« nahm Athanasius Kircher in sein Werk »China monumentis illustrata« (1667) auf<sup>4</sup>. Die erste Beschreibung und Abbildung einer eisernen Kettenbrücke gibt in Europa aber schon der in Venedig als Ingenieur tätige Dalmatiner Faustus Verantius in seinem 1617 erschienenen Werk »Machinae novae«, wo es im Text heißt: »Diese Brücke nennen wir deshalb ‚eisern‘, weil sie an zwei, an beiden Seiten des Wassers errichteten Türmen mit vielen eisernen Ketten aufgehängt ist.«

Da ist die schmiedeeiserne Kette also nur ein Ersatz des Seiles und die Bedeutung des Eisens für das ganze Gebilde prinzipiell von der jener Zugstangen der mittelalterlichen Gewölbe nicht wesentlich verschieden.

<sup>1</sup> Vergl. Gottgetreu a. a. O., S. 12 ff. und Rondelet, L'art de bâtir VII, Kap. 2.

<sup>2</sup> Vergl. Charles-François Viel, De la construction des édifices publics sans l'emploi du fer. Paris 1808.

<sup>3</sup> Gauthey (Traité de la Construction des Ponts [1732—1807], III Ed. II, p. 101) will ihn in italienischen Werken des 16. Jahrhunderts gefunden haben . . . Wo?

<sup>4</sup> Erschienen in Amsterdam. Danach in Fischer von Erlachs Historischer Architektur 1725, Buch III, Taf. 15. Ob die Nachricht, Alexander habe bei seiner Brücke über den Euphrat Eisen verwandt, auf Eisenketten zu beziehen ist? (Vergl. Merckel a. a. O., S. 266. Mehrtens, Brücken, a. a. O., S. 3.)

Anders, wo das Eisen als Ersatz des hölzernen Hängewerkes und des steinernen Brückenbogens auftritt.

Auch diese Möglichkeit hat Verantius bereits ins Auge gefaßt. Neben der Kettenbrücke skizziert er eine feste Flachbogenbrücke, die »aus lauter Glockenspeise« (Erz) herzustellen sei, und fügt hinzu: »Auf dieselbe Weise kann man auch mit viel geringeren Kosten die Dächer und Decken der großen Gebäude und Kirchen machen«. Von neuem taucht dieser Gedanke am Anfang des 18. Jahrhunderts in Frankreich auf<sup>1</sup>.

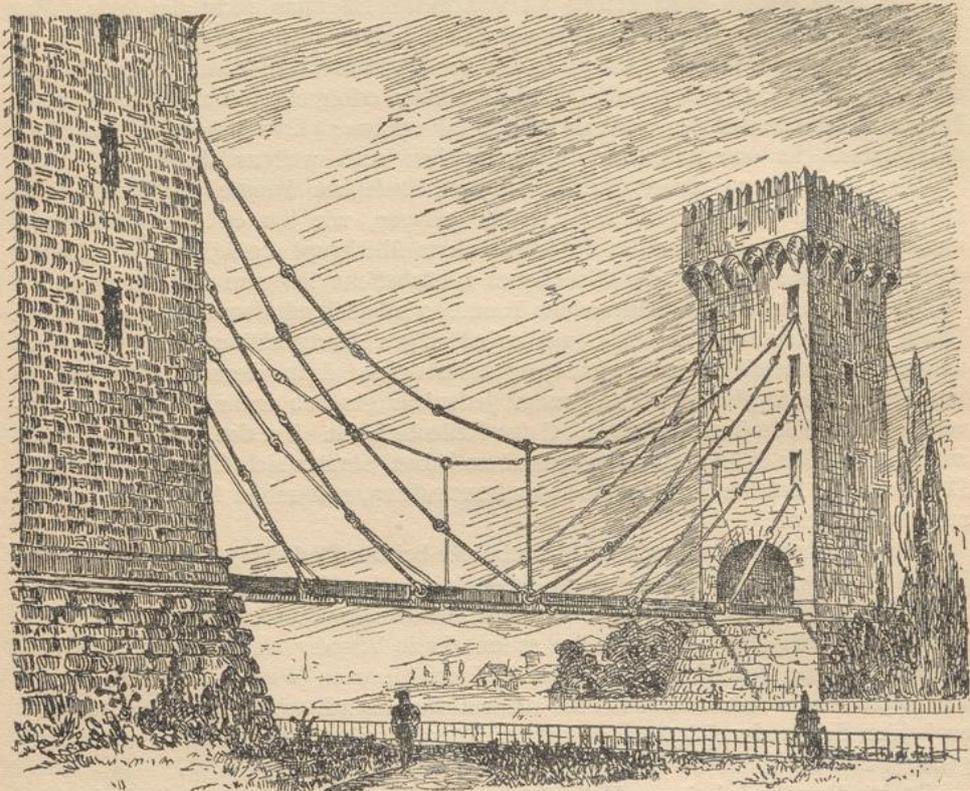


Abb. 1. Chinesische Kettenbrücke bei der Stadt Kingtung.

Seine Verwirklichung für eine Flußbrücke wurde zum ersten Male 1755 von *Garrin* in *Lyon* versucht, aber schon nach der Errichtung des ersten der drei geplanten Bögen wieder aufgegeben: die Erzeugungs- und Bearbeitungsmethoden des Rohmaterials waren noch zu unvollkommen. Sie verbesserten sich am frühesten in Nord-England. — Bahnbrechend für die Verwendung des Gußeisens für konstruktive Zwecke war in den fünfziger Jahren des 18. Jahrhunderts der Ingenieur *John Smeaton*

<sup>1</sup> Désagulier 1719.

(geb. 1724), aber er fand zunächst wenig Anhänger. Er selbst schreibt darüber 1782<sup>1</sup>: »Als ich vor 27 Jahren zum ersten Male Gußeisen für gewisse Zwecke verwandte, rief alles: ‚Wie kann sprödes Gußeisen halten, wenn das stärkste Zimmermannsholz nicht widersteht?‘ Die »gewissen Zwecke« waren nächst den Maschinenteilen, den Dampfkesseln, Walzgerüsten, Wasserrädern und Schienen — die erste gußeiserne Schiene ward 1767 in den Werken von Coalbrookdale gegossen — Teile des Mühlenbaues und des 1757—1759 von Smeaton im wesentlichen aber aus Steinquadern errichteten



Abb. 2. Ironbridge über den Severn.

Leuchtturmes von *Eddystone*. Das erste ganz aus Gußeisen errichtete Bauwerk ist die noch heute funktionierende »Ironbridge« über den *Severn* beim Dorfe Brosely

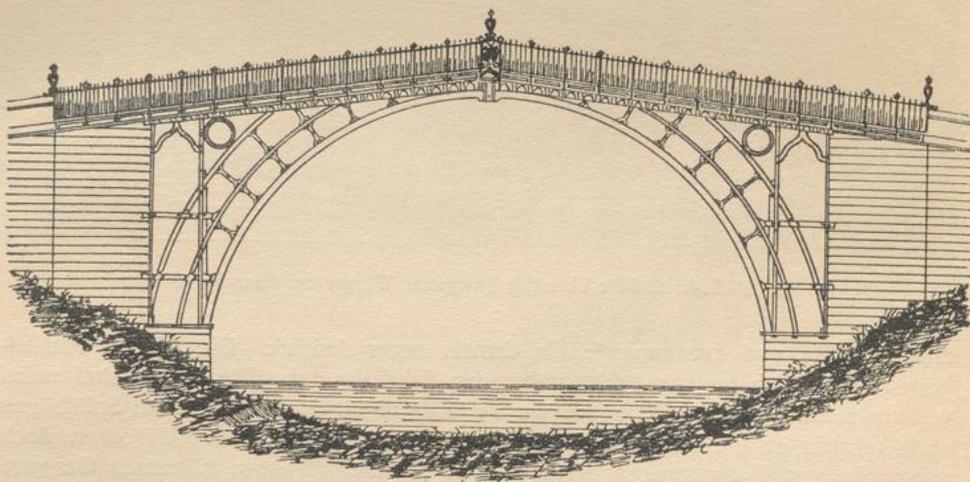


Abb. 3. Ironbridge über den Severn.

(Ost-England)<sup>2</sup> (Abb. 2 und 3), die 1773—1779 unter Leitung von John Wilkinson, dem »Eisentollen« (»iron mad«), und Abraham Darby in dem schon genannten

<sup>1</sup> Vergl. G. Ch. Mehrtens, Vorlesungen über Statik der Baukonstruktionen und Festigkeitslehre, Leipzig 1903, S. 75 und desselben Verfassers »Brücken«, a. a. O., S. 5. ff.

<sup>2</sup> Shropshire. An der Bahnstrecke Shrewsbury-Worcester. Vergl. Mehrtens, Die ältesten eisernen Brücken der Welt. Ztschr. »Stahl und Eisen« 1896, Nr. 24. Ztschr. »The Engineer« 1898 (Sept.), S. 303: »The birth-place of modern bridges«.

berühmten Werk in Coalbrookdale ausgeführt wurde<sup>1</sup>. Die technische Leistung — über einem Durchmesser von 30,62 m fünf nahezu halbkreisförmige Bögen, deren ca. 23 m lange Hälften noch heute nicht leicht zu gießen wären — ist besonders berühmt. Aber auch der Form nach verdient diese Brücke in der Geschichte des Eisenbaues einen Ehrenplatz: zum ersten Male bringt sie die durch das neue Material ermöglichte Leichtigkeit und Durchsichtigkeit des Gesamtgebildes zur Geltung. Naturgemäß geschieht dies hier nach dem Prinzip der Holzkonstruktion. Die Seitenabschlüsse sind offene in Gußeisen übertragene Fachwerkgerüste aus Stielen und Riegeln; die fünf parallelen Eisenbögen selbst jedoch sind nicht mehr aus einzelnen bogenförmig geschnittenen Stücken zusammengesetzt, sondern ihre beiden Hälften gleiten von den Ufern her als homogene, schlanke Gebilde in einheitlichem Linien-

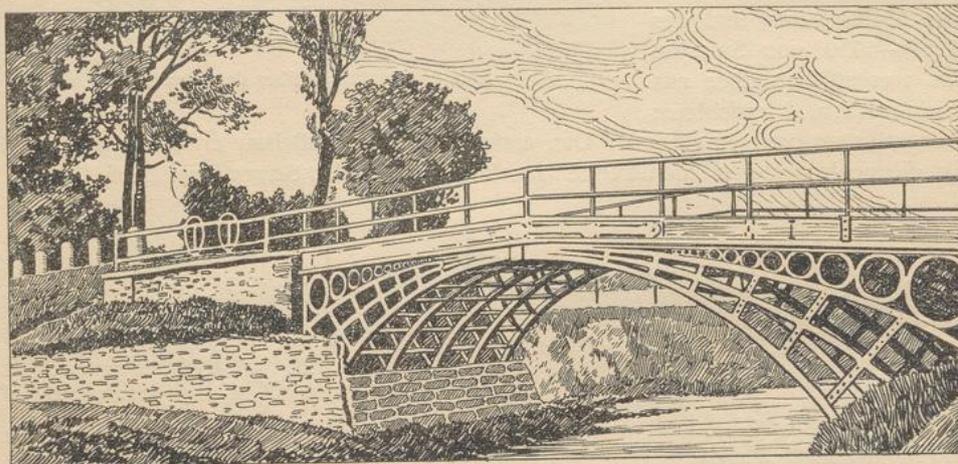


Abb. 4. Brücke über das Striegauer Wasser bei Laasan.

zug aufwärts und zusammen<sup>2</sup>: ein damals neuer Anblick. Die inneren Parallelbögen laufen sich an der leicht steigenden Fahrbahn tot. Die Bögen sind radial verbunden und die Zwickel sowie die Vertikalstangen durch Ringe und Spitzbögen maßwerkartig gefüllt. Das ist in seiner durchsichtigen Feingliedrigkeit denn doch auch rein formal ein ganz anderes Gebilde als die schweren hölzernen Gesperre aus Bohlen oder vollends aus geraden Balken! Zum ersten Male redet der Eisenbau hier die zierliche Sprache der Linien. Im Aufbau verwandt ist die früheste Eisenbrücke des europäischen Festlandes, die 1794 über das *Striegauer Wasser* bei

<sup>1</sup> Vergl. Stevenson in *Philosophical Journal* X. Edinburgh. Abbild. nach Photogr. in *Ztschr. «The Engineer»* a. a. O. und »Buch d. Erfind.« 9. Aufl., IX, S. 390, Abbild. 401. — Gottgetreu, *Eisenkonstruktionen*, Fig. 32, S. 13. — Vierendeel a. a. O., Text S. 23. — Eine zweite Brücke über den Severn wurde bei Buildwas in der Nähe von Coalbrookdale 1795—1796 von Telford errichtet. Sie hat 39,65 m Spannweite.

<sup>2</sup> Der seitliche Erddruck hat die beiden Bogenteile so stark gepreßt, daß der Scheitel aufwärts gedrückt wurde. Das Modell dieser noch heute funktionierenden Brücke befindet sich in der Sammlung der Society of arts in London.

*Laasan*<sup>1</sup> (Schlesien) geschlagen wurde (Abb. 4); aber hier sind die Bögen nicht mehr parallel, sondern schießen zum Mittelpunkt zusammen, und die Zwickel werden durch eine Reihe von den Enden zur Mitte sich verkleinernder Ringe ausgefüllt: das Prinzip des eisernen Bogenträgers, der am Scheitel am dünnsten ist. — Ist bei diesen Brücken trotz der Eigenart der Durchführung und Erscheinung die Kraftverteilung nicht anders »gedacht« als beim Holz, so überträgt die mächtige, den *Wearfluß* zu *Wearmouth* bei *Sunderland* mit sechs fast 29 m hohen Flachbögen von nahezu 72 m Spannweite überspannende Brücke<sup>2</sup> die keilförmigen Steine der gemauerten Bögen in hohle Guß-

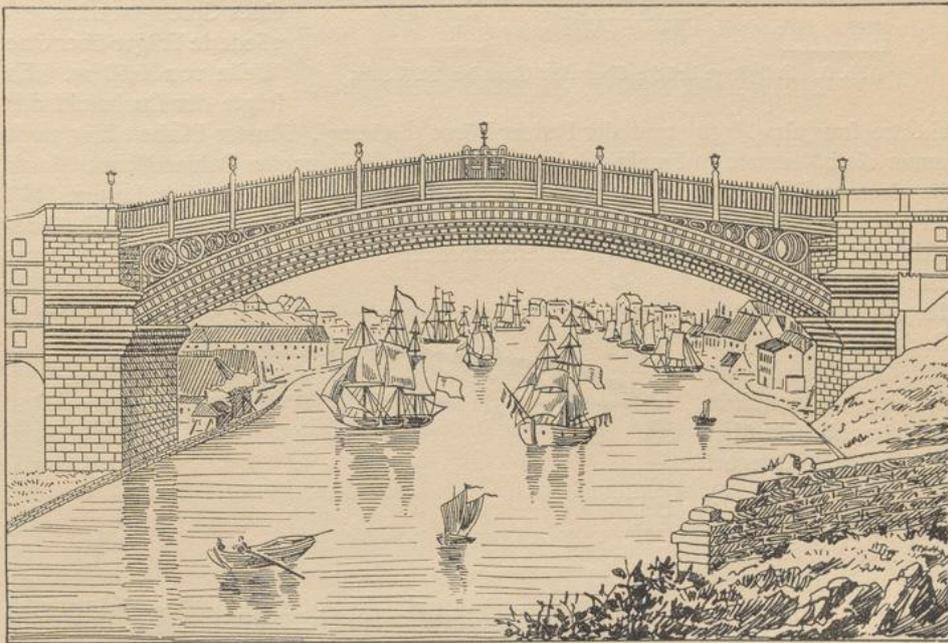


Abb. 5. Brücke über den Wearfluß zu Wearmouth bei Sunderland.

eisenstücke (Abb. 5). In zwei Reihen übereinander zwischen mächtigen Stein Pfeilern angeordnet, gleichen dieselben für den Anblick in der Tat Gewölbsteinen; der Raum zwischen diesen Tragebögen und der Fahrbahn wird wiederum durch Ringe gefüllt. Die neue Leichtigkeit dieser Eisenbrücke ist also nicht, wie in Coalbrookdale, durch das durchsichtige Gerüstprinzip, sondern durch die frei und weit in ganz flacher Wölbung schwebende Bogenspannung selbst erreicht.

Die Wearbrücke wurde 1793—1796 von dem englischen Ingenieur Payne nach einer Zeichnung Wilsons errichtet. Inzwischen war das Eisen insbesondere in

<sup>1</sup> Abbild. nach Photogr. in »Buch d. Erfind.« a. a. O., Nr. 403, S. 391. Das Gußeisen aus dem Königl. Eisenhüttenwerk bei Laasan in Schlesien.

<sup>2</sup> Abbild. nach »Buch d. Erfind.« a. a. O., Nr. 402, S. 391. Vierendeel a. a. O., Pl. I, Fig. 5—11. Die Spannweite beträgt 71,91 m.

Frankreich bereits energisch auch in den Wohnbau eingeführt worden, aber nicht mehr als Gußeisen, dessen konstruktive Mängel sich bald gezeigt hatten, sondern als im Flammofen gewonnenes *Schmiedeeisen*. Am frühesten soll dieses 1780 am

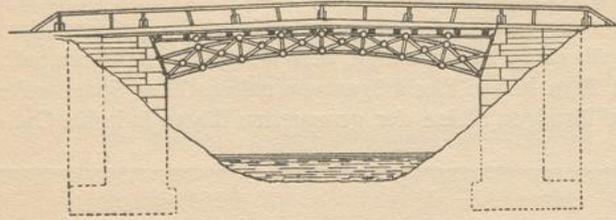


Abb. 6. Fußgängerbrücke über den Crou bei St. Denis.

Dach des «Grand Salon du Louvre» verwendet worden sein. 1785 legte der Architekt *Ango* in einem Hause in Boulogne schmiedeeiserne, nach Art eines Sprengwerkes gegliederte Träger über eine Weite von 6,50 m. Es folgte der Dachstuhl des

Théâtre français (*Ango*) und der Pariser Börse (*Labarre*). Muster blieben hier noch immer die hölzernen, in Frankreich besonders vervollkommneten Bohlendächer. Auch die eisernen Pariser Brücken schlossen sich zunächst — wie der Pont du Louvre 1803 der Holzkonstruktion oder wie der bedeutendere »Pont d'Austerlitz«<sup>1</sup> 1806 — der Steinkonstruktion nach Art der Sunderlandbrücke an. Die »rationellste« Gestaltung

der Fachwerkträger mit diagonal verstrebt Gurtungen brachte erst 1808 die kleine, von Bruyère ausgeführte Fußgängerbrücke über das Flübchen *Crou* bei St. Denis<sup>2</sup> (Abb. 6). Ihre flachen Bögen sind der Konstruktion nach ebenfalls im hölzernen Brückenbau vorgebildet: eine ganz ähnliche Holzbrücke gibt schon Palladio<sup>3</sup> (Abb. 7). Aber was früher aus schweren Vierkanthölzern zusammengezimmert war,

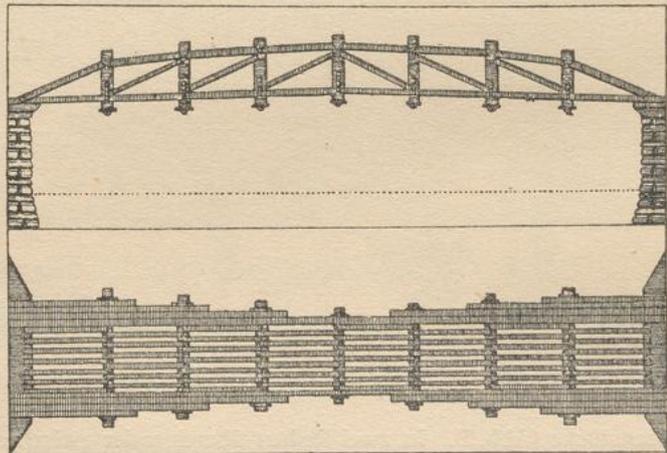


Abb. 7. Holzbrücke von Palladio.

bietet nun einen ganz anderen Anblick. Der »Gerüststil« des Eisens hat in der Dreiecksverstrebung sein richtiges und wichtiges Prinzip gefunden.

<sup>1</sup> Fünf Bögen; 1854 durch die heutige Steinbrücke ersetzt.

<sup>2</sup> Abbild. nach Vierendeel a. a. O., Pl. 1, Text S. 32. Bruyère entwarf nach gleichem Prinzip 1810 eine Fußgängerbrücke über die Seine (Passerelle de l'Hôtel de Ville) von 130 m Spannweite (!), die jedoch nicht ausgeführt wurde.

<sup>3</sup> Architecture. Tom. II, L. III, Tafel III.

Dessen Ausbildung zur Großkonstruktion erfolgte allerdings erst ein halbes Jahrhundert später. Der Weg ist ebenso beträchtlich, wie etwa der von den frühesten Verwendungen der Tonnengewölbe für Wasserleitungen bis zum Gewölbebau der Gotik. Jene Brücken- und Dachkonstruktionen des 18. Jahrhunderts sind nur die ersten, vereinzelt, bald tastenden, bald kühnen Versuche des Eisenbaues. Sie mußten an dieser Stelle deshalb erwähnt werden, weil sie überhaupt erst den Gedanken brachten und verwirklichten, daß man mit Eisen »bauen« könne. Das Eisen wurde an ihnen zum ersten Male zum »Baustoff«.

\* \* \*

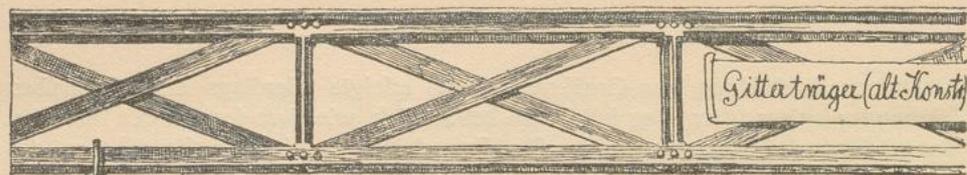
Daß das Eisen nach diesen immerhin bescheidenen Anfängen im 19. Jahrhundert zu einem Hauptmaterial aller Baukonstruktionen ward, hat wesentlich andere Gründe als die Entwicklung der konstruktiven Kräfte anderer Baustoffe und Zeiten.

Entscheidend wurde, daß es sich beim Eisen eben um eine »künstlich« erzeugte Masse handelt, bei deren Zusammensetzung und Formung jedem Anspruch genügt werden kann, soweit er im Bereich der technischen Möglichkeit bleibt. Bei diesem Baustoff trat also der völlig neue Fall ein, daß nicht nur die Konstruktionen sich nach dem Baumaterial richteten, sondern auch umgekehrt dieses nach ihnen: schon seine Grundformen wurden von vornherein als »rationellste« Konstruktionsteile gebildet. Dabei arbeiteten Wissenschaft und Technik zusammen, jene einerseits als Chemie und Statik, diese als Bewältigung der gewaltigsten mechanischen Kraftübertragungen und Umformungen. Bezeichnend für diese gemeinsame Arbeit von Theorie und Praxis ist besonders die Ausbildung des Materialprüfungswesens. Seit man im ersten Viertel des 19. Jahrhunderts vereinzelte Versuche über die Festigkeit der verschiedenen Baustoffe angestellt hat, haben diese Probleme zu einer eigenen Wissenschaft mit eigener Methodik und Technik geführt, die auf Schritt und Tritt in die Praxis eingreift. Auch die wirtschaftlichen Verhältnisse sprachen wesentlich mit, und neben den Fortschritten der mathematischen und der Natur-Wissenschaften gaben die neuen Aufgaben der neuen Kultur selbst Gelegenheit, die Errungenschaften fort und fort zu erproben und zu mehren.

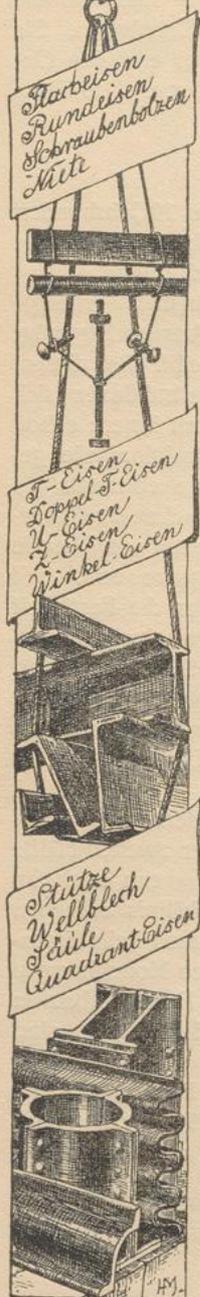
So wurde jener neue »Baustoff«, den das Ende des 18. Jahrhunderts als solchen überhaupt erst erkannt und noch keineswegs anerkannt hatte, in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in feste *Normalformen* gebracht, welche — wenn auch im einzelnen natürlich noch verbesserungsfähig — das prinzipielle Verhältnis zwischen den Konstruktionselementen und dem konstruktiven Gesamtorganismus beim Eisenbau wohl schon endgültig bestimmen. Die wichtigsten unter diesen Normalformen bedeuten für den heutigen Eisenbau etwa dasselbe, wie für den Fachwerkbau in Holz die Pfosten, Streben, Riegel und Verwandtes; und wie im Holzbau, so sind auch im Eisen die Verbindungsmittel typisch.

Von den letzteren werden stilistisch die *Nieten* bedeutsam: Bolzen, die mit »Setz- und Schließkopf« versehen sind<sup>1</sup>. Sie wirken rein konstruktiv — als »Kraftniete«, zur Überleitung der Spannkraft, oder als »Heftniete«, nur zur Verbindung

<sup>1</sup> Der Bolzen wird bis zur Weißglut erhitzt. Die ersten Vernietungen von Eisenträgern in heißem Zustand erfolgten nach Vierendeel (a. a. O., S. 32) in den dreißiger Jahren (Winterpalais in St. Petersburg.)



† Abb. 8. Profileisen.



der Teile. Aber für den Anblick sind die Reihen dieser halbkugelförmigen, knopfartigen Setzköpfe der Nieten auf den Eisenstäben und Blechen meist die einzigen »Details«, und sie bieten in ihren regelmässigen Abständen stets rhythmische Umränderung oder Teilung. Das Gleiche gilt natürlich auch von den *Schraubenmuttern*.

Hierbei handelt es sich um Gebilde, die schon aus Konstruktionen in anderen Materialien längst bekannt sind. Ebenso bei einer Reihe der *Stabformen*, in denen das Flußeisen von den Walzwerken den Eisenkonstruktionen als Handelsware zur Verfügung gestellt wird (Abb. 8). Das »gewöhnliche Stabeisen« mit regelmässigem, geometrischem Querschnitt — rund (für Zugstangen) und eckig (Quadrat, Polygone; heute nur noch bei leichteren Konstruktionen verwandt) — erscheint stilistisch nur als Balken oder Stange; das dem Wesen des Eisens entsprechende »Neue« ist hier nur die geringe Stärke des Querschnittes, nicht dessen Form. Anders bei den *Façoneisen* mit unregelmässigen, teils symmetrischen, teils unsymmetrischen Querschnitten, wie sie in Deutschland seit 1880 als sogenannte *Normalprofile* eingeführt sind. Deren Reihe eröffnet der **T**-beziehungweise der *Doppel-T-Träger* (**I**). Seine Vorläufer bildete der Eisenbahnbau Englands aus; vollkommen stand sein Typus mit doppelten Winkeleisen und Nieten in tadelloser Ausführung nach Angaben des Ingenieurs Joly bereits auf der Pariser Ausstellung 1849 vor aller Augen. In der Geschichte des Eisenbaues ist das ein ähnliches Ereignis, wie etwa in der des Geschützwesens die Herstellung des ersten »gezogenen« Rohres. 1849 noch nicht nach Gebühr beachtet, ward der **I**-Träger während der letzten Jahrzehnte der im Eisenbau weitaus am häufigsten verwendete Konstruktionsteil. Er verdankt dies seiner »verhältnismässig grossen Tragfähigkeit, guten Materialausnutzung und seitlichen Steifigkeit«. Die **Z**- (Z-), **U**- (U-) und alle **L**- (Winkel-) und **I**- (Steg-) Profile sind in denen des **T**-Trägers enthalten.

Was bedeutete nun dieser **T**-Träger als Bauglied rein formal für den Anblick?

Das Wesentlichste hebt schon die gangbare Bezeichnung: »*Profil-Eisen*« selbst hervor: für den Fernblick und innerhalb

der Gesamtmasse einer Großkonstruktion statt des vollen Balkenkörpers eine stegartig dünne Fläche, deren I-Profil fast zu einem Liniengebilde zusammenschumpft. In der Längsansicht wirft die Flansche auf die Stegfläche einen leichten Schlag Schatten. Die *Quadrant-Eisen*  und *Trapez-Eisen* , die zu vierten symmetrisch zusammengeschlossen einen schmiedeeisernen Hohlfeiler, beziehungsweise eine Hohlsäule bilden, verbinden die Flächen zum Körper. Das nur nach der Länge ausgedehnte »Stabeisen« gibt ausgewalzt die »Flacheisen«: für den Anblick nur Eisenbänder. — Die zweite große Hauptgruppe der Eisenformen neben den »Stabeisen« sind die nach Länge und Breite ausgewalzten *Bleche* (Grobbleche oder Feinbleche und das konstruktiv heute so wichtige *Wellblech*).

Diese Grundformen, in denen das Eisen als Baustoff auftritt, sind also bereits an sich als Einzelgebilde teilweise neuartig. Und ihre Eigenart ist in besonderem Grade Ergebnis und Ausdruck der natürlichen Eigenschaften des Baumaterials, weil schon die letzteren selbst technisch und wissenschaftlich gerade für *diese* Formen entwickelt und ausgenutzt werden. Der zielbewußte Arbeitsprozeß, der den Rohstoff zum unmittelbar verwendbaren Baustoff umformt, setzt beim Eisen bereits in einem weitaus früheren Stadium ein als bei den bisherigen Baumaterialien. Zwischen Materie und Material waltet hier füglich ein anderes Verhältnis als zwischen Stein und Quader, Ton und Ziegel, Holz und Balken: Baustoff und Bauform sind im Eisen gleichsam mehr homogen.

Daher schien es angezeigt, jene Elementarformen der Eisenkonstruktionen schon an dieser Stelle, im Zeichen des »Baustoffes« selbst zu erörtern.

Es entspricht nicht nur dem Zweck und der Gesamtanlage dieses Buches, sondern auch dem Wesen des Eisenbaues selbst, hierbei prinzipiell sogar noch einen Schritt weiter zu gehen und in diesem ersten Kapitel bereits auch mehrere *typische Konstruktionsformen* zu behandeln. Sie setzen sich aus jenen Elementarformen zusammen, wie die Hänge- und Sprengwerke aus den Balken, aber sie funktionieren nicht nur wie jene bei Dachstühlen und Brücken, sondern sie sind rasch zu Hauptteilen *aller* Eisenbauten geworden. Deren Eigenart selbst beruht auf ihnen, und wiederum sind auch sie aus der Natur des Baustoffes technisch und rechnerisch als zweckmäßigste Verbindungen der zweckmäßigsten Elemente abgeleitet.

Ausgebildet sind diese typischen Konstruktionen bei den eisernen *Tragwerken* mit größeren Spannweiten.

Bei diesen treten die Bleche, Flach- und Winkel- oder T-Eisen zum »Blechträger« zum hohlen »Kastenträger«, insbesondere aber zum »Fachwerkträger« zusammen. (Abb. 9).

Der *einfache »Blechträger«* besteht aus der vertikalen Blechwand (»Stehblech«) und den durch Winkeleisen gebildeten, meistens noch durch Flacheisen ver-

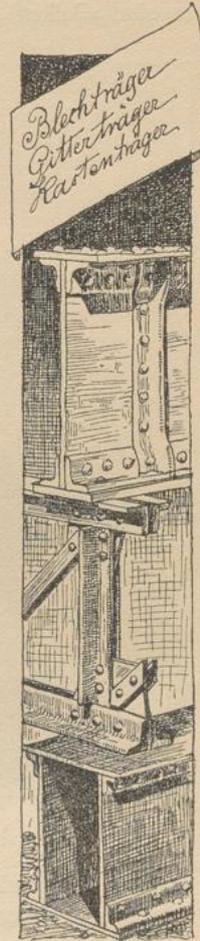


Abb. 9.  
Vernietete  
Konstruktionen.

stärkten Gurtungen, er wirkt also für den Anblick nicht wesentlich anders als ein I-Träger mit breiten Flanschen. Die *Kastenträger* vollends gleichen nur mächtigen Balken aus Eisen. Was dabei freilich allein der Maßstab bedeutet, zeigte bereits die erste, aus hohlen schmiedeeisernen Balken hergestellte Eisenbahnbrücke der Welt, Stephenson's »Britanniabrücke« über die Menaistraße (1846—1849) (Abb.10); es sind »Balken«, wie sie zuvor nur die Sage von den Cyklopen kannte!

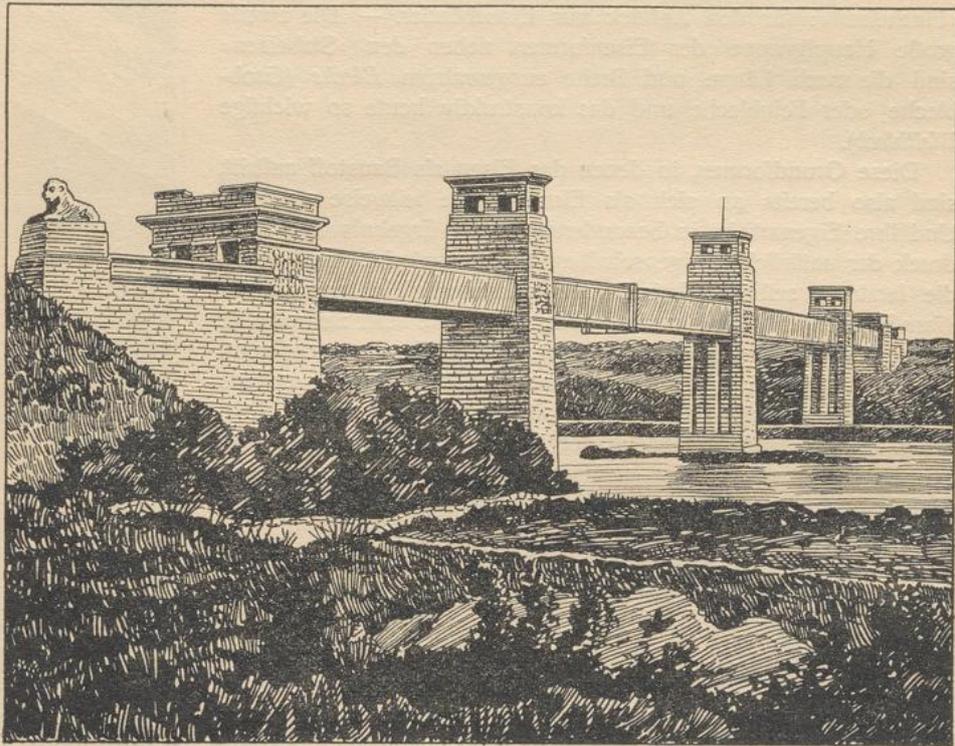


Abb. 10. Stephenson's »Britanniabrücke« über die Menaistraße. ¶

Wie konstruktiv, so ist jedoch auch stilistisch das Hauptsystem der heutigen Eisenkonstruktion der *Fachwerkträger*.

Das »Fachwerk«<sup>1</sup> ist ein »gegliedertes Tragwerk«; theoretisch: ein System von Stäben, die an ihren Endpunkten (»Knotenpunkten«) durch reibungslose Gelenke verbunden sind. Die letzteren lassen sich in Wirklichkeit nicht herstellen. In Deutschland pflegt man die »Knoten« als feste Nietungen auszubilden; in Amerika zog man bis vor kurzem die Gelenkverbindung vor.

In der Praxis des Eisenbaues teilt man die »Stäbe«, aus denen sich die Fachwerkträger zusammensetzen, ein in die umgrenzenden und die füllenden. Jene heißen

<sup>1</sup> Die folgenden Angaben sind dem einleitenden Kolleg des Herrn Prof. Siegmund Müller über »Statik der Hochbaukonstruktionen« an der Königl. Technischen Hochschule in Berlin entnommen.

»Gurtungen« (»obere« und »untere«), diese »Füllungsstäbe« (»Wandglieder«, »Gitterwerk«). Die »Füllungsstäbe« sind gerade; ihrer Richtung nach »vertikal« oder geneigt, »diagonal«. Im Beginn des Eisenhochbaues, vor der Ausbildung seiner statischen Theorien, herrschte insbesondere bei Brücken der »Gitterträger« mit mehrfach gekreuzten, an den Kreuzungsstellen fest vernieteten Streben als zwei-, drei- und mehrteiliges Gitterwerk. In diesen »engmaschigen« Systemen, deren Gitter sich der Vollwand näherten, sah man sogar eine Bürgschaft für die Tragfähigkeit. Allein sie sind statisch unbestimmt, bedeuten technisch eine Materialverschwendung und bieten dem Winddruck zu viel Angriffsfläche. Das Füllwerk wurde daher immer luftiger. Heute sucht man es möglichst einfach und »klar« zu gestalten, statisch bestimmt, insbesondere durch Bildung von Dreiecken, deren kleinster Winkel dabei  $30^\circ$ , deren größter  $60^\circ$  und deren »wirtschaftlich« günstigster  $45^\circ$  beträgt. Das Gitterwerk sich kreuzender Stäbe findet meist nur noch in seiner in jedem Sinne besten Form als System der »Gegendiagonalen«  $\boxtimes$  Anwendung.

Die heutige Zeichnung der Eisenschwerwerke macht sich vom Einfluß der überlieferten »Systeme« mehr und mehr frei. Sie sucht jede Aufgabe für sich nach Zweck und Stabilität möglichst rationell zu lösen, und die leitenden Gesichtspunkte sind dabei allgemeingültig: einen Dreiecksverband zu gewinnen, dessen Höhenentwicklung der Größe der Biegemomente entspricht.

Gleichwohl ist es für unsere Zwecke, insbesondere für die im folgenden angewandten Bezeichnungen, erwünscht, die üblichsten »Systeme« der Fachwerkträger hier knapp zusammenzustellen.

I. Parallelträger.

II. Polygonalträger.

III. Bogenträger.

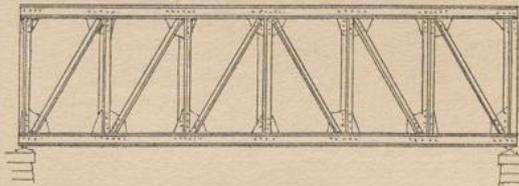


Abb. 11. Parallelträger.

Je nach der mathematischen Kurve des Obergurtes unterscheidet man dabei: Parabel-, Ellipsen- (Korbbogen-), Hyperbel- (»Schwedler«-) und Pauli-Träger.

Scheinbar sind diese Systeme der eisernen Fachwerkträger in den hölzernen Hänge- und Sprengwerken vorgebildet. Aber diese können lediglich auf Druck und Biegung beansprucht werden, nur ausnahmsweise auf Zug. Die dem letzteren ausgesetzte Dreiecksverbindung ist im Holzwerk — ohne eiserne Zugstangen

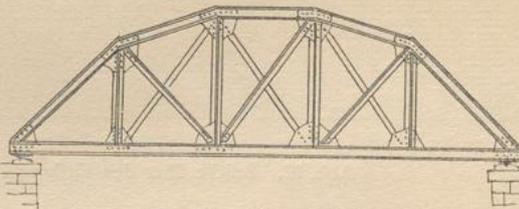


Abb. 11a. Polygonalträger.

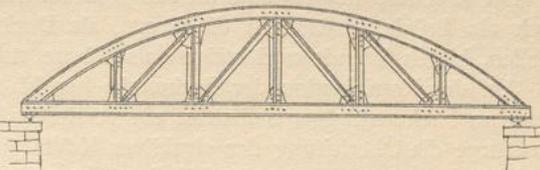


Abb. 11b. Bogenträger (Träger mit bogenförmigem Ober- und horizontalem Untergurt, spitz auslaufend).

— schwierig. Und gerade in der Verbindung zu geschlossenen Figuren wirken die dünnen Eisenstäbe im Vergleich mit den starken Pfosten, Balken und Bohlen leicht und schrumpfen für den Fernblick fast zu Linien zusammen. Dabei bedeutet jeder dieser Fachwerktypen im Eisenbau in stärkerem Grade als in der Holzkonstruktion eine selbständige Einheit. Das empfindet man am unmittelbarsten, wenn das Fachwerk nicht als »Balkenträger« von Stützpunkt zu Stützpunkt reicht, sondern wenn es als »Ausleger« oder Kragdach nur an seinem einen Ende befestigt ist, während das andere frei schwebt.

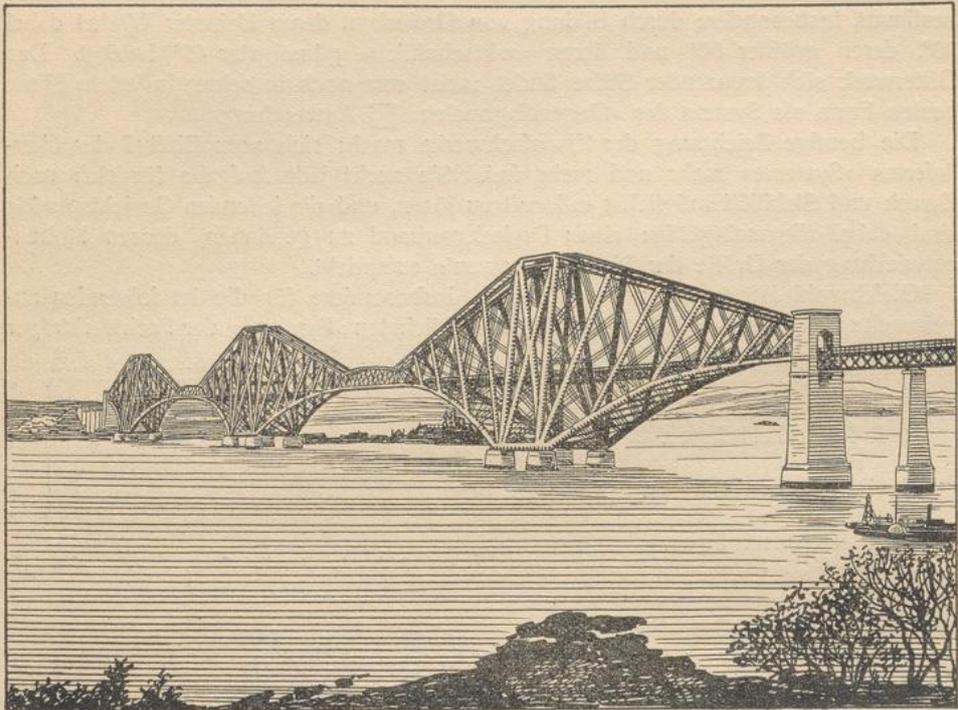
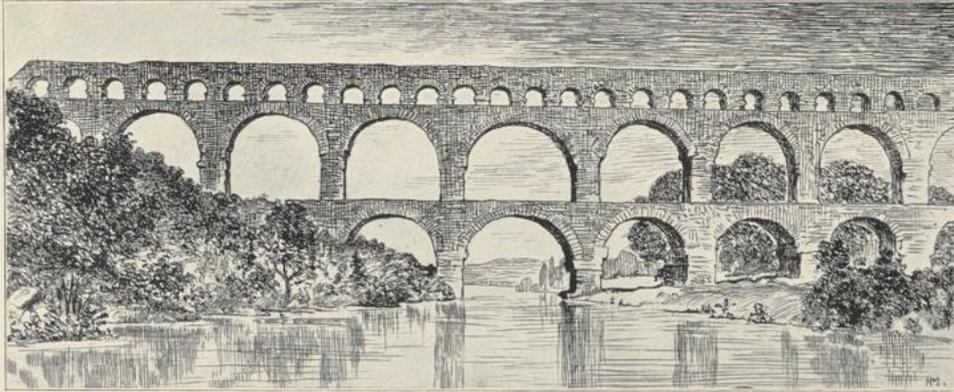


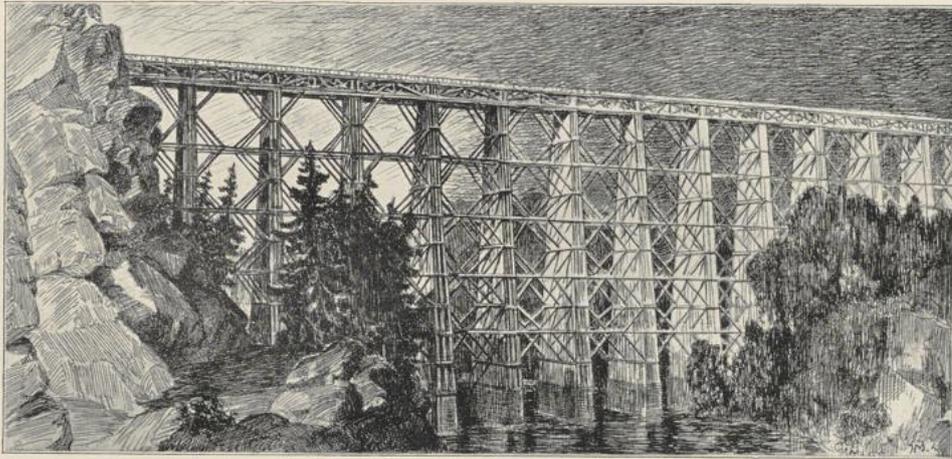
Abb. 12. Brücke über den Firth of Forth bei Edinburgh.

Die »Fachwerkträger« sind die Hauptglieder des heutigen Eisenbaues. Sie spannen sich als Brücken zwischen die Wege, als Decken mannigfachster Form über die Hallen, bilden Wände und steigen als Türme auf.

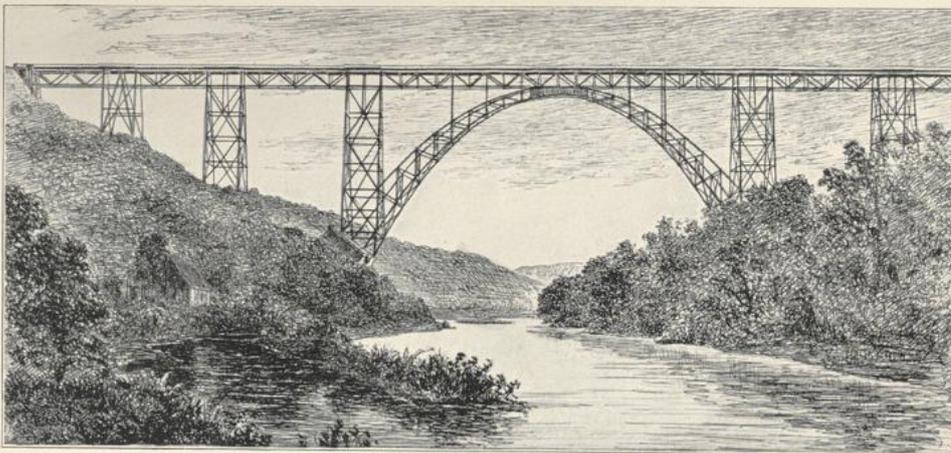
Auf der Kombination der Fachwerke beruht der »Gerüststil« des Eisens. Jeder einzelne Fachwerkträger selbst ist ein versteifter Rahmen. Wo er offen bleibt, kann das Auge die Überleitung der struktiven Kräfte auf die einzelnen Punkte unmittelbar verfolgen; wo er — was verhältnismäßig seltener geschieht — durch Bleche geschlossen wird, ist das struktive Gerüst noch als solches erkennbar.



Pont du Gard bei Nîmes



Portage-Talbrücke der Erie-Eisenbahn



Talbrücke bei Müngsten



Das soll es in voller Klarheit auch im Totaleindruck des Bauwerkes bleiben, so groß immer die Zahl und der Maßstab der zu ihm verbundenen Fachwerke ist. Allein gerade die gewaltigsten Konstruktionen dieser Art genügen dieser stilistischen Forderung oft am wenigsten. Der Abstand der einzelnen Fachwerkglieder und der einzelnen Fachwerksysteme voneinander wird da so groß — oder so klein —, daß sich der rhythmische Zusammenhang löst oder verwirrt; ein Beispiel ist die Forthbrücke (Abb. 12 u. Tafel I). Stilistisch ist dies ein Fehler. Aber die Natur des »neuen Stoffes« kommt gerade in der erstarrten Unruhe solcher Großkonstruktionen vielleicht am mächtigsten zur Geltung: sie ist gleichsam ein ungebändigter Rest des bewegten Urelementes, dem das Eisen seine Entstehung dankt.

\* \* \*

Was die hier angedeuteten Unterschiede der Baustoffe für den *Baustil* bedeuten, läßt sich als Grundlage für alle späteren Erörterungen am unmittelbarsten an drei Großkonstruktionen zeigen, die für den gleichen Zweck und in annähernd gleichem Maßstab ausgeführt sind: dem *steinernen Pont du Gard* bei *Nîmes*, der *hölzernen Portage-Talbrücke* der Erie-Eisenbahn und der *eisernen Talbrücke* bei *Müngsten* (s. Tafel II).

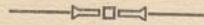
Bei allen dreien handelt es sich um durchquerende Raumauffüllung; alle drei wollen diese nicht durch Vollwände bieten, sondern mit dem nur eben für die Überbrückung nötigen Materialaufwand. Der Steinbau muß dabei mit Mauern rechnen — für den Holz- und Eisenbau genügen Stäbe; dort durchbrochene Massen, hier offene Gerüste. Die Steingewölbe vermögen die gewaltige Höhe nur durch ein Übereinander von Bogensystemen auszufüllen: durch einen Stockwerkbau von Bogenreihen — die von vornherein in der Längsrichtung ausgedehnten Holz- und Eisenstäbe ragen vom Boden bis zur nötigen Höhe als ununterbrochene Einheiten auf: als turmartige, wagrecht verbundene Stützen der Fahrbahn. Bis dahin bleiben die beiden Holz- und Eisenbauten in ihrem gemeinsamen Gegensatz zum Steinbau einander prinzipiell gleich. Aber bei der Eriebrücke treten die turmartigen Stützen dicht aneinander und tragen die Fahrbahn allein — bei der Müngstener Brücke sind sie weit auseinander gerückt, und die Hauptaufgabe der Überbrückung löst ein einziges, zwischen den beiden inneren Stützen selbständig zu deren Höhe aufgewölbtes Bogengerüst.

Und nun vergleiche man die drei Gesamtbilder im Hinblick auf die dabei als Durchsichtigkeit wirkende Leichtigkeit, man prüfe die Linienverbindungen im ganzen und in den einzelnen Übergängen; man vergleiche Rhythmus und Tempo, in denen das strukturelle Leben pulsiert!

Unter allen diesen Gesichtspunkten offenbart der Eisenbau die in diesem Buch maßgebende Natur seines Stoffes, die Wirkung des rationellsten Baumaterials, das die konstruktive Aufgabe mit dem geringsten Volumen und auf dem kürzesten Wege am schnellsten löst. Bei allen drei Werken ist das Bauen ein Kombinieren von Kräften. Aber wie diese selbst, so ist auch die Art ihrer Verwendung eine grund-

sätzlich verschiedene. Bei der Steinbrücke ist es ein Formen, das Masse mit Masse homogen vereint; das hölzerne und eiserne Stabwerk wird zusammengestellt, es wird *konstruiert*. Die struktiven Kräfte verdichten sich gleichsam zu Kraft-*Linien*, und diese werden zu bestimmten *Punkten* hin- und zusammengeleitet.

Das ist weniger ein »Formen« als — ein »Verbinden«. Die rein verstandesmäßige Erwägung gewinnt größere Macht. Deren theoretische Tätigkeit ist in diesem Falle das Zerlegen und Summieren der Kräfte, also ein »Rechnen«. Bei jeder Eisenkonstruktion geht dieses dem »Bauen« voran.



## II. RECHNEN UND BAUEN.

»Die Seele von dem, was Menschen schaffen, ist die Vernunft, ihre Mittel: ihre Berechnung, und die Folgen der Anwendung von Vernunft und Berechnung kann die sicherste und reinste Schönheit sein«.

*Van de Velde.*

Berechnungsmethoden der Stand- und Tragfähigkeit — das bedeutet, wie bei vielen verwandten Errungenschaften: Ergänzung der Praxis und Empirie durch die Theorie, Zusammenfassung vereinzelter Kenntnisse zu einem System, Erweiterung eines geistigen Sonderbesitzes zu einem Allgemeingut, Ausbildung eines »Wissens« zu einer »Wissenschaft«.

Wann und auf welchem Wege ward dieser folgenschwere Schritt beim Bauen getan?

Das Tempo der Entwicklung ist auch hier, wie bei der Geschichte des Eisens als Baustoff, ein völlig ungleiches. Jahrtausendlang bleibt sie nahezu auf dem gleichen Punkt, dann ein zunächst ruckweises Vordringen, zuletzt, im 19. Jahrhundert, ein ununterbrochenes Vorwärtseilen von Erfolg zu Erfolg, das die Ergebnisse aller früheren Zeiten weit hinter sich läßt.

\* \* \*

Die älteste Baulehre, die wir besitzen, das Werk Vitruvs, leitet das Wesen der Architektur aus zwei Quellen ab<sup>1</sup>: aus der »fabrica« und der »ratiocinatio«. Man hat diese Worte durch »Praxis« und »Theorie« übersetzt, und in der Tat erklärt sie Vitruv selbst in ähnlichem Sinn: »fabrica« sei die »kontinuierliche« Erfahrung, welche die handwerkliche und zweckgemäße Bautätigkeit bietet; »ratiocinatio« die Fähigkeit, »das handwerksmäßig Hergestellte durch inneres Verständnis und auf Grund der Verhältnissgesetze zu erklären und zu erörtern«: »quae res fabricatas solertia ac ratione proportionis demonstrare atque explicare potest.«

Allein als den größten Nutzen der Theorie betont Vitruv — einen gesellschaftlichen Vorteil: diejenigen Architekten, denen die theoretische Schulung fehle — »qui sine literis contenderant, ut manibus essent exercitati« —, könnten für ihre Leistungen nicht das rechte Ansehen erwerben. »Ratiocinatio« ist für Vitruv füglich etwa gleichbedeutend mit »Bildung«. Der Praxis gegenüber ist sie höchstens eine wünschenswerte Ergänzung, keineswegs eine notwendige Voraussetzung. Er nennt sie deren »Schatten«.

So dachte man in Rom zu Beginn der Kaiserzeit, am Anfang einer Epoche, die im Nutz- wie im Kunstbau zu den größten aller Zeiten gehört.

<sup>1</sup> De Architectura. Lib. I, Cap. I.

Jahrtausende früher war die Bautätigkeit der altorientalischen Welt auf ihren Höhepunkt gelangt, Jahrhunderte zuvor blühte die Architektur der Hellenen.

Bei diesen hatte die Wissenschaft der *Mechanik* begonnen. Die Untersuchungen des *Archytas* von Tarent sind nicht erhalten, aber *Aristoteles* erkennt und formuliert die Hebelwirkung als wissenschaftliches Problem, und mit der Schrift des *Archimedes* »De aequi-ponderantibus« beginnt die »Statik« in ihrer heutigen Bedeutung als »Lehre vom Gleichgewicht der unter Einwirkung von Kräften befindlichen Körper«. Allein die Blüte hellenischer Kunst ward von diesen Erfolgen wissenschaftlichen Denkens kaum berührt; ihre Architektur »reichte im großen und ganzen mit dem Instinkt und einzelnen Regeln aus«<sup>1</sup>.

Standen doch zur Zeit des *Archytas* (400 v. Chr.) bereits die Tempel der Akropolis, und die Lehren des *Aristoteles* (287—212) konnten nicht mehr der hellenischen Baukunst nützen, sondern höchstens der hellenistischen!

Der ganzen Struktur dieser hellenistischen Zeit entspräche ein unmittelbarer Eingriff der Wissenschaft in die Kunst und eine Einwirkung der Statik auf die Wege und Ziele der Konstruktionen. Doch auch dafür fehlen bisher Belege. Völlig klar sehen wir in diese Verhältnisse während des Altertums überhaupt nicht; weder Schulung noch Praxis seiner Baumeister und Ingenieure ist uns überliefert<sup>2</sup>. Allein der prinzipielle Vorgang selbst, dem die Mechanik im Altertum ihre Entwicklung zu einer Wissenschaft dankt, spricht *gegen* deren unmittelbaren, zielbewußten Einfluß auf die Praxis. Von dieser geht sie aus, aber ihre Erfahrung bleibt eine instinktive<sup>3</sup>. Das Experiment, soweit es die Griechen überhaupt verwandten, und vollends die begrifflichen Schlußfolgerungen aus ihm treten aus dem Arbeitsgebiet der Bauleute heraus.

Eine weitere Stütze für die Richtigkeit dieser Annahme bringt das Verhältnis der antiken Architektur zur *Arithmetik* und *Geometrie*. Auch sie dienen nicht der Statik, sondern — dem Veranschlagen und der Proportionslehre. »Durch die Arithmetik« — sagt *Vitruv*<sup>4</sup> — »werden die Kosten der Gebäude berechnet, die Maßeinteilungen entwickelt und schwierige Fragen der Verhältnisse sowie des Ebenmaßes nach geometrischen Gesetzen und Regeln gelöst.« Die Geometrie »lehrt den Gebrauch des Richtscheites und des Zirkels, mit denen die Grundrisse der Bauten aufs leichteste verfertigt werden, ferner die Handhabung des Winkelmaßes, der Setzwage und der Schnur«<sup>5</sup>. Von den Hilfen der Arithmetik und Geometrie für statische Ermittlungen aber ist bei *Vitruv*, der doch beispielsweise schon die Wirkungen des Erdschubes erörtert, nicht die Rede.

<sup>1</sup> Vergl. F. Th. Vischer, *Ästhetik* III, I, § 516. Ähnlich urteilt auch noch Kurt Merckel a. a. O., z. B. S. 498 auch hinsichtlich der Entwässerungs- und Bewässerungsanlagen der Griechen. Daß bei den antiken Bauausführungen genaue Zeichnungen vorlagen, ist selbstverständlich. Ebenso in Rom. So schrieb *Nomius Datus*, er habe für seinen Tunnel in der Nähe von *Lambäsis* »Pläne und Schnitte des ganzen Werkes gezeichnet« (Merckel a. a. O., S. 577).

<sup>2</sup> Vergl. die dürftigen Angaben darüber bei Merckel a. a. O., Kap. VII, S. 596 ff.

<sup>3</sup> Vergl. E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*. 2. Auflage Leipzig 1889.

<sup>4</sup> A. a. O., Lib. I, Cap. I. »Per arithmeticon vero, sumptus aedificiorum consummantur, mensurarum rationes explicantur, difficilesque symmetriarum quaestiones geometricis rationibus et methodis inveniuntur.

<sup>5</sup> Vergl. Kurt Merckel a. a. O. S. 597.

Nur auf der Praxis fußende Empirie war es, die im Altertum die Pyramiden erbaute und die Obelisken errichtete, die Tempel erdbebensicher machte, die riesigen Spannweiten überwölbte und die gewaltigen Brücken, Wasserleitungen und Hafenanlagen schuf, die sogar die Achsen eines Tunnels »einigermaßen zu bestimmen wußte«<sup>1</sup>. Neben dem statischen Wissen bildete die statische Wissenschaft eine Welt für sich.

Im *Mittelalter* verschwindet diese selbst: in der Geschichte der Naturwissenschaften und daher auch in der gesamten Mechanik ist hier ein fast leeres Blatt. Aber wie in der Naturkunde des Mittelalters für die Ergebnisse wissenschaftlicher Forschung mannigfache Kenntnisse der natürlichen Vorgänge Ersatz boten, so auch in der Mechanik. Die »schiefen Türme« italienischer Städte verkörpern das sichere Vertrauen zur richtigen Schwerpunktsbestimmung selbst da, wo das naive Gefühl an der Stabilität zweifeln muß. Die mittelalterlichen Gewölbekonstruktionen vollends, die von tastenden Versuchen zu höchster Kühnheit aufstiegen, sind Ergebnisse einer durch jeden Bau und jeden — Einsturz vermehrten Erfahrung, die sich in einer immer größeren Summe praktischer Regeln fortpflanzte von Geschlecht zu Geschlecht, von Land zu Land.

Selbstverständlich spielte dabei die geometrische Figur eine Hauptrolle. Die Bauhütte stand allen offen, die — wie die Formel lautet — »nach den Regeln der Geometrie arbeiteten«.

Diese »Regeln« betrafen zweifellos auch statische Verhältnisse. Einen Nachklang daran bietet beispielsweise das bekannte, Bramante zugeschriebene Gutachten über den Vierungsturm des Mailänder Domes, wo für die »forteza«, die Stabilität dieses Turmes, an Stelle des Achtecks ein Quadrat mit dem Grundsatz empfohlen wird: »Chi in sul quadro s'afonda, sul drito s'aponta«<sup>2</sup>. Das klingt wie ein statischer Memorialvers. Aber die Lehre, die es enthält, und die Cesariano 1521 in seiner Vitruvübersetzung bei gleicher Gelegenheit wiederholt, ist doch keinesfalls eine Entdeckung statischer Wissenschaft! Und gerade Cesarianos geometrische Schematisierung des Mailänder Turmes, dessen Querschnitt und Aufriß er in ein Gradnetz von gleichseitigen Dreiecken einzeichnet, bezeugt, daß es sich bei diesen vielerörterten »Triangulaturen« und »Quadraturen« »more Germanico« in erster Reihe nicht um die Ermittlung statisch wirkender Kräfte handelt, sondern um die statisch überzeugender Proportionen. Auch der Nachweis der Gegenwart, daß das gleichseitige Dreieck bei einer ganzen Reihe gotischer Kirchen den Aufbau tatsächlich bestimmt hat<sup>3</sup>, will und kann nur in diesem Sinne gedeutet werden. Er ist nicht sowohl ein Beitrag zur mittelalterlichen Statik als zur mittelalterlichen Ästhetik<sup>4</sup>. Geometrische Hilfskonstruktionen wurden vor allem beim Steinschnitt benutzt. Von ihrer Anwendung in den mittelalterlichen Bauhütten zum Zweck statischer Ermittlungen hören wir ebensowenig wie im Altertum.

<sup>1</sup> Merckel a. a. O., S. 592.

<sup>2</sup> Vergl. Boito, *Il Duomo di Milano*. Milano 1889, p. 230 f.

<sup>3</sup> Vergl. besonders Dehio, *Untersuchungen über das gleichseitige Dreieck als Norm gotischer Bauproportionen*. Stuttgart 1894.

<sup>4</sup> Über die Entwicklung der wissenschaftlichen Perspektive und ihre Beziehung zum konstruktiven Zeichnen vergl. C. Winterbergs Einleitung zu seiner Ausgabe der »*Prospectiva pingendi* des Petrus Pictor Burgensis« I. Straßburg 1899, S. 39 ff.

In der *Renaissance* mußte sich das Verhältnis zur Bauphysik ändern. Das lag im Geist der Zeit selbst. Die »causarum cognitio«, die Kenntnis von den Ursachen der Dinge, erschien als des Menschen würdigste Aufgabe. »Mußt zuerst die Theorie beschreiben und hierauf die Praxis!« — mahnt Leonardo da Vinci<sup>1</sup> — »sonst bleibst du ein Pilot auf einem steuerlosen Schiff!« In alle Künste drang das wissenschaftliche Bewußtsein von der Gesetzmäßigkeit der darzustellenden Natur<sup>2</sup>; den Malern dünkte insbesondere die *Perspektive* ein wahrer Talisman.

Welche Stellung erhielten nun Mechanik und Statik in der Architektur?

Zuverlässige Antwort darauf gibt die erste große Baulehre, die das Wollen und Wissen der italienischen Renaissancearchitekten zusammenfaßt: *Leone Battista Albertis* »De re aedificatoria« (1452 vollendet). Sein Anschluß an Vitruv<sup>3</sup> ist ein mehr äußerlicher und wird für die hier maßgebenden Gesichtspunkte im wesentlichen nur dadurch wichtig, daß auch Alberti gleich Vitruv bei der Gesamtanordnung des Stoffes die »firmitas« und »utilitas« der Bauten ihrer »venustas« voranstellte. Daß er den Unterschied zwischen dem »Architekten« und dem »Bauingenieur« nicht kennt, ist selbstverständlich. Der Architekt ist für ihn der König über das gesamte Gebiet baulichen und konstruktiven Schaffens »Magna est res architectura!« Unter diesem Motto behandelt Alberti nach dem Muster Vitruvs also auch den Brücken- und den Wasserbau sowie einzelne Maschinenelemente. Er verlangt daher vom Architekten mechanisches und, wie vom Maler<sup>4</sup>, auch mathematisches Wissen<sup>5</sup>. So erörtert Alberti im Anschluß an Archimedes und Vitruv nicht nur die Mittel zum Heben und Fortbewegen von Lasten<sup>6</sup>, wie den Hebel, den Flaschenzug, Räder, Rollen, Walzen u. s. w., sondern auch die dabei maßgebenden Grundprinzipien des Gleichgewichts — »omnium est quidem ratio ex principiis ducta librae!« — und die der Bewegung<sup>7</sup>. Er verwahrt sich freilich selbst ausdrücklich dagegen, mit den Theoretikern von Fach etwa wetteifern zu wollen: nicht als Mathematiker, sondern als Baumeister wolle

<sup>1</sup> Vergl. Leonardo da Vinci, der Denker, Forscher und Poet. Ausgabe von Marie Herzfeld. Leipzig 1904, S. 2 f.

<sup>2</sup> F. Th. Vischer a. a. O.

<sup>3</sup> Über das Verhältnis Albertis zu Vitruv vergl. Paul Hoffmann, Studien zu L. B. Albertis zehn Büchern, »De re aedificatoria«. Leipzig. Inaugural-Dissert. 1883. Leonis Baptistae Alberti . . . libri De re aedificatoria decem. Erste Druckausgabe Florenz 1485. Im folgenden nach der Pariser Ausgabe von 1512 zitiert. Italienische Ausgabe der ersten Bücher in den Opere Volgari ed. Bonucci. (Übersetzung von Bartoli.) Die Verbreitung in Frankreich besonders durch Fortunatus Duraeus und Geoffroy Tory de Bourges, in Deutschland durch Johannes Kircher aus Schlettstadt.

<sup>4</sup> Vergl. den Anfang seines Buches: Della Pittura.

<sup>5</sup> Darauf weist schon am Beginn seines ganzen Werkes seine berühmte »Definition« hin, »architectus« sei, wer »durch eigenes, wundersames Wissen und Können alles erlernt habe, was durch Bewegung und Verbindung körperlicher Gebilde in schönster Weise den Bedürfnissen der Menschen entspricht«. Ed. 1512, Fol. 1 »quaecumque ex ponderum motu corporumque compactione et coaugmentatione dignissimis hominum usibus bellissime commodentur«.

<sup>6</sup> A. a. O., Lib. VI, Cap. VI, Fol. LXXXVI. »Quemadmodum maximorum lapidum moles ac pondera facilius moveantur aliorum prius indicio: et naturali quidem ac philosophico«, und Cap. VII: »De trocleis (Flaschenzug) vestibis rotulis rotis et earum partibus magnitudine formis et figuris aptioribus«.

<sup>7</sup> A. a. O., Fol. LXXXVII »rerum movendarum rationes«.

er über diese Dinge reden<sup>1</sup>, allein er sagt doch, Zeichnen (*pictura*) und Mathematik seien für den Architekten so unerläßlich, wie für den Dichter Laute und Silben<sup>2</sup>. Wie den Traktat über die Malerei, so beginnt er auch seine Baulehre mit den Elementen der Geometrie, mit Erörterungen des Punktes, der Linien, Winkel, Flächen u. s. w.<sup>3</sup>. Die mathematischen und mechanischen Kenntnisse, die Alberti vom Architekten verlangt, werden von ihm bereits in sichtlicher Beziehung zur Baukonstruktion formuliert, in der Mechanik: die Lehre vom Gleichgewicht, von der Bestimmung der Flächen und Körper nach Maß und Gewicht<sup>4</sup>; in der Geometrie: die auf die Verbindung von Winkeln, Zahlen und Linien gestützte Methode — »*peritia . . . quae angulis una et numeris et lineis mista ad usum est excogitata*«<sup>5</sup>. Das letztere könnte auf graphische und arithmetische Berechnungsweisen anspielen. Dafür spräche auch Albertis Bemerkung, er selbst habe auf diesem Wege oft erkannt, daß sein Entwurf undurchführbar sei — »*cum ad lineas redegissem, errores inveni*«<sup>6</sup>. Allein auch er scheint dabei doch nicht sowohl statische Verhältnisse im Sinne zu haben, als vielmehr wiederum die Proportionslehre in ästhetischer Hinsicht. Von den Zahlen und Maßen, den Quadrat- und Kubikwurzeln spricht er vorwiegend im Hinblick auf die Grundrißgestaltungen<sup>7</sup> und insbesondere auf den musikalischen Rhythmus und die Formenharmonie (*concinntas*)<sup>8</sup>. Und was Albertis Buch unmittelbar über statische Fragen enthält, vor allem über die Tragfähigkeit der Bogen und Gewölbe sowie über ihre Widerlager, beschränkt sich meist auf sachliche Angaben des Praktikers<sup>9</sup>. Daß die damit verbundenen theoretischen Fragen Alberti, der von seinem vierund-

<sup>1</sup> A. a. O., Fol. LXXXVIII. Die gleiche Stelle am Anfang des Traktats über die Malerei. Dennoch wurde Alberti von den Zeitgenossen sogar mit Euklid verglichen, so von Ugolini Verrini (*de illustratione urbis Florentiae libri tres*).

<sup>2</sup> A. a. O., Lib. IX, Cap. IX, Fol. CLI verso: »*Verum pictura et mathematica non carere magis poterit quam voce et syllabis poeta. Atque haud scio an sit ea satis vel mediocriter praecepisse*«.

<sup>3</sup> A. a. O., Lib. I. De Lineamentis Cap. VI, Fol. IX ff.

<sup>4</sup> A. a. O., Lib. IX, Cap. IX, Fol. CLI verso »*Qualia sunt quae de ponderibus, de superficiebus corporibusque metiendis traduntur: quae illi (die Mathematiker von Fach) podismata embadaque (Vitruv) nuncupant*«. Embata. cf. Embater. Vitruv. = Grundmaß modulus =  $\frac{1}{2}$  U.D.

<sup>5</sup> A. a. O.

<sup>6</sup> A. a. O., Lib. IX, Cap. IX, Fol. CLI verso: »*De me hoc profiteor, multas incidisse saepius in mentem conjectationes operum, quae tum quidem maiorem in modum probarim eas cum ad lineas redegissem, errores inveni in ea parte ipsa quae potissimum delectasset, et valde castigandos. Rursus cum perscripta pensitavi, et numero metri adorsus sum, indiligentiam cognovi meam atque redargavi*«.

<sup>7</sup> A. a. O., Lib. IX, Cap. III, Fol. CXXXIX und Cap. VI, Fol. CXLIV. »*Numerorum in dimetiendis areis correspondentia*« vergl. die Erörterungen der Tempelgrundrisse Lib. VII, Cap. IV, Fol. XCIX.

<sup>8</sup> A. a. O., Lib. IX, Cap. V, Fol. CXLIII ff.

<sup>9</sup> So fordert er für die Stärke der Brückenpfeiler ohne weitere Begründung ein Drittel der Spannweite. (A. a. O., Lib. VIII, Cap. VI, Fol. CXXXVI verso: »*Pilae fient inter se numero et amplitudine compares. Earum crassitudini dabitur apertionis tertia*«. — Schon Hoffmann hat a. a. O., S. 42 hervorgehoben, daß Alberti, während er sich über Steinbrücken ziemlich ausführlich äußert, von Holzbrücken nur Caesars Beschreibung der Rheinbrücke (*de bell. Gall. IV, 17*) gibt: ein Beweis dafür, »wie für Alberti eine Sache durch die Berufung auf die Antike erledigt wird«. Daß der zuverlässigste und leistungsfähigste Bogen der Rundbogen bliebe, sei evident und ließe sich auch theoretisch beweisen (»*ratione argumento*«); er dürfe aber nicht kleiner sein als der Halbkreis vermehrt um ein Siebentel des Radius. (A. a. O., Lib. I, Cap. XII, Fol. XVI [»*arcus rectus*«]): »*Sed omnibus apertionibus quibus arcus ducitur curandum est, ut ille quidem arcus non minor quam circuli dimidia pars parte addita semidiametri septima*«. »*Nam apud peritos compertum affirmant, hunc esse omnium suum ad perennitatem accomodatissimum. Ceteros vero omnes arcus esse putant imbecilles ad ferendum onus: et promptos atque expositos ad ruinam*«. Vergl. a. a. O., Lib. III, Cap. XIII, Fol. XLIII.

zwanzigsten Jahre an mit Vorliebe mathematische Studien trieb, besonders stark angezogen und beschäftigt hätten, ist aus seinem Lehrbuch jedenfalls nicht ersichtlich, obschon dasselbe doch sonst so ungemein ausführlich bei technischen Dingen verweilt. Allerdings begnügt sich der »scrutator assiduus«, der im Forschen Unermüdliche, nicht mehr mit den nackten Regeln, sondern er ordnet diese dem ganzen, mit weitem Blick für den Zusammenhang der Dinge entworfenen Lehrgebäude ein; aber man spürt, daß diesen Regeln selbst doch noch immer lediglich die alten, vereinzelt, in ununterbrochener Überlieferung während des Mittelalters erhaltenen Erfahrungen zu Grunde liegen. Von der Mathematik und Mechanik bietet schließlich auch Alberti nur »das Allergewöhnlichste und Unentbehrlichste«. Das Verhältnis der Theorie zur Praxis ist auch hier noch höchstens das der Erklärung zur bekannten Tatsache, keinesfalls die Ableitung von Einzel Tatsachen aus einer allgemeinen, wissenschaftlichen Theorie. Der gebildete Humanist, der zu seinesgleichen spricht, steht ungleich höher als Vitruv und vollends als die Werkleute der mittelalterlichen Bauhütte, aber ein Zeuge für die Ausbreitung statischer Wissenschaft ist er nicht.

Ebensowenig ist es der Mann der architektonischen Tat, der auch in seinem Wissen so recht das Idealbild Albertis vom Renaissancearchitekten erfüllt: *Brunelleschi*<sup>1</sup>, trotz seiner immer wieder gerühmten Fähigkeit, schwierige Hebevorrichtungen und Aufzugsmaschinen zu ersinnen, und trotz seiner konstruktiven Meisterleistung, der Einwölbung der Florentiner Domkuppel.

Brunelleschi ist vor allem Konstrukteur und Baumeister, Alberti Humanist; das Forschen als Selbstzweck dagegen verkörpert sich in *Lionardo da Vinci*. Durch die ungeheure Gedankenwelt seiner aphoristischen Aufzeichnungen rauscht der Geist der Zukunft. Auch er geht von der Empirie aus, aber »er erhebt sie zu einer Methode, und damit beginnt die moderne Zeit, die moderne Wissenschaft«<sup>2</sup>. Und gerade bei Lionardo erhalten die »mathematischen Wissenschaften« eine Stellung wie nie zuvor. »Wo man sie nicht anwenden kann«, gibt es für ihn überhaupt »keine Gewißheit«<sup>3</sup>. Die Probleme des Gleichgewichts und der Bewegung durchdenkt er als Ergebnisse von Naturgesetzen und löst sie in einer ganzen Reihe von Einzelfragen vor Stevinus, Ubaldi, Galilei. Er setzt sie bei seinen Maschinen auch in die Praxis um<sup>4</sup>. Wenn irgend einer unter den Forschern und Künstlern der Renaissance, so wäre Lionardo zum Begründer einer »statischen Wissenschaft« berufen gewesen. Allein tatsächlich erörterte er nur einige ihrer Grundlagen. Der Weg, der von diesen

De flexilinis tectis, arcibus, eorum differentia et extructione. Mit Berufung auf den Ausspruch Varros: »in arcuatis operibus dextra non magis stare ex sinistris quam sinistra ex dextris). »Beim Halbkreisbogen seien Zugstangen unnötig.) Doch betont auch Alberti schon, daß die Tragkraft des Spitzbogens durch die Belastung wachse. (»Tam etsi compositi arcus istiusmodi ponderibus confirmantur superadiectis magis quam opprimantur.«.) Bei Albertis Erörterung der verschiedenen Gewölbearten, bei der er von Vitruv ganz unabhängig bleibt, tritt der statische Gesichtspunkt überhaupt wenig hervor. (A. a. O., Lib. III, Cap. XIV, Fol. XLIV ff., vergl. auch Hoffmann a. a. O., S. 49, wo Albertis Selbständigkeit betont wird.)

<sup>1</sup> Vergl. C. v. Fabriczy, Filippo Brunelleschi. Stuttgart 1892. Kap. VIII, Brunelleschi als Ingenieur und Mechaniker, S. 339 ff.

<sup>2</sup> Marie Herzfeld a. a. O., Einleitung S. CX.

<sup>3</sup> A. a. O., Text S. 3.

<sup>4</sup> Vergl. neben den Schriften Paul Müller-Waldes besonders: Hermann Grothe, Lionardo als Ingenieur und Philosoph.

zu den statischen Aufgaben der Baukonstruktionen führt, lag abseits der Pfade Lionardos, dessen Allseitigkeit ohnehin gerade die Architektur das fernste Gebiet blieb, und der jede nur formelhafte Fassung eines wissenschaftlichen Ergebnisses verschmähte. Ferner aber: seine Kenntnisse waren das Sonderwissen eines Begnadeten, der seiner Zeit mit den Riesenschritten des Genies vorausgeeilt war und seine Entdeckungen für sich selbst machte und behielt. Aus Lionardos mathematischen und mechanischen Erörterungen auf das Allgemeinwissen der Architekten seiner Zeit zu schließen, wäre ebenso verfehlt, wie etwa aus dem Gesichtskreis Dantes die gleichzeitige Durchschnittsbildung ermitteln zu wollen.

Etwa 120 Jahre nach dem Werk Albertis erhielten die italienischen Renaissancearchitekten ein neues »Lehrbuch«, diesmal von einem Baukünstler, dessen höchste Bedeutung gerade auf der inneren Gesetzmäßigkeit seines Schaffens beruht. *Andrea Palladio* ward der Gesetzgeber der Baukunst für Jahrhunderte<sup>1</sup>. Aber seine Lehre ist im wesentlichen Formenlehre. Der humanistische Zug zu allumfassender Wissenschaftlichkeit, der Alberti bestimmt, tritt bereits zurück. Zu seiner Befriedigung genügte das nun allgemein verbreitete Werk Vitruvs. Und in *Palladios* Lehrbuch der Architektur, dessen dritte Abteilung als »Öffentliches Bauwesen« den Straßen- und insbesondere den Brückenbau sehr ausführlich behandelt, der bei dem letzteren als Rekonstruktionen<sup>2</sup> und Entwürfe Palladios selbst einige der wichtigsten Beispiele der hölzernen Hänge- und Sprengwerke der Renaissance zeigt, ist von statischen Grundsätzen und überhaupt von statischen Gesichtspunkten weitaus weniger die Rede als in dem Buch Albertis. Auch das ist ein Zeichen der Zeit! Die Hochrenaissance betrachtete die wissenschaftlichen Kenntnisse nicht mehr als Entdeckerin, sondern schon als Besitzende. Das konstruktive Können des Architekten wird vorausgesetzt. Die Hauptkunst ist auf das Formale eingestellt. In Vignolas Lehre von den Säulenordnungen gewinnt dies völlig die Oberhand. Ähnlich wie die Italiener dachte in Frankreich *Philibert de l'Orme*, ja er sieht in dem Anwachsen theoretischer Studien eine Grundgefahr für die Architektur: »Il nous faut penser, qu'il y a aujourd'hui peu de vrais architectes, il en est qui se sont arrêtés aux lettres seules et démonstrations géométriques, ce qui fait que seulement ils ont suivi l'ombre de ce beau corps d'architecture, sans aucunement parvenir à la vraie connaissance de l'art!«

So erscheint also die gesamte Baukunst der Renaissance auch im Spiegel ihrer Lehrbücher mehr als eine Glanzzeit konstruktiven und künstlerischen Könnens als theoretischen Wissens.

Das bezeugen auch ihre Werke selbst. Die heutige wissenschaftliche Statik kann die Kuppelkonstruktionen des Florentiner Domes und der Peterskirche nicht in jeder Hinsicht gut heißen, aber diese Riesenwölbungen, ihrem Umriß nach die schönsten der Welt, stehen noch heute, und ihre Spalten, Verbeulungen und Verzerrungen sind weniger die Folgen schlechter konstruktiver Maßnahmen als schlechter Ausführung. Dennoch kommt auch der beste heutige Kenner dieser Konstruktionen, Joseph

<sup>1</sup> Erste Ausgabe: I quattro libri dell' architettura. Venezia 1570.

<sup>2</sup> Dabei spielt, wie bei allen Gelegenheiten dieser Art, Caesars Rheinbrücke eine Hauptrolle. Vergl. zu ihr auch Merckel a. a. O., S. 286 f.

Durm<sup>1</sup>, zu dem Schluß, daß diese Renaissancemeister wohl nicht »gerechnet« haben, daß sie sich auch »über gewisse Kräftewirkungen nicht immer im klaren waren«. Aber »ihr sicheres statisches Gefühl, gebildet an den Konstruktionen ihrer Vorfahren, die sie auf Herz und Nieren prüften, und die ihnen in Fleisch und Blut übergingen, hat sie nie im Stiche gelassen«. Freilich waren sie eher zu vorsichtig als zu kühn. Sie vervielfältigten die statisch wirksamen Mittel und erreichten den Schein leicht aufsteigender Wölbung mit einem großen Aufwand von Material. »Rationelle Konstruktionen« sind diese Steingewölbe der Renaissance nicht!

Eher noch sind es die *hölzernen Dachstühle* und die als Hänge- und Sprengwerke zusammengesetzten Baugerüste. An ihnen ließen sich die *Wirkungen der Zug- und Druckkräfte* unmittelbarer erproben und studieren.

Allein um solche Erwägungen vom Bau- und Zimmerplatz in die Studierstube des Gelehrten hinüberzutragen zu wissenschaftlich systematischer Durcharbeitung, dazu bedurfte es einer vollständigen Wandlung des ganzen geistigen Lebens. Was der Genius Lionardos einst in seiner verschwiegenen Riesenwerkstatt begonnen hatte, gewann in *Galilei* und *Newton* die werbende Kraft reformatorischer Gedanken und drang mit unaufhaltsamer Macht vorwärts. Und gerade die Gesetze der Körperwelt hatten dabei die ersten und höchsten Probleme geboten und die am gewaltigsten nachwirkenden Lösungen gefunden. Daran mußten auch die spezielleren »statischen« Grundlehren teilnehmen. Nun in der Tat beginnt seit dem Altertum die zweite Hauptperiode ihrer wissenschaftlichen Theorie<sup>2</sup>. An ihrer Spitze steht das von *Galilei* selbst behandelte und nach ihm benannte statische »Problem« des Balkens, dessen eines Ende in eine Wand eingemauert ist und der durch sein eigenes oder ein hinzugefügtes Gewicht zum Bruch kommt: die erste »Theorie der Biegefestigkeit«<sup>3</sup>.

Galilei ward auch zum Förderer rationeller Konstruktion; er fand, daß Hohlkörper den Biegekräften wesentlich besser widerstehen als gleich schwere Vollkörper.

### 1. Statische Theorien.

Die Grundprinzipien der eigentlichen *Statik* als der Lehre vom Gleichgewicht sind in den Zeiten Galileis bereits vollständig erkannt. Ihre weitere wissenschaftliche Entwicklung geht derjenigen der *Dynamik*, als der ebenfalls mit Galilei beginnenden Lehre von der Bewegung der Körper, parallel.

Die Vervollkommnung der Elastizitätslehre, insbesondere der Theorie der Biegefestigkeit, durch *Hooke* und *Mariotte* bis zu den von *Euler* aufgestellten Gleichungen

<sup>1</sup> Vergl. Zwei Großkonstruktionen der italien. Renaissance. Zeitschr. f. Bauwes. XXXVII, 1887, Heft VII—IX und: Die Kuppel der Kirche Sa. Maria dell' Umiltà in Pistoja a. a. O., 1902.

<sup>2</sup> Die folgende geschichtliche Skizze stützt sich insbesondere auf G. Chr. Mehrrens, Vorlesungen über Statik der Baukonstruktionen und Festigkeitslehre. I. Bd. Leipzig 1903, S. 77 ff. — Vergl. G. Winkler, Abriß der Geschichte der Elastizitätslehre in Techn. Blätter. 1879. — Navier-Saint-Venant, L'application de la mécanique. III<sup>e</sup>. édit. Paris 1864. S. XC ff. »Historique abrégée des recherches sur la résistance et sur l'élasticité des corps solides.« — Cantor, Geschichte der Mathematik.

<sup>3</sup> Fortgesetzt für den auf beiden Enden unterstützten Balken durch Blondel (1661), Marchetti (1669), Fabri und Grandi (1660—1700), vergl. Mehrrens a. a. O., S. 77.

für die Knickfestigkeit förderte auch die Berechnung der Stabwerke. Im letzten Drittel des 18. Jahrhunderts gibt *Coulomb* die richtige Lage der Gleichgewichtsachse (der »neutralen Linie«), berechnet die in ihrer Bedeutung schon von *Lionardo* erkannten »Momente« der statischen Kräfte und berücksichtigt zum ersten Male die in der Querschnittsebene auftretenden »inneren Kräfte«, die Scherspannungen.

Hand in Hand mit diesen Entdeckungen selbst hatten sich auch die analytischen und synthetischen Methoden ihrer Darstellung vervollkommen. Zum numerischen Rechnen trat — besonders durch *Vieta* (1540—1603) — das Buchstabenrechnen mit abstrakten Größen, die Algebra; »der Ausdruck für die Beziehungen zwischen Ursache und Wirkung, zwischen dem Ganzen und seinen Teilen wurde die »Gleichung«. Derselbe *Vieta* führte der Analysis die graphische Darstellung zu, die dann im »*Traité de Gnomonique*« des *de la Hire* 1682 zur systematischen Begleitung und Ergänzung der arithmetischen Operation und der algebraischen Formel wurde. Die Stabilitätsuntersuchungen ließen sich also nach Formeln in numerischen Tabellen und nach verhältnismäßig einfachen graphischen Darstellungen ausführen, und in der Tat folgten sich nun Tabellen und Hilfsbücher solcher Art sehr schnell. Am bekanntesten und verbreitetsten wurden die französischen Werke eines *de la Hire*, *Parent*, *Fresier*, dann eines *Bélibor* und *Bossut*.

Dennoch blieb bis zum Ende des 18. Jahrhunderts in den Kreisen der Architekten und der Bauingenieure noch immer die praktische Erfahrung die einzige als zuverlässig erkannte und verwandte Macht. Belege dafür bieten wie in der Renaissance die übrigens auch damals noch sehr vereinzelt *theoretischen Baulehren*, insbesondere für den Brückenbau. Sie verwenden bereits jene genau detaillierten Pläne und Tabellen für die Stärke der Hölzer, wie sie beispielsweise *de la Hire* in seinem »Traktat von Zimmerwerken« für verschiedene Trägerlängen aufgestellt hatte. *Leupold*, der seinem 1726 im Anschluß an den französischen Ingenieur *Gautier* veröffentlichten »*Theatrum pontificale*« oder »Schauplatz der Brücken und Brückenbauer« die *La Hiresche* Tabelle beifügt<sup>1</sup>, rühmt: »Es ist nun soweit gekommen, daß man weiß, wie dick und lang die geschnittenen Hölzer sein müssen, eine gewisse Gewalt bei einer Brücke oder einem anderen Werk zu erhalten. Die Extrema soll man vermeiden, wozu die Praxis gute Vorteile lehret. So man die Dicke und Länge der Hölzer nach einer gewissen Einteilung machet, ist man vor das Einfallen sicher. Diese Einteilung oder dieser Entwurf soll deutlich zeigen, wieviel Holz nötig, ihre Maße, seine Natur, Unterschied und Eigenschaften und endlich ein jedes Stück zu seinem Gebrauche bemerken«. Alle diese Angaben sind noch Erfahrungswerte, ohne Erläuterung der Berechnungsmethoden, und wie weit man darin noch zurück war, lehrt beispielsweise die ebendort abgedruckte Bemerkung *Gautiers* über die Widerlager steinerner Brücken: »Die alten gaben den Pfeilern von den Brücken zu ihrer Dicke den dritten Teil von der Weite des Bogens, welche Dicke sie zuweilen bis auf die Hälfte der Weite vergrößerten; heutzutage hat man gefunden, daß diese Dicke zu groß und hat sie kleiner angenommen als  $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{5}$  der Weite des Bogens. Weder die Alten noch die Neuen wissen *raison* darin zu geben, und so sie heutzutage gefordert würde, dürfte man in eben der Not stecken.«

<sup>1</sup> Vergl. Merckel, Zur Geschichte der Technik. Deutsche Bauztg. 1888, Nr. 46.

Um die Ausnützung dieser »raison« für die praktische Baukunst hatten sich die *Mathematiker* im 18. Jahrhundert selbst überhaupt nur wenig bemüht, und die Sprödigkeit der Architekten ihren Lehren gegenüber fand einen Hauptgrund in ihrer fast ausschließlich praktischen und formalen Schulung, von denen die letztere im wesentlichen auf die antik-klassischen Stile eingeschränkt blieb. Dieses Verhältnis betont schon 1789 der Mathematiker *Franz Gerstner*, wenn er in seiner als Doktor-dissertation der Prager Universität gedruckten kleinen »Einleitung in die statische Baukunst« sagt: »Bei den Fortschritten welche die mechanischen Künste seit einem Jahrhundert mit Hilfe der höheren Mathematik machten, traf die Baukunst das unverdiente Schicksal, ziemlich weit hinter den übrigen zurückzubleiben. Leibnitz und die Bernoulli hatten zwar auch einigen Samen zu ihrer Vervollkommnung gestreut, indem sie die Kettenlinie für die schicklichste zu Gewölben erklärten. Allein außerdem, daß sich diese Linie *mit dem guten Geschmack der Alten nicht vertragen wollte*, konnten oder wußten die Baumeister von derselben keinen vorteilhaften Gebrauch zu machen, weil sie mehr die Schwerpunkte der Gewölbesteine als die Lehrbögen anzugehen schien.« Auch die seitens der Mathematiker — wie 1793 von *Helpfenrieder*, Professor der Mathematik und Doktor der Theologie (!) an der Universität in Ingolstadt, mit seinen »Beiträgen zur bürgerlichen Baukunst« — in mehr populärer Form unternommenen Annäherungsversuche zwischen Mathematik und Praxis blieben erfolglos. Sie wurden von den Baupraktikern zuerst sogar mit größter Heftigkeit zurückgewiesen.

Der klassische Boden für diesen heute schon vergessenen und doch recht denkwürdigen Kampf ist wiederum Paris, und zwar unmittelbar vor und nach der Revolution. Der beredteste Gegner der Theoretiker war damals der tüchtige, aber bis zur Beschränktheit einseitige Architekt *Charles François Viel*, Baumeister der Pariser Hospitäler, Mitglied des »conseil des travaux publics« etc. Er veröffentlichte schon 1797 in seinem Hauptwerk: »Principes de l'ordonnance et de la construction des bâtiments«, neben den heftigsten Angriffen auf Soufflotts teilweise von Mathematikern berechnete Konstruktionen an St. Geneviève (dem jetzigen Pantheon) und auf die Seinebrücke Peronnets, ein »Des dangers et de l'abus de la science du trait« überschriebenes Kapitel<sup>1</sup>. Aber dort beschränken sich seine Einwände im wesentlichen noch auf *ästhetische* Bedenken gegen Konstruktionen die dem »emploi des masses« widersprächen. Später, nachdem insbesondere der Gewölbeeinsturz des Pantheons 1804 die Zuverlässigkeit der Berechnungen auch vor der öffentlichen Meinung erschüttert hatte, schrieb Viel sein voluminöses Buch: »De l'impuissance des mathématiques pour assurer la solidité des bâtiments. 1805« und ging in einer ganzen Reihe von Gelegenheitsbroschüren zu einer immer heftigeren Tonart über, die sich während des Baues der Madeleinekirche in heute besonders ergötzlichen Tiraden äußerte: »En architecture, pour la solidité des édifices, les calculs compliqués, hérissés de chiffres et de quantités algébriques, avec leurs 'puissances', leurs 'radicaux', leurs 'exposans', leurs 'coefficiens' ne sont nullement nécessaires.« »Il faut se défendre d'autant plus aujourd'hui de l'influence funeste des machinistes des savans en  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (!) pour les constructions.«

Das ließ Viel 1818 drucken, sieben Jahre nach der Vollendung des ersten, großen, lediglich durch statische Berechnung ermöglichten Eisenhochbaues! Es war die

<sup>1</sup> A. a. O., S. 199 ff. (Kap. XXXIV).

1809—1811 ausgeführte Kuppel der *Halle au blé* in Paris. Das einst von Philibert de l'Orme entworfene, 1783 von Roubo erneuerte Bohlendach dieser Halle war bereits 1802 durch Brand zerstört worden, und die Frage, wie es feuersicher zu ersetzen sei, stand jahrelang im Vordergrund aller beteiligten Interessen. Sie schürte den Gegensatz der alten und der neuen Schule zu hellen Flammen an. Projekt folgte auf Projekt. Auch Viel<sup>1</sup> beteiligte sich daran mit dem Entwurf eines mächtigen Steingewölbes. Zuletzt aber drang 1809 der kühne Entwurf des Architekten *Bellanger* durch, die 40 m Spannweite erfordernde Kuppel aus gußeisernen Rippen zu errichten und mit Kupferplatten einzudecken, und für diesen Entwurf lieferte der Ingenieur *Brunet*<sup>2</sup> nur auf *rechnerischem Wege* die *genaue* Detaillierung, die Bestimmung der Gesamtkonstruktion und die Angabe aller Maße<sup>3</sup>. Das ist nicht nur in der Geschichte des Eisenbaues ungemein wichtig — große eiserne Brücken waren schon zuvor errichtet worden —, es ist vor allem der Anfang jener Machtstellung, den das *statische Rechnen* im heutigen Eisenbau einnimmt. Der Tragweite des ganzen Ereignisses war man sich in Paris übrigens wohl bewußt, und der Einweihung des Baues 1811 wohnte sogar der Kaiser Napoleon bei. Aber der persönliche Streit zwischen den »Statikern« und »Praktikern« bestand fort. Er war nur die Sonderform jenes seit dem Ende des 18. Jahrhunderts ausgebildeten Gegensatzes der »constructeurs« und »ingénieurs« zu den »architectes«. Über das rechte Ziel schossen beide hinaus. Jene behaupteten, in der Architektur »beruhe *alles* auf Geometrie«, die ganze Baukunst sei eine »Tochter der mathematischen Wissenschaften«, deren »naturalisation scientifique« (!) unerläßlich werde — die »architectes« dagegen leugneten die Zuverlässigkeit der Theorien, stellten — wie Viel — ganze Listen der Bauten auf, die »trotz der Berechnung eingestürzt seien«, und wiesen auf die bei jedem Kunstwerk entscheidende Macht des »persönlichen Genies«<sup>4</sup>.

Inmitten dieser Streitrufe aber arbeitete einer der besten Baupraktiker und zugleich ein zum Lehren ungewöhnlich begabter Theoretiker, Soufflots größter Schüler *Rondelet*, an seinem noch heute berühmten und brauchbaren »*Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*« (Paris 1812—1817), wo die statische Berechnung zum ersten Male als ein wesentlicher Teil der Konstruktionslehre behandelt ist<sup>5</sup>, und gleichzeitig wurden die gesamten statischen und dynamischen Theorien seitens der mathematischen Wissenschaft selbst nicht nur von neuem geprüft und verbessert, sondern ebenfalls zu einem großen Lehrgebäude verbunden. Auch dies geschah durch einen Franzosen: durch den als Gelehrter und Praktiker gleich bedeutenden Ingenieur *Louis Navier* (1785—1836). Sein Hauptwerk »*L'application de la mécanique*

<sup>1</sup> Viel, Dissertation sur la Halle au blé à Paris.

<sup>2</sup> Brunet, Dimensions des fers qui doivent former la coupole de la Halle au blé. 1809.

<sup>3</sup> Vergl. Benoit a. a. O., S. 22 ff.

<sup>4</sup> Vergl. Benoit a. a. O., S. 24. Dieses Mißtrauen währte in den Pariser Kreisen bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts. Besondere Nahrung erhielt es durch den Einsturz der zum Teil aus Schmiedeeisen konstruierten großen basilikalen Markthallen von Paris 1842. Vergl. Försters Bauzeitung 1838, S. 30, Bl. 185; 1840, S. 280; 1844, S. 165.

<sup>5</sup> Rondelets Werk wurde 1823 ins Deutsche übertragen, in Deutschland selbst aber hatte bereits David Gilly seit 1797 mit seinem »Handbuch der Landbaukunst« (3. Bde., Berlin-Halle; der 3. Bd. 1811 von Friederici) erfolgreich einen ähnlichen Weg beschritten.

à l'établissement des constructions et des machines«<sup>1</sup> (1. Ausg. 1826, Paris) ist ein Markstein in der Geschichte aller hier in betracht stehenden Fragen. Sein Hauptzweck war, der »herrschenden Praxis« eine wissenschaftliche Lehre an die Seite zu stellen. In der Vorrede heißt es noch 1826: »La plupart des constructeurs déterminent les dimensions des parties des édifices ou des machines d'après les usages établis et l'exemple des ouvrages existants; ils se rendent compte rarement des efforts que ces parties supportent et des résistances qu'elles opposent . . . L'objet de ces 'Résumés'« — unter diesem Titel erschien das Naviersche Werk zunächst als Leitfaden seiner Vorlesungen an der École des ponts et chaussées — »est d'exposer les conditions de l'établissement des constructions que les ingénieurs dirigent, et de mettre à même de vérifier le degré de résistance de chacune de leurs parties.«

In Naviers Werk ist der Theorie der hölzernen und eisernen Stabwerke der letzte Abschnitt gewidmet, er behandelt aber fast ausschließlich die Sprengwerke. Die Berechnung und Theorie des *gegliederten Trägers*, des im heutigen Eisenbau wichtigsten Faktors, hat die schon durch den Herausgeber Naviers *Saint Venant* beschleunigten Fortschritte der Elastizitätslehre während der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts zur Voraussetzung, gehört aber als selbständige, den in ihnen gegebenen statischen Bedingungen entsprechende Methode erst der zweiten Hälfte an. Bahnbrechend waren dafür die Arbeiten der Theoretiker, des Deutschen *Culmann* und des Italieners *Cremona* 1851. Das erste allgemeine einfache und praktische Verfahren der Berechnung von durchgehenden Trägern stammt aus dem Jahre 1857 von dem Ingenieur *Clapeyron*, der es damals »beim Bau großer Eisenbrücken verwandte«. (Mehrstens).

## 2. Graphische Darstellungsmethoden.

Bald darauf gesellte sich diesen Theorien und Berechnungsmethoden ein bedeutender, auch auf ihre Erweiterung zurückwirkender Fortschritt ihrer *Darstellungsmethoden*. Das geschah durch den Bund der analytischen Untersuchung mit der synthetischen, die im wesentlichen von geometrischen Anschauungen ausgeht.

Auch dafür war der Boden schon im 16. und 17. Jahrhundert bereitet worden<sup>2</sup>, vor allem durch *Simon Stevinus* (1548—1603), der zuerst die Größe der Kräfte als Längen ihr parallel laufender gerader Linien darstellte. Erst von da an ward das Dreieck auch als statisch wichtigste Figur des Baues wissenschaftlich erkannt. Stevinus selbst fand 1576 auf graphischem Wege: »daß drei auf einen Punkt wirkende Kräfte sich das Gleichgewicht halten, wenn sie parallel und proportional den drei Seiten eines rechtwinkligen Dreiecks sind«<sup>3</sup>.

1687 veröffentlichte dann *Newton* den Satz vom »Parallelogramm der Kräfte« und gleichzeitig *Varignon* das »Kräftepolygon« und das »Seilpolygon«: die Fundamente der »graphischen Statik«. Allein in der mit Leibnitz' Infinitesimalrechnung

<sup>1</sup> Zuerst 1824 nur für seine Hörer, dann 1826 unbeschränkt veröffentlicht; viele neue Bearbeitungen und Übersetzungen. (III. Ed. von Barbé de Saint-Venant. Paris 1864; dort S. XXXIX ff. Biographie und Bibliographie Naviers). Die »Résistance des corps solides« ist im ersten Band behandelt.

<sup>2</sup> Zum Folgenden vergl. besonders J. J. Wehrauch, Über die graphische Statik. Leipzig 1874.

<sup>3</sup> De Beghinselen der Weegkonst s. Statica. 1586.

beginnenden Hauptepoche der *analytischen* Methoden, wie sie für die Mechanik Lagrange 1788 in seiner »Mécanique analytique« zusammenfaßte, lagen die rein geometrischen Probleme brach. Das änderte sich erst, als *Monge* die Grundzüge der »darstellenden Geometrie« gegeben hatte<sup>1</sup>, doch kam diese praktisch nur dem Bauzeichnen zugute. Die Anwendung graphischer Methoden auf die Baustatik, die »geometrische Statik«, wurde zunächst durch *Poinsot* (*Eléments de Statique*, Paris 1804), vorbereitet. Beim Bogen- und Gewölbepbau sowie auch bei der Tischlerei hatten die geometrischen Hilfskonstruktionen und insbesondere die Ausmittlung der Kurven schon seit dem 17. Jahrhundert eine große Rolle gespielt<sup>2</sup>. An der Pariser Académie d'Architecture bildete vor der Revolution die »Ecole de trait« eine eigene Sektion. Zwei Jahrzehnte später (1818) gliederte sich der Unterricht in die Abteilungen: 1. Architecture, 2. Mathématique, 3. Stéréotomie, Construction. Man behandelte also die vom Steinschnitt ausgehenden geometrischen Methoden innerhalb der Konstruktionslehre — zu großer Unzufriedenheit Viels<sup>3</sup>, der darin eine Herabwürdigung des »constructeur« zum »appareilleur« (Steinmetz) sah. Selbst noch Poncelet bediente sich der geometrischen Konstruktionen im wesentlichen nur als einer Hilfe bei der Ableitung schwieriger analytischer Formeln und als Ergänzung zu deren Ergebnissen. Lamé und Clapeyron zeichneten 1827 die Kettenlinien der über 300 m langen Kettenbrücke für St. Petersburg nach dem Kräfte- und Seilpolygon. Die ersten, die rein geometrische Stabilitätsbestimmung der Bauwerke als allgemein gültige Hauptmethode empfahlen, waren der Deutsche *Möbius* (1827) und der Franzose *Cousinery*, der in seinem »Calcul par le trait«, Paris 1839, das System und praktische Beispiele des »graphischen Rechnens« gab. Cousinery bediente sich dabei der Perspektive, noch nicht der »Neueren Geometrie«, der durch Poncelet begründeten und von v. Staudt zu einer besonderen Wissenschaft erhobenen »Geometrie der Lage«. Darauf erst beruht die von dem Schweizer *Culmann* geschaffene »Graphische Statik« (1. Aufl. Zürich 1866), ein »Versuch«, »die einer geometrischen Behandlung zugänglichen Aufgaben auf dem Gebiete des Ingenieurfaches mit Hilfe der neueren Geometrie zu lösen.«

Sie bietet die wissenschaftliche und zugleich praktische Ausnutzung der zwischen dem Kräfte- und Seilpolygon bestehenden Beziehungen, und in dieser Hinsicht einen Schlußstein des mit Newton und Varignon beginnenden Ausbaues der ganzen geometrischen Statik. Was Culmann selbst 1866 bescheiden nur einen »Versuch« genannt hatte, ist heute eine anerkannte und unentbehrliche Hilfswissenschaft der Konstruktionslehre, an deren Weiterbildung neben Culmann selbst besonders *Cremona*, *Maxwell*, *Mohr* und *Müller-Breslau* beteiligt sind.

Durch die innigere Fühlung der mathematischen Wissenschaft mit der Praxis wurden dieser aber auch wissenschaftlich zuverlässige und auch bei nicht höherer mathematischer Schulung doch leicht anwendbare Methoden zur Verfügung gestellt. Eine solche ist vor allem die »Elementare Theorie und Berechnung eiserner Dach-

<sup>1</sup> Géométrie descriptive. Paris 1788.

<sup>2</sup> Wie vielseitig diese »art du trait« insbesondere bei den Holzkonstruktionen angewendet wurde, zeigt am besten wohl Roubos großes Lehrbuch der Tischlerei: »L'art du menuisier«. Paris 1769—1775.

<sup>3</sup> Vergl. besonders: De la chute imminente de la science de la construction des bâtiments etc. 1818. S. 25.

und Brückenkonstruktionen« von *August Ritter* (1. Aufl. Hannover 1862), welche die Bestimmung der Spannungen analytisch nur auf die Methode der »statischen Momente«, also nur auf die elementarsten Kenntnisse in der Mechanik zurückführt. — Auch der Behandlung »statisch unbestimmter« Fachwerke, deren »analytische Bestimmung seit Navier besonders durch *Clapeyron* und *Castigliano* auf neue Bahnen geführt worden war, gab die graphische Statik einfache und zuverlässige Methoden an die Hand. Neuerdings ist sie insbesondere an der Arbeit gewesen, mit Hilfe der 1835 von Ampère begründeten geometrischen Bewegungslehre (Kinematik) das allgemeinste Gesetz der Statik, das Prinzip der »virtuellen Verschiebungen«, auf das Fachwerk anzuwenden.

Die wissenschaftliche Zusammenfassung aller heut maßgebenden »Methoden der Festigkeitslehre und der Statik der Baukonstruktionen« ist das Verdienst eines Deutschen, der diese Methoden selbst außerordentlich bereichert hat: *Müller-Breslaus*. Seine beiden groß angelegten Lehrbücher schließen in der Geschichte der statischen Wissenschaft diese zweite, glänzende Periode ab, deren Beginn das Lebenswerk des Franzosen Navier bezeichnet.

\* \* \*

Die theoretische Festigkeitslehre ist auch heute ihren Zielen noch fern. In der Statik des Hochbaues harren noch viele aktuelle Probleme der Lösung, und jede Großkonstruktion kann sie vermehren. Vor der Schärfe der heutigen wissenschaftlichen und ökonomischen Ansprüche halten die alten Festigkeitsberechnungen nicht immer stand, indem sie das Material unzweckmäßig auf die einzelnen Glieder des Bauwerkes verteilen. Daß sie gleichwohl in Hunderten von Fällen sich »bewährt« haben, erklärt der Statiker sehr hübsch als eine Folge der »Schlauheit des Materiales«, womit gemeint ist, »daß dort, wo eine statisch unbestimmte Konstruktion am starrsten und widerstandsfähigsten ist, auch die angreifenden Kräfte aufgenommen werden, und die schwächeren Teile eines Bauwerkes gerade wegen ihrer Nachgiebigkeit kleinere Beanspruchung erfahren«.

Allein im Vergleich mit allen früheren Jahrhunderten der Baugeschichte darf man sagen, daß das Bauen im 19. Jahrhundert im statischen Rechnen ein neues, großes sicheres und fortan unentbehrliches Mittel zur Lösung seiner konstruktiven Aufgaben erhielt. Und dieses Mittel ist seit einem Menschenalter auch Allgemeingut der Fachkreise. Die Riesenliteratur der Baukunde überliefert es in allen Formen, vom streng theoretischen Lehrbuch bis herab zum tabellarischen Handbüchlein. An den technischen Hochschulen, die in ihrem stolzen Lehrgebäude jetzt Bau- und Maschineningenieurwesen und Architektur vereinen, wird die Mechanik in ihrer Beziehung zur gesamten Ingenieur Tätigkeit als Sonderdisziplin behandelt. Jeder Baubeamte muß mit der Berechnung einfacher Hochbauten vertraut sein; die staatliche Aufsicht über die Bauprojekte und Bauausführungen verfährt nach fest formulierten statischen Gesetzen. Für den Hochbau der Bauingenieure ist die Statik eine Fundamentalwissenschaft. Wo die Architektur vor größere, schwierigere Konstruktionsaufgaben gestellt wird, vertraut sie die statischen Probleme verantwortungslos der fachwissenschaftlichen Arbeit des Bauingenieurs an, etwa wie die Heilkunde die mikroskopische Unter-

suchung zu einer Sonderdisziplin gemacht hat, auf deren Ergebnisse sie sich sicher stützen kann. —

Dieses ganze Verhältnis ist ein neues, grundverschieden von der Art, wie bis zum 19. Jahrhundert statische Regeln beim Bau angewandt wurden. Mögen solche auch früher entschieden haben, und nicht nur das »statische Gefühl«, mögen in der »Triangulatur« und »Quadratur« wirklich auch statische Gesetze ausgesprochen, mancherlei Erfahrungen schon früher formelhaft zusammengefaßt worden sein: sie waren lediglich den Fachgenossen bekannt, sie wurden als Sonder- und Zunftbesitz sorgsam gehütet. In dieses Halbdunkel von Kenntnissen und Erkenntnis trug erst das 19. Jahrhundert die Leuchte der Wissenschaft hinein, und unter ihrem hellen Strahl schwanden die spukhaften Formen der Geheimlehre vor der freien Forschung, die allen offen steht, in jedem Augenblick bereit, Kontrolle zu üben und zu dulden. —

Damit trat dann freilich in die praktische Baukunde ein theoretisches, in systematischer Form übermitteltes Wissen.

Was bedeutet das für das »Bauen« als schöpferische Tätigkeit, für den »Bau« als deren Schöpfung? —

Die Antwort ist je nach deren Gattung verschieden. Auch dabei entscheidet in erster Reihe der Zweck.

Dem *reinen Nutzbau* hat zu allen Zeiten das konstruktiv Notwendige genügt. Wenn sich dieses jetzt auf feste Normen von wissenschaftlicher Zuverlässigkeit stützen kann, die ihm zahlenmäßig oder in geometrischen Figuren bestimmt vorliegen, so erfüllt es seinen nächsten Zweck vollkommen, indem es den gegebenen Fall diesen Normen anpaßt. Das geschieht in Hunderten von Stein-, Holz- und Eisenbauten. Schon dabei aber nehmen die letzteren eine Sonderstellung ein. Sie sind dem Material nach die weitaus jüngsten, also auf Kontrolle besonders angewiesen. Die Methoden dieser Kontrolle, die wissenschaftlichen sowohl wie die praktischen (der »Probebelastung«), haben sich mit und an den Eisenbauten selbst entwickelt, gehören also gleichsam zu deren eigenen Lebensbedingungen. Vor allem aber: das Wesen des Eisenbaues beruht ja auf der »rationellen Konstruktion«, durch die er der Beanspruchung mit weitaus geringerem Materialvolumen zu genügen vermag, als alle anderen Baustoffe. Ist doch eine Eisenkonstruktion schon an sich eine besonders sinnfällige Verkörperung der im Bau wirksamen statischen Kräfte; sie steht dadurch gewissermaßen nur am Ende jenes synthetischen Weges, der die Probleme der Mechanik aus dem Bereich arithmetischer Operationen und algebraischer Formeln in die Anschauung graphischer Gebilde überträgt.

Nun aber vergegenwärtige man sich einmal, *wie* dieses Ziel des ganzen Weges, den die Empirie eröffnete, die Theorie beschritt, von der Praxis des Eisenbaues heute im Einzelfall erreicht zu werden pflegt!

Der letztere habe dabei einen ganz gewöhnlichen Nutzzweck, es handle sich um den einfachsten eisernen Dachstuhl.

Gegeben ist im Bauprogramm die zu überdeckende Grundfläche, also die Spannweite der »Dachbinder«. Deren Zahl und Gestalt ist das gesuchte »x«. Die Zahl der Dachbinder — das heißt also auch ihr Abstand — wird in einer ersten Skizze schätzungsweise bestimmt, wobei, insbesondere hinsichtlich der Druck- und Zugbeanspruchung, neben dem speziellen Zweck zunächst nur Erfahrung und

statisches Gefühl entscheiden. Ob sie dabei im vorliegenden Falle das Richtige trafen, erkennt man später aus dem Gewicht — das heißt also auch aus den Kosten — der übermittelnden Zwischenkonstruktionen (Pfetten). Man dividiert dann die pro Quadratmeter erfahrungsmäßig bekannte Gesamtlast des Daches (Winddruck und Schneelast) durch die projektierte Anzahl der Binder und erhält so die Beanspruchung, der jeder *einzelne* von ihnen ausgesetzt ist. Die weiteren Ermittlungen können sich füglich auf diesen *allein* beschränken. Sie beginnen wiederum mit einer Rechnung, die nun die Verteilung der den einzelnen Binder treffenden Last zu untersuchen hat. Dieselbe wirkt zunächst auf die »Auflager«, und es gilt deren »Reaktionen« zu prüfen. Das sind die »äußeren Kräfte« des Binders. Die folgende Hauptfrage betrifft seine »inneren«, die in den Gurten, Diagonalen und Vertikalen auftretenden »Spannungen«, die im Projekt ihrer Größe und Richtung nach als Druck oder Zugkräfte schätzungsweise angenommen sind. Dies ist der Punkt, wo heute meist die »graphische Statik« einsetzt, indem sie die in den einzelnen Teilen wirkenden Kräfte durch das »Kräftepolygon« kombiniert, ihre Größe nach einem beliebigen graphischen Kräftemaßstab (z. B. 1 cm = 100 kg) ermittelt und ihre Richtung anzeigt. Die aus dieser graphostatischen Rechnung oder durch andere Methoden — besonders auch durch das »Rittersche Schnittverfahren« — erkannte Beanspruchung jedes Binderstückes bestimmt unter Berücksichtigung des »Sicherheitskoeffizienten« die Wahl seiner Querschnitte in bezug auf die Größe, aber wiederum nur im Sinne einer theoretischen Mindestforderung. Dann erst erfolgt deren Anpassung an die Wirklichkeit: die Wahl der Querschnitte aus der Reihe der von den Walzwerken gebotenen Normalprofile, wobei neben den rechnerischen Ergebnissen nun auch die materiellen Anforderungen der Zusammensetzung, wie beispielsweise die Notwendigkeit genügend großer Flächen zum Vernieten der Laschen und ähnliches, den Ausschlag geben.

Damit wäre die konstruktive Arbeit, soweit sie Entwurf ist, an ihrem Ende angelangt, und es erübrigte nur noch, die Ausführungsbedingungen zu erwägen. In den meisten Fällen folgt diesem ganzen ersten Rechnungsgang jedoch noch ein zweiter — oder er sollte ihm wenigstens folgen —, der zu prüfen hat, ob die in jener ersten, grundlegenden Skizze willkürlich gewählten Anordnungsverhältnisse tatsächlich die zweckmäßigsten sind, oder ob etwa bei den Bindern durch Vermehrung der Streben deren Länge verkürzt und hierdurch die Querschnitte verringert werden können, und ob dies trotz der numerischen Vergrößerung eine Herabminderung des Gesamtgewichts bedeuten würde.

Bei dieser ganzen Arbeit handelt es sich lediglich um das *Notwendige* und *Zweckmäßigste*. Solche Aufgaben sind in der Bautätigkeit aller Zeiten in unzählbarer Fülle gelöst worden, noch ehe man an statisches Rechnen und an Eisenmaterial dachte. Wenn das, was früher instinktmäßig oder empirisch bestimmt wurde — noch bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts sind die konstruktiv glänzenden hölzernen Fachwerkbrücken Amerikas *ohne* genauere Berechnungen entstanden — heute rationell auf rechnerischem Wege gefunden wird, so bedeutet das auf dieser Stufe der Baukonstruktionen nur eine Systematisierung und daher Beschleunigung des verstandesmäßigen Vorgehens und meist auch eine größere Sicherung desselben gegen Irrungen, bei der selbst der nur handwerksmäßig geschulte Praktiker die höchsten Werte einer

selbständigen modernen Wissenschaft benutzt. Er verfährt dabei kaum anders als etwa der Laborant, der nach bekannten Methoden den für eine bestimmte Verwendung qualitativ und quantitativ zweckmäßigsten chemischen Stoff herstellt.

Aber selbst auf diesem unpersönlichsten Wege werden auch beim einfachsten eisernen Nutzbau, der nichts anderes sein will und ist als eine richtig berechnete, technische Leistung, in einer bisher ungewöhnlichen Art theoretische Ergebnisse in die Form und Abmessung eines neuen Baustoffes übertragen.

Sie werden zunächst ungeformt, im Sinne der Theorie vergrößert. Das Verhältnis zwischen Theorie und Wirklichkeit ist eben auch beim Eisen, dem »rationellsten« Baustoff, nicht prinzipiell anders als beim Stein und Holz, sondern nur graduell. Das Eisen kann sich in seinen Formen den Forderungen der theoretischen Statik weit mehr nähern als jene, allein sie gerade nur ganz zu erfüllen, ohne ein »Zuviel« — das Ideal der »rationalen Konstruktion« — ist auch dem Eisen nie und nirgends möglich. Ist doch schon der Grundbegriff der »kontinuierlichen Verstärkung« technisch nicht zu verwirklichen. Im Eisenbau tritt dafür das statisch rohe Aufeinanderheften der Verstärkungsbleche ein. Die Eisentechnik bemüht sich seit einem Menschenalter, der Praxis jene nach der Theorie rationellsten Normalformen zu schaffen, und von allen beteiligten Seiten arbeitet man an deren Vervollkommnung. Allein den theoretischen Ergebnissen gegenüber bleiben auch sie ihrem Wesen nach und vollends im Einzelfall nur Annäherungswerte, nur »Rohformen«. Darauf nimmt, wie wir sahen, die Rechnung selbst Rücksicht. Die theoretisch zulässige Beanspruchung wird bei ihr durch einen »Sicherheitskoeffizienten« vermindert, das heißt also, der Querschnitt vergrößert.

Doch der Unterschied zwischen Linie und Körper, zwischen Formel und Konstruktion, ist selbstverständlich. Es bleibt die Tatsache, daß beim Eisenbau die statische Rechnung im Verein mit Technik und Praxis schon bei der Gestaltung der einzelnen Konstruktionselemente — z. B. jener Normalprofile — in ganz unvergleichlich stärkerem Grade maßgebend ist, als etwa bei den Normalabmessungen der Ziegel, am Schnitt der Quadern oder selbst an dem der Balken und Bohlen. Und dieses »Rechnen« entscheidet dann vollends über die Zusammenfügung der Einzellemente, sowohl zu den Teilformen, insbesondere zum gegliederten Träger, wie zur gesamten Konstruktion. Die Zahl der neuen Formen, die auf rein rechnerischem Wege durch den Eisenbau eingeführt und bereits eingebürgert sind, ist schon jetzt beträchtlich. Am fruchtbarsten war dafür die Theorie des Brückenbaues in den fünfziger und sechziger Jahren. Damals erhielten die gegliederten Träger auf Grund der theoretisch günstigsten Verteilung von Druck und Zug und der sichersten Berechnungsmöglichkeit neue Umriss, in denen die flache Kurve herrscht (Parabel-, Halbparabel-, Linsenträger). Die Namen einzelner als Theoretiker wie als Konstrukteure gleich berühmter Bauingenieure leben in den Bezeichnungen der von ihnen ersonnenen Konstruktionsformen fort (Schwedlerträger, Pauliträger). Auch dem allgemeinen statischen Gefühl ist die Mehrzahl dieser neuen Gebilde bereits geläufig.

Eine völlig neue Grundlage für die Erziehung dieses statischen Gefühles schaffen beispielsweise die gerade durch die »statisch bestimmten Systeme« eingeführten, nur im Eisenbau möglichen Gelenkverbindungen. An Stellen, in denen der Steinbau breite massige Ansätze bietet, zeigen sie ein Anschwellen von einem nur durch ein

kleines Scharnier bezeichneten Punkt, beziehungsweise ein Abschwellen zu ihm hin. Der Träger berührt — wie Reuleaux einmal sagt — »den Boden gleichsam nur mit den Zehenspitzen«. Im Laufe der folgenden Betrachtungen werden uns verwandte Erscheinungen noch häufig begegnen.

Sie bezeugen eine Macht der Rechnung über die Bauform, die in Verbindung mit dem neuen Baustoff sehr wohl auch zu einer »objektiv« stilbildenden Kraft werden kann.

Und eine solche wohnt der Eisenarchitektur selbst da inne, wo sie lediglich oder vorzugsweise mit den schon im Stein- und insbesondere im Holzbau von jeher herrschenden Konstruktionsmitteln arbeitet oder wiederum durch das Zusammenwirken von »Rechnen« und »Bauen« in dem neuen Material neue Erfolge erzielt.

Aus der graphischen Rechnung »weiß« man, daß dieser Erfolg in einer Verringerung der Einzelvolumina zu gunsten einer Vergrößerung des räumlichen Gesamtvolumens, beziehungsweise der konstruktiven Gesamtleistung besteht. Aber das ist zunächst nur ein abstraktes Wissen, eine Funktion des Gedankens. Die beiden Hauptträger der neuen Werte — die absolute Größe und die relative Knappheit der für sie aufgewandten Mittel — stehen vorerst nur in Zahlen und geometrischen Figuren vor Augen. Der Fachmann versteht sie, er sieht auch wohl das fertige Gebilde wenigstens in seinem Zusammenhang bereits vor Augen. Das ist »innere Anschauung«, ist bildliches »Denken«<sup>1</sup>. Aber in das Rechtsgebiet des »Stiles« tritt dieses erst, sobald die Konstruktion nach Angabe jener Rechnung und Zeichnung tatsächlich ausgeführt ist, sobald sie als ein greifbares, körperliches Raumgebilde ihr wirkliches Leben beginnt. Dann erst wirkt sie auf die Sinnesorgane, welche den Begriff »Größe« als Eigenschaft eines »Bauwerkes« zu erfassen vermögen und die aufgewandten Mittel nicht nur beurteilen, sondern in der »Aisthesis« wahrnehmen. Und dann bedeuten diese eisernen Großkonstruktionen in jedem Falle nicht mehr nur ein »Rechnen«, sondern ein »Bauen«: nicht mehr die »kalte Einsicht«, die »leere Regel«, welche die Wissenschaft gibt, sondern: »begeisteten« und dadurch »überwundenen« Stoff<sup>2</sup>.

Das ist ihr *erster* Schritt zu ihrer stilbildenden Kraft — stilgeschichtlich schon ein Schritt von großer Tragweite, deren Abschätzung das folgende, den Großkonstruktionen gewidmete Buch bieten soll.

Allein dieser Schritt ist gleichsam ein unbewußter. Er geschieht mit zwingender Notwendigkeit, sobald die statische Rechnung vor eine dem Maßstab oder der Konstruktion nach ungewöhnliche Aufgabe gestellt wird, diese rationell löst, und wenn die technische Ausführung ihr nach Möglichkeit entspricht.

Selbst wenn die Arbeit dabei im wesentlichen nur den systematisch geregelten Gang macht, wie er oben skizziert wurde, bleibt der persönlichen Entscheidung an vielen Punkten ein mehr oder minder freier Spielraum. Beispielsweise ist beim Entwurf des Fachwerkträgers wohl die Anzahl der an einem Knotenpunkt zu vereinigenden Stäbe im »statisch bestimmten System« nach einer bekannten all-

<sup>1</sup> Zum Folgenden vergl. besonders: Guido Hauck: »Über innere Anschauung und bildliches Denken«. Festrede in der Aula der Königl. Technischen Hochschule gehalten am 26. Januar 1897.

<sup>2</sup> Vergl. die allgemeinen Erörterungen vom »Wesen der Baukunst« bei F. Th. Vischer. Ästhetik III. II. 1. § 553 ff.

gemeinen Formel beschränkt, aber über die Lage und Länge der Stäbe selbst enthält diese Formel nichts. Für den Anblick kann der Träger also von vornherein voller oder leerer, massiger oder leichter werden. Ebenso bei der Wahl der Querschnitte. Notwendig ist nur, daß dieser Stab für eine mindestens so und so große Druckbeanspruchung, jener für eine mindestens so und so große Zugbeanspruchung ausgebildet wird. Das »Wie« bleibt offen. Die statische Rechnung ist auch beim einfachsten Nutzbau nur ein *Weg*, der zu den rechten Mitteln führt. Diese selbst müssen unbedingt auf ihm liegen, aber — man kann sie auch *jenseits* jener Grenze suchen und finden, bei der die rechnende und konstruierende Verstandestätigkeit die Führung an die sinnliche Vorstellungskraft abgibt.

Das geschieht in dem Augenblick, wo sich die Zahlen und Linien vor der »inneren Anschauung« in das Wirklichkeitsbild des Eisengerüsts verwandeln. Dieser Moment *kann* unfruchtbar bleiben. Dann entscheiden eben Rechnung und Nutzwert allein, und es entsteht nur eine zweckmäßige Konstruktion, an der die Architektur keinen Anteil hat. Allein dieser Moment kann innerhalb der konstruktiven Zweckmäßigkeit auch unmittelbar den Übergang zum künstlerischen Schaffen bieten. Er erfolgt, sobald jenes »Wirklichkeitsbild« der inneren Anschauung in irgend einem Punkte, der nicht mehr nur der rationell notwendigen Konstruktion angehört, auf deren Mittel, das heißt also zunächst auf die Rechnung, modifizierend zurückwirkt. Schon jener Wechsel der Betrachtungsweise selbst, das Umsetzen des »Denkbildes« in das »Körperbild«, kann dies sofort veranlassen. Der Verstand allein vermag Zahlen und Linien in schier endlosem Neben- und Hintereinander mühelos aufzunehmen und am Faden der Untersuchung übersichtlich aufzureihen — vor der sinnlichen Vorstellungskraft dagegen wird dieses Neben- und Hintereinander leicht zu einem Gewirr. Und wenn dies als unerwünscht empfunden, wenn die Rechnung unter diesem Gesichtspunkt erneut wird, um die Konstruktion klarer, ruhiger, freier, zierlicher zu machen, um die Einförmigkeit rhythmisch zu unterbrechen, um zu schroffe Gegensätze auszugleichen, um das Wesentliche schärfer hervorzuheben und die Hilfsformen auch für den Anblick nur als Nebensächliches zu kennzeichnen, dann wird die »Rechnung« im Eisenbau<sup>1</sup> sogar *selbst* zur stilbildenden Kraft. Sie wird dann »elegant« im ästhetischen Sinn und nicht mehr nur in jener übertragenen Bedeutung, in der man dieses Wort wohl auch für eine rechnerische Manipulation oder für eine geometrische Konstruktion zu gebrauchen pflegt.

Solches »Rechnen« wird dann ein Disponieren von Kräften<sup>2</sup>, bei dem *nicht* mehr das zahlenmäßig und technisch »Rationelle« gesucht wird, sondern das formal günstig *Wirkende*.

Das ist allerdings noch immer nur ein bescheidener Anteil künstlerischen Bau-sinnes am Rechnen; noch hat dieses unbedingt die Führung; noch immer handelt es sich höchstens um geschickte und klare »Konstruktionen«.

<sup>1</sup> Damit sind hier selbstverständlich nicht die nur äußerlich aus Schönheitsrücksichten vorgenommenen Veränderungen gemeint, die ohne Änderung des Systems dessen konstruktiv funktionierende Teile gelegentlich betreffen. Das findet beispielsweise bei Bogenträgern statt, deren Enden oben theoretisch am besten spitz zusammentreten, während die Praxis die Obergurte in stetiger Linie fortzuführen liebt.

<sup>2</sup> Hauck vergleicht a. a. O., S. 17, die Denkarbeit des Technikers mit der des Strategen.

Aber dieser Weg führt weiter. In die rechnerisch abwägende Tätigkeit selbst kann eine dem künstlerischen Schaffen näher verwandte persönliche Kraft spontan eingreifen: das »statische Gefühl« des genialen Konstrukteurs, das dem Rechnen *vorausseilt*, das dieses nur in seinen Dienst nimmt. Dann fällt der »Rechnung« nur noch die Rolle eines Regulatives zu: sie hat das gefühlsmäßig erkannte Resultat nachträglich nur zu bestätigen. Wo *diese* Schaffensart herrscht, da ist die innere Vorstellungskraft von vornherein rege. Das »visionäre« Denken des *Genies* ist im wesentlichen immer ein »bildliches«. Und dann pflegt es auch als formal glückliche Gestaltungskraft zu wirken. Hat man doch selbst auf eine Maschinenzeichnung das Zolasche Wort angewendet: »Sie muß ein *reales Etwas* sein, angesehen und wiedergegeben durch ein *Temperament*«. <sup>1</sup> Aber auch umgekehrt empfinden gerade die phantasievollsten Künstler immer von neuem die innere persönliche Gesetzmäßigkeit ihres Schaffens als allgemein gültiges Gesetz, wie Gabriele Rosetti, der englische Präraffaelit, alles Ernstes behauptete, er male nach »ungeschriebenen Regeln«, die er jeden so folgerichtig lehren könne, wie etwa — Arithmetik. Freilich: »von der Freiheit oder Unfreiheit, in der die Phantasie des Künstlers bei der Malerei und Plastik schaltet, bleibt die des Technikers grundverschieden, und auch innerhalb des baukünstlerischen Schaffens behält seine »Denkarbeit«, soweit sie der Statik gewidmet ist, beim Eisenbau *stets* eine ganz andere Machtstellung als beim Stein-, Ziegel- und Holzbau. Für die Mauer-, Widerlager- und Gewölbestärken, für die hölzernen Hänge- und Sprengwerke sind die Verhältnismaße tabellarisch festgelegt. Ihre Kenntnis gehört zum ABC der Baukonstruktionslehre. Dem Architekten müssen sie in Fleisch und Blut übergegangen sein. Bei dem Entwurf sind sie nicht das gesuchte X, sondern selbsterklärende Voraussetzung, deren Kontrolle sogar Hilfskräften überlassen bleiben kann. Wenn der Architekt seinen Grundriß und Aufriß gestaltet, so denkt *er* dabei überhaupt nicht an Geometrie und Zahlen, sondern er gruppiert Räume, er schaltet mit Baumassen, er läßt deren Größe und Verhältnisse aus ihren Grenzflächen sprechen. Die »Linie« ist *ihm* dabei nicht ein statisches Maß, sondern eine statische Kraft und ein wirksamer Umriß; die »Zahl« kennt *er* höchstens als Ausdruck bezeichnender und wohlgefälliger Proportionen. *Seine* Arbeit ist stets *Raum-Kunst*.

Beim Eisenbau dagegen, wo auch das »statische Gefühl« höchstens mit den Linien eines Eisengerüstes »bauen« kann, wo die statische Rechnung schon am Anfang der entwerfenden Tätigkeit steht und der Ausarbeitung des Projektes auf dem ganzen weiten Wege bald zur Seite, bald voranschreitet, bald nachfolgt, wo das »bildliche« Denken beständig durch das »abstrakte« kontrolliert wird, spielt die wissenschaftliche Methode als solche eine ungleich wichtigere Rolle. Sie bannt den Entwurf in feste, engere Grenzen; sie stellt ihm seine Lebensbedingungen in Form von Zahlen und Figuren fort und fort vor Augen, für jedes Glied des Baues, auch für das kleinste, und ebenso für den Gesamtorganismus. Ihre Ergebnisse sind zuverlässig und unabänderlich; den Flug der gestaltenden Phantasie sichern sie, aber sie hemmen ihn auch.

Das sind die neuen Bedingungen, die das »Rechnen« für das »Bauen« im »neuen Stoff« geschaffen hat.

<sup>1</sup> Hauck a. a. O.

Die »Baukunst« also, die auf diesem Wege entsteht, wird nie und nimmer die monumentale Steinarchitektur etwa verdrängen und ersetzen können, wie einige allzu feurige Propheten des Eisenbaues verkünden. Ebenso wenig jedoch ist es berechtigt, dem Eisenbau einen maßgebenden Einfluß auf die »Architektur« der Zukunft abzusprechen, weil er nur »konstruiert« und auf »Rechnung« beruht. Die »Rechnung« ist notwendig, aber sie kann sich dem »Formenwillen« gesellen, sich ihm zur Verfügung stellen und dann die Schöpfung eines Bauwerks von künstlerischer Eigenart nicht nur begleiten, sondern fördern. Für diese stilbildende Kraft wird es gleichgültig, ob »Rechnen« und »Bauen« dabei in einer einzigen Persönlichkeit vereint sind oder nicht. Unter den bis jetzt vorhandenen künstlerischen Eisenbauten sind sowohl solche, die lediglich vom »Bauingenieur« entworfen und ausgeführt wurden, wie solche, bei denen er mit dem Architekten gemeinsam arbeitete.

Daß dies eine große Bereicherung der architektonischen Mittel bedeuten kann, ist schon jetzt zweifellos. Vor allem zeigen es die Kuppelräume einer schon stattlichen Reihe von monumentalen Steinbauten. Und gerade dabei sprechen die Fortschritte der Graphostatik wesentlich mit, die im letzten Jahrzehnt insbesondere die »Raumfachwerke«, die Kuppel-, Zelt- und Walmdächer, sowie die Flechtwerksgebilde zum Gegenstand ihrer Untersuchung gemacht hat. Derselben Gattung von Raumgebilden gehören aber auch bereits einige der künstlerisch bedeutendsten reinen Eisenbauten an, deren Meister sich nur »Bauingenieure« nannten: sie waren eben zugleich auch Künstler.

So hängt das Verhältnis des »Rechnens« zum »Bauen«, soweit dieses eine »Kunst« ist, schließlich also doch immer nur von der *persönlichen* Kraft, vom Wollen und »Können« des Meisters ab. Ohne Rechnen kann keine zuverlässige Eisenkonstruktion entstehen, durch Rechnung allein kein Kunstwerk.

Die Baukunst sucht in der statischen Wissenschaft eine kräftige, willige Gehilfin, die statische Wissenschaft strebt danach, für jede Aufgabe eine sichere Lösung bereitzustellen. Ihre allgemeine Tendenz, die im letzten Jahrzehnt darauf hingeht, vor allem »statisch klare« Systeme zu schaffen, kommt dem ästhetischen Bedürfnis nach wenigen entscheidenden, übersichtlichen Hauptlinien entgegen. Und so mögen wir in doppeltem Vertrauen zur Macht unserer Kunst und unserer Wissenschaft an kommende Zeiten glauben, in denen die Eisenarchitektur mit den Resultaten der statischen Rechnung nicht anders schalten wird, als heute die Steinarchitektur mit den Ergebnissen der empirischen und rationalen Gewölbelehre<sup>1</sup>. Vielleicht daß einst im Anschluß an den berühmten Ausspruch Robert Mayers über die »organische Natur« und die »lebende Welt« auch das Endurteil über das Verhältnis zwischen »Rechnen« und »Bauen« lauten darf: dort die Notwendigkeit — hier die Freiheit, dort das Gesetz — hier die Schönheit, und als Grenzmarke zwischen beiden: die Zahl. In der statischen Wissenschaft ist sie alles, bei der Konstruktion vieles, in der Bau-Kunst — auch in der des Eisens, soweit sie dort nicht Proportionen ausspricht — ist sie »nichts«. —

<sup>1</sup> Auch in der Steinarchitektur werden übrigens größere Konstruktionen, insbesondere Gewölbe, heute statisch berechnet.

