

Die Ursprünge einiger »idealer« struktureller Formen

Einführung

Üblicherweise wird elementare Statik bemüht, um die strukturelle Effizienz und Ressourceneffizienz bestimmter gebräuchlicher Formen von Balken und Säulen (oder Streben) zu demonstrieren: ein Fischbauchbalken (oder -träger) spiegelt den Biegemomentverlauf einer gleichmäßig verteilten Last wider; ein zu seiner Mitte hin dicker werdender Stab spiegelt die Euler'sche Knickformel wider; die I-Form gilt als der effizienteste Querschnitt eines Balkens. Es überrascht daher nicht, wenn oft impliziert wird, dass diese strukturellen Formen tatsächlich aus der Anwendung dieser einfachen Statik entstanden; in anderen Worten: Sie gelten als gute Beispiele der Anwendung der »Theorie« in der »Praxis«. In der Tat ergaben sich die Ursprünge dieser Formen vor allem aus praktischen Anliegen, insbesondere aus der Einführung von Gusseisen im Hoch- und Brückenbau, die in den letzten Jahrzehnten des 18. Jahrhunderts erfolgte. Erst später, im ersten Drittel des 19. Jahrhunderts, wurden die Formen durch die Anwendung der Statik und Festigkeitslehre verfeinert.

Das Gusseisen

Im Jahre 1790 war Gusseisen im Vergleich zu Holz und Stein sehr teuer. Es wurde lediglich dann verwendet, wenn es signifikante Vorteile im Vergleich zu den traditionellen Materialien aufwies. Die Hauptvorteile des Gusseisens sind seine größere Festigkeit bei Zug und Druck sowie eine größere Steifigkeit gegenüber Stein und Holz (siehe Taf. 1).

	Druckfestigkeit	Zugfestigkeit	Steifigkeit	Bruch
	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	
Stein	50–250	5–25	10–50	spröde
Holz (mit Maserung)	8–10	10–15	8–15	halbduktile
Gusseisen**	500–600	70–120	100	spröde

Tafel 1 Materialeigenschaften von Stein, Holz und Gusseisen*

* Diese Zahlen können je nach Materialart stark variieren.

** Daten für zwischen 1770 und 1840 hergestelltes Gusseisen

Abgesehen von seiner Festigkeit wurde Eisen aus noch zwei weiteren Gründen in Gebäuden eingeführt. Der erste war, das optische Gewicht einer Säule zu verringern, da Eisensäulen viel schlanker waren als diejenigen aus Stein oder Holz. Schon im Jahre 1693 hatte Christopher Wren schmiedeeiserne Säulen verwendet, um einen innenliegenden Balkon zu stützen; um 1790 verwendeten bereits mehrere Ingenieure und Architekten gusseiserne Säulen [Addis 2007]. Der zweite Grund, der wichtige Konsequenzen für die Gebäudekonstruktion hatte, war der Feuerwiderstand von Eisen. Für feuerfeste Deckenbalken und Dachkonstruktionen wurde Schmiedeeisen zum ersten Mal um 1780 in Frankreich angewendet. Im Jahre 1793 wurden gusseiserne Säulen in mehrgeschossigen »feuerfesten« Industriebauten in England eingesetzt; gusseiserne Balken in »feuerfesten« Deckenkonstruktionen folgten zwei oder drei Jahre später [Addis 2010].

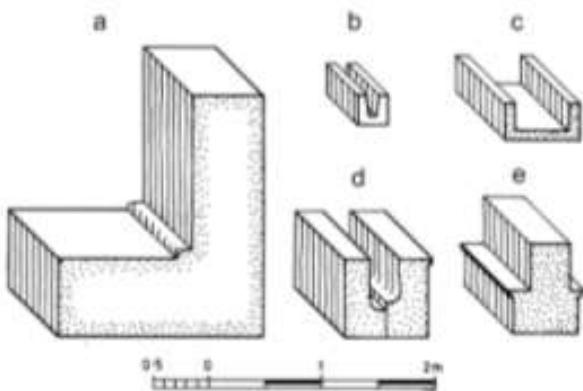
Die Herstellung von Tragwerken aus Stein und Holz

Aufgrund seiner hohen Massendichte, Sprödigkeit und geringen Biegefestigkeit wurde Stein nie in großen Stücken verwendet, in Tür- oder Fensterstürzen maximal in der Länge von etwa einem Meter. Größere Spannweiten wurden mit Bögen und Gewölben erreicht, dafür mussten jedoch viele kleinere Formate aus Stein geschnitten werden.

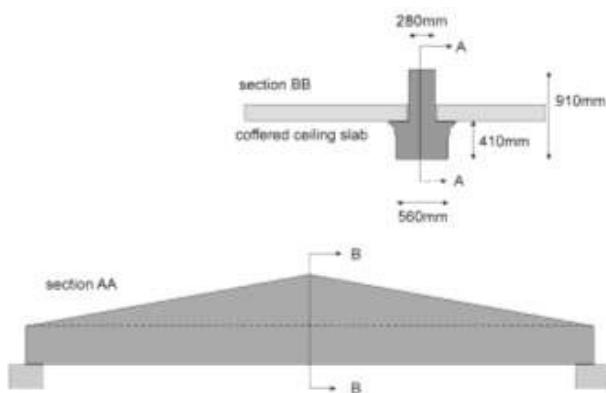
Da die Stärke und Stabilität einer Säule oder eines Bogens nicht von der Zug- und Druckfestigkeit des Materials abhängen, sondern vom Vermeiden der Scharnierwirkung zwischen aneinanderstoßenden Bogensteinen, gibt es keinen Grund, den Querschnitt eines Bogens zu verringern, um Gewicht und Material zu sparen – im Gegenteil, ein größerer Querschnitt gibt mehr Stabilität.

Ähnliches gilt für Holzbalken: Es lohnte sich in der Regel nicht, von einem aus einem Baumstamm gefertigten Balken mit rechteckigem Querschnitt mehr Holz als nötig wegzuschneiden, um Gewicht und Material zu sparen und die optimale Dimension zu erreichen – für normale Spannweiten würde dies lediglich einen Verlust an Sicherheit bedeuten.

Als interessanter Exkurs lohnt sich ein Blick zurück in die Zeit vor der Erfindung des Mauerwerksbogens, in der Stein oft zur Herstellung bisweilen sehr großer Balken verwendet wurde. In der Säulen-und-Balken-Architektur des antiken Griechenland gab es für große Spannweiten keine konstruktiven Alternativen zum Steinbalken. Hier



1 Querschnitte von steinernen Stürzen (Balken), Griechenland, 6.–4. Jh. v. Chr.



2 Steinbalken von der Insel Samothrake, Griechenland, 4. Jh. v. Chr.

spielte natürlich das Eigengewicht der Balken eine große Rolle: Man reduzierte das Material, um die größte Spannweite zu ermöglichen. Es sind mehrere große Steinstürze aus dem antiken Griechenland erhalten, die zeigen, wie das Eigengewicht soweit reduziert worden war, bis ein wirksamer Querschnitt blieb. Dabei wurde mehr Material in der unteren Hälfte des Balkens (in der Zugzone) belasen, wo es am notwendigsten war (Abb. 1). Bei einem aus dem 4. Jahrhundert v. Chr. erhaltenen Balken, der über 6 m lang ist und dessen Längsschnitt sich dem Biegemomentenverlauf annähert, wurde der Querschnitt im oberen Teil, in der Druckzone des Balkens, reduziert und unten vergrößert, wo der Stein unter Zugspannung steht (Abb. 2). Es ist zu bedenken, dass es keine Beweise dafür gibt, dass diese Balken ihre Form den Berechnungen von Biegemomenten verdanken oder dass sie Einfluss auf die spätere Entwicklung des Bauverständnisses hatten.

Die Herstellung von Tragwerken aus Gusseisen

Während Balken und Säulen aus Stein oder Holz hergestellt werden, indem Steinblöcke oder Baumstämme auf

die erforderliche Größe abgearbeitet werden, geschieht beim Gusseisen das Gegenteil – hier wird das Material bis zu der gewünschten Größe aufgebaut.

Dem Material Gusseisen sowie dem dazugehörigen Gießprozess ist es immanent, so wenig Material wie möglich einzusetzen und eine optimale Konstruktionsform zu suchen. Die enorme Bedeutung dieser grundsätzlich anderen Vorgehens- und Denkweise ist nicht zu unterschätzen, ebenso wie die Auswirkung, die sie auf die Entwicklung der bautechnischen Wissenschaft hatte.

Um beispielsweise eine Säule aus Gusseisen herzustellen, fertigt man zuerst Holzmodelle der zwei Hälften der Säule (vertikal geschnitten). Diese werden in zwei Sandformen eingebettet. Die Holzmodelle werden entfernt und die beiden Sandformen zusammengesetzt, sodass die Hohlform der Säule entsteht. Die Hohlform wird mit geschmolzenem Eisen (durch ein Loch an einem Ende) gefüllt. Nach dem Aushärten des Eisens wird die Sandform entfernt.

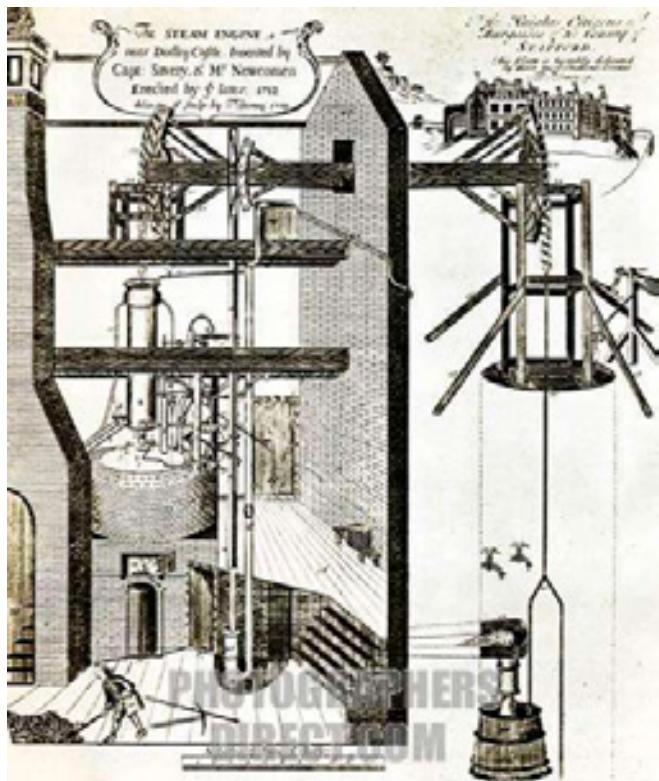
Die frühesten Säulen, die als architektonische Elemente eingesetzt wurden, waren massiv und hatten entweder einen konstanten runden Querschnitt oder einen Querschnitt mit einer leichten Verjüngung nach oben. Die ersten Säulen in den mehrstöckigen Industriegebäuden waren ebenfalls massiv, wiesen aber einen kreuzförmigen Querschnitt auf, andere verjüngten sich leicht nach oben und nach unten – vergleichbar mit der Entasis griechischer Säulen.

In den späten 1790er-Jahren wurde ein neues Gießverfahren erfunden, mit dem hohle runde Säulen hergestellt werden konnten. Bei diesem Herstellungsprozess befand sich innerhalb der hohlen Sandform ein zylindrischer »Kern« von starrem, verdichtetem Sand, der beim Gießen im Inneren des Gusseisenlements eingeschlossen wurde. Nach dem Auskühlen der Säule wurde diese aufgebrochen und der Kern entfernt. Mit einem rohrförmigen Querschnitt konnte das gleiche Trägheitsmoment (I) und auch die gleiche Druck- und Knickfestigkeit erreicht werden wie bei massiven Säulen, jedoch unter Verwendung von deutlich weniger Gusseisen.

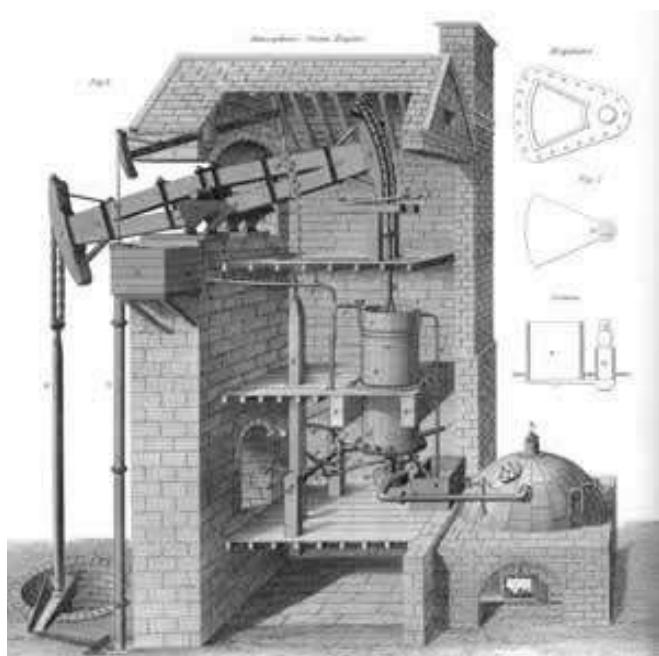
Die Ursprünge der strukturell effizienten Balken und Stützen

Der Bedarf an effizienten Konstruktionen bei der Verwendung von Eisen entstand zuerst im Zusammenhang mit dem Bau einer neuen Art von Maschine in der Mitte des 18. Jahrhunderts, der Dampfmaschine. Diese musste weit größeren Kräften standhalten als ältere Maschinen, die von Hand, Wind oder Wasser angetrieben wurden.

Die erste funktionierende Dampfmaschine wurde von Thomas Newcomen im Jahre 1712 gebaut, um Wasser aus Minen abzupumpen (Abb. 3). Sie bestand aus einem Dampfzylinder, der an einem Ende eines Holzbalkens zog,



3 Newcomens erster mit Dampf betriebener Pumpen-Motor mit einem geraden Holzbalken, 1712



4 Eine Newcomen-Maschine aus den frühen 1730er-Jahren mit einem verstärkten Holzbalken

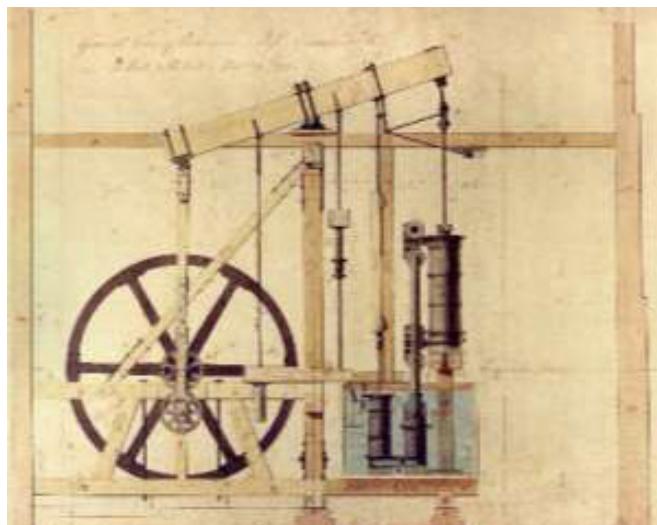
der über 6 m lang war und wie eine Wippe mittig aufgela-
gert war. Am anderen Ende des Balkens war eine Holz-
oder Eisenstange befestigt, die den Kolben der Pumpe,
die tief unten in den Schacht reichte, hochzog. Der Balken
wurde daher beim Pumpen aufgrund der Kräfte an beiden
Enden auf Biegung beansprucht.



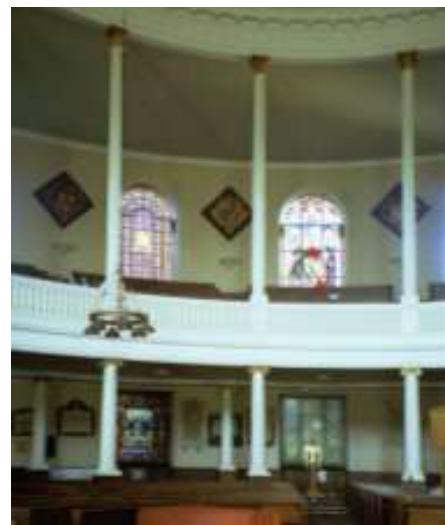
5 Boulton und Watts Dampfmaschine mit einem mit Eisenstangen
verstärkten Holzbalken, 1777



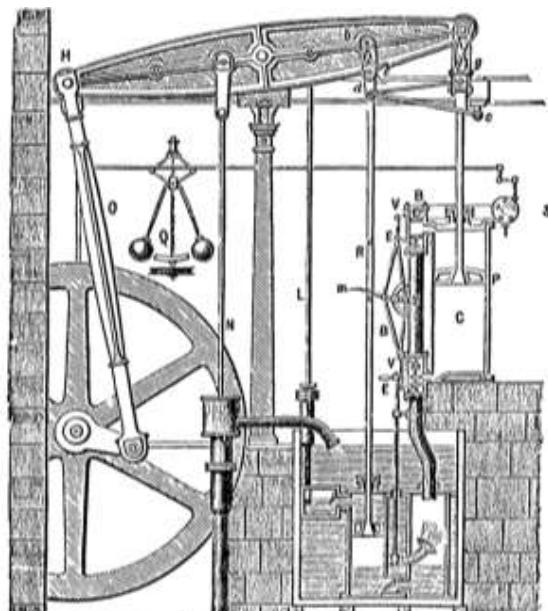
6 Boulton und Watts Dampfmaschine für Pumpen mit gusseisernem
Balken, 1812



7 Watt nutzte seine Sonnen- und Planetengetriebe, um eine Drehbewegung zu erreichen; die vertikale Pleuelstange musste Spannungen und kleine Druckkräfte aushalten, 1781



9 Runde Säulen in St. Chad, Shrewsbury, 1791–92



8 Watts »Double action«-Dampfmaschine, 1784, mit Balken und Pleuelstange aus Gusseisen, die Pleuelstange mit kreuzförmigem und in der Mitte verstärktem Querschnitt



10 Pont y Cefnau, Südwales, 1793, »Die älteste erhaltene Eisenbahnbrücke der Welt«

Als die Leistung der Motoren gesteigert wurde, wurde der Balken das schwache Glied in der Kette. Seit den 1730er-Jahren wurden einige Balken durch die Vergrößerung des Querschnittes in der Feldmitte verstärkt (Abb. 4).

Als sich die Leistung der Dampfmaschinen noch weiter erhöhte, musste der Balken weiter verstärkt werden. Im Jahre 1777 verwendeten die Ingenieure Boulton und Watt Eisenstangen, um den Holzbalken zu verstärken (Abb. 5). Ab 1800 wurden üblicherweise gusseiserne Balken verwendet (Abb. 6, 8).

Um 1780/81 hatten Boulton und Watt die Idee, die Hin-und-her-Bewegung des Kolbens in eine Drehbewegung umzuwandeln, die die Maschinen in einer Fabrik über Riemenscheiben und Riemen antreiben könnte. Das erste Modell verwendete eine starre, hölzerne Pleuelstange, die den Balken der Dampfmaschine mit dem Schwungrad, das die Energie speicherte und die Bewegung zwischen den Hüben des Kolbens glättete, verband (Abb. 7). Zwei Jahre später entwickelte Watt die »Double action«-Dampfmaschine, in der der kondensierende Dampf



11 North Mill, Belper, von W. Strutt, 1804, uniforme, kreuzförmige Säulen, identisch mit Säulen in Strutts Fabriken in Derby und Milford (1793)



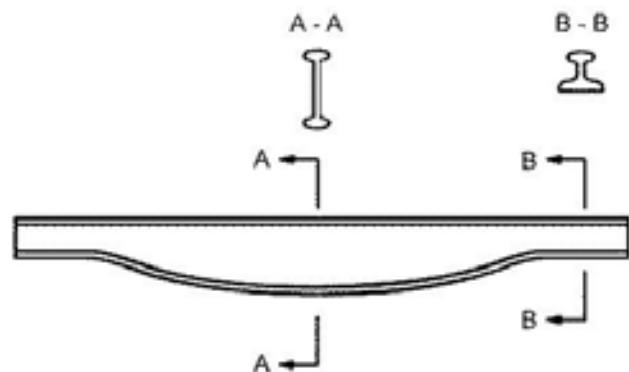
12 Castle Foregate Mill, Shrewsbury, von Charles Bage, 1796, kreuzförmige Säulen mit doppelter Verjüngung

den Kolben alternativ nach oben und unten zog. Als Folge der erhöhten Leistung und der wechselnden Kräfte war Holz nicht mehr für die Pleuelstange geeignet. Der Balken und die Pleuelstange wurden linsenförmig (sich verjüngend) ausgebildet und aus Eisen gefertigt; zudem hatte die Pleuelstange einen kreuzförmigen Querschnitt (Abb. 8).

Die Verwendung gusseiserner Säulen in Gebäuden
 Die früheste Anwendung gusseiserner Säulen in der Architektur erfolgte mit dem Ziel, schlankere Bauelemente zu schaffen (Abb. 9). Am Pont y Cafnau (1793) wurde das Gusseisen als Ersatz für Holz eingesetzt. Der Hohlquerschnitt der auf Druck belasteten Bauelemente hatte ein gutes Trägheitsmoment und war einfach zu gießen (Abb. 10).

Gusseiserne Säulen in mehrgeschossigen Fabriken wurden zuerst von William Strutt in Derby und Milford in den Englischen Midlands eingesetzt (1792–93), und erneut 1803 in der North Mill in Belper, etwa 10 km nördlich von Derby und Milford (Abb. 11). Die Säulen hatten kreuzförmige, über die gesamte Höhe gleichbleibende Querschnitte. Im Jahre 1796 verwendete William Bage gusseiserne Säulen in seiner Flachsspinnerei in Shrewsbury und bildete sie mit einer Verdickung auf halber Höhe aus (Abb. 12) – eine Lösung, die er zuvor bei den Pleuelstangen von Boultons und Watts Dampfmaschine gesehen hatte. Boulton und Watt und deren Maschinen waren Strutt und Bage bekannt.

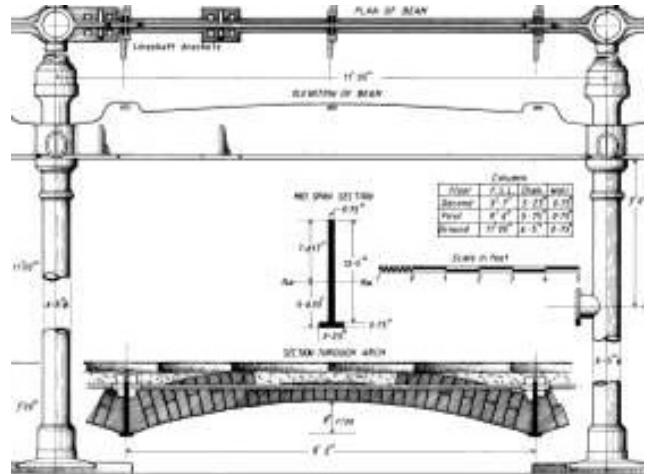
Bage konsultierte Strutt bei der Gestaltung seiner Fabrik, setzte Eulers Knickformel ein, um die Stärke der Säulen zu berechnen und nahm eine Last von 78 Tonnen an. Das entsprach etwa dem 2,5-fachen der Last, die die Säulen tatsächlich zu tragen hatten. Etwa so würde man noch heute die Last berechnen.



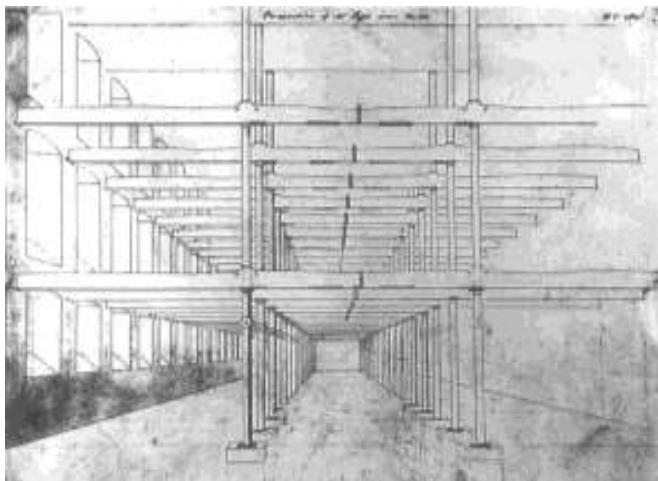
13 Gusseiserne Schiene von William Jessop, 91 cm lang, 1789



14 Castle Foregate Mill, Shrewsbury, von Charles Bage, 1796, die ersten gusseisernen Deckenbalken in Form eines »Hog-backs« mit invertiertem Y-Querschnitt



16 Armley Mills, Leeds, 1805, »Hog-back«-Balken und hohle Säulen



15 Fabrik in Salford, von Boulton und Watt, 1801

Hohle, röhrenförmige Säulen, die eine effizientere Verwendung des Eisens bedeuteten, wurden zum ersten Mal 1801 von Boulton und Watt in ihrer Spinnerei in Salford eingesetzt (Abb. 15); sie wurden schnell zur Norm und blieben für die nächsten siebzig Jahre Stand der Technik (vgl. z.B. Abb. 16), bis Gusseisen durch Walzstahl ersetzt wurde.

Die Verwendung gusseiserner Balken in Gebäuden

Die früheste Verwendung eines Fischbauchbalkens erfolgte im Zusammenhang mit dem Eisenbahnbau. William Jessop patentierte seine gusseiserne Fischbauchschiene im Jahre 1789. Sie fand weite Verbreitung (Abb. 13). Der Querschnitt dieser Schiene war symmetrisch – das heißt der untere Flansch und der obere Flansch des Balkens hatten die gleiche Form und Größe. Eigentlich war der Fischbauch keine ideale Form, da Gusseisen besser auf Druck als auf Zug belastbar ist. Der untere Flansch hätte

darum größer als der obere sein müssen. Jessop machte beide gleich groß, weil der obere Flansch auch dem Druck der eisernen Wagenräder widerstehen musste.

Im Jahr 1789 wurde Jessop zum Ingenieur des Cromford-Kanals ernannt und seine Fischbauchschiene wurden für die Bahn genutzt, die den Kanal mit den naheliegenden Minen verband. Diese waren nicht weit von Belper und Milford entfernt, wo William Strutt einige Fabriken gebaut hatte (mit Säulen und Balken aus Holz). Strutt und Charles Bage kannten daher sicher die Schienen von Jessop, als sie ein paar Jahre später ihre Version der eisernen Fischbauchbalken (umgekehrt ein »Hog-back«-Balken) einsetzten.

Die Castle-Foregate-Fabrik von Charles Bage in Shrewsbury im Westen von England, war die erste, die gusseiserne (feuerfeste) Deckenbalken aufwies. Diese haben einen Querschnitt in Form eines umgekehrten Y; im Längsschnitt weisen sie die Form eines »Hog-backs« (Halbparabel) auf (Abb. 12, 14). Die Balken überspannten drei Spannweiten, von den Wänden aus über jeweils zwei Zwischensäulen.

Bage führte mit Unterstützung von William Strutt einige statische Berechnungen auf der Grundlage der einfachen Biegetheorie durch. Dass er diese Theorie verwendete, um die Form des Balkens zu rechtfertigen, ist allerdings nicht belegt; er nutzte sie lediglich, um die Einzelspannweiten nachzuweisen [Skempton 1956].

Das zweite feuerfeste Gebäude mit eisernen Balken und Säulen war eine siebenstöckige Fabrik in Salford, die von Boulton und Watt zwischen 1799 und 1801 gebaut wurde (Abb. 15).

Boulton und Watt kannten Bage und seine Fabrik in Shrewsbury und übernahmen viele seiner Ideen. Sie machten jedoch einige wichtige Verbesserungen, zum Beispiel vergrößerten sie die Spannweiten und realisierten drei Spannweiten von 3,9 m statt vier Spannweiten von 2,9 m.



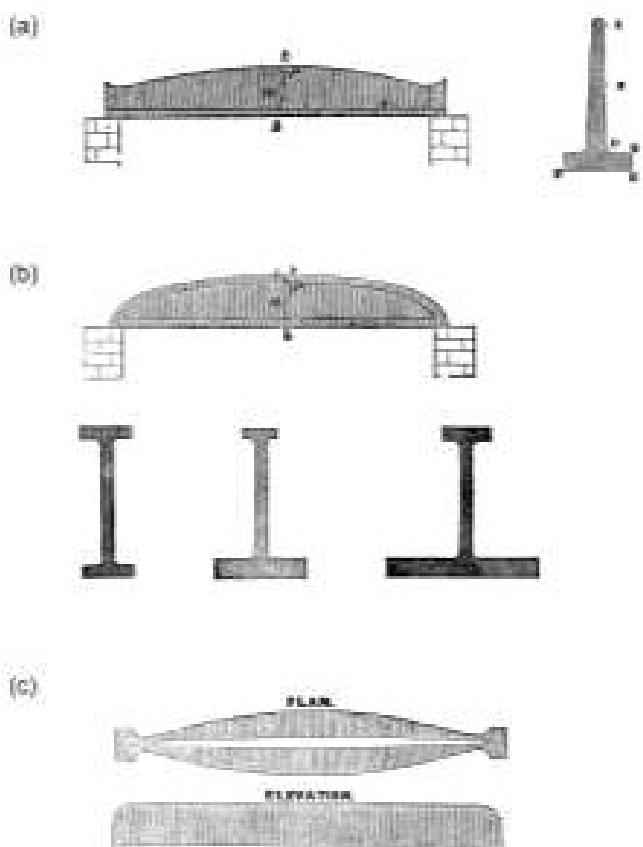
17 Beehive Mill, Manchester, 1824, typische gusseiserne primäre, sekundäre und tertiäre Fischbauchbalken mit T-Querschnitt

Wie in der Castle-Foregate-Spinnerei waren die Balken in Salford durchlaufend über die Säulen gelegt worden und ihre Tiefe spiegelte den Grad der Biegebelastung, der sie ausgesetzt waren. Wie in Shrewsbury gab es in Salford keine Rahmen-Tragwirkung von Etage zu Etage; die röhrenförmigen, hohen Säulen waren einfach aufeinandergestellt worden. Der Querschnitt der Balken war ein invertiertes T.

In den folgenden zwanzig Jahren wurden viele Hundert solcher Gebäude errichtet, wobei die grundlegenden Ideen vielfach variiert wurden. Noch bis Mitte der 1820er-Jahre wurden jedoch Balken ohne Flansche auf der unteren Seite ausgeführt. Viele dieser Bauten sind heute noch erhalten (Abb. 17).

Als sich die Zahl der neuen Fabrikbauten erhöhte, wurde dem Ingenieur William Fairbairn klar, dass sich erhebliche wirtschaftliche Vorteile ergeben könnten, wenn man Form und Abmessungen gusseiserner Balken sorgfältig studieren würde, um die optimale Nutzung des Gusseisens zu ermitteln. Fairbairn brachte nicht nur gute Voraussetzungen mit, um diese Studien zu betreiben, sondern auch, um davon zu profitieren, denn er besaß und leitete das damals wahrscheinlich größte Gusseisenwerk der Welt in Manchester. Er selbst war kein wissenschaftlich ausgebildeter Ingenieur und arbeitete mit Eaton Hodgkinson, Professor am Manchester Mechanics Institute, zusammen, um eine Reihe von Experimenten zu planen und auszuführen. Ziel war es, ein für allemal den optimalen Quer- und Längsschnitt für einen gusseisernen Balken zu ermitteln.

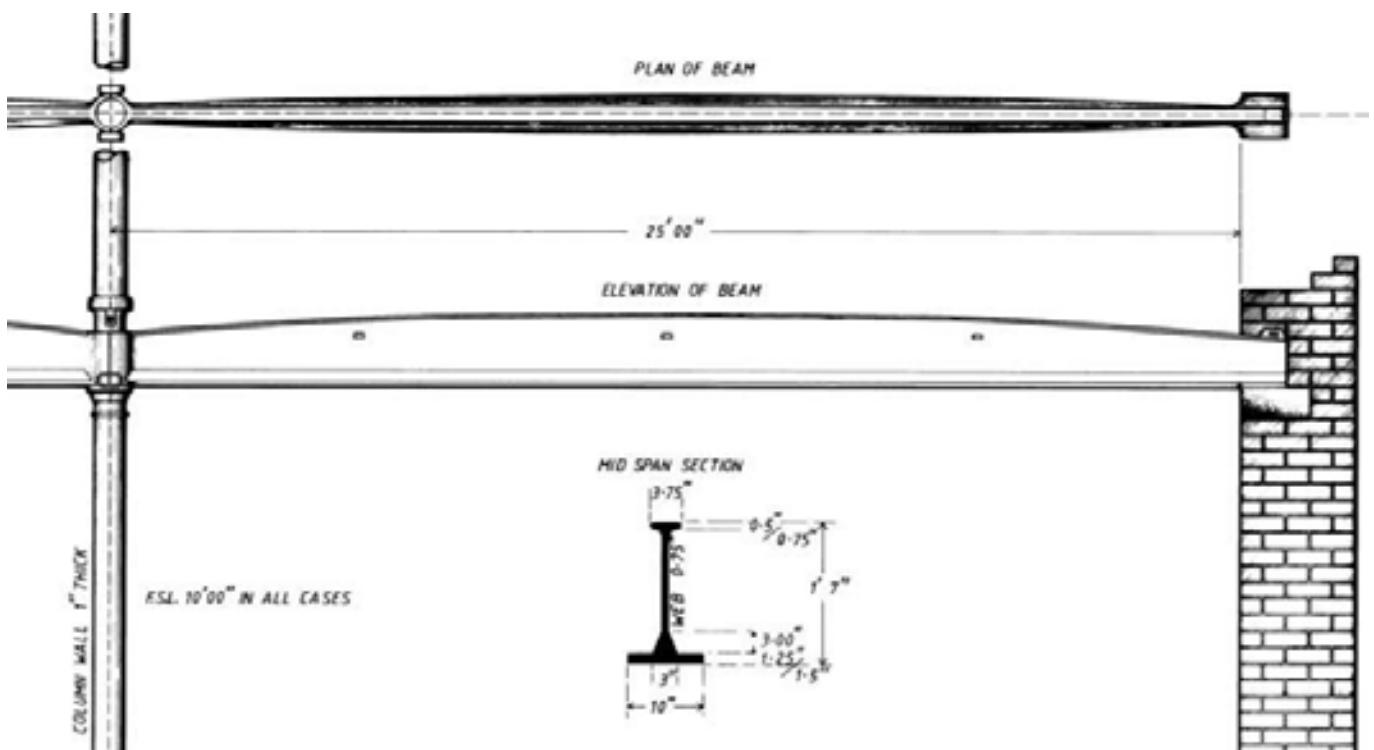
Seit einigen Jahren hatte Hodgkinson ein besseres, allgemeines mathematisches Modell für das Biegeverhalten eines Balkens mit einem bestimmten Querschnitt und bestimmten Abmessungen gesucht. Das Modell sollte das beobachtete Verhalten der Balken erklären und es somit ermöglichen, sowohl die Durchbiegung unter Last als auch die Bruchlast vorherzusagen. Hodgkinson und Fair-



18 Skizzen von gusseisernen Balken, Eaton Hodgkinson und William Fairbairn, 1826–30

bairn unternahmen in den 1820er-Jahren Versuche mit Dutzenden verschiedenen Balkenformen und -größen, sowohl im elastischen Bereich als auch bis zu Bruch (Abb. 18). Als Folge dieser Studien war Hodgkinson auch der erste, der schlüssig nachweisen konnte, dass die neutrale Achse im Schwerpunkt des Querschnitts liegt [Hodgkinson 1831]. So konnte Hodgkinson die wirtschaftlichste Anordnung von Gusseisen in einem Balken ermitteln. Der Querschnitt sollte ein umgekehrtes T sein, aber mit zwei Flanschen – der untere hatte den Zug unter normaler Belastung, der obere die Drucklast zu tragen und das Biegedrillknicken im oberen Teil des Querschnitts zu verhindern. Die zwei Flansche sollten ein Flächenverhältnis von etwa 1:6 haben – das umgekehrte Verhältnis der Festigkeiten von Gusseisen bei Druck und Zug. Im Längsschnitt sollte die Form den Biegemomentverlauf spiegeln und zu den Enden sollte die Höhe des Balkens wieder größer werden, um die größeren Scherkräfte zu tragen.

Fairbairn war bald in der Lage, Balken mit 20–30% weniger Eisen als zuvor herzustellen. Das Gebäude, in dem er den neuen rationalen Balken das erste Mal einsetzte, war die Orrell-Spinnerei in Stockport in England im Jahre 1834 (Abb. 19). So wie der asymmetrische I-Querschnitt folgt der



19 Orrells Mill, Manchester, von William Fairbairn, 1834, »Hog-back«-Balken mit 7,5 m Spannweite, I-förmiger Querschnitt mit Flanschverjüngung von der Mitte zu den Enden [Fitzgerald 1988]

Balken der Form eines »Hog-backs« (nach dem Biegemoment). Auch der Grundriss des Profils folgt dieser Form, um das Biegeknicken zu verhindern.

Ein letzter Schritt in der Geschichte des Gusseisens und seiner strukturellen Geometrie wurde in der Mitte der 1840er-Jahre vollzogen, als George Baker zum ersten Mal den H-Querschnitt für eine Säule nutzte. Diese verwendete er für eine Reihe von Schuppen, die er zur Überdachung von Trockendocks, in denen Schiffe gebaut oder repariert wurden, errichtete (Abb. 20) [Sutherland 1999].

Resümee

Obwohl in der Theorie ein ausreichendes Verständnis des strukturellen Verhaltens von Balken (vor 1700) und von Säulen (vor 1750) existierte, begann dieses erst dann einen Einfluss auf den Entwurf dieser Bauelemente zu haben, als Gusseisen ab den 1770er-Jahren zunächst in Dampfmaschinen und später in Gebäuden und Brücken die traditionellen Materialien ersetzte.

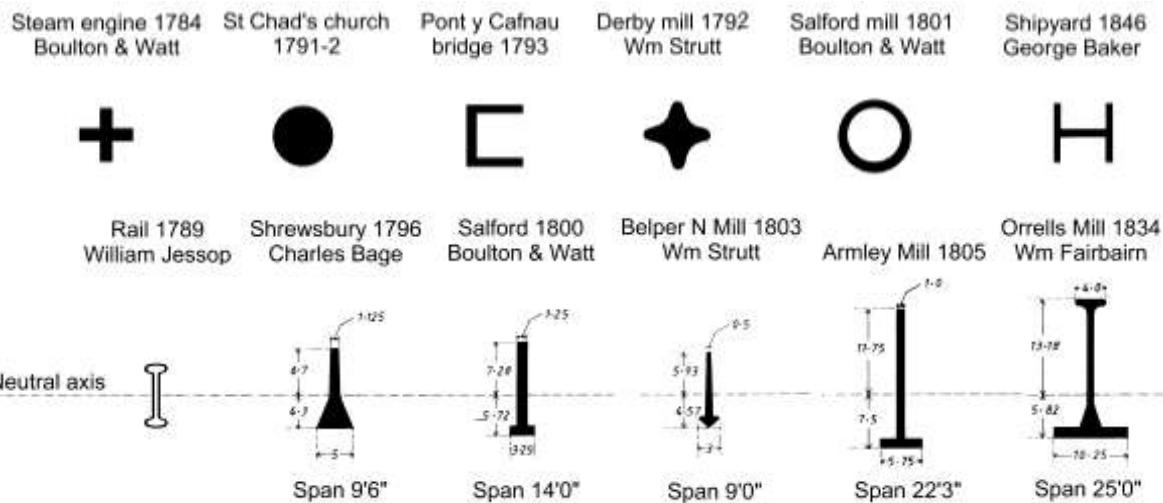
Die Formentwicklung, die in der Reihe von Querschnitten in Abb. 21 zusammengefasst ist, erzählt eine bemerkenswerte Geschichte. Sie markiert die Geburtsstunde der modernen Bautechnik.

Der Einsatz experimenteller Erprobung und aktueller wissenschaftlicher Kenntnisse zur Materialfestigkeit mündete in Kosteneinsparungen sowie in zusätzlicher Sicher-



20 Gusseiserne Säulen mit H-Querschnitt im Olympia Warehouse, London, von George Baker, 1846

heit, sodass Tragwerksentwerfer gewonnen werden konnten, die neue strukturelle Geometrien für den optimalen Einsatz des neuen Materials entwickelten. Dieser neue Ansatz zur Gestaltung der Tragwerke wurde schnell von Planern eiserner Dachstühle und ab Mitte der 1840er-Jahre von Planern von Eisenbahnbrücken aufgenommen.



21 Querschnitte von Balken, Säulen und Stützen aus Gusseisen, 1784–1846

Literatur

- [Addis 1990]: Addis, W.: Structural Engineering – the Nature of Theory and Design. Chichester: Ellis Horwood 1990.
- [Addis 1999]: Addis, W. (Hg.): Structural and Civil Engineering Design. Vol. 12 of the series »Studies in the History of Civil Engineering«. Aldershot: Ashgate (Variorum) 1999.
- [Addis 2007]: Addis, Bill: Building: 3000 years of Design, Engineering and Construction. London und New York: Phaidon 2007.
- [Addis 2010]: Addis, Bill: »The Iron Revolution: How iron replaced traditional structural materials between 1770 and 1870«, in: Rinke, M.; Schwartz, J. (Hg.): Before Steel, Zürich: Niggli 2010, S. 3–48.
- [Fitzgerald 1988]: Fitzgerald, R.: »The Development of the Cast Iron Frame in Textile Mills to 1850«, in: Industrial Archaeology Review, 10, No. 2 (Spring), 1988, S. 127–145. Reprinted in: Sutherland 1997.
- [Hodgkinson 1831]: Hodgkinson, E.: »Theoretical and Experimental Researches to ascertain the Strength and Best Form of Iron Beams«, Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester, 2nd series, Vol. 5, 1831, S. 407–544.
- [Skempton/Johnson 1952]: Skempton, A.W.; Johnson, H.R.: »The first iron frames«, Architectural Review, Vol. 131, March 1952, S. 175–186. Reprinted in: Sutherland 1997.
- [Skempton 1956]: Skempton, A.W.: »The origin of iron beams«, Actes du VIII^e Congrès International d'histoire des sciences, Florenz, 3–9 September, 1956, S. 1029–1039. Reprinted in: Addis 1999.
- [Sutherland 1997]: Sutherland, R. J. M. (Hg.): Structural Iron 1750–1850, Vol. 9 of series »Studies in the History of Civil Engineering«. Aldershot: Ashgate (Variorum) 1997.

1. Jahrestagung der Gesellschaft für Bautechnikgeschichte in Aachen 2013

Bestandsaufnahme

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Trautz
Lehrstuhl für Tragkonstruktionen
RWTH Aachen, Fakultät für Architektur



Impressum

Aachen 2016

© Lehrstuhl für Tragkonstruktionen
RWTH Aachen, Fakultät für Architektur
© Texte: Autoren

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Trautz
Lehrstuhl für Tragkonstruktionen
RWTH Aachen, Fakultät für Architektur

Redaktion

Rolf Gerhardt, Martin Trautz

Gestaltung

Lehrstuhl für Tragkonstruktionen
RWTH Aachen, Fakultät für Architektur

Lektorat und Satz

Tanja Bokelmann

Gefördert durch Mittel der
Gesellschaft für Bautechnikgeschichte e.V.

ISBN 978-3-00-052737-1