

Zeitschrift: Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Stiftung der Georg Fischer AG
Herausgeber: Eisenbibliothek
Band: 79 (2007)

Artikel: Bauen mit gewalztem Schweisseisen und Stahl : Stangen, Profile, Bleche und Draht
Autor: Mende, Michael
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-378429>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

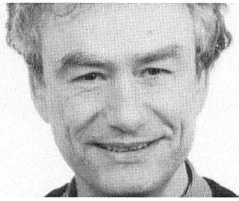
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées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

Terms of use

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

Download PDF: 30.06.2025

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



Bauen mit gewalztem Schweisseisen und Stahl: Stangen, Profile, Bleche und Draht

Prof. Dr. Michael Mende

1945 in Schleswig geboren.
1978 Promotion zum Dr. phil.
an der TU Berlin. Professor
für Architektur- und Design-
geschichte an der Hochschule
für Bildende Künste in Braun-
schweig. Forschungen und
Veröffentlichungen zur Industrie-
archäologie und Technik-
geschichte insbesondere des
Eisenhüttenwesens, Maschinen-
baus, Bauwesens und der Textil-
industrie Nordwestdeutschlands.



Eiserne Brücke über den Georgskanal im Wörlitzer Park, 1791.

Trotz der bereits 1791 fast nur aus Stabeisen gebauten Eisernen Brücke des Wörlitzer Parks oder des sogar einige Jahre zuvor für das Théâtre Français in Paris errichteten schmiedeeisernen Dachstuhls setzte das «eiserne Zeitalter des Bauwesens» eigentlich erst dann ein, als geeignete Profile wie vor allem der Doppel-T-Träger in genügender Menge und Genauigkeit gewalzt zu werden vermochten. Zwar wurden Mauerwerk oder hölzerne Deckenbalken spätestens seit dem Mittelalter gelegentlich mit Schmiedeeisen verstärkt, doch blieb es als Teil wenig dekorativer und zudem gegen Witterungseinflüsse vor dem Rost zu schützender Hilfskonstruktionen in solchen Fällen meist dem Blick verborgen. Hatte der Übergang zum indirekten Verfahren mit Hochofen und Frischherd noch vor Beginn der Frühen Neuzeit für ein größeres Angebot an Schmiedeeisen gesorgt, so ebnete ihm der Übergang zum Puddeln und Walzen von Profilen seit Beginn des 19. Jahrhunderts spürbar den Weg auf die Baustellen, ehe schliesslich etwa sechs Jahrzehnte später die Verfahren der Massenstahlerzeugung und des Walzens von Breitflanschträgern das Tor zum Stahlhochbau im heutigen Verständnis aufstossen sollten.

Despite the fact that the Iron Bridge in Wörlitzer Park was built nearly entirely of bar iron in 1791 or that even a few years prior a wrought iron roof truss was erected for the Théâtre Français in Paris, the “era of iron construction” only truly became popular when suitable profiles, such as the double T-beam, could be rolled with adequate precision and in sufficient quantity. Although wrought iron was occasionally used to reinforce masonry or wooden ceiling joists since the Middle Ages, it remained largely hidden from sight as an element with little ornamental value and as an auxiliary construction that required protection from rust and the effects of weather. And whilst the transition to indirect processes with blast and charcoal furnaces provided for a larger offering of wrought iron before the early modern period, the transition to profile puddling and rolling at the beginning of the 19th century clearly paved the way to construction sites, before finally about six decades later the mass production of steel and the rolling of broad flanged beams opened the doors for steel framed superstructures as we know them today.

Gewalzte Profile an Stelle geschmiedeter Stäbe und Flacheisen

Legt man die Produktionsergebnisse der deutschen Stahlindustrie von 1928 zugrunde, als der Stahlhochbau, das heisst über den Bau von Brücken und Hallen hinaus auch der Bau von selbsttragenden Stahlskeletten für Warenhäuser, Bürohochhäuser und Wohnblöcke einem ersten Höhepunkt zustrebte, so wurden von den damals insgesamt 14,4 Mio. t Rohstahl, die zu 55,5 % nach dem Siemens-Mar-

tin-Verfahren und zu 42,3% nach dem Thomasverfahren gewonnen worden waren, nahezu vier Fünftel oder knapp 12 Mio. t in Walzwerkerzeugnisse aller Art verwandelt. Von dieser Menge entfielen wiederum 1,24 Mio. t auf Schienen, 1,02 Mio. t auf Träger, 3,1 Mio. t auf Stabstahl, 1,6 Mio. t auf Grobbleche mit Stärken von mehr als 4,76 mm, und 1,15 Mio. t auf Walzdraht.¹ Seit 1925 hatte bis dahin insbesondere die Produktion von Profilträgern aller Art mehr als die aller anderen Walzwerkerzeugnisse zugenommen. Zwar war sie gegenüber 1927 um gut 7% zurückgegangen, doch liess sie mit einer Steigerungsrate von immerhin 74% im Jahre 1928 die Ergebnisse von Walzdraht mit sieben oder Grobblech mit sechs Prozent Zuwachs dennoch weit hinter sich.² In der beachtlichen Zuwachsrate der Produktion gewalzter Profilträger spiegelte sich somit zugleich der Bedeutungsgewinn, den der Stahlbau als deren wichtigster Abnehmer in dieser Zeit gegenüber dem Stahlbetonbau zu erringen vermochte, der selbst wiederum einen Grossteil des Walzdrahts und auch des Stabstahls verbrauchte. Am Ende des Jahrhunderts sollten von den inzwischen gut 200 Mio. t Rohstahl, die in den damals fünfzehn Ländern der Europäischen Union erzeugt wurden, jeweils etwa ein Zwölftel zu schweren und ein gutes Zehntel zu leichten Trägern sowie etwas mehr als ein weiteres Zehntel zu Betonstahl ausgewalzt werden.³

Die Idee, «im Hochbau wegen der gesteigerten Holzpreise» statt der bis dahin üblichen Holzbalken gewalzte Doppel-T-Eisen für Dachstühle und die Decken von öffentlichen Gebäuden, grossen Wohn- oder Geschäftshäusern zu verwenden, war ebenso wie die, Zement mit Drahtgittern zu bewehren, erstmals gut anderthalb Jahrhunderte zuvor in Frankreich gefasst und in die Tat umgesetzt worden.⁴ Mehr noch als die Verbindung von Schmiede- oder Schweisseisendraht mit Zement zum Eisenbeton sollte vorerst die «Einführung des Doppel-T-Eisens ... recht eigentlich erst das eiserne Zeitalter des Bauwesens»⁵ eröffnen.

Neuartig war kurz vor Mitte des 19. Jahrhunderts allerdings lediglich das Verfahren, auf einem Universalgerüst mit jeweils einem Paar horizontaler Kaliberwalzen und glatter, vertikal umlaufender Walzen ein I-förmiges Profil mit einem Steg zwischen den beiden entweder als Ober- oder aber Untergurt wirkenden Flanschen hervorzubringen. Bei verhältnismässig geringer Masse sorgte dieses Profil für eine beachtliche Biegesteifigkeit des schweisseisernen Balkens. Während vom oberen Flansch die aus der Auflast resultierenden Druckkräfte aufzunehmen waren, hatte der untere Flansch den dabei zugleich auftretenden Zugkräften zu widerstehen. Dass «die Fasern der unteren Fläche dem Zerreißen, dagegen die der oberen, auf welche die Last unmittelbar drückt, dem Zerdrücken ausgesetzt sind»⁶, gilt unabhängig von seinem jeweiligen Material indes für jeden Balken, der an beiden Enden aufliegt. Zeichnete sich das Schmiedeeisen als Baustoff gegenüber dem Gusseisen bereits durch seine allgemein

höhere absolute Festigkeit gegen Zerreißen aus, während die Biegesteifigkeit des Gusseisens wiederum vornehmlich auf dessen rückwirkender Festigkeit gegen Zerdrücken beruht, so verhalf nun das symmetrisch ausgebildete Doppel-T oder I-Profil dem gewalzten Träger mit seinen beiden gleich breiten und ebenfalls gleich starken Flanschen sowie seinem überall gleich starken Steg ausserdem zu erhöhter Steifigkeit gegen ein seitliches Ausbiegen oder Verdrehen.

Die gegenüber jeder Art von Holz und Stein sowie Gusseisen und Beton deutlich höhere Reiss- oder Zugfestigkeit des schmiedbaren Eisens hatte es zuweilen bereits seit der Antike als Hilfsmittel empfohlen, um die im Mauerwerk von Bögen und Kuppeln zwangsläufig auftretenden Schubkräfte abzufangen, ausschliesslich in Druckkräfte umzuwandeln und senkrecht in das Fundament umzulenken. Auf diese Weise liess sich die dem Seitenschub innewohnende Gefahr der Rissbildung mit eventuell sogar folgendem Einsturz abwenden. Je mehr mit der Spannweite von Bögen und Kuppeln auch der Schub zunahm, über den die Masse ihres Mauerwerks die sie jeweils stützenden Pfeiler oder Wände tendenziell zur Seite drückte, desto dringlicher wurde die Notwendigkeit, ihn zu neutralisieren. Mit wachsender Höhe der stützenden Pfeiler oder Wände nahm zugleich die Dringlichkeit zu, den Schubkräften entweder durch verstärktes Stützmauerwerk, leichteres Material für Bögen und Kuppeln oder aber eben schmiedeeiserne Zugelemente begegnen zu müssen.

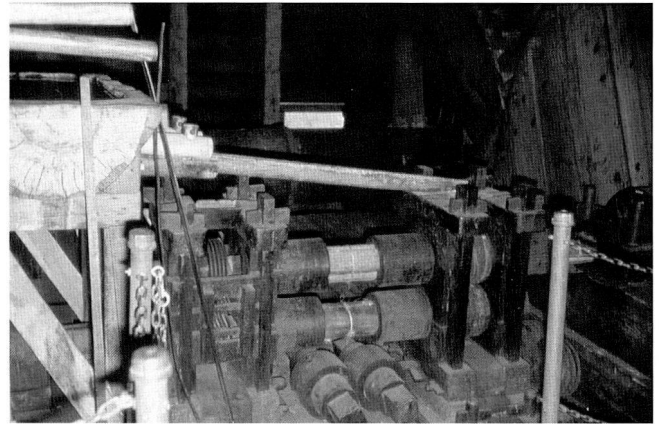
In der Antike waren es zunächst nur mit dem Handhammer geschmiedete Klammern, die deren Aufgabe erfüllten, indem sie einzelne Steinblöcke des schweren, weil nahezu ausschliesslich auf Druckbelastung ausgelegten Mauerwerks miteinander verbanden. Hingegen erhielt bereits das Oktogon der 805 geweihten karolingischen Pfalzkapelle in Aachen eine aus Vierkantstäben gebildete Kette umgelegt, die als Ringanker den Schub seiner massiv gemauerten Kuppelschale neutralisierte.⁷ Gegen Ende des 17. Jahrhunderts nutzte Christopher Wren dieses Mittel, um den Schub seiner immerhin gut 30m weiten, dreifachen Kuppel über der Vierung von St. Paul's in London im Übergang ihres mittleren, aus Backsteinen 30m hoch gemauerten Konus in die innere Gewölbeschale abzufangen. Dadurch vermochte er die tragenden, fast 14m hohen Säulen zu entlasten und so schlank zu halten, wie es die Proportionslehre für die korinthische Ordnung vorsah. In vergleichbarer Weise sicherte auch Ernst George Sonnin 1778 noch nachträglich das gotische Langhaus der Petrikirche in Buxtehude mit einer insgesamt 77m langen Kette aus «gut Eisen, ...durchgehends weich geschmiedet und in den Gelenken wohl geschweißet»⁸, die er auf dem Wasserhammer des Hamburger Eisenfabrikanten Wuppermann herstellen liess. Zusammen mit mehreren, jeweils acht Meter langen hölzernen Quersteifen erlaubte sie es ihm schliesslich, auf die sonst unerlässlichen äusseren Verstärkungspfeiler zu verzichten.



Loggia des Palazzo della Ragione in Padua, um 1430.

Um die Schildbögen der einzelnen Gewölbejoche in der Pariser Sainte Chapelle möglichst leicht belassen zu können, wurden ihnen zu diesem Zweck gegen Mitte des 13. Jahrhunderts beidseitig dem Krümmungsverlauf folgende Flacheisen angelegt, deren versteifende Wirkung man wiederum dadurch verstärkte, dass sie jeweils wie die beiden Holme einer Leiter mit kurzen und die Keilsteine quer durchdringenden Rundeisen verband.⁹ Diese Konstruktion behielt zwar Seltenheitswert, doch blieben schmiedeeiserne Hilfskonstruktionen gerade für das leichte und zuweilen sogar auf eine Art Skelett reduzierte Mauerwerk der auf innere Lichtfülle angelegten Gebäude der Gotik nahezu unumgänglich. In der Regel behalf man sich wie etwa bei den um 1430 von Fra' Giovanni dem fast einhundert Meter langen Palazzo della Ragione in Padua vorgesetzten Loggien mit den in Längs- und Querrichtung eingelegten Gebindeankern. Die dazu verwendeten Vierkantstäbe mit ihren Lagen um die vier Meter dürften aus den Alpentälern oberhalb von Brescia, Bergamo oder aber auch Kärntens, als den damals erstrangigen Bezugsquellen Venedigs, einbaufertig geliefert worden sein.¹⁰ Brescia war zusammen mit Lecco am Comer See im letzten Drittel des 14. Jahrhunderts auch der Ursprung umfangreicher Eisenlieferungen zum Bau des Mailänder Doms,¹¹ während die insgesamt vier Tonnen besonders zähen Eisens, die Mitte des 13. Jahrhunderts auf die Baustelle der Westminster Abbey gebracht worden waren, aus dem damals führenden Revier des Forest of Dean im heutigen Gloucestershire stammten.¹² Zu Vierkantstäben gereckt, diente es im Langhaus wie im seitlichen Kapitelhaus als Zuganker dazu, dem Gewölbeschub entgegenzuwirken, sowie in der Form von Flacheisen dazu, die grossen Fensterflächen gegen Winddruck zu sichern und dennoch den filigranen Charakter ihres steinernen Masswerks zu bewahren.

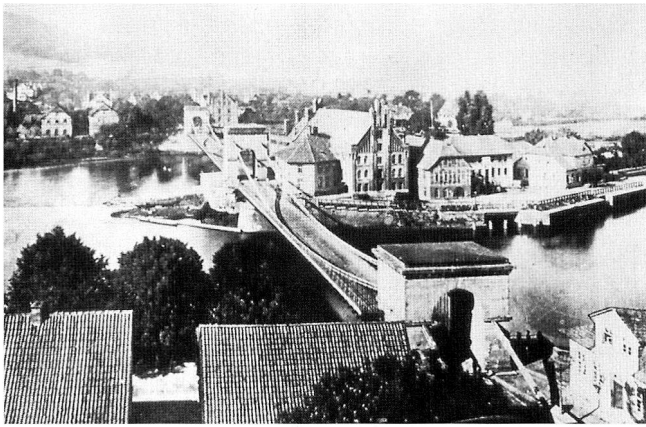
Wenngleich Eisen in Anbetracht der bei solchen Bauwerken vermauerten Mengen an Steinen oder Ziegeln eine eher



Walz- und Schneidewerk der Saugus Ironworks, etwa 1790 (erstmalig um 1650).

vernachlässigenswerte Grösse zu sein schien, blieb es in konstruktiver Hinsicht dennoch unentbehrlich, sollten die Wände dieser ebenso weitgespannten wie hoch aufragenden Raumgebilde leicht und lichtdurchlässig bleiben. Deren gewölbte Decken sollten zu schweben scheinen und der dadurch vermittelte Eindruck des nahezu Überirdischen daher keinesfalls durch den Anblick derber Anker oder Fensterbänder gestört werden. Vielmehr durften sie in ihrer Stofflichkeit ebenso wenig hervortreten wie das tragende Mauerwerk. Je feingliedriger sie dazu unter dem Hammer gereckt werden mussten, desto reiner und homogener hatte jedes Mal das Ausgangsmaterial auszufallen, von dessen Festigkeit, Zähigkeit und Elastizität letztlich ihre Zuverlässigkeit abhing.

Für Bauvorhaben, bei denen es auf die Verfügbarkeit solch hochgradig beanspruchbarer Anker ankam, wurde daher bereits frühzeitig auch auf Lieferanten zurückgegriffen, die sich auf die Herstellung von Stabeisensorten mit den gewünschten Eigenschaften spezialisiert und entsprechend bewährt hatten. Je höher dabei die Ansprüche lagen, desto weniger fielen Entfernungen und mit ihnen der zu erwartende Tarnsportaufwand ins Gewicht. So deckte Brügge seinen diesbezüglichen Bedarf seit dem Ende des 12. Jahrhunderts vor allem im Baskenland. Seit Beginn des 13. Jahrhunderts kamen der Forest of Dean, das Bergische und das Sauerland sowie nicht zuletzt das Weserbergland mit Lieferungen über Bremen hinzu. Spanien blieb allerdings wegen der besonderen Qualität seines Stabeisens Flanderns vorrangige Bezugsquelle. Importe aus Schweden, die zunächst über das unweit von Brügge gelegene Damme erfolgten, gewannen erst im Laufe des 16. Jahrhunderts eine gewisse Bedeutung. Gemessen am Umfang der Lieferungen, hatte sich unterdessen jedoch das Maastal von Lüttich und Namur mit seinen um 1600 nahezu sechzig Hochöfen und entsprechend vielen Frischhütten zum dominierenden Lieferanten entwickelt. Hier fand die Stabeisenproduktion zudem



Kettenbrücke über die Weser in Hameln, 1836–39.

schon zu dieser Zeit nicht allein in Wasserhämmern statt, sondern mitunter bereits in den kombinierten Walz- und Schneidwerken der effizienteren *Fenderien*.¹³ Wie beispielsweise ab Mitte des 17. Jahrhunderts bei den Saugus Iron-works in Massachusetts, wurden hier die auf dem Frischherd bereiteten Luppen unter dem Hammer zunächst zu etwa 7,5 cm breiten wie hohen und um die 30 cm langen Blöcken ausgeschmiedet, dann zu Flacheisen gleicher Breite, jedoch vierfacher Länge ausgewalzt, um ihrerseits schliesslich in mehrere dünne Stäbe geschnitten zu werden. Dazu griffen in der Regel bis zu dreizehn Scheiben mit rechtwinkligen Schneidkanten und Durchmessern von ungefähr 30 cm ineinander. Wie die beiden glatten und noch recht schmalen Walzen waren sie paarweise übereinander als Duo angeordnet. Die Wellen der Schneidscheiben und Walzen lagerten zwar in jeweils einem eigenen Gestell, blieben jedoch zum Antrieb über das gemeinsame Wasserrad miteinander zu einer Einheit gekuppelt.¹⁴

Die Walz- und Schneidwerke stellten eine zeitgemässe Antwort auf die zunehmende Eisenerzeugung wie auf den nicht weniger wachsenden Bedarf dar. Brachte ein direkt reduzierendes Rennfeuer jeweils nur eine sogleich schmiedbare Luppe von etwa 75 kg hervor, so vermochte ein Stückofen um die Mitte des 15. Jahrhunderts immerhin schon auf eine halbe Tonne je Durchgang zu kommen, die dann nach und nach unter dem Wasserhammer zu Stabeisen zu verarbeiten war.¹⁵ Im 18. Jahrhundert liessen sich auf diese Weise durchschnittlich fünf Tonnen in der Woche recken, während nicht nur schwedische Walz- und Schneidwerke wöchentlich 10 t Schmiedeeisen in bis zu 2,5 m lange und 10 bis 15 mm starke Stäbe verwandeln konnten.¹⁶ Diese dienten ihrerseits in erster Linie als Vormaterial für die Herstellung von Nägeln jeder Art und Grösse, daneben aber auch dazu, gebündelt erneut dem Schweissfeuer übergeben und anschliessend unter dem Wasserhammer zu Zugstangen besonderer Güte

und Bruchfestigkeit verarbeitet zu werden. In Lüttich und Namur standen dazu bereits am Ende des 16. Jahrhunderts jeweils vier Walz- und Schneidwerke zur Verfügung, an denen mit 25 Kaufleuten zunächst vor allem der Antwerpener Eisenhandel finanziell beteiligt war und deren Ausstoss sich dann bald auch der Marke von jährlich 1000 t näherte.¹⁷

Bereits kurz nach 1600 fanden solche Walz- und Schneidwerke auch in Deutschland, England und Frankreich Verbreitung. Obwohl die Eisenspalterei von Neustadt bei Eberswalde, die 1683 ihren Betrieb aufnahm, keineswegs die erste ihrer Art in Deutschland war, sondern schon zu Beginn des Jahrhunderts einen Vorgänger in der Nähe von Giessen gehabt hatte, sollte die Zahl solcher Walz- und Schneidwerke bis 1800 dennoch auf lediglich ein knappes Dutzend beschränkt bleiben.¹⁸ Bis zu dem um die Mitte der 1820er Jahre auch hier erfolgenden gemeinsamen Übergang zum Puddeln oder Frischen des Roheisens mit Steinkohlen in Flammöfen und zur anschliessenden Produktion von Stabeisen allein mittels jeweils entsprechend kalibrierter Walzen sollte sich daran wenig ändern. So entstanden die weitgehend aus Stabeisen gefertigten Teile der *Eisernen Brücke*, die 1791 nach dem Vorbild der gusseisernen *Ironbridge* über den 7,5 m breiten Georgskanal des Wörlitzer Parks geschlagen wurde und damit überhaupt das erste deutsche Beispiel eines sichtbar ganz aus Eisen errichteten Bauwerks darstellte, noch unter dem Wasserhammer der im Harz gelegenen Hütte von Mägdesprung. Auch die in sehr viel grösserer Zahl benötigten Meridiansparren, Pfettenringe und Spannglieder der 1822 von Georg Moller für die östliche Vierung des Mainzer Doms entworfenen Kuppel oder die mehr als tausend schmiedeeisernen Teile der 1838 nach dem Entwurf von Georg Wendelstadt vollendeten Hamelner Kettenbrücke über die beiden jeweils etwa 60 m breiten Arme der Weser entstanden noch auf dieselbe Weise. Ausschliesslich auf einem Walzwerk wurden hingegen erst 1842 die Glieder für die daraufhin 1839 ebenfalls bei ihm bestellte Kettenbrücke über den Neckar in Mannheim vorgefertigt.¹⁹ Den Auftrag dazu sollte nicht von ungefähr die bei Neuwied gelegene Rasselsteiner Hütte erhalten, die als erstes deutsches Werk 1824 anstelle der traditionellen wallonischen und deutschen Herdfrischerei das Puddelverfahren eingeführt und 1830 erstmals auch Winkelprofile gewalzt hatte.²⁰

Vorsprung der Baukonstruktionen gegenüber den Walzverfahren

Während die Sollinger Hütte im hannoverschen Uslar sich erst 1838, nachdem sie ihre Erfahrungen mit der allzu umständlichen und entsprechend langwierigen Herstellung der schmiedeeisernen Glieder für ihre Hamelner Kettenbrücke hatte machen müssen, dazu entschliessen konnte, sich zusammen mit einem Puddelofen auch ein Stabeisenwalz-



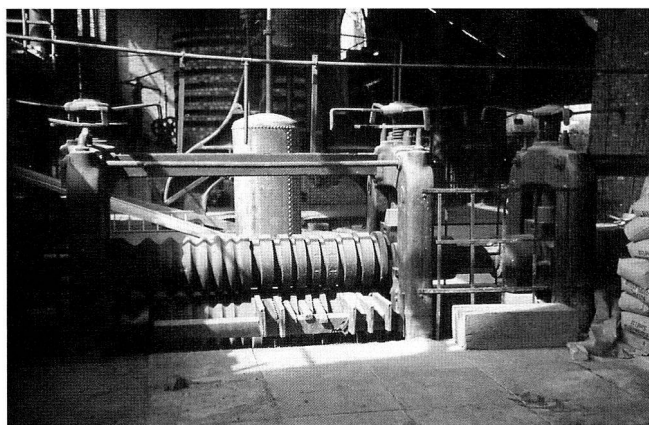
Gusseiserner Lagerblock der Budapester Kettenbrücke mit zwei gewalzten Gliedern der Tragkette, Anfang der 1840er Jahre.

werk zuzulegen und dem seit 1832 betriebenen Walz- und Schneidwerk zur Seite zu stellen, waren solche Aufträge in Grossbritannien schon seit zwei Jahrzehnten nach dessen Patent in Samuel Browns *Kettenfabrik* von Newbridge bei Cardiff erledigt worden. Während in Uslar noch den insgesamt gut 2200 Flacheisen für die Glieder der Spann- und Tragketten die Augen unter dem Wasserhammer im Gesenk angeschweisst werden mussten, stand Brown hierzu ein dazu besonders kalibriertes Walzwerk zur Verfügung, auf dem dann unter anderem auch die Glieder der seit 1835 im Bau befindlichen Budapester Kettenbrücke gefertigt wurden.²¹

Kaliberwalzwerke waren seit den 1760er Jahren in England aus dem dort seit der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts bekannten Schneidwerk entwickelt worden. So erhielten John Purnell 1766 und Richard Ford 1769 je ein Patent für ihr Walzwerk zur Herstellung von Rundstäben, aus denen dann vor allem Bolzen gefertigt wurden. Purnell versah zu diesem Zweck die glatten Stirnseiten seiner Schneidscheiben mit halbkreisförmigen Rillen. Er und seine Nachfolger, wie zum Beispiel ab 1777 ein gewisser Fleur

in Besançon, gingen indes bald dazu über, glatte Walzen mit den entsprechend geformten Rillen zu versehen, die dann als Kaliber in ihre Oberfläche eingeschliffen wurden. Schliesslich erhielt William Purnell 1787 ein Patent «auf das Herstellen, Zängen und Schweissen von Eisen mit Steinkohlen ... (und) mittels einer Maschine.»²² Diese Kombination des Puddelns oder Frischens unter der Flamme eines Steinkohlenfeuers auf dem überwölbten Herd eines Flammofens und anschliessender Formgebung zwischen Kaliberwalzen hatte sich 1782 und dann nochmals zwei Jahre später allerdings auch Henry Cort schon patentieren lassen. «Ehe man es zusammenbindet, kann man gröberes Eisen mit dem Schrott» ungereinigt zu Paketen bündeln, «welche man an einem Ende zulaufen ..., um die Operation zu erleichtern, durch Walzen eines gewöhnlichen Walz- und Schneidewerks durch passieren lässt, wodurch die Schlacken ausgepresst und das Metall in einen sehnigen, zähen Zustand übergeführt wird, wobei das Schmieden unter dem Hammer fortfällt. Platten, Stäbe, Bolzen, Flacheisen, Reifeisen usw. können mittels flachen oder gefurchten Walzen nach Bedürfnis oder durch Spalten, wenn erforderlich hergestellt werden.»²³

Cort wie Purnell hatten indes offenkundig nur eine Entwicklung zum vorläufigen Abschluss gebracht, die bereits in den Jahrzehnten zuvor angebahnt worden war. Sowohl das Verschweissen von Schrott im steinkohlengefeuerten Flammofen als auch das anschliessende Strecken zu Nageleisen oder Bändern zu Beschlägen aller Art gehörte ebenso wie das Walzen von Blech spätestens zur Mitte des 18. Jahrhundert vielerorts zum Allgemeingut.²⁴ Die Einführung des Cortschen Flammofenfrischens oder Puddelns zusammen mit dem überdies durch eine Dampfmaschine Wattscher Bauart angetriebenen Walzwerk vermochte bald jedoch die Stabeisenproduktion in England und Wales beträchtlich auszuweiten. Wurde für die herkömmlichen Walz- und Schneidwerke, die nun nur noch für Vierkantstäbe mit Stärken von weniger als 22 mm herangezogen wurden, durchschnittlich nur eine Produktionsleistung von einer Tonne in zwölf Stunden angesetzt, so kamen die seit 1788 auch dampfgetriebenen Walzwerke in derselben Zeit bis zum Ende des Jahrhunderts auf 15 t grobes und immerhin noch 5 t feines Stabeisen.²⁵ Roh vorgeschmiedete oder auf etwa einen halben Meter Länge vorgewalzte Kolben von etwa 25 kg Gewicht wurden insgesamt siebenmal zunächst durch die Grobwalzen und dann die Streck- und Fertigwalzen geschickt, um zuletzt eine Länge von dreieinhalb Metern zu erreichen. Die britische Stabeisenproduktion, die nun mehr und mehr von den Midlands nach Südwales verlagert wurde und 1788 erst ungefähr 33 000 t ausgemacht hatte, sollte bereits 1791 auf 50 000 t und bis 1812 auf 250 000 t gesteigert werden, von denen wiederum allein 150 000 t aus den neuen Walzwerken mit Einzelkapazitäten von jährlich 5 bis 15 000 t hervorgegangen waren.²⁶



Stabeisen-Walzwerk in Blists Hill, Coalbrookdale (Shropshire), Ende der 1830er Jahre.

Seitdem das Puddelverfahren ab 1816 nochmals beschleunigt werden konnte, indem nun Frischschlacken und Zunder zugegeben wurde und damit in kürzester Zeit mehr Sauerstoff zur Entkohlung des eingesetzten Roheisens und Gussschrotts zur Verfügung stand als lediglich mit der in den Flammofen eingezogenen Luft, stieg die Ofenleistung schnell auf durchschnittlich 1,5 t je Zwölfstundentag und die britische Schweisseisenproduktion bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts auf knapp 1,3 Millionen Tonnen.²⁷ Der grösste Teil davon wurde allerdings zu Eisenbahnschienen verarbeitet. Auf gewalzte Kesselbleche, die zusammen mit Winkelprofilen auch zu Blechträgern vernietet wurden, oder T-Eisen für Dachsparren, Decksbalken oder zur Verstärkung von Dampfkesseln entfiel hingegen vorerst noch ein deutlich geringerer Anteil. Für Balken von Gebäudedecken wurden noch über die Jahrhundertmitte hinaus entweder Gusseisen, abgelegte Eisenbahnschienen oder gelegentlich auch noch Façoneisen zur Unterspannung von Holzbalken bevorzugt. In jedem Fall jedoch bestand der «Hauptpunkt» bei der Vorbereitung des Walzens weiterhin «zuvörderst in der zweckmässigen Packetbildung, um Eisensorten mit einander in Berührung zu bringen, die gut miteinander schweissen.»²⁸ Dazu wurden je nach späterem Verwendungszweck 24 ausgesuchte Flacheisen zu einem Paket von etwa 21 cm Breite, knapp 10 cm Höhe und 25 cm Kantenlänge zusammengelegt und, wie beispielsweise im 1837 in Betrieb genommenen Puddel- und Walzwerk von Blists Hill bei Coalbrookdale im südwestenglischen Severntal, in zwei Hitzten unter dem Dampfhammer verschweisst, dann in einem Durchgang oder Stich auf einen 5 cm starken Vierkantstab vorgewalzt und schliesslich nach zwei weiteren Stichen das gewünschte, etwa 4,5 bis 6 m lange Profil fertig hervorgebracht.²⁹

Der Übertragung des Walzens von Blechen und Profilen auf den Kontinent stand bis in die ersten Jahrzehnte des 19. Jahrhunderts gleichermassen die Unkenntnis der

Paketierung und vielleicht mehr noch die des Giessens und Abdrehs der Walzen im Wege.³⁰ Je stärker die Produktion ausgeweitet wurde, desto häufiger mussten die Walzen ausgewechselt und nachgedreht werden, wollte man keine beträchtlichen Abstriche bei der Massgenauigkeit der Profile oder gar kostenträchtige Betriebsstörungen in Kauf nehmen. Dieser Umstand führte indes binnen Kurzem oft zu einem empfindlichen «Mangel an guten Walzendrechslern», die von Anbeginn «überall zu den bestbezahlten Hüttenarbeitern» aufstiegen, «da die Kenntnis der Walzenkonstruktion noch bis in die neuere Zeit», das heisst hier bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts, «hauptsächlich in ihrer Hand ruhte und von ihnen, wie leicht erklärlich, in ein mystisches Dunkel gehüllt ward.»³¹ Nicht von ungefähr sollte deshalb der Betrieb der seit den frühen 1820er Jahren in rascher Folge in Belgien, Deutschland und Frankreich angelegten Puddel- und Walzwerke wenigstens in den Anfangsjahren noch in starkem Masse von englischen Fachkräften abhängig bleiben.

Bis Ende der 1830er Jahre entstanden allein im wallonischen Süden Belgiens mehr als zehn solcher kombinierten Werke, unter ihnen 1825 in Seraing bei Lüttich das John Cockerills und 1835 das der Firma *Providence* in Marchienne au Point bei Charleroi.³² Zum Teil wurden von hier aus auch die englischen Helfer zum Aufbau der sieben zwischen 1824 und 1836 im Rheinland und in Westfalen gegründeten Werke herbeigerufen. Ihre Erfahrungen waren hier noch immer gefragt, als das Rasselsteiner Werk der Gebrüder Remy elf Jahre nach Betriebsbeginn 1835 seine Schienenfabrikation aufnahm und dazu englische und belgische Expertise aus Seraing und aus dem Walzwerk der Gebrüder Hoesch aus Lendersdorf bei Düren einholen liess.³³ Währenddessen waren in Frankreich einhundert Puddelöfen mit den dazugehörigen Walzwerken zur Weiterverarbeitung als *forges anglaises* in Betrieb gesetzt worden.³⁴ Wenngleich auch die kurz nach Mitte der 1830er Jahre zusammen 160 *forges champenoises* mit Steinkohlenfeuerung im Flammofen arbeiteten, sollte die Schweisseisenproduktion auf der Grundlage von Holzkohle hier erst in der Zeit danach schnell an Bedeutung verlieren. Stammten 1819 erst eintausend der insgesamt 74 000 t in Frankreich produzierten Stabeisens aus dem Steinkohlenfeuer, so waren es 1847, bei Aufnahme der Fertigung gewalzter Doppel-T-Träger, schon 280 000 von insgesamt knapp 380 000 t.³⁵ Zehn Jahre zuvor arbeiteten noch die meisten der fast zweitausend französischen Frischhütten mit überwölbten Herden des *Comté Feuers* sowie zum deutlich geringeren Teil und zudem vorwiegend nur im Norden nach dem Verfahren der *Wallonenschmiede*.³⁶

So waren es in Frankreich noch zu Beginn der 1840er Jahre nicht allein die aus ihren Puddelöfen versorgten Walzwerke wie das von Montataire im Département Oise nordwestlich von Paris, die eine Führungsposition einnahmen,

sondern eher Werke wie Decazeville am Lot oberhalb von Cahors in Südwestfrankreich, Audincourt, das sich erst 1863 einen Puddelofen zulegte, oder Fourchambault unweit von Névers in Burgund, das dann in den 1860er Jahren zur Wiege des Martinverfahrens für die grossmassstäbliche Produktion von Gussstahl werden sollte.³⁷ Fourchambault und Montataire waren 1849 zudem die ersten Werke, die in der Lage waren, Doppel-T-Träger ohne anschliessend kaum noch zu behebende Deformationen zu walzen. Das wichtigste Zentrum der Stabeisenproduktion blieb indes Saint-Étienne und seine nähere Umgebung, in der bereits im 18. Jahrhundert Orte wie Forez insgesamt elf und Rive de Gier acht Fenderien oder Eisenspaltereien aufwiesen sowie auf der Grundlage der örtlichen Steinkohlevorkommen zwischen 1821 und 1826 drei Puddelwerke entstanden, von denen allein das in Terrenoire sogleich mit vierzehn Öfen begann.³⁸ In diesem Revier gründeten schliesslich auch Hyppolite Pétin und Jean Marie Gaudet 1837 nach dem Vorbild der Werke Schneiders im burgundischen Le Creusot ihr 1843 um einen Neubau erweitertes Unternehmen, das nach der Verschmelzung mit der Firma der Gebrüder Jackson ab 1854 nicht nur zum führenden Trägerwalzwerk, sondern mit seinen Lieferungen von Radbandagen, Panzerplatten und Geschützrohren überhaupt zum wichtigsten Betrieb dieser Branche im zweiten Kaiserreich aufsteigen sollte.³⁹

Anders als England und ebenso Deutschland hatte Frankreich spätestens seit der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts damit begonnen, zumal für repräsentative Monumentalbauten in beträchtlichem Umfang Konstruktionen aus Flacheisen und Vierkantstäben zu entwickeln. Bereits Mitte der 1750er Jahre erhielt das Steinmauerwerk der Grossen Kolonnaden des Louvre und der nach den Entwürfen von Jacques Ange Gabriel an der heutigen Place de la Concorde errichteten Bauten eine umfangreiche innere Bewehrung von Zug- und Hängestäben, die einen deutlich grösseren Säulenabstand und damit grössere Fensterflächen erlaubten. Eine entscheidende und in jeder Hinsicht tragende Rolle spielte diese *maçonnerie armée* bei der von Jacques Germain Soufflot angestrebten *légèreté* für die zugleich ungewöhnlich weiträumige Pariser Sainte Geneviève, das heutige Panthéon. Sie fand sich deshalb nicht allein im Gebälk des riesigen Portikus, sondern als Vorform der Bewehrung im Stahlbeton seit den 1780er Jahren auf Vorschlag Jean Baptiste Rondelets nachträglich auch in den dadurch erstaunlich schlank gehaltenen Pfeilern unter der hoch aufragenden Vierungskuppel.⁴⁰ Nur wenige Jahre nachdem Soufflot seine Entwürfe für diesen gewaltigen Kirchenbau vorgelegt hatte, war François Joseph Bélanger, unterstützt von Rondelet, mit dem Plan hervorgetreten, für die Kuppel der in Paris neu zu errichtenden Getreidehalle erstmals einen ausschliesslich aus Flacheisen und Vierkantstäben montierten Dachstuhl vorzusehen. Zwar sollte er selbst noch wegen allzu hoher

Kosten zugunsten einer Bohlenbinderkonstruktion verworfen werden, doch fanden sich nur wenige Jahre später, 1779, bereits erstmals ein ganzeiserner Dachstuhl von 15 m Spannweite über einem Treppenhaus des Louvre und 1786, ebenfalls in Paris, einer über dem 24 m weiten Auditorium des von Victor Louis entworfenen Théâtre Français.⁴¹ Das Material für diese Dachstühle wurde wie noch 1823 für die sehr ähnliche Konstruktion des Dachstuhls über dem stützenlosen Saal des Pariser Börsenbaus von Eloi Labarre vorzugsweise von Hammerschmieden aus dem Berry bezogen, während ab 1827, zuerst für die Teile des Tragwerks der Kuppel über der Pariser Feydeau-Halle, dann schliesslich doch eher gepuddeltes Walzeisen aus dem Stephanois um Saint Etienne zum Einsatz kommen sollte.⁴²

Schmiedeeiserne Deckenkonstruktionen aus hochkant gestellten Flacheisen, die untereinander durch Vierkanteisen verbunden waren, erfreuten sich bis ungefähr zur Mitte des 19. Jahrhunderts besonders in Paris und nicht zuletzt auch für offen sichtbare Glasdächer wie etwa bei den neu hinzugekommenen Bauaufgaben der Markthalle und Passage einiger Beliebtheit.⁴³ Die schmiedeeisernen *Pariser Roste* bewahrten als zugbeanspruchbare und dadurch biegesteif ausgelegte Konstruktionen das tragende Mauerwerk weitgehend von der gegebenenfalls schädlichen Wirkung eines Seitenschubs und gestatteten über schwächere und somit leichtere Wände gleichermassen Ersparnisse an Material und Arbeitsaufwand. Die bogenförmigen, mit Zugband und Schliesse versehenen Hauptträger der schmiedeeisernen Dachstühle wurden bei den verschiedenen, vor Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelten Deckenrostsystemen zunächst durch hochkant gestellte und nur noch ein wenig, allerdings unter dem Wasserhammer gekrümmte Flachschienen ersetzt. Nachdem seit den 1830er Jahren auch in Frankreich Winkelprofile mit einem indes vorerst nur wenige Zentimeter hohen Steg sicher gewalzt zu werden vermochten, ohne dass unterschiedliche Umfangsgeschwindigkeiten in den Kaliberfurchen der Walzen zu Reibungswiderständen und ungleichmässiger Druckverteilung geführt und sie letztlich dann verbogen oder aufgestaucht hätten, traten sie bald an die Stelle der üblichen schlichten Flacheisen. Zumal dann, wenn sie paarweise zu einem liegenden T-Profil vernietet wurden, zeichneten sie sich gegenüber Letzteren durch eine zusätzlich grössere Verwindungssteifigkeit aus.

«Je nach ... Verbindung dieser Träger mit den Quer- und Langschienen haben sich im Laufe der Zeit eigenthümliche Systeme ausgebildet, von denen das einfachste das sog. Vaux'sche System ist. ... Die hochkantig gestellten und aufwärts gekrümmten Hauptträger ... erhalten bei 6 Meter Spannweite eine Höhe von 0,16 Meter und eine Stärke von 0,009 Meter, wobei ihre Pfeilhöhe für jeden Meter auf 1 Centimeter angenommen werden kann. Zwischen diesen, nach der Tiefe des zu überdeckenden Raumes in Entfer-

nungen von 0,75 Meter verlegten, Trägern liegen in gleichen Entfernungen schwächere Längsschienen ... von Quadratischeisen und werden durch hakenförmige Endigungen auf die ersteren fest aufgetrieben.»⁴⁴ Zur Ausfüllung der verbleibenden Zwischenräume wurden zwecks Gewichtsparsnis Tontöpfe oder entsprechend geformte Hohlziegel empfohlen. Die so hergestellte Fussbodenfläche brauchte dann nur noch mit hölzernen Latten verschalt und abschliessend mit Gips überzogen zu werden.

Je mehr jedoch mit der Entfernung der tragenden Wände voneinander die Spannweite und damit die Länge der Deckenträger zunahm, desto höher musste der Steg ausfallen. Dazu suchte man sich durch die Verbindung eines oder zweier stehender Bandeisen mit jeweils rechts und links angefügten Winkleisen zu behelfen, die aber ebenso wenig wie die Querrippen eines kreuzförmigen Profils unter der von der Deckenlast bewirkten Durchbiegung ein seitliches Ausbiegen oder wellenförmiges Verwerfen zu verhindern vermochten.⁴⁵ Der 1848 von Ferdinand Zorès in Paris mit einem liegenden T-Profil von 16 m Steghöhe unternommene Versuch führte ebenfalls nicht zum gewünschten Ergebnis. Die beiden 16 cm breiten Flacheisen, die dazu beidseitig alle 10 cm mit Winkleisenstücken verschweisst wurden, lieferten «in Bezug auf Tragfähigkeit nur schwache Resultate, indem sich ebenfalls eine seitliche wellenförmige Verwerfung im vertikalen Steg ergab»⁴⁶. Um sie auszuschliessen, kam Zorès und dem Bauunternehmer Chibon gemeinsam die Idee, auch die obere Kante des Steges beiderseits durch nunmehr allerdings durchlaufende Winkleisen zu versteifen und das liegende T-Profil zum I-Profil zu verdoppeln. Da sich indes die heimischen Walzwerke anders als die britischen bis dahin nicht einmal in der Lage gesehen hatten, auch nur einfache T-Profile zu walzen, sollte es noch bis zum Februar 1849 dauern, ehe der Pariser Bauunternehmer Kauleck das erste, in einem Stück gewalzte Doppel-T-Profil von 5,4 m Länge und 14 cm Steghöhe als Deckenträger im Neubau eines Wohnhauses am Boulevard des Filles du Calvaire einsetzen konnte.

Um danach die «für beliebige Konstruktionen ... unzweckmässigsten Profilformen und deren Tragfähigkeit zu ermitteln», musste Zorès indes vorläufig wieder auf die Verlegenheitslösung seitlich im Abstand von 5 cm an den Blechstege geschweisster Winkelstücke zurückgreifen. Zwar gelang es den Walzwerken, Doppel-T-Träger für Spannweiten bis zu 6,5 m und einer Steghöhe bis zu 18 cm bei einem Gewicht von dann etwa 130 kg herzustellen, jedoch nur mit oben und unten jeweils gleich breiten Flanschen. Seinem Wunsch, den oberen Flansch auf Kosten des Stegs wie den Kopf einer Eisenbahnschiene zu verdicken, um auf diese Weise seine Druckfestigkeit und damit die Tragfähigkeit des Profils, aber nicht zugleich dessen Gewicht zu erhöhen, vermochten sie bei seinem hier geordneten deutlich höheren Steg allerdings nicht nachzukommen. Indem Zorès feststellen musste, dass

«das Schmiedeeisen, welches auch immer seine spezielle Form sein mag, kaum die Hälfte seiner Last tragen kann welche zum Zerreißen erforderlich ist, ohne sich dabei bis zur Unbrauchbarkeit durchzubiegen oder seine Elastizitätsgrenze zu überschreiten»⁴⁸, kam er nicht umhin, die unter den gegebenen Umständen von den Walzwerken einzig lieferbare «symmetrische Doppel-T-Form mit überall gleich dickem Steg»⁴⁹ und verhältnismässig schmalen Flanschen als vorläufig durchaus praktikablen Kompromiss hinzunehmen.

Universalwalzwerke für Träger mit breiteren und zudem parallelen Flanschen

Schon bald danach begannen sich Walzwerke in Frankreich wie auch in Belgien und Deutschland auf die Produktion von Doppelflanschträgern einzurichten. Hier nahm als erstes das Walzwerk der Gesellschaft *Phoenix* in Eschweiler-Aue bei Aachen 1857 die Produktion auf, 1859 und 1860 gefolgt von den Walzwerken der Burbacher Hütte bei Saarbrücken und der Hütte Quint bei Trier. Zunächst waren ihre Träger mit Steghöhen zwischen etwa sieben und knapp 20 cm vorwiegend für die Fahrgestellrahmen von Eisenbahnwagen bestimmt, ehe auch andere Walzwerke dazu übergingen, diese Profile zu walzen und darüber hinaus als Dachsparren, Stützen oder Telegrafmasten anzubieten. Bevor die Profile ab 1880 nach Übereinkunft mehrerer technischer und hüttenmännischer Vereine standardisiert und wenig später durch die Verfügungen des preussischen Ministers für öffentliche Arbeiten sowie des Chefs der Reichsmarinerverwaltung als *Normalprofile* verbindlich vorgeschrieben wurden, hatten sie meist ihre jeweils werkseigene Querschnittform erhalten, die überdies in einer grossen Zahl je nach Kundenwunsch variierender Längen und Steghöhen zu bekommen war.⁴⁸

«Ob und inwieweit England etwa an dieser Ehre partizipiert,» solche Trägerprofile «erfunden» und erstmals gewalzt zu haben, war für die Zeitgenossen «vor der Hand nicht zu ermitteln.»⁴⁹ Eisenbahnschienen mit ähnlicher Querschnittform wurden hier zwar schon 1820 nach den Vorgaben von John Birkinshaw auf den Bedlington Ironworks gewalzt. Um das gewünschte Gesamtprofil mit deutlich abgesetztem Fuss, Steg und Kopf zu erhalten, mussten indes sie ebenso wie die in der Folgezeit angebotenen anderen Formen erst aus zwei oder drei weniger stark profilierten Schienen montiert werden.⁵⁰ Einfache T-Träger mit etwa 6 cm hohem Steg, dessen Profil allerdings noch sehr sanft und mit grossem Krümmungsradius in das der Flansche übergang und die unter anderem John Nash Ende der 1820er Jahre für den Buckingham Palace verwenden sollte, gab es in England immerhin schon seit 1825, doch gelang es hier erst William Fairbairn 1845, auch Profilträger mit doppeltem Flansch walzen zu lassen, die dann vor allem als Decksbalken im



Kappendecke des Wartsaals der Centraal-Station in Amsterdam, 1881–89.



Conway, Kettenbrücke und Tubular Bridge, 1823–26 bzw. 1846–48.

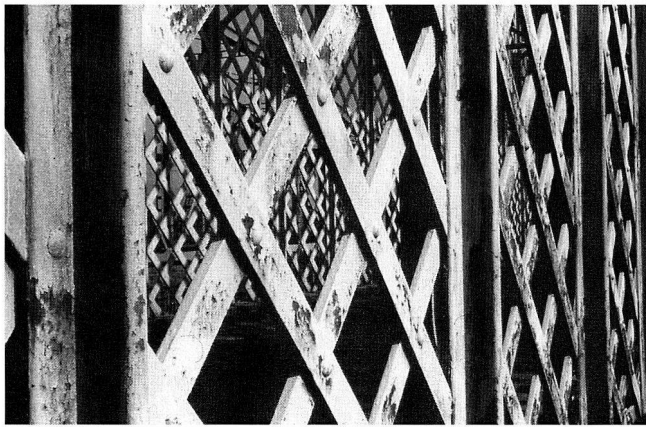
Schiffbau Verbreitung fanden.⁵¹ Vor diesem Hintergrund wunderten sich daher offenkundig manche der einschlägig interessierten Zeitgenossen, «dass in England, wo man in jener Zeit doch mehr wie jetzt (gegen Mitte der 1860er Jahre – MM) in der Walzkunst und billigeren Produktion dem Kontinent überlegen war, sich diese Fabrikation nicht rascher entwickelt hat, und zwar umso mehr, als gerade damals in England so gewaltige Bauten in Eisen ausgeführt wurden, denen das Studium über die Form und Tragkraft der Träger doch nothwendig vorausgegangen sein musste, das sich aber, wie es scheint, damals vorzugsweise nur auf das Gusseisen erstreckt hat»⁵².

In Gestalt abgenutzter Eisenbahnschienen standen allerdings hier wie dort Profilträger gleichermaßen für Decken zur Verfügung, bei denen Holzbalken als Zwischenträger auf die Innenseiten des dazu als Flansch benutzten Fusses gelegt wurden, wie für solche, bei denen jeweils ein Paar dem zwischen ihnen eingespannten Ziegelmauerwerk flacher Kappengewölbe gewissermaßen zum Widerlager diene. Bis zur Einführung des Doppel-T-Trägers nach Zorès verwandte man auch bei den Neubauten vieler der öffentlichen Gebäude in Paris von den Eisenbahngesellschaften abgelegte Schienen als Deckenträger an Stelle von Holzbalken. Dort, wo wie in Lagerhäusern oder bei mehrgeschossigen Ladengeschäften mit höheren Deckenlasten zu rechnen war, behalf man sich schlicht mit «zwei verkehrt aufeinander gestellte(n) und im Fusse zusammenge Nieteten Schienen»⁵³. In solchen Fällen allerdings, wo es wie bei Eisenbahnviadukten auf Träger noch höherer Biegesteifigkeit und deshalb einer Steghöhe ankam, die weit über dieses Mass hinausging, mussten andere Lösungen gefunden werden. War es in England bis zur Mitte der 1860er Jahre gelungen, Doppel-T-Träger bis zu 40 cm Höhe zu walzen, so bereiteten darüber hinausgehende Stegmasse kaum zu überwindende Schwierigkeiten.

Diese waren vorerst nur zu umgehen, indem entweder zwei bis drei solcher immerhin bereits 10 m langer Träger übereinandergestellt und an ihren Flanschen miteinander vernietet wurden, oder indem man die Höhe dadurch vergrößerte, dass zwischen die Stege zweier T-Eisen ein Flacheisen oder Blech entsprechender Breite mit zwei dünnen Verbindungsschienen eingefügt und dann alles miteinander unter dem schnellen Prellhammer verschweisst wurde. Die Fertigung derartiger, 1862 von ihren stolzen Herstellern als «Beweis von der hohen Vollkommenheit der englischen Schmiedekunst»⁵⁴ auf der Londoner Weltausstellung präsentierter Träger blieb indes ebenso kostspielig wie risikoreich und damit den billigeren, mit Winkeleisen aus Kesselblechen zusammenge Nieteten Konstruktionen unterlegen.

Auch wenn Edmund Heusinger von Waldegg darauf hinweisen konnte, dass seine Idee, Doppel-T-Eisen mehrfach zu einem durchlaufenden Brückenträger übereinanderzustellen, nur die Hälfte der Nietverbindungen benötigte, die bei einer Gitterträgerbrücke oder einem geschlossenen Hohlkastenträger erforderlich wären,⁵⁵ so vermochte er dennoch nur wenig Gegenliebe für sie zu finden. Trotz der beachtlichen Zeitersparnis, die seine Konstruktion versprach, blieben Gitterträger, deren diagonal gestellte Flacheisen sich wie bei der 1850–57 von Carl Lentze für den Weichselübergang bei Dirschau, dem heutigen Tczew entworfenen Brücke in dichter Folge kreuzten und mit abgelegten Schienen als Druckstäben versteift wurden, offensichtlich ebenso beliebt wie die aus Kesselblechen und Profilen montierten Kastenträger, denen nicht zuletzt Robert Stephenson mit seiner 122 m langen, zwischen 1846 und 1848 erstandenen *Conway Tubular Bridge* zum Durchbruch verholfen hatte.

Solange für Baukonstruktionen aller Art allein Schweisseisen zur Verfügung stand, sollte der Aufwand, der dabei für die Nietarbeiten anzusetzen war, immer hoch bleiben. Zwar



Dirschau (heute Tczew), Eisenbahnbrücke über die Weichsel
1847/1850–57.

zeigten Pétin, Gaudet & Co. aus Rive de Gier auf der Pariser Weltausstellung von 1867 neben einem bereits auf ihrem Universalwalzwerk hergestellten, 2,5 t schweren I-Profilträger von 10 m Länge bei einem Meter Steghöhe auch schon ein fast 3 t wiegendes Blech von 1,57 x 19,2 m Grösse, doch blieben solche Schaustücke aus Kostengründen und wegen der beim Walzen einzugehenden Risiken noch bis zum Ende des Jahrhunderts weithin die Ausnahme. Das «praktische Höchstgewicht» lag noch in den 1880er Jahren bei 400 bis 454 kg, die Abmessungen von Blechen mit Stärken zwischen 7 und 15 mm dadurch bedingt bei weniger als einem Meter in der Breite und bis zu acht in der Länge. Schweres Brückenblech mit einer Stärke von 10 mm bemass sich in der Regel sogar bloss auf ungefähr 4,5 m². Flacheisen sollten, weil sie sonst zur Blasenbildung neigten und danach ausserdem lediglich unter erheblichen Schwierigkeiten zu richten gewesen wären, bei Stärken bis zu 230 mm tunlichst nur bis zu einer Breite von 60 cm und einer Länge von 9 m gewalzt werden. Auch das grösste bis dahin in Deutschland gewalzte Doppel-T-Profil kam bei einem Gewicht von 1,4 t und einer Steghöhe von etwa 50 cm auf nicht mehr als zehn Meter Länge.⁵⁶

Diese Einschränkungen ergaben sich aus dem ausgesprochen umständlichen Ablauf der Walzvorgänge und hingen eng mit den Eigenheiten des Schweisseisens zusammen. Anders als der zu Bauzwecken seit den 1870er Jahren in Siemens-Martin-Öfen gewonnene oder seit den 1890er Jahren zunehmend auch aus Thomas-Konvertern stammende Flusstahl, der sich unmittelbar nachdem er zuvor in Kokillen zu Blöcken gegossen, abgekühlt und erstarrt war, zu Brammen oder Knüppeln und dann, nach erneuter Vorwärmung, schrittweise zu Blechen oder Profilen in den gewünschten Endmassen herunterwalzen liess, verlangte das Schweisseisen zunächst einiges an Vorarbeit. Nachdem die aus dem Puddelofen gezogenen Luppen unter dem Hammer von Schlackenresten befreit und grob zum Block vorge-

schmiedet worden waren, mussten sie erst auf dem Luppenwalzwerk zu noch relativ kurzen Rohschienen vorgestreckt werden, die dann ihrerseits, mit ebenso langen Deckeln und Seitenplatten aus zwei- bis dreimal geschweisstem Eisen sowie häufig auch Alteisen und Schrott zu Paketen gebündelt, unter die Block- oder Schweisswalze, bei einer Masse von mehr als einer Tonne jedoch nochmals unter den Dampfhammer kamen, um dort zu einer Art Bramme oder Knüppel verschweisst zu werden. In beiden Fällen hatte das Walzgut dabei zugleich bereits annähernd den Querschnitt angenommen, der dann beim Fertigwalzen den Anlauf zum ersten Stich ermöglichte.⁵⁷

Das Blech oder Profil war am Ende doppelt so breit, aber vier- bis fünfmal so lang wie das ursprüngliche Schweisseisenpaket. Aus dieser Differenz ergab sich wiederum eine gegenüber in der Walzrichtung deutlich geringere Querfestigkeit des jeweiligen Endprodukts. Bei I-Profilträgern konnten noch verschiedene Defekte hinzukommen, die meist auf einem unzulänglich vorgewalzten Anlauf oder überhaupt mangelnder Sorgfalt beruhten. Zu ihnen zählten mitunter auf der der Oberwalze zugekehrten Seite unregelmässig oder unvollkommen ausgebildete Flanschen, wellige Stege infolge von Materialspannungen, die nach ungleichmässigem Verschweissen der paketierte Stücke oder während des Streckens von Schwankungen in der Temperatur und dem auf das Walzgut einwirkenden Druck geblieben waren, sowie schliesslich noch Risse im Übergang vom Steg zu den Flanschen.⁵⁸ Solche Risse liessen sich zwar durch die Vergrösserung des Kurvenradius verhindern, mit dem die Flanschen in den Steg übergingen, doch erschwerte dies nur die Montage der Deckenroste. Denn damit wurde nicht nur die Auflagefläche für die Querträger geschmälert, sondern ausserdem verhindert, dass ihre Schnittflächen zur sicheren Verbindung mit den Hauptträgern jeweils unmittelbar an deren Steg stossen sollten.

Die französischen Doppel-T- oder I-Profilträger erwiesen sich in dieser Hinsicht noch nachteiliger als die deutschen. Bevor sie kurz nach Mitte der 1860er Jahre erstmals von Pétin, Gaudet & Co. auf dem Universalwalzwerk hergestellt werden konnten, waren ihre Flanschen ohnehin recht schmal, ihre Kanten abgerundet und der Winkel im Übergang zum Steg stumpf geblieben.⁵⁹ Die Profilträger aus den Werken des Rheinlands oder Westfalens waren indes meist schon mit etwas breiteren Flanschen versehen, die sich zu ihren ausserdem scharfwinkligen Kanten hin nur mässig verjüngten und in einzelnen Fällen sogar die gleiche Stärke aufwiesen wie der Steg.

Mit solchen Eigenschaften fielen diese Profilformen nicht allein montagefreundlicher aus, sondern boten bei grösserer Flanschbreite und damit erhöhter Knickfestigkeit auch Ersatz für hölzerne oder gemauerte Stützen. Allerdings liessen sie sich nicht mehr auf einem gewöhnlichen Kaliberwalzwerk

herstellen, sondern setzten die Verwendung eines Universalwalzwerks in der Art voraus, wie es zur Erzeugung von Flacheisen mit gleichbleibend scharf rechtwinkligen Kanten erstmals 1848 bei Lohmann & Brandt in Witten und nach vorhergegangener Verbesserung seiner Konstruktion durch Reiner Daelen bald darauf auch in der Hörder *Hermannshütte* unweit von Dortmund zum Einsatz kommen sollte.⁶⁰ Auf ihm vermochte das Walzgut allseitig zwischen horizontalen und vertikalen Kaliberwalzen gestaucht und gereckt zu werden, die dazu paarweise als Duo angeordnet waren. Das Vertikalduo stand hierbei allerdings zunächst hinter dem Horizontalduo und bildete mit ihm insofern noch keine gemeinsame Wirkebene. Beide wurden jedoch über ein gemeinsames Rädergetriebe in Bewegung gesetzt, das sich bis 1856 noch unter dem Hallenboden befand, ehe es Reiner Daelen zwecks besserer Zugänglichkeit auf das Gerüst verlegte.

Sowohl in Europa wie in den Vereinigten Staaten hatte Daelens Universalwalzwerk seit Beginn der 1860er Jahre vor allem zur Produktion von Doppel-T-Trägern allgemeine Verbreitung gefunden.⁶¹ Hierbei war die Firma Pétin, Gaudet & Co. vorangegangen, indem sie es für die besonderen Anforderungen bei der Formgebung dieses Profils anpasste. Um den Flanschen eine grössere Breite geben zu können, baute sie ein Paar senkrecht gelagerter Druckrollen so zwischen die beiden liegenden Walzen ein, dass sich alle vier Achsen in einer Ebene befanden. Das stehende Duo erhielt Schleppwalzen, die vom liegenden Duo aus über das beide passierende Walzgut angetrieben wurden.⁶² Damit konnte die Werkstoffverformung praktisch «in einem allseitig geschlossenen und der Hauptsache nach mit unmittelbarem Druck arbeitenden Kaliber»⁶³ ablaufen und das auf der Blockstrasse bereits annähernd I-förmig vorgewalzte Profil nach mehreren, bis um die 2,5 mm engeren Durchgängen oder *Stichen* seinen endgültigen Querschnitt erreichen.

Dieses Verfahren ersparte nicht allein den übermässigen und kostspieligen Vorrat an Walzen, der bei den einfachen Horizontalkalibern vorzuhalten gewesen wäre, sondern vermied auch, dass sich die Flanschen infolge tiefer Kaliberfurchen bei zudem allzu geringer Flankenneigung sowie der mit der Entfernung ihrer Kanten zur Walzachse wachsenden Umfangsgeschwindigkeit leicht einklemmen, schwer lösen und mitunter sogar einreissen konnten. Mit zunehmender Flanschbreite verteilte sich die Streckwirkung überdies weniger gleichmässig auf den gesamten Querschnitt, und die daraufhin in ihrer Richtung und Stärke sehr unterschiedlich über Steg und Flanschen verteilten Spannungen führten letztlich zu schadhafte Erzeugnissen wie ebenso zu vorzeitigem Verschleiss der Walzen.⁶⁴

Andererseits wurde mit den dennoch nicht mehr als insgesamt 22 cm breiten Flanschen sowie deren vom Übergang in den Steg zu den Aussenkanten mitunter um 17 % geneigten Innenflächen ein wenig vorteilhaftes Verhältnis zwischen

Breite und Höhe des Profils eingehandelt, das dessen Verwendbarkeit als Träger oder mehr noch als Stütze spürbar einengte. Seine unter diesen Voraussetzungen recht schmale Querschnittfläche ergab entweder ein übermässig hohes Gewicht oder aber ungünstige Trägheitsmomente.⁶⁵ Weil die relativ schmalen Flanschen und ihr grosser, mit der starken Neigung der Innenflächen einhergehender *Anzug* zudem noch oft genug die Montage erschweren sollten, gingen bald viele der statischen Vorzüge verloren, die das Doppel-T-Profil sonst gegenüber anderen Trägerformen auszeichneten.

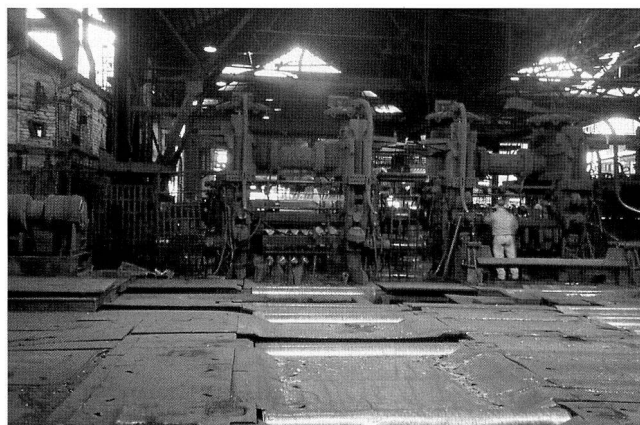
Sobald überdies die «neueren Bauweisen ... aus statischen und wirtschaftlichen Gründen I-Träger in immer grösseren Abmessungen» verlangten und die gewohnten Normalträger mit ihren schmalen «Querschnittformen ... zum Teil nicht mehr den Anschauungen der Verbraucher ...»⁶⁶ genügten, musste sich unweigerlich Enttäuschung breit machen. Die wesentliche Einbusse an Widerstand gegen Druck- und Biegebeanspruchung, die man gepaart mit einem beträchtlichen Mehraufwand an Material hinnehmen musste, wenn man sich dieser Zwangslage durch genietete Doppel-T-Träger aus Blechen und Winkleisen zu entziehen suchte, unterstrichen nur die Dringlichkeit, allmählich Walzwerke zur Betriebsreife zu bringen, auf denen sich Träger mit ausreichend breiten und zudem von den Aussenkanten bis zum Steg gleich starken Flanschen herstellen liessen.

Die Schwächen des Schweisseisens kamen noch hinzu. Auf die Dauer sollte sich das Puddelverfahren «als völlig unelastisch» erweisen, um auf weitere «Steigerungen der Nachfrage eingehen zu können»⁶⁷. Die einzelne Luppe durfte nicht mehr als 50 kg wiegen, um noch handhabbar zu bleiben. Dies bedeutete, dass für Blöcke, die zu einem maximal acht Meter langen Doppel-T-Profil ausgewalzt werden sollten, zuvor etwa sechs bis acht solcher Luppen ausgebracht sein mussten, um die zur Paketierung erforderliche Zahl an Rohschienen zu erhalten. Zwar wurde die ausgesprochen sehnige Struktur des Schweisseisens noch bis zum Ende der 1880er Jahre für eine Reihe von Anwendungsfällen geschätzt, weil die durch eine Art dünnen Schlackenschicht voneinander getrennten Sehnen sich unter Zugbeanspruchung gleichsam wie einzelne Drähte gedehnt wurden, sodass, anders als anfangs bei Flusseisen oder Flusstahl aus dem Siemens-Martin-Ofen oder Thomaskonverter, nie mit schlagartigen Rissen oder Brüchen gerechnet zu werden brauchte.⁶⁸ Allerdings zeigte sich dieser Vorzug allein in der Walzrichtung, während die insgesamt eher weichen Schweisseisenträger bei Überlastung in der Querrichtung dazu neigten, auszubeulen, zu kippen und schliesslich sogar zu knicken.⁶⁹ Überhaupt folgte aus der produktionsbedingt häufig selbst schon beim einzelnen Träger wenig gleichmässigen Zusammensetzung des Schweisseisens eine kaum kalkulierbare Schwankungsbreite der Festigkeitswerte und somit nur begrenzte Sicherheit.

Während diese Mängel bis zum Beginn der 1880er Jahre bei der zwar langsamer verlaufenden, jedoch leicht kontrollierbaren Produktion von Flusseisen oder Stahl nach dem Martinverfahren und am Ende des Jahrzehnts allmählich auch beim noch sehr viel schnelleren Thomasverfahren behoben worden waren, sollten entsprechend leistungsfähige und vor allem einwandfrei arbeitende Universalwalzwerke noch etwas auf sich warten lassen. Die meisten Schwierigkeiten bereitete seit den Anfängen von Pétin, Gaudet & Co. in den frühen 1860er Jahren immer noch die Bildung von Graten an den Flanschanten in den Kaliberöffnungen und der im Zuge des Streckvorgangs gegenüber den Flanschen stärkeren Werkstoffverlagerung innerhalb des Stegs. Sie mochten weder dadurch behoben zu werden, dass zunächst in Frankreich anstelle nur eines Gerüsts wie inzwischen zum kontinuierlichen Walzen von Draht mehrere Gerüste hintereinander angeordnet wurden, noch dadurch, dass wie nach den 1882 und 1883 patentierten Vorschlägen von Hugo Sack vertikal mit zunächst symmetrisch ausgebildeten, dabei einerseits offenen, andererseits aber geschlossenen, und danach abschliessend mit glatten Stauchkalibern fertiggewalzt wurde. Bevor das Walzgut jedoch diese Endstufe erreichte, hatte es nach jedem Stich um 180° gewendet zu werden. Dieses umständliche Verfahren wurde erst nach dem Tode Hugo Sacks 1906 durch die Rombacher Hütte aufgegeben, die dazu ab 1910 einem ersten Universalvorwalzgerüst mit offenen Kalibern ein zweites mit geschlossenen Kalibern sowie als drittes ein Universalfertiggerüst folgen liess, um in ihm die bis dahin in Schräglage bearbeiteten Flanschen senkrecht aufzurichten und so zu einigermaßen befriedigenden Ergebnissen zu gelangen.⁷⁰

Unterdessen waren in den Vereinigten Staaten, wo der Bedarf an Trägern mit breiten und bald auch parallelen Flanschen zum Bau von Stahlskeletten als Tragwerk vielgeschossiger Hochhäuser noch dringender war als in Europa, ähnliche Vorschläge unterbreitet worden. Von ihnen wurde allerdings nur der eines Universalwalzwerks für Breitflanschträger realisiert. Drei Jahre nachdem 1889 L. S. und J. E. York ihren Entwurf präsentiert hatten, übernahmen ihn die Ironton Structural Steel Co. in Duluth, um auf seiner Grundlage ein Walzwerk zu errichten, das die Flanschanten über einen besonderen, jeweils vor und hinter seinem Universalgerüst befindlichen Schleppkaliber bearbeiten sollte. Die mit ihm verbundenen Erwartungen blieben indes unerfüllt, denn infolge der ungleichmässigen Werkstoffverdrängung während des Streckens bildeten sich auf der Oberfläche des Trägers Stauchungen.

Auch die nacheinander 1896 und 1897 von Henry Grey an diesem Walzwerk vorgenommenen Veränderungen vermochten die Streckvorgänge nicht so hinreichend zu verstetigen, dass es die Träger endlich nicht mehr schlicht krumm, sondern vollkommen gerade verliessen. Erst das unter Max Mei-



Duo-Reversiergerüste des Blockwalzwerks der Völklinger Hütte, 1891.

er auf der Grundlage der Greyschen Patente in der Differdinger Hütte ab 1901 eingeführte Vorprofil-Blockwalzwerk schuf hier Abhilfe, indem der Block auf ihm im Zustand besonderer Plastizität und unter höchstem Druck in ein I-förmiges Profil mit bereits annähernd endgültigem Verhältnis von Flanschbreite und Steghöhe umgeformt zu werden vermochte, ohne dass Spannungen zurückblieben. Die Materialstärke dieses Vorprofils lag noch bei etwa dem Zweieinhalbfachen derjenigen, die für das Fertigprofil angestrebt und dann unter wiederholtem Kanten und Wenden über mehr als zwanzig Stiche durch insgesamt vier verschiedene Kaliber erzielt wurde.⁷¹ Ab 1902 hatte das Differdinger Werk dieses Verfahren so weit zur Betriebsreife gebracht, dass es erstmals einen wirklich marktgängigen Breitflanschträger anbieten konnte, dessen Innenprofil von den Kanten zum Steg nur um noch 9 % anstieg.

Wenngleich die Köpfe der Niete und Schrauben für die Verbindungen der Träger untereinander dadurch schon «weit besser» als vordem «lagerten und ... eine grössere Haltbarkeit»⁷² versprochen, blieb selbst dieser verhältnismässig geringe Neigungswinkel für stark beanspruchte Stossverbindungen, wie sie nicht zuletzt in mehrdimensionalen Fachwerkknoten vorkamen, lästig und von erheblichem Nachteil. Erst nach erneutem Umbau der Anlage vermochten ab 1916 ausnahmslos Doppel-T-Träger ohne Neigung der inneren Flanschflächen hergestellt zu werden. Auf dem Vorprofil-Blockwalzwerk mit Profil- und Stauchkaliber wurde der Block zunächst in eine grob angenäherte I-Form gebracht, dann in mehreren Stichen auf der Universal-Vorstrasse auf ein noch schmales Profil mit gleicher Stärke für Steg und Flanschen gestreckt und schliesslich auf der Universalträger-Anlage auf ein quadratisches Profil mit einem gegenüber den Flanschen schwächeren, doch in seiner Höhe deren Breite gleichen Steg ausgewalzt. Währenddessen hatte Johann Puppe in Peine bis 1914, ausgehend von



John C. Kluczynski, Federal Building in Chicago, 1974
nach Entwürfen aus dem Büro Ludwig Mies van der Rohes.

den Sackschen Patenten, sein Verfahren zur Betriebsreife bringen können, das mit einer deutlich geringeren Zahl von insgesamt nur zweimal neun Stichen auskommen sollte. Hierbei hatte der Block bereits dadurch, dass das Material in eine entsprechend profilierte Kokille vergossen worden war, eine günstigere Vorform erhalten, die dann zum Vorprofil mit einer gegenüber dem Fertigprofil noch gut doppelten Flansch- und Stegstärke gestreckt wurde. Im Fertiggerüst erfuhren die Flanschen bis zum vorletzten Durchgang einen ebenso starken Druck wie der Steg. Der Träger erhielt so eine über alle Teile seines Profils gleichmässige Streckung, ohne dass dabei der Steg den Flanschen voraneilte. Erst zuletzt wurde der hohe Stauchdruck zurückgenommen, um die noch leicht angewinkelten Flanschen unter dem vergleichsweise leichten Druck der vertikalen Kopfwalzen plan aufzurichten und ihnen mit den Horizontalwalzen gleichzeitig scharfe Kanten zu geben.

Bei Beginn des Ersten Weltkriegs produzierte das Walzwerk im luxemburgischen Differdingen monatlich bereits 18000 t Träger, während das Werk in Peine umständehalber

zunächst nur auf 1500 t kommen und die Kapazität ihrer auf eine mittlere Tageserzeugung von 1000 t hin konzipierten Anlage erst Mitte der 1920er Jahre ausschöpfen konnte. Unterdessen hatte sich der Ausstoss des Peiner Stahlwerks der Marke von jährlich fast einer halben Million Tonnen genähert, die grossenteils in Gestalt von Gussblöcken zur weiteren Verarbeitung zu Trägern oder Stabstahl an das benachbarte Walzwerk weitergereicht wurden.⁷³ Die breitflanschigen Parallelträger öffneten den Unternehmen des Stahlbaus neue Geschäftsfelder wie nicht zuletzt das der Errichtung vielgeschossiger Turmhäuser. Dazu ebneten ihnen diese Trägerprofile, die bald in einer Fülle unterschiedlicher Längen und Querschnittabmessungen angeboten wurden, gleichzeitig den Weg zu neuartigen Konstruktionen. Indem sie sich ebenso gut als Unterzüge weitgespannter Decken einsetzen liessen wie als einteilige, doch selbst aussermittig hoch belastbare Stützen, konnte an Material gespart und die Rohmontage beschleunigt werden. Da die Steghöhe der Deckenträger trotz des nun deutlich weiteren Stützenabstands wiederum vergleichsweise gering bleiben konnte, erhielten selbst grossflächige und tiefe Räume noch ausreichend Tageslicht. Die Möglichkeit, die biegesteifen Deckenträger auch weit über die äussere Stützenreihe vorkragen zu lassen, nahm der Fassade ihre tragende Funktion und erlaubte schliesslich, sie auf eine ebenso leichte wie transparente Hülle aus Glas mit vielleicht noch etwas dünnem Brüstungsmauerwerk zu reduzieren.

- ¹ Ausschuss zur Untersuchung der Erzeugungs- und Absatzbedingungen der deutschen Wirtschaft, Hg., Die deutsche eisenerzeugende Industrie. Verhandlungen und Berichte des Unterausschusses für Gewerbe, Industrie, Handel und Handwerk (III. Unterausschuss); Berlin 1930; S. 37 u. 42.
- ² Max Hochfeld, Die deutsche Feinblechindustrie; Würzburg 1935 [Diss. Univers. Köln 1932], S. 23.
- ³ Vgl. den Beitrag von Paul Josef Mauk im vorliegenden Heft.
- ⁴ Eduard Mäurer, Die Formen der Walkkunst und das Formeisen, seine Geschichte, Benutzung und Fabrikation für die Praxis der gesamten Eisenbranche; Stuttgart 1865, S. 103; Raymond Guidot, Béton armé; in Antoine Picon, Hg., L'Art de l'ingénieur, constructeur, entrepreneur, inventeur; Paris 1997, S. 79–82, hier S. 79.
- ⁵ Mäurer a.a.O. 1865, S. 103.
- ⁶ Ebd., S. 106.
- ⁷ Jean Louis Taupin, Le fer des cathédrales; in: Monumental 13; Paris 1996, S. 18–27, hier S. 18 f.; Erika Pomsel, Radar für die Karolinger. Über jedem Menschen hängen zwanzig Zentner Bruchstein: Der Zentralbau des Aachener Domes wird erforscht und saniert; in: Frankfurter Allgemeine Zeitung 26.V.2001, S. 46; Kaiserliches Rot; ebenda, 29.X.2003, S. 35.
- ⁸ Hermann Heckmann, Sonnin. Baumeister des Rationalismus in Norddeutschland; Hamburg 1977, S. 146.
- ⁹ S. B. Hamilton, The Structural Use of Iron in Antiquity; in: Transactions of the Newcomen Society; 31[1957–59]; London 1961, S. 29–47, hier S. 42.
- ¹⁰ Philippe Braunstein, Le commerce du fer à Venise au XVe siècle; in: Studi veneziani 8 (1967), S. 267–302; Ennio Concina, L'Arsenale della Repubblica di Venezia. Tecniche e istituzioni dal medioevo all'età moderna; Mailand 1984, S. 75.
- ¹¹ Philippe Braunstein, Les débuts d'un chantier: le Dôme de Milan sort de terre 1387; in: Odette Chapelot u. Paul Benoit, Hg., Pierre et métal dans le bâtiment au Moyen Age; Paris 1985, S. 81–102, hier S. 93 u. 95.
- ¹² Hamilton a.a.O. 1957–59, S. 44.
- ¹³ Aimé Stroobants, Le fer forgé dans l'architecture à Gand, Bruges et Anvers à la fin du Moyen Age; in: Chapelot u. Benoit a.a.O. 1985, S. 273–291, hier: S. 274.
- ¹⁴ R. F. Tylecote, A History of Metallurgy; London 1976, S. 90.
- ¹⁵ Hamilton a.a.O. 1957–59, S. 42.
- ¹⁶ Otto Johannsen, Die geschichtliche Entwicklung der Walkwerkstechnik; in: Johann Puppe u. Georg Stauber, Hg., Handbuch des Eisenhüttenwesens. Walkwerkswesen. Erster Band; Düsseldorf u. Berlin 1929, S. 252–337, hier S. 261 u. 270.
- ¹⁷ Jean Marie Yante, Provenance, achimement et mise en œuvre du fer dans le bâtiment: le cas du Pays Mosan XVe–XVIe siècles; in: Chapelot u. Benoit a.a.O. 1985, S. 293–303, hier S. 294 u. 297.
- ¹⁸ Klaus Werner Bosak, Die Geschichte der Walkwerktechnik und Entwicklung der Walkwerksindustrie im 19. Jahrhundert in Deutschland bis zur Wirtschaftskrise 1873; Hannover 1970 [= Diss. TU Hannover], S. 118 f..
- ¹⁹ Marie Frölich u. Hans Günther Sperlich, Georg Moller. Baumeister der Romantik; Darmstadt 1959, S. 287; Michael Mende, A matter to be considered in various directions: Approaches in design, prefabrication and assembly of the Hamelin Chain Bridge, 1936–38; in: Santiago Huerta, Hg., Proceedings of the First International Congress on Construction History; Madrid 2003, Band 2, S. 1417–1426, hier S. 1425; Ludwig Beck, Denkschrift zur Erinnerung an die hundertfünfzigjährige Zusammengehörigkeit des Rasselsteiner Eisenwerks mit der Familie Remy 1760–1910; Neuwied 1912, S. 38.
- ²⁰ Ludwig Beck, Die Familie Remy und die Industrie am Mittelrhein; in: Annalen des Vereins für Nassauische Altertumskunde und Geschichtsforschung 35 (1905); Wiesbaden 1906, S. 73 u. 75.
- ²¹ Michael Mende, Nicht bloss eine Frage des Geschmacks, sondern einer Demonstration bezüglich der Gesetze von Mechanik und Mathematik. Die Übernahme britischer Vorbilder im Bau von Hängebrücken in Kontinentaleuropa während der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts; in: Volker Benad-Wagenhoff, Hg., Industrialisierung: Begriffe und Prozesse. Festschrift Akos Paulinyi zum 65. Geburtstag; Stuttgart 1994, S. 95–128, hier S. 106; Mende a.a.O. 2003, S. 1425.
- ²² Ludwig Beck, Die Geschichte des Eisens in technischer und kulturgeschichtlicher Beziehung. Dritte Abtheilung. Das XVIII. Jahrhundert; Braunschweig 1897, S. 581 f.; Tylecote a.a.O. 1976, S. 110.
- ²³ Ebd., S. 111; Beck a.a.O. 1897, S. 689; Akos Paulinyi, Das Puddeln. Ein Kapitel aus der Geschichte des Eisens in der Industriellen Revolution; München 1987, S. 159.
- ²⁴ Torsten u. Peter Berg, Hg., R R Angerstein's Illustrated Travel Diary 1753–1755. Industry in England and Wales from a Swedish Perspective; London 2001, S. 201 f., 262, 289, 295 u. 316.
- ²⁵ Harry Scrivenor, History of the Iron Trade, from the earliest records to the present period; London 1854, S. 122.
- ²⁶ Ebd., S. 121; Thomas Southcliffe Ashton, Iron and Steel in the Industrial Revolution; Manchester 1968⁴, S. 96.
- ²⁷ W. K. V. Gale, Ferrous Metals; in: Ian McNeil, Hg., An Encyclopedia of the History of Technology; London u. New York 1996², S. 146–185, hier S. 161 und 165.
- ²⁸ Carl Hartmann, Die Fortschritte des Eisenhüttengewerbes in der neueren Zeit; Leipzig 1858, S. 394.
- ²⁹ Tom Swailes, Mark Watson u. Audrey Dakin, Scottish Iron Structures. Historic Scotland Guide for Practitioners 5; Edinburgh 2006, S. 86 f.
- ³⁰ Friedrich August Eversmann, Uebersicht der Eisen- und Stahl-Erzeugung auf Wasserwerken in den Ländern zwischen Lahn und Lippe; Dortmund 1804, S. 119; Mäurer a.a.O. 1865, S. 5 f.
- ³¹ Ebd.
- ³² Ebd., S. 7.
- ³³ Ebd., KS. 10–14.
- ³⁴ Christian Sütterlin, La grande forge; La Courade-Ile de Ré 1981, S. 50.
- ³⁵ Gerd Hardach, Technik und Industriearbeit. Zur Sozialgeschichte der französischen Hüttenarbeiter in der Industriellen Revolution; in: Karin Hausen u. Reinhard Rürup, Hg., Moderne Technikgeschichte; Köln 1975, S. 249–266, hier S. 250.
- ³⁶ Sütterlin a.a.O. 1981, S. 46 f.
- ³⁷ Ebd., S. 110.
- ³⁸ Jean François Belhoste, Fonte, fer, acier. Rhône-Alpes, XVe-début XXe siècle; Lyon 1992, S. 11 u. 60; Sütterlin a.a.O. 1981, S. 120.
- ³⁹ Belhoste a.a.O. 1992, S. 86; Maurice Dumas, L'Archéologie industrielle en France; Paris 1980, S. 264.

- ⁴⁰ Bertrand Lemoine, *L'Architecture du fer. France: XIXe siècle*; Seyssel 1986, S. 34.
- ⁴¹ Allan Braham, *The Architecture of the French Enlightenment*; London 1980, S. 77; Mark K. Deming, *Halle au blé (coupole de la)*; in: Picon a.a.O. 1997, S. 219 f., hier S. 220.
- ⁴² Jean François Belhoste, *Fabrication et mise en œuvre du fer dans la construction: Grandes étapes d'évolution (XIII-XIXe siècles)*; in: *Monumental* a.a.O. 1996, S. 8–17, hier S. 14.
- ⁴³ Christian Schädlich, *Das Eisen in der Architektur des 19. Jahrhunderts. Beitrag zur Geschichte eines neuen Baustoffs*; Weimar 1967 (Habil.-Schrift Hochschule für Architektur und Bauwesen), S. 23 u. 71.
- ⁴⁴ Eugen Brandt, *Lehrbuch der Eisen-Konstruktionen mit besonderer Anwendung auf den Hochbau*; Berlin 1865, S. 263.
- ⁴⁵ Schädlich a.a.O. 1967, S. 60.
- ⁴⁶ Mäurer a.a.O. 1865, S. 105.
- ⁴⁷ Ebd., S. 108.
- ⁴⁸ Georg Mehrstens, *Eisen und Eisenkonstruktionen in geschichtlicher, hütten technischer und technologischer Beziehung*; Berlin 1887, S. 167.
- ⁴⁹ Mäurer a.a.O. 1865, S. 109.
- ⁵⁰ Ebd., S. 48–56.
- ⁵¹ Swailes, Watson u. Dakin a.a.O. 2006, S. 112.
- ⁵² Mäurer a.a.O. 1865, S. 109.
- ⁵³ Ebd., S. 103.
- ⁵⁴ Ebd., S. 113.
- ⁵⁵ Edmund Heusinger von Waldegg, *Die eiserne Eisenbahn oder neue einfache Eisenkonstruktionen für Eisenbahnen*; Hannover 1863.
- ⁵⁶ Mehrstens a.a.O. 1887, S. 169 f.
- ⁵⁷ Ebd., S. 171–174.
- ⁵⁸ Ebd., S. 180 f.
- ⁵⁹ Mäurer a.a.O., S. 110.
- ⁶⁰ Ebd., S. 20.
- ⁶¹ Johannsen a.a.O. 1929, S. 281.
- ⁶² Otto Emicke, *Die Walze, ihr Einbau und ihre Anordnung im Walzgerüst*; in: Puppe u. Stauber a.a.O. 1929, S. 652–713, hier S. 681.
- ⁶³ Johann Puppe u. Günther Bertram Lobkowitz, *Das Walzen von Breit- und Parallelflansch-I-Trägern (Universalträgern)*; in: Johann Puppe u. Georg Stauber, Hg., *Handbuch des Eisenhüttenwesens. Walzwerkswesen. Zweiter Band*; Düsseldorf u. Berlin 1934, S. 287–337, hier S. 290.
- ⁶⁴ Ebd.
- ⁶⁵ Ebd., S. 287.
- ⁶⁶ Ebd.
- ⁶⁷ Paulinyi a.a.O. 1987, S. 157.
- ⁶⁸ Georg Mehrstens, *Zur Frage der Verwendung des Flusseisens für Baukonstruktionen*; in: *Centralblatt der Bauverwaltung* 8 (1888), 6, S. 67 f., hier S. 67.
- ⁶⁹ Frank Werner u. Joachim Seidel, *Der Eisenbau. Vom Werdegang einer Bauweise*; Berlin u. München 1992, S. 39 u. 133.
- ⁷⁰ Puppe u. Lobkowitz a.a.O. 1934, S. 299 f.
- ⁷¹ Ebd., S. 307 f.
- ⁷² Ebd., S. 315.
- ⁷³ Erich Cords, *Die technische Entwicklung des Peiner Walzwerks 1872–1950*; Düsseldorf 1952, S. 148.