

1 Entwicklung der Eisen- und Stahlbauweise

1.1 Eisen- und Stahlbauweise – ein historischer Abriss

Stein und Holz waren in der Antike und im Mittelalter die bevorzugten Baumaterialien. Die industrielle Revolution wirkte hauptsächlich ab Mitte des 19. Jahrhunderts als Triebkraft für die Anwendung von Eisen bzw. Stahl im Bauwesen. Eisen war der Menschheit in Form des Meteoriteneisens seit etwa 6000 Jahren bekannt. Eisen kommt in der Natur nicht in reiner Form vor, sondern nur in Verbindung mit anderen Elementen, insbesondere mit Sauerstoff als Eisenoxid. Die Eisengewinnung aus Eisenerzen und damit die Anwendung dieses Materials erfolgt seit etwa 3000 Jahren und ist durch Funde aus jener Zeit belegt (Lanzenspitzen, Beile u. Ä.).

Eisenerze sind mit Gestein vermischte Eisen-Sauerstoff-Verbindungen und kommen hauptsächlich als Brauneisenstein, Magnet-eisenstein, Roteisenstein und Spateisenstein vor. Die Eisenerze werden zunächst gebrochen, gemahlen bzw. gesiebt und vom Gestein getrennt (Erzaufbereitung). Durch Schmelzen wird dann Roheisen gewonnen.

Ursprünglich wurde das Eisen in Gruben oder niedrigen Schachtöfen aus Lehm und Bruchstein bzw. Findlingen aus dem Eisenerz mit Holzkohle und bei Naturluftzug erschmolzen. Im späten Mittelalter entstand daraus der Stückofen für die Eisenverhüttung, der bereits mit einem Blasebalg (später mit Wasserkraft) betrieben wurde. Das Produkt war ein schlackendurchsetzter teigiger Klumpen schmiedbaren Eisens (Luppe). Es stand aber nur in kleinen Mengen für Werkzeuge und Waffen zur Verfügung, spielte im Bauwesen also noch keine Rolle.

Ein bedeutender Schritt gelang um das Jahr 1400. Das Roheisen wurde im Hochofen gewonnen, durch die bessere Ausnutzung der Wärme erstmals nicht als teigiger Klumpen (Luppe), sondern im flüssigen Zustand. Seit jener Zeit erlangte der Eisenguss in Europa große Bedeutung (Kugelguss, Röhren, Glocken, Öfen- und Kaminplatten, Roste, Gewichte). Bereits im Mittelalter erkannte man die Vorzüge dieses neuen Baustoffs auch im Bauwesen.

Für Dachtragwerke waren gemauerte Bogenkonstruktionen typisch. Zur Aufnahme der Horizontalkräfte dienten häufig eiserne Zugbänder. Ein typisches Beispiel aus dieser Zeit sind die um das Jahr 1218 erstmals fertiggestellten und in der heutigen Form seit dem Jahr 1420 erhaltenen Markthallen im Palazzo della Ragione in Padua (Bild 1.1). Michelangelo umspannte die im Jahr 1590 fertiggestellte Kuppel des Petersdoms in Rom mit zwei geschmiedeten Eisenringen. 150 Jahre später hatte die Kuppel große Risse und drohte auseinanderzubrechen. Zur Aufnahme der Zugkräfte wurden fünf weitere Eisenketten (Zugringe) um die Kuppel gelegt, siehe dazu [1.2] und [1.19].



Bild 1.1 Eiserne Zugbänder in der Markthalle von Padua

Das flüssige Roheisen hat einen Kohlenstoffgehalt von ca. 2 bis 5 %, schmilzt bei relativ niedriger Temperatur, ist jedoch nicht schmied- und schweißbar und kommt in zwei Sorten vor: als weißes Roheisen (Kohlenstoff chemisch gebunden) und als graues Roheisen (Kohlenstoff teilweise frei). Graues Roheisen wird durch mehrmaliges Umschmelzen gereinigt und ergibt *Gusseisen*. Bestens geeignet war das Gusseisen für die Herstellung von Druckgliedern. Gussstützen konnten wesentlich schlanker sein als herkömmlich gemauerte Pfeiler (Bild 1.2). Wegen der leichteren Formbarkeit ließen sich vielfältige Querschnittsformen und Oberflächen gestalten. Durch das Angießen von Kapitellen im oberen und von Füßen im unteren Bereich erfolgte eine gute Lastein- und -weiterleitung. Gusseisen kann bei Stößen und Erschütterungen leicht brechen (spröde), und die Gestaltung von Trägeranschlüssen war schwierig.

Die Verwendung von Gusseisen für Stützen war am Ende des 19. Jahrhunderts allerdings nur noch dann zu rechtfertigen, wenn Querschnitte und Formen gefordert waren, die mit *Schmiedeeisen* nicht realisiert werden konnten. Man ging häufig dazu über, schmiedeeiserne Stützen einzusetzen, bei denen nur noch Kopf und Fuß aus Gusseisen hergestellt wurden.

Die Möglichkeiten der industriellen Fertigung von Glas im 19. Jahrhundert führte zu einer Kombination mit dem Baustoff Eisen. Das imposanteste Bauwerk dieser Zeit war der Kristallpalast von London (Bild 1.3), gebaut von Joseph Paxton für die Weltausstellung im Jahr 1851. Dieses riesige Gebäude bestand aus einer 563 m langen und 124 m breiten abgestuften rechteckigen Haupthalle, die von einem hohen gewölbten Querschiff (Tonnenengewölbe) zweigeteilt war. Die vertikalen Tragwerkelemente waren hohle, runde Gusseisenstützen mit einer Länge von 14,5 Fuß (4,4 m) bis 20 Fuß (6 m), der Außendurchmesser betrug bei allen Stützen 8 Zoll (20 cm), je nach Belastung variierte die Wandstärke. Die horizontalen Tragwerkelemente waren in Gusseisen bzw. in Schmiedeeisen ausgeführte Fachwerkträger. Die Gebäudehülle bestand vollständig aus Glas. Insgesamt wurden 83.200 m² Glas für die Außenwände und die Dacheindeckung, 3.500 t Gusseisen und 530 t Schmiedeeisen verbaut. Nähere Angaben zum Bauwerk sind in [1.14] und [1.15] zusammengestellt. Nach der Weltausstellung erfolgte die Demontage des Gebäudes und ein Wiederaufbau an anderer Stelle. Das Bauwerk wurde im Jahr 1936 durch einen Brand vollkommen zerstört.

Die Umwandlung des weißen Roheisens in *Stahl* besteht im Wesentlichen darin, dass der hohe Kohlenstoffgehalt des flüssigen Roheisens durch Bindung an Sauerstoff gesenkt wird, gleichzeitig werden dabei unerwünschte Gehalte der Eisenbegleiter (Phosphor, Schwefel, Stickstoff, Mangan, Silizium) vermindert. Dieser Vorgang wird als Frischen bezeichnet und war im Mittelalter und bis in das 18. Jahrhunderts hinein technisch nicht durchführbar. Der erste Koksofen in Deutschland – man verwendete Steinkohle und Koks als Brennstoff – wurde im Jahr 1796 in Gleiwitz angeblasen. Größere Mengen an Roheisen konnten jetzt zwar gewonnen, aber noch nicht in gleichem Maße durch Frischen in Stahl umgewandelt werden. Es sollte noch fast weitere 50 Jahre dauern, bis dies umfassend gelang. Eine der Schwierigkeiten bei der Stahlerzeugung lag nämlich darin, dass der Stahl nicht mit Steinkohle oder Koks in Berührung kommen durfte, da er dann Schwefel aufnahm und warmbrüchig wurde.

Mit der Einführung des Puddelverfahrens im Jahr 1784 durch Henry Cort (1824 in Deutschland erstmals angewandt) ließen sich diese Nachteile vermeiden. Bei diesem Verfahren wird der Kohlenstoff des flüssigen Roheisens bei ständigem Durchrühren

(Puddeln) durch die Flammgase einer Ofenfeuerung oxidiert. Die erreichte Temperatur reichte nicht aus, das Roheisen flüssig zu halten. Die entstehende teigige Masse teilte man in einzelne Luppen, die der weiteren Oxidation ausgesetzt wurden. Durch Ausschmieden ließ sich die Luppe von Schlacke befreien. Letztendlich wurden die Luppen unter dem Hammer noch in teigigem Zustand zum sogenannten Puddelstahl „zusammengeschweißt“. Das auf diese Weise hergestellte Eisen gab es in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt als *Schweiß Eisen* bzw. *Schweißstahl* [1.5]. Dieser Stahl ist nicht schweißbar, aber schmied- und walzbar. Die Anwendung des Puddelverfahrens konnte den steigenden Bedarf an Stahl jedoch nicht befriedigen (Leistung 4,5 Tonnen pro Tag). Im Jahr 1855 gelang es dem Engländer Henry Bessemer auf einfachere Weise Stahl herzustellen (Bessemer-Verfahren). Die Umwandlung des Roheisens in Stahl erfolgte in einem mit kieselsäurehaltigen feuerfesten Steinen ausgekleideten kippbaren Gefäß (Konverter oder Bessemer-Birne), in welches das Roheisen flüssig eingefüllt wurde. Der auf diese Weise erzeugte Stahl erhielt deshalb die Bezeichnung *Flusseisen* bzw. *Flussstahl*. Das Bessemer-Verfahren wurde im Jahr 1862 von Alfred Krupp in Deutschland eingeführt. Komprimierte Luft wird unter Aufrichten des Konverters durch den Siebboden von unten durch das Roheisenbad hindurchgeblasen, was eine schnelle Oxidation des Kohlenstoffs und der Eisenbegleiter (Si, Mn) bewirkt.

Wegen des sauren Futters im Konverter konnte nur phosphorarmes Roheisen (0,1 % P) verarbeitet werden, da Phosphorsäure nicht vom sauren Futter gebunden werden kann. Diesen Nachteil löste Sidney Thomas im Jahr 1879 durch Ausfütterung des Konverters mit Kalk (Konverter mit basischem Futter werden nach ihm Thomas-Birne genannt), so dass auch phosphorreiches Roheisen (1,9 bis 2,7 % Phosphor) verarbeitet werden konnte. Beide Konverter-Verfahren (Bessemer- und Thomas-Verfahren) erzeugen Stahl in schmelzflüssigem Zustand – eben Flussstahl. Im Jahr 1895 wurde der erste Flussstahl in Deutschland nach dem Thomas-Verfahren erzeugt. In [1.3] ist eine Übersicht der chemischen Zusammensetzung von historischen Stählen angegeben (siehe Tabelle 1.1).

Beim Thomas-Verfahren verbrennt von allen Nebenbestandteilen Phosphor zuletzt, man erhält ein fast entkohltes Eisen, welches aber durch Zugabe von Spiegeleisen „zurückzuholen“ ist. Sowohl

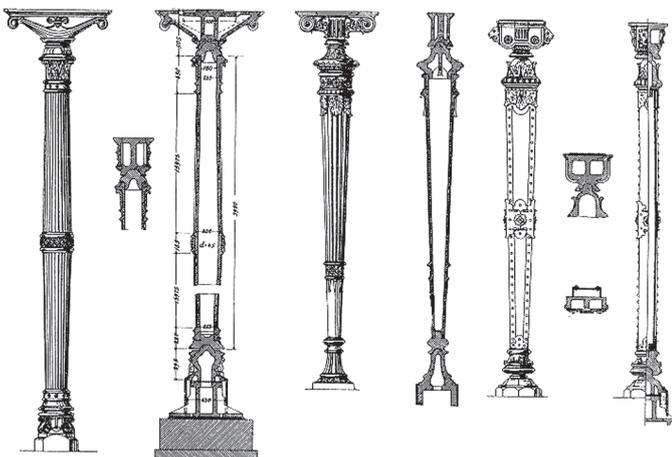


Bild 1.2 Beispiele für gusseiserne und schmiedeeiserne Stützen nach [1.4]



Bild 1.3 Kristallpalast in London, erbaut 1851

Tabelle 1.1 Übersicht der chemischen Zusammensetzung von Altstahl [1.3]

Historische (Profil-) Stähle nach der Herstellung	Legierungsgehalt in Masse-%					
	C	Si	Mn	P	S	N
Puddelstahl – im Mittel	0,025	0,147	0,213	0,396	0,061	0,009
Flussstahl – im Mittel	0,070	0,020	0,471	0,043	0,042	0,010
Flussstahl – Bessemer Verfahren	0,094	0,101	0,491	0,047	0,047	0,014
Flussstahl – Thomas Verfahren	0,048	0,009	0,462	0,051	0,044	0,014
Flussstahl – Siemens Martin Verfahren	0,090	0,008	0,477	0,035	0,038	0,005
zum Vergleich heutiger unlegierter Baustahl S235 nach der Stückanalyse						
DIN EN 10025: 1990						
S235JRG2 – t ≤ 40 mm	0,190	–	1,500	0,055	0,055	0,011
S235JRG2 – t ≤ 40 mm	0,230	–	1,500	0,055	0,055	0,011

beim Bessemer-Verfahren als auch beim Thomas-Verfahren wirkte das Hindurchblasen von komprimierter Luft ungünstig. Der Luftstickstoff steigerte die Sprödebruch- und Alterungsempfindlichkeit dieser Stähle.

Ein weiteres Verfahren zur Stahlerzeugung war das Flammofenfrischen (Herdfrischen). Diese Ära begann 1864 und wurde nach den Entwicklern Siemens-Martin-Verfahren genannt. Das Verfahren beruhte auf dem Zusammenschmelzen von etwa 15 bis 30 % Roheisen und 85 bis 70 % Schrott in einem Flammofen mit muldenförmigem Herd. Die Oxidation der Eisenbegleiter erfolgte dabei einerseits durch die Frischewirkung der heißen Flamme, die durch die Siemenssche Regenerationsfeuerung erreicht wurde, und andererseits durch den am Schrott anhaftenden Rost bzw. sauerstoffabgebende Zuschläge (z. B. Erz). Die hohen Temperaturen (1.600 °C bis 1.700 °C) wurden durch eine Gasfeuerung erzielt. Dieses Verfahren eignete sich für Roheisen mit wenig oder mäßigem Phosphorgehalt. In Deutschland gingen die ersten Siemens-Martin-Öfen 1868/69 in Essen bei Alfred Krupp und in Berlin in Betrieb.

Ein weiteres Flammofenverfahren ist das Tiegelschmelzverfahren, es besaß allerdings nur eine untergeordnete Bedeutung. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts konnte man also Stahl in

brauchbaren Qualitäten und in großen Mengen herstellen. Nach dem Frischeverfahren (Stahlherstellungsverfahren) erhalten die Stähle auch ihre Bezeichnung: Puddelstahl, Thomasstahl, Siemens-Martin-Stahl (früher) bzw. Elektro Stahl und Oxygenstahl (heute). Eine umfassende Zusammenstellung zur Entwicklung alter Stähle und Bauweisen mit vielen weiterführenden Literaturhinweisen ist in [1.24] angegeben.

Bei den Eisenkonstruktionen des Hochbaus kamen als Verbindungsmittel nur Nieten, Schrauben und Bolzen in Betracht. Insbesondere etablierte sich die Niettechnik. Das Zusammenschweißen von tragenden Bauteilen war aufgrund unzureichender bzw. unzuverlässiger Festigkeit der Schweißstelle verboten. Der Eiffelturm stellt ohne Zweifel einen Höhepunkt des Stahlfachwerkbbaus und der Nietkonstruktionen dar. Dieses Stahltragwerk, heute das Wahrzeichen der französischen Hauptstadt, wurde 1889 anlässlich der Pariser Weltausstellung aus über 7.000 Tonnen Eisen (im Puddelverfahren hergestellt) errichtet und war mit seinen 300 m Höhe lange das höchste Bauwerk der Welt. Der mit Hilfe eines Kletterkrans gebaute Turm wurde in nur zwei Jahren errichtet. 15.000 Stahlteile wurden mit ca. 2,5 Millionen Nieten verbunden. Die Bilder 1.4 a) bis c) zeigen das Bauwerk heute und während der Bauphase.



a)



b)



c)

Bild 1.4 Der Eiffelturm heute, am 27. April 1888 und im Juli 1888

Gleichzeitig gab es bereits eine gewisse Produktvielfalt an Walzstählen (Bleche und Flacheisen, Quadrat- und Rundeisen, Profileisen). Vom Verband Deutscher Architekten- und Ingenieurvereine, dem Verein Deutscher Ingenieure und dem Technischen Verein für Eisenhüttenwesen wurden seit dem Jahr 1880 die „Deutschen Normalprofile“ aufgestellt [1.1]. Daraus ergaben sich ungeahnte Möglichkeiten im Hoch- und Brückenbau. Heute sprechen wir vom Stahlbau bzw. von Stahltragwerken, bis 1928 hieß es Eisenbau bzw. Eisenkonstruktionen.

1906 hatte der Deutsche Verband für Materialprüfung in der amtlichen Kennzeichnung Flusstahl für Eisenwerkstoffe mit mindestens 420 N/mm² Zugfestigkeit und Fluss- und Schweißisen mit geringeren Festigkeiten festgelegt.

1925 fällt die Obmännerversammlung des Werkstoffausschusses einen Beschluss, nach dem „alles ohne Nachbehandlung schmiedbare Eisen als Stahl bezeichnet werden soll, dass aber gleichzeitig die handelsüblichen Bezeichnungen Formeisen, Stabeisen usw. beibehalten werden“ [1.16].

Mit den „Bestimmungen des preußischen Ministers für Volkswohlfahrt für den Eisenhochbau vom 25.02.1925“ wurde der hochwertige Baustahl St 48 eingeführt. Zwischen den Jahren 1926 und 1937 entwickelten die Stahlerzeuger insbesondere auf Wunsch der Deutschen Reichsbahn den Stahl St 52 [1.2].

Bis in die 1960er Jahre waren das Thomas- bzw. das Siemens-Martin-Verfahren bestimmend bei der Stahlerzeugung. Wegen des hohen Phosphor- und Stickstoffgehaltes konnte Thomas-Stahl die statischen Anforderungen einer ausreichenden Schweißbarkeit nicht erfüllen. Beim Siemens-Martin-Verfahren [1.6] lagen der Brennstoffbedarf und die Abstichzeiten relativ hoch. Der letzte Siemens-Martin-Ofen in Westeuropa befindet sich im Stahlwerk Brandenburg. Er wurde im Jahr 1993 stillgelegt und ist jetzt Teil eines Industriemuseums.

Seit dem Jahr 1950 setzten sich für die Stahlerzeugung das Sauerstoffaufblasverfahren (Oxygenstahl) und das Elektroofenverfahren (Elektrostahl) immer mehr durch. Im Jahr 1979 wurde Stahl in Deutschland wie folgt erschmolzen: 9,9 % Siemens-Martin-Stahl, 14 % Elektrostahl, 76,1 % Oxygenstahl [1.8]. Der Anteil des im Elektroofen erzeugten Stahls wurde in den folgenden Jahren

dann ausgeweitet. Im Jahr 2005 erfolgte die Rohstahlerzeugung zu 31,1 % mit dem Elektrostahlverfahren und zu 68,9 % mit dem Sauerstoffaufblasverfahren [1.10]. Beim Sauerstoffaufblasverfahren wird wegen der stürmischen Wärmeentwicklung in den schräg gestellten leeren Konverter zunächst Schrott als Kühlmittel eingegeben, danach das flüssige Roheisen. Anschließend wird der Konverter gerade gestellt und reiner Sauerstoff unter hohem Druck bis 12 bar von oben mit einer wassergekühlten Lanze eingeblasen. Beim Verbrennungsprozess, bei dem Temperaturen von 2.500 °C bis 3.000 °C entstehen, entweicht das sich bildende Kohlenmonoxid CO als Gas, die Verbrennungsprodukte der Begleitelemente Si, P und S gehen in die Schlacke.

Bei dem heute allgemein durchgeführten kombinierten Blasen wird von oben mit einer Lanze reiner Sauerstoff und zur besseren Durchspülung von unten durch Bodendüsen ebenfalls Sauerstoff oder Inertgas eingeblasen. Der so gewonnene flüssige Stahl wird im Anschluss daran vergossen.

Bis in die 1970er Jahre wurde der Stahl im sogenannten Blockguss in Dauerformen (Kokillen) vergossen. Heute wird in Deutschland zu 95 %; weltweit zu 80 % das wirtschaftlichere und zu besseren Stahlqualitäten führende Stranggießen angewendet [1.9]. Es schließt sich die Formgebung an; das wichtigste Verfahren ist hierbei das Warmwalzen.

Seit den 1960er Jahren wurden hochfeste Baustähle entwickelt und im beachtlichen Umfang im Behälterbau, Kranbau und für ausgewählte Projekte auch im Hochbau eingesetzt. Beispielsweise werden für Windenergieanlagen seit Jahren niedriglegierte hochfeste Sonderbaustähle mit Mindeststreckgrenzen bis 460 N/mm² eingesetzt. Beim Bau des Sony-Centers in Berlin fand ein Feinkornbaustahl S 690 QL 1 Anwendung. Auch Baustähle mit Mindeststreckgrenzen von 890 N/mm²; 960 N/mm² und 1.100 N/mm² sind bereits lieferbar und werden zunehmend eingesetzt. Nähere Angaben zu Herstellung, Eigenschaften und Anwendung sind in [1.20], [1.21] und [1.22] zusammengestellt. Bild 1.5 gibt einen Überblick über den zeitlichen Ablauf der Entwicklung hochfester Baustähle.

Jahr	Stahlgüte	Streckgrenze $f_{y,k}$ [N/mm ²]	Zugfestigkeit $f_{u,k}$ [N/mm ²]	
um 1900	Schweiß- und Flusseisen	≥ 220	320–400	
ab 1925	Flusstahl St. 37	≥ 235	335–470	
	hochw. Baustahl St. 48		480–580	
ab 1928	St. 52	≥ 355	520–620	nach DIN 4100
1957	St. 33		330–500	
	St. 37	≥ 235	370–450	
	St. 37 – 2	≥ 235	370–450	
	St. 37 – 3	≥ 235	370–450	
	St. 52 – 3	≥ 355	520–620	
Stand 1990	S 235 (t ≤ 40 mm)	≥ 240	≥ 360	nach DIN 18800-1 und DIN EN 10025
	S 235 (40 < t < 100 mm)	≥ 215	≥ 360	
	S 275 (t ≤ 40 mm)	≥ 275	≥ 410	
	S 275 (40 < t < 80 mm)	≥ 255	≥ 410	
	S 355 (t ≤ 40 mm)	≥ 360	≥ 510	
	S 355 (40 < t < 80 mm)	≥ 335	≥ 510	

Tabelle 1.2 Gängige Stähle in der Historie nach [1.3]

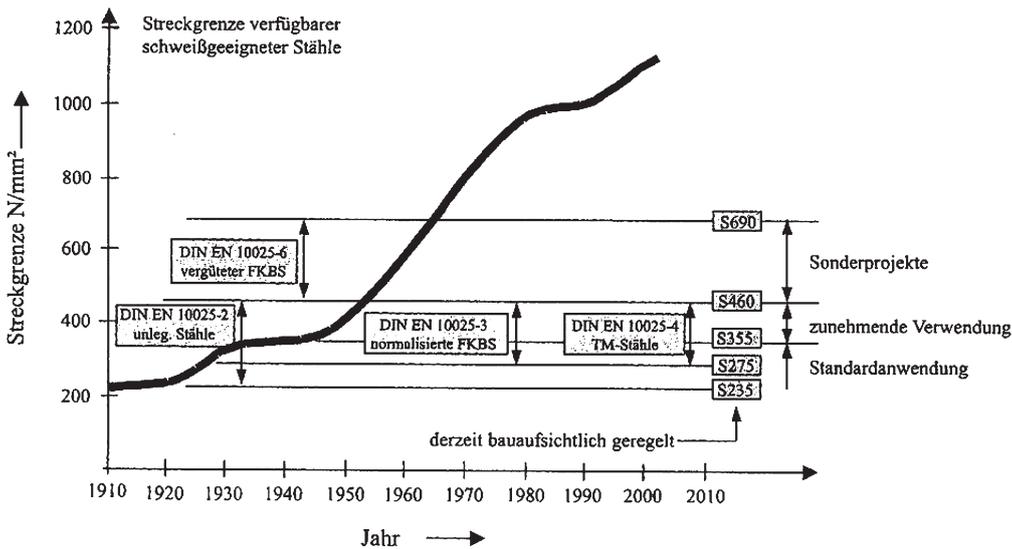


Bild 1.5 Entwicklung hochfester Baustähle [1.21]

1.2 Geschichtliche Entwicklung der Stahlbaunormung

Mit der Entwicklung des Baustoffs Stahl wurde es auch erforderlich, Regeln für die Planung und Ausführung von Stahlbauten aufzustellen. Aus dem Jahr 1893 stammen die „Normalbedingungen für die Lieferung von Eisenkonstruktionen für Brücken- und Hochbauten“, aufgestellt vom Verband Deutscher Architekten- und Ingenieur-Vereine unter Mitwirkung des Vereins Deutscher Ingenieure und des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute [1.5]. Die Tabellen 1.3 und 1.4 zeigen den Stand um das Jahr 1900. Dargestellt sind die zulässigen Spannungen für „Eisen“.

Eine Stahlbaunorm existierte also noch nicht. Als zulässige Beanspruchung für Schweiß- bzw. Flusseisen auf Zug und Druck wurden bis zu 1.000 kg/cm² (100 N/mm²) angesetzt, für die Schubbeanspruchung wurde mit dem 0,8-fachen Wert gerechnet. Diese höheren Werte mussten allerdings vereinbart werden. Sie wurden mit der Einführung der Walztechnik (Normalprofile) dann im Regelfall auch angesetzt.

Nach [1.8] kann als Beginn geregelter Bestimmungen der 31.01.1910 gelten, an dem die ministeriellen preußischen „Bestimmungen über die bei Hochbauten anzunehmenden Belastungen und die Beanspruchungen der Baustoffe und Berechnungsgrundlagen für die statischen Untersuchungen von Hochbauten“ erlassen wurden. Diese Regelung kannte eine obere und eine untere Grenze für die zulässige Beanspruchung des Baustoffs. Für den Baustoff Eisen (ein dem St 37 entsprechendes Flusseisen) galten

Tabelle 1.3 Zulässige Inanspruchnahme der Baumaterialien bei der Berliner Baupolizei nach [1.5]

Material	Zulässige Beanspruchung [kg/cm ²]		
	Zug	Druck	Abscherung
Schmiedeeisen	750	750	600
Flusseisen	875–1.000	875–1.000	–
Gusseisen	250	500	200
Bombiertes Eisenwellblech	500	500	–

beispielsweise als obere Grenze ein Wert von 160 N/mm² und als untere Grenze ein Wert von 140 N/mm². Diese Bestimmung war auch der Ursprung für die Einteilung in die Lastfälle „Hauptlasten“ (H) und „Haupt- und Zusatzlasten“ (HZ).

Mit den „Bestimmungen des preußischen Ministers für Volkswohlfahrt für den Eisenhochbau“ vom 25.02.1925 wurde in Preußen die zulässige Beanspruchung und Berechnung von Konstruktionsteilen aus Flusstahl und hochwertigem Baustahl im Hochbau festgelegt. Hier führte man für Stabilitätsnachweise die ω -Zahlen ein.

Bild 1.6 zeigt einen Auszug aus einer Statik jener Zeit. Untersucht wurde ein mittig belasteter Druckstab (horizontaler Windverbandsstab) mittels ω -Verfahren. Zum Einsatz kam ein Normalwalzprofil U 14, der Anschluss erfolgte mittels Nietverbindung. Infolge der Entwicklung der Schweißtechnik wurde 1931 DIN 4100 „Vorschriften für geschweißte Stahlhochbauten“ eingeführt. Im Jahr 1936 wurde DIN 120 „Berechnungsgrundlagen für Stahlbauteile von Kranen und Kranbahnen“ eingeführt. Die Gütebedingungen für Baustahl wurden in Normblättern geregelt und später durch DIN 17100 ersetzt, siehe [1.7].

Als Folgebestimmungen der Regelungen von 1925 wurde am 01.10.1934 DIN 1050 „Berechnungsgrundlagen für Stahl im Hochbau“ erlassen. Diese Norm führte den Baustahl St 52 ein und behielt sowohl die Einteilung der Lasten in Hauptlasten (H) und Haupt- und Zusatzlasten (HZ) als auch das Nachweiskonzept der zulässigen Spannungen bei. Damit wurde ein erster umfas-

Tabelle 1.4 Zulässige Inanspruchnahme der Baumaterialien im Bereich des Preußischen Ministeriums der öffentlichen Arbeiten (vom 16. Mai 1890) nach [1.5]

Material	Zulässige Beanspruchung [kg/cm ²]		
	Zug	Druck	Abscherung
Schmiedeeisen	750–1.000	750–1.000	600–750
Flusseisen	875–1.000	875–1.000	–
Gusseisen	250	500	200
Bombiertes Eisenwellblech	500	500	–

sender, für alle Länder gültiger Standard geschaffen. Die Neuausgabe dieser Norm im Jahr 1957 und im Juni 1968 ließ für Zug und Biegezug höhere Spannungen als in der früheren Fassung zu.

Beim Stabilitätsnachweis verwies DIN 1050 auf DIN 4114 Teil 1 und 2.

DIN 4114 „Knickung, Kippung, Beulung“ wurde im Juli 1952 (Blatt 1) bzw. Februar 1953 (Blatt 2) als Berechnungsgrundlage für Stabilitätsfälle im Stahlbau eingeführt.

Die Einführung von DIN 18800 Teil 1 in der Ausgabe vom März 1981 leitete die Neugliederung des Stahlbau-Normenwerkes in Grundnormen und Fachnormen (für bestimmte Anwendungsgebiete) ein. Die Einheiten wurden auf die heute gültigen SI-Einheiten umgestellt (kN/cm² anstatt kp/cm²). Die Bemessung erfolgte im Rahmen dieser Norm noch auf der Grundlage der zulässigen Spannung mit summarischem Sicherheitsfaktor. Außerdem behielt diese Normengeneration die Einteilung in Lastfälle gemäß DIN 1050 bei. Diese Fassung von DIN 18800 Teil 1 entstand im Wesentlichen aus der Zusammenfassung der Regelungen für die Bemessung und bauliche Durchbildung aus DIN 1050, DIN 1073, DIN 4100 und DIN 4101.

Die Einführung von DIN 18800 im November 1990 stellte den Wechsel vom lange angewandten Bemessungskonzept mit zulässigen Spannungen (summarischer, komplexer Sicherheitsfaktor) zum Bemessungskonzept mit Teilsicherheitsfaktoren dar. Dieses Konzept wurde bereits auf die zu erwartende europäische Normung abgestimmt. Durch die Weiterentwicklung der theoretischen Grundlagen (Europäische Knickspannungslinien, Nutzung plastischer Querschnittsreserven) und geänderte Stahlbauweisen waren DIN 4114 von 1952/53 und DIN 18800 von 1981 inhaltlich überholt.

Die zukünftigen vereinheitlichten europäischen Normen zur Bemessung und Ausführung im Stahlbau wurden als EC 3 in Form von Vornormen veröffentlicht und werden zur Zeit in EN-Normen überführt. In Deutschland werden sie als DIN-Normen bekannt gemacht.

1.3 Tragwerkselemente in der historischen Entwicklung

1.3.1 Gewalzte und genietete Träger

In der Mitte des 19. Jahrhunderts wurden für den Träger- und Deckenbau häufig alte Eisenbahnschienen verwendet. Ende des 19. Jahrhunderts (ab 1880) hatte die Walztechnik aber dann einen Stand erreicht, der es ermöglichte, Träger mit bis zu 550 mm Querschnittshöhe zu walzen (Deutsche Normalprofile). Infolgedessen fiel der Preis für Walzträgererzeugnisse; nach Angaben von [1.5] kostete 1 lfdm Eisenbahnschiene etwa 2 Reichsmark. Für diesen Preis erhielt man aber bereits einen I-Walzträger mit einer Höhe von 130 mm (NP 13). Gusseisen wurde im Trägerbau aufgrund ungleicher Materialbeschaffenheit und dargestellter Preisentwicklung nicht mehr verwendet.

Genietete Blechträger kamen dann zum Einsatz, wenn passende Walzträger, vor allem für größere Spannweiten oder größere Belastung, nicht zur Verfügung standen.

Der Steg wurde im Regelfall durch ein senkrechtes Blech gebildet, und die Gurtungen bestanden aus Winkeleisen, deren senkrechte Schenkel mit dem Steg durch Nieten verbunden wurden. Bei Bedarf wurden die Gurtungen durch aufgenietete Flacheisen

$$\begin{aligned}
 & \text{V. } 1 \text{ L N. P. 14} \\
 & I_{\min} = 62,7 \text{ cm}^4; \bar{F} = 20,4 \text{ cm}^2 \\
 & i = \sqrt{\frac{62,7}{20,4}} = 1,75 \\
 & s_k = 1,8 \text{ m} \\
 & \lambda = \frac{180}{1,75} = 103; \omega = 2,36 + 3 \cdot 0,05 = 2,51 \\
 & \bar{\sigma}_d = \frac{2,51 \cdot 7500}{20,4} = 925 \text{ kg/cm}^2 < 1000 \\
 & \text{Anschlüsse, 4 Nieten } 17 \text{ } \phi \\
 & \bar{F}_s = 7,26 \text{ cm}^2 \\
 & \bar{\tau} = \frac{7500}{7,26} = 1030 \text{ kg/cm}^2 > 1000. \\
 & \text{Der Verband in den kleineren Feldern hat dieselben Querschnitte.}
 \end{aligned}$$

Bild 1.6 Knickstabnachweis [1.27]

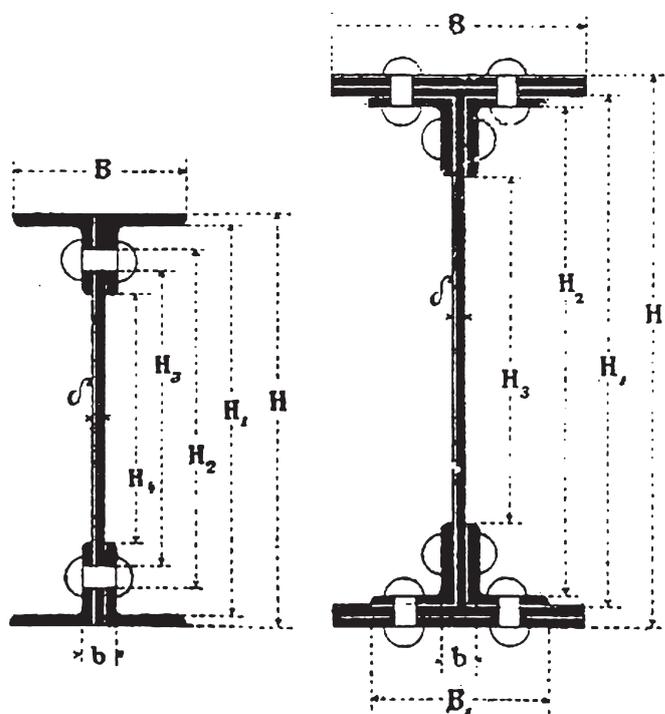


Bild 1.7 Beispiele für genietete Stahlträger [1.5]

(Kopfplatten) verstärkt. Die waagerechten und die senkrechten Nieten wurden gegeneinander versetzt angeordnet, damit eine Querschnittsschwächung durch mehr als zwei Nietlöcher in jedem Gurt vermieden werden konnte. War die zur Verfügung stehende Konstruktionshöhe zu gering, wurden Kastenträgerquerschnitte ausgeführt (Bild 1.8).

1.3.2 Stützen

Gusseiserne Stützen hatten meist einen kreisrunden Querschnitt, seltener kamen quadratische Querschnitte zum Einsatz (Bild 1.9). Infolge der geringen Zugfestigkeit setzte man sie bevorzugt bei mittiger Belastung ein. Der seitliche Trägeranschluss erfolgte hauptsächlich durch Konsolen.

Flusseiserne Stützen ermöglichten gute Trägeranschlüsse und waren für exzentrische Belastung gut geeignet. Die am häufigsten eingesetzten Querschnitte sind in Bild 1.10 zusammengestellt. Geschweißte Rohrquerschnitte (schmiedeeiserne Hohl-säulen) gab es in Längen bis ca. 5 m, mit einem Durchmesser von 317,5 mm und einer Wandstärke von 8 mm (Bild 1.10 a). Sehr gebräuchlich waren auch die aus Viertelkreis- bzw. Quadrateisen zusammengesetzten Querschnitte (Bilder 1.10 b, c). Deren Verwendung nahm zu, nachdem die Schwierigkeiten bei der Herstellung, insbesondere hinsichtlich des Preises, überwunden worden waren. Weiterhin wurden kastenförmige, kreuzförmige und aus I- und U-Profilen zusammengesetzte Querschnitte eingesetzt (Bilder 1.10 d–g). In einigen Walzwerken wurden Quadrateisenquerschnitte gewalzt.

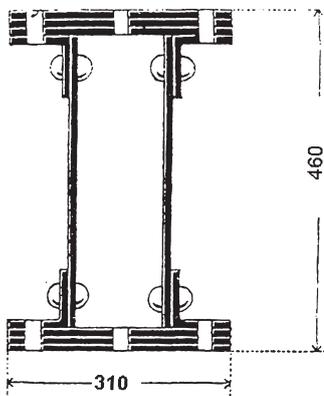


Bild 1.8 Beispiel für einen Kastenträgerquerschnitt [1.5]

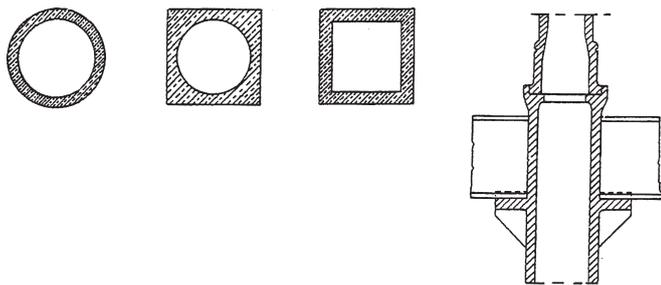


Bild 1.9 Beispiele für Querschnitte gusseiserner Stützen [1.4]

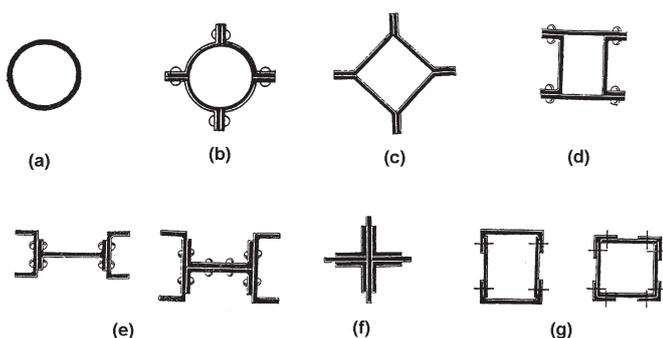


Bild 1.10 Beispiele für Querschnitte flusseiserner Stützen [1.5]

1.4 Verbindungsmittel in der historischen Entwicklung

1.4.1 Nietverbindungen

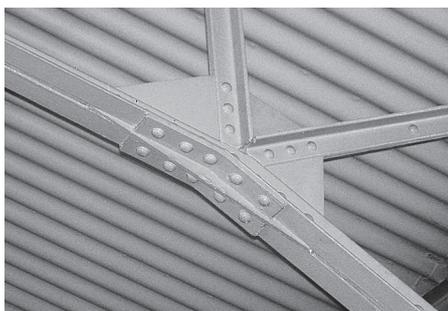
Bis in die Anfänge des 20. Jahrhunderts waren Niete das vorherrschende Verbindungsmittel. Vor allem in der Fachwerk- und Trägerbauweise (Stützenquerschnitte, Dach- bzw. Hallen-tragwerke) wurde die Nietverbindung unentbehrlich. Bild 1.11 zeigt Beispiele für Nietkonstruktionen.

Seine vorherrschende Stellung im Bereich der Verbindungen begann der Nietverbund in den 1920er Jahren an die Schweißtechnik zu verlieren (siehe Kapitel 1.4.3). Aus dem modernen Stahlbau wurde die Nietung bis heute vollständig verdrängt, sie bleibt jedoch für den Denkmalschutz und bei Sanierungsmaßnahmen interessant und soll deshalb im Rahmen dieses Kapitels beschrieben werden.

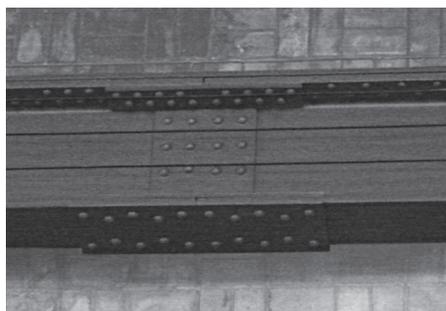
Ein Niet besteht aus Schaft und Kopf (Setzkopf). Im Stahlbau kam für die Herstellung einer kraftschlüssigen tragenden Verbindung nur die warme Nietung in Frage. Bei der warmen Nietung ($\varnothing > 10 \text{ mm}$) wurde der ganze Niet – also der Setzkopf und der Schaft – bis zur Hellrot- oder Weißglut (ca. 1.000°C) erhitzt. Dieser so vorbereitete Niet wird dann in die entsprechenden Löcher der zu verbindenden Teile gesteckt und mittels des Vorhählers oder einer Nietwinde durch einen Arbeiter am Setzkopf festgehalten. Aus dem hervorragenden Ende des hellrotglühenden Schaftes wird der zweite Kopf (Schließkopf) geformt, indem zuerst mit leichten Hammerschlägen der Nietschaft solange gestaucht wird, bis das zylindrische Nietloch völlig ausgefüllt ist. Danach wurde mit Hilfe des Schelleisens (auch Schellhammer oder Döpper genannt – er enthält auf der einen Seite den Abdruck für den Nietkopf) durch schwere Hammerschläge der Schließkopf gebildet. Für diesen Arbeitsgang waren im Regelfall zwei weitere Arbeiter erforderlich. Neben dieser Handhammernietung kam später die Pressluftnietung bzw. Maschinennietung hinzu. Beim Erkalten des Nietes schrumpft der Schaft. Die kalten Bauteile behindern die Schrumpfung, so dass sich im Nietschaft eine Zugkraft aufbaut, die über den Schließ- und Setzkopf die Bauteile zusammenpresst. Bei dieser Scher-Lochleibungs-Pass-Verbindung entsprachen die Nietrohdurchmesser den heutigen Schraubendurchmessern. Die Tragfähigkeit eines Nietes erhöhte sich dann im Laufe der Jahre (besserer Stahl, Vervollkommnung der Niettechnik). Entsprechende Tragfähigkeitstabellen sind in [1.11] zusammengestellt.

1.4.2 Bolzen- und Schraubenverbindungen

Bis weit in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts war eine Verschraubung bei Schmiedeeisen bzw. Stahl die Ausnahme und fand nur dann Anwendung, wenn die Verbindung beweglich, lösbar und nachstellbar sein sollte, wenn für eine Nietung der Platz fehlte bzw. wenn der Bolzenschaft auf Zug beansprucht wurde. Auch gusseiserne Bauteile durften aufgrund des spröden Materialverhaltens nur verschraubt werden, da die beim Nieteten auftretenden Schläge vermieden werden mussten. Eine Anwendung von Schraubenverbindungen erfolgte hauptsächlich nur für Zugstangen in eisernen Dachbindern und Bögen, für Spannschlösser, bei Verankerungen im Fundamentbereich (Steinschrauben) und für echte Gelenkverbindungen (Drehbolzen mit Auge). Ansonsten war eine Nietverbindung billiger und mit größerer Sicherheit herzustellen und wurde einer Schraubenverbindung vorgezogen. In den 1930er Jahren wurden im Stahlhochbau auch schon rohe



a)



b)

Bild 1.11 Beispiele für Nietkonstruktionen

a) Fachwerkknoten

b) Biegesteifer Kranbahnträgerstoß

Sechskantschrauben mit Whitworth-Gewinde eingesetzt, dafür stand zunächst nur ein Schraubenwerkstoff (St 38 – geregelt in DIN 1613) zur Verfügung. Aber erst mit der Entwicklung neuer Schraubenwerkstoffe (hochfeste Schraube) und Schraubenarten nach dem Zweiten Weltkrieg setzte sich diese Verbindungstechnik neben der Schweißtechnik im Hochbau mehr und mehr durch und verdrängte die Nietverbindung.

1.4.3 Schweißen

Für die Anwendung des Schweißens im Stahlbau war einerseits die Entwicklung geeigneter Schweißverfahren notwendig, andererseits mussten die Stähle auch schweißbar (schweißgeeignet) sein. Die Schweißbeignung war in den frühen Jahren der Stahlerzeugung im Allgemeinen nicht gegeben. Beispielsweise verhinderten die im Puddelstahl enthaltenen Schlackeeinschlüsse eine qualitätsgerechte Schweißung. Auch die Einführung moderner Vergießungsarten (beruhigt vergossene Stähle, Anwendung moderner Stranggießverfahren u. a.) war eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz der Schweißtechnik. Stahltragwerke haben im Regelfall eine hohe Lebensdauer, im Sanierungsfall muss man auch heute noch mit nicht oder nur bedingt schweißgeeigneten Stählen rechnen. Aufschluss hierzu gibt eine chemische Analyse des Stahls (vgl. Tabelle 1.1).

Im Jahr 1890 entwickelte der russische Ingenieur Slavjanov ein Lichtbogenschweißverfahren mit abschmelzender Elektrode. Die Schweißnähte waren zu Anfang nur von geringer Qualität. Der schwedische Ingenieur Kjellberg entwickelte im Jahr 1907/1908 die ersten umhüllten Elektroden, um die schädigende Umgebungsluft von der Schweißstelle fernzuhalten. Es sollte noch Jahrzehnte dauern, bis das elektrische Lichtbogenschweißen entscheidend die Bemessung und konstruktive Durchbildung der Stahltragwerke beeinflusste. Aber bereits im Jahr 1938 wird in [1.16, S. 211] festgestellt: „Bei sachgemäßer Auswertung sichert die Schweißtechnik dem Stahlbau wirtschaftliche Vorteile durch verminderte Herstellungskosten (etwa bis zu 15 %) und geringeren Stahlaufwand gegenüber Nietung (etwa 12,5 bis 20 %)“. In Tabelle 1.5 sind einige Daten zur geschichtlichen Entwicklung der Schweißtechnik zusammengestellt.

1.5 Entwicklungen in der Industriebauweise

Ein weites Anwendungsfeld für den Baustoff Eisen in der Industrie- und Hallenbauweise ergab sich zunächst für Dachkonstruktionen durch den Einsatz fachwerkartiger Bauweisen. Eiserne Fachwerkbinder entstanden zuerst als Dreiecksbinder. Gusseisen kam als Material für Fachwerkträger nicht mehr in Betracht, die Tragglieder wurden zunächst teils in Holz und teils in Stahl

gebaut (Mischbauweise). Gebräuchlich waren die einfachen bzw. doppelten französischen Binder (auch Polonceau- oder Wiegmann-Dachbinder genannt). Charakteristisch waren dabei die senkrecht zu den Sparren stehenden Druckstreben.

Bild 1.12 zeigt einen einfachen Polonceau-Dachbinder mit Ziegeldacheindeckung in Mischbauweise, der je nach Holzsparrenquerschnitt für Spannweiten bis zu 15 m eingesetzt wurde. Für die Fachwerkstäbe waren Doppelwinkel am gebräuchlichsten. Die Auflagerung erfolgte im Regelfall auf Mauerwerk. Dachbinder nach dem System Polonceau wurden beispielsweise für die Bahnhöfe der Paris-Versailler Bahn und für den Westbahnhof Budapest eingesetzt.

Öffentliche Gebäude mit Versammlungsräumen, Fabrikgebäude, Speichergebäude und Bahnhofshallen erforderten zunehmend größere Spannweiten. Hier ersetzte das Eisen vollständig die Holztragglieder. Gebaut wurden Bogentragwerke, Zelt- und Kuppeldächer. Bei kleinen Spannweiten bis etwa 25 m wählte man oft Zweigelenkbögen mit Zugstangen. Bei größeren Spannweiten wurden Dreigelenk-Fachwerkbögen gebaut. Damit verschwand auch die klare Trennung zwischen den Tragwerksteilen Dach und Wand. Das statische System des Dreigelenkbogens wurde

Tabelle 1.5 Geschichtliche Entwicklung des Schweißens

Jahr	Entwicklungen in der Schweißtechnik (Auswahl)
1821	Entdeckung des Lichtbogens
1890	Lichtbogen-Schweißverfahren mit abschmelzender Elektrode (Slavjanov)
1902	Fouche entwickelt das Gasschweißen mit Acetylen
1907	Erstmalige Anwendung der Autogenschweißung bei Eisenbahnschienen
1907/08	Kjellberg benutzt umhüllte Stabelektroden für das Schweißen
1930/37	Patent für das Unterpulverschweißen / erste Einsätze in Deutschland
1946	Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) wird in den USA erfunden
1951	Plasmaschweißen wird entwickelt
1953	Einführung des Schutzgasschweißens (MIG/WIG) in der Industrie
1953	Industrieller Einsatz von Kohlendioxid beim Schutzgasschweißen (MAGC-Schweißen) – Vorläufer des heutigen MAG-Schweißens
1961	Laserschweißen wird entwickelt
1980	Erster Schweißroboter in der Industrie
bis heute	Entwicklung weiterer Hochleistungs-Schweißverfahren

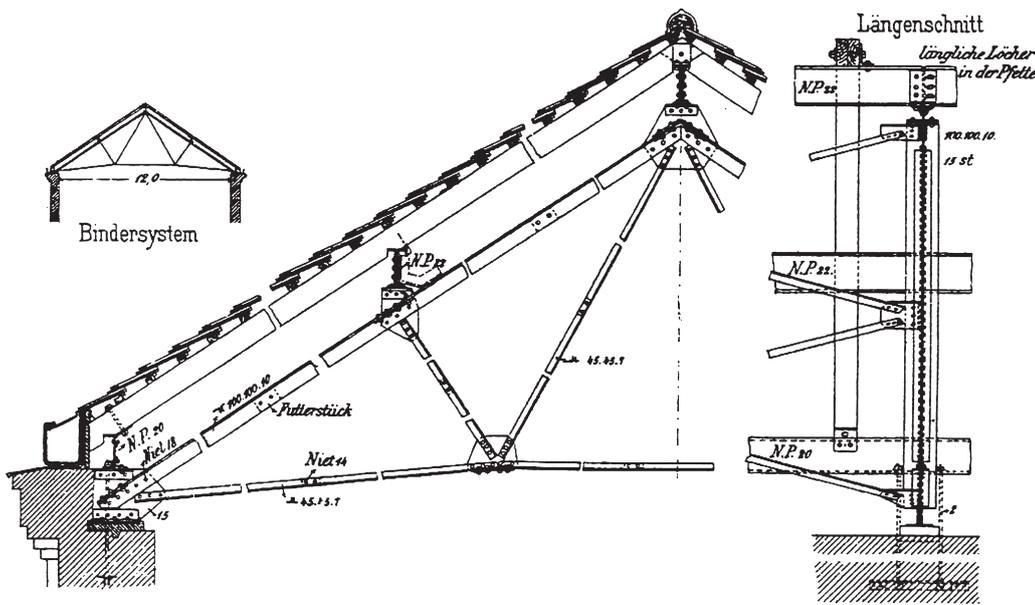


Bild 1.12 Typischer Polonceau-Dachbinder [1.5]

zuerst bei Bahnhofshallen verwandt, später auch im Industriebau. Tabelle 1.6 zeigt eine Auswahl ausgeführter Bogentragwerke, die dort angeführte Maschinenhalle wird im Folgenden näher erläutert.

Gegenüber dem Eiffelturm wurde im Jahr 1889, anlässlich des 100. Geburtstags der Französischen Revolution, für die Weltausstellung in Paris das „Palais des Machines“ gebaut. Die Maschinenhalle (Bild 1.13) war Teil einer Gesamtanlage und besaß

schmale Seitenschiffe, die vom Hauptraum her kaum in Erscheinung traten. Das Tragsystem war ein Dreigelenkfachwerkbogen aus dem neuen Werkstoff Stahl. Mit einer Gesamtlänge von 422,49 m, einer lichten Höhe von 46,67 m, einer Spannweite von 110,6 m und einem mittleren Binderabstand von 26 m wurden alle bisherigen Bogentragwerke übertroffen. Die neue Dimension wird auch darin deutlich, dass das Verhältnis Spannweite zu Höhe beim Kristallpalast 9:8, bei der Maschinenhalle bereits

Tabelle 1.6 Bogentragwerke der Neuzeit

Baujahr	Bauwerk	Statisches System	Spannweite [m]	Pfeilhöhe [m]
1883	Bahnsteighalle Berlin-Friedrichstraße	Dreigelenkfachwerkbogen	36,0	20,0
1893	Markthalle Hannover (Mittelschiff)	Dreigelenkfachwerkbogen	34,06	18,2
1889	Maschinenhalle (Pariser Weltausstellung)	Dreigelenkfachwerkbogen	110,6	64,6
1897	Bahnsteighalle Köln (Hauptschiff)	Zweigelenkfachwerkbogen	63,5	24,0
1909	Luftschiffhalle Friedrichshafen	Zweigelenkfachwerkbogen	43,0	20,4
1910	Luftschiffhalle Hamburg	Eingespannter Fachwerkbogen	45,0	26,0

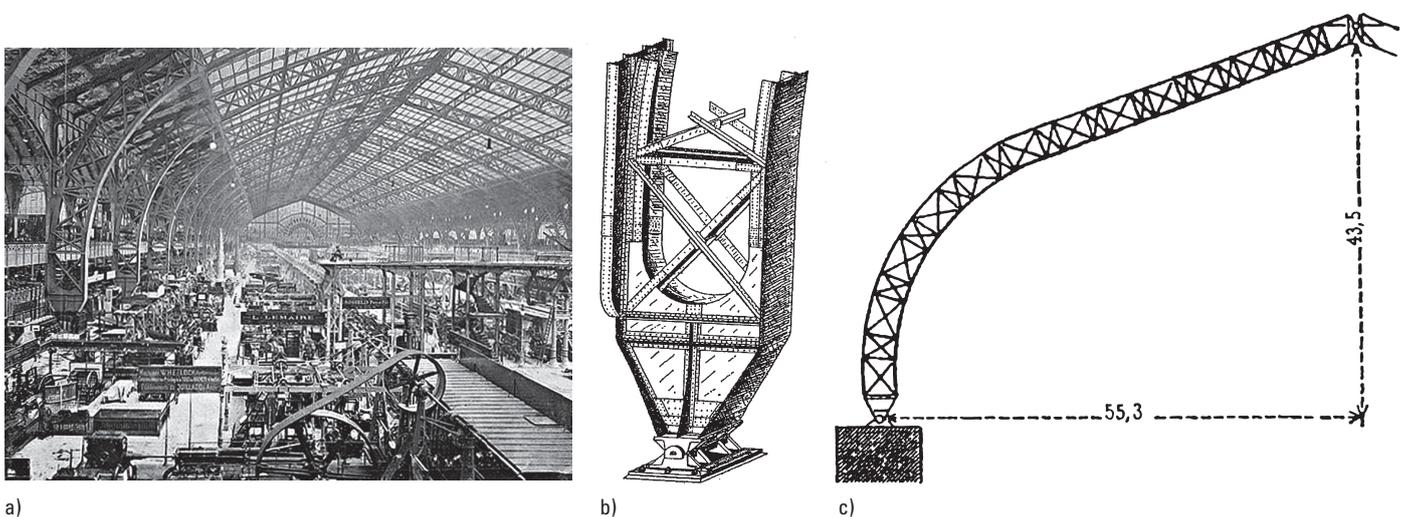


Bild 1.13 Maschinenhalle mit Bogen und Fußgelenk, erbaut 1889 [1.15]



Bild 1.14 Halle der Hüttenwerke Vyksa (Gesamtansicht)
[Animation: Matthias Beck / Alexander Quixtner]



Bild 1.15 Blick auf die Tragstruktur

10:4 betrug. Die Stabilisierung in Längsrichtung erfolgte durch leichte Fachwerkträger, welche die Bögen im Traufbereich pfettenartig verbanden. Die Binder (Querschnitt $3,50\text{ m} \times 0,75\text{ m}$) waren in einem Bogen konzipiert worden, der zunächst in einer engen Kurve, dann aber fast geradlinig zum Scheitel verlief. Im Jahr 1910 wurde das Gebäude abgerissen, nähere Angaben zum Tragwerk sind in [1.15] zusammengestellt.

Die im Jahr 1897 durch Suchov errichtete Produktionshalle der Hüttenwerke in Vyksa in der Region Niznij Novgorod (Bilder 1.14 und 1.15) war das erste doppelt gekrümmte Flächentragwerk aus Stahl. Diese Halle besteht bis heute und wurde 1974 unter Denkmalschutz gestellt, Näheres siehe [1.25], [1.26].

Eindrucksvolle Beispiele für die Leistungsfähigkeit des Stahlbaus in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind die in Deutschland errichteten Luftschiffhallen, siehe dazu [1.13]. Bild 1.16 zeigt ein Beispiel aus dieser Zeit. Bei der im Jahr 1929 errichteten Luftschiffhalle in Akron (USA) wurde sogar eine Spannweite von 99 m bei einem Stich von 60 m erreicht (Bild 1.17).

Die ehemalige Gießereihalle Sayner Hütte (erbaut in den Jahren 1824 bis 1830) wird in [1.17] als älteste gusseiserne Halle Deutschlands und als Vorläufer heutiger dreischiffiger Industriehallen mit Laufkran beschrieben. Zwölf 6,50 m hohe gusseiserne Hohlstützen mit einem Durchmesser von 0,65 m tragen eine gusseiserne Bogenkonstruktion (siehe Bild 1.18). Die Spannweite des

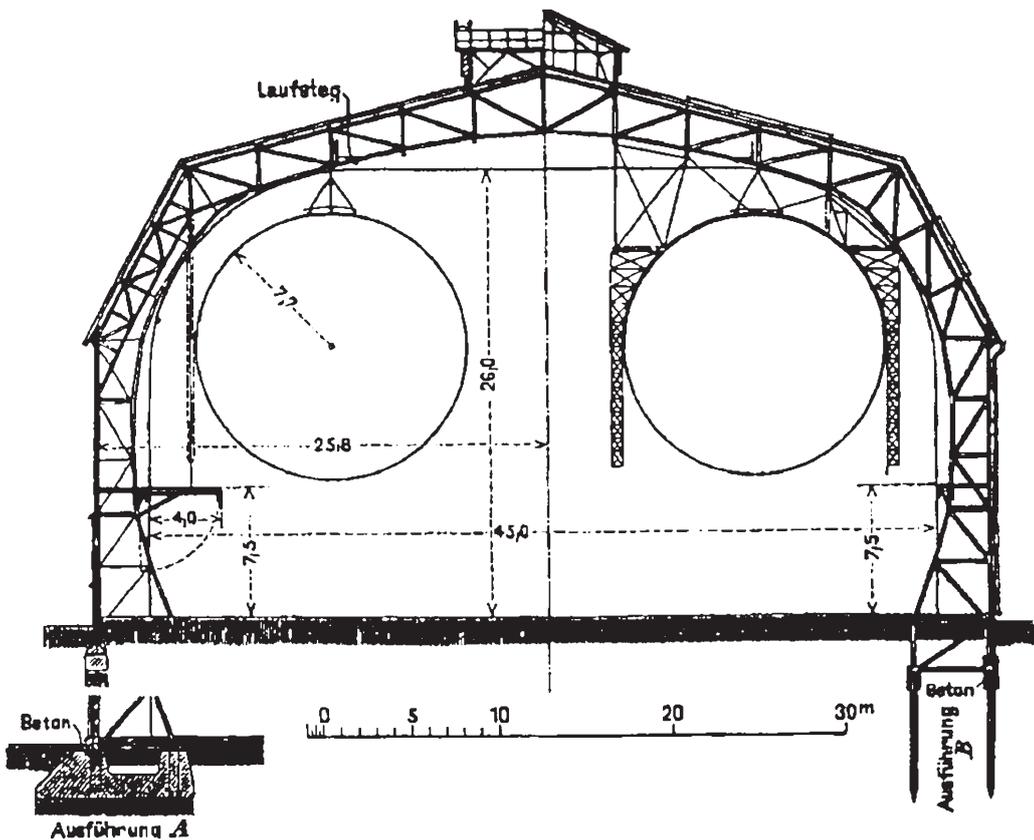


Bild 1.16 Luftschiffhalle Hamburg-Gr.Borstel [1.13]

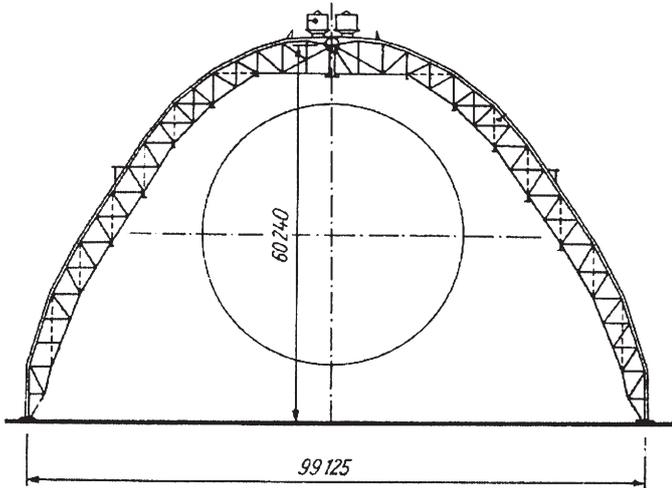


Bild 1.17 Luftschiffhalle Akron (Ohio) [1.23]



Bild 1.18 Sayner Gießhalle – Blick in das Mittelschiff [1.17]



Bild 1.19 Hallenkonstruktion mit Vollwandstützen [1.18]

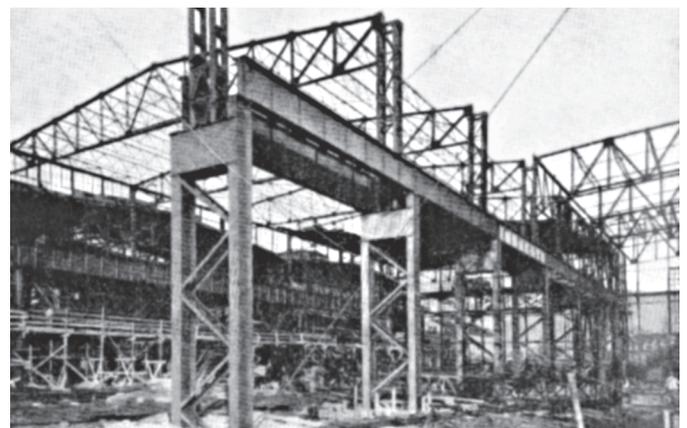


Bild 1.20 Halle mit Fachwerkstützen [1.18]

Mittelschiffes beträgt 7,85 m, die der Seitenschiffe je 6,85 m. Im Industriehallenbau des 20. Jahrhunderts sind folgende Bauweisen üblich:

- Vollwandrahmen mit und ohne Gelenkanordnungen (Hallen mit vollwandigen Rahmenstielen und -bindern)
- Systeme mit Fachwerkbindern auf Stahlvollwandstützen oder Fachwerkstützen (Bilder 1.19, 1.20)

Genietete Hallen hatten sich vor allem in der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts bewährt. Geschweißte Hallen traten etwa seit 1930 immer mehr in den Vordergrund, wobei für die Tragwerkelemente Schweißnähte gewählt wurden. Die Verbindung der Bauteile untereinander erfolgte weiterhin durch Niete, erst später durch Schrauben.

1.6 Literatur

- [1.1] Fischer, M.: Ist der heute im Stahlbau verwendete Baustoff optimal? Stahlbau 71 (2000), Heft 1, S. 13–21.
- [1.2] Ramm, W.: Über die Geschichte des Eisenbaus und das Entstehen des Konstruktiven Ingenieurbaus. Stahlbau 70 (2001), Heft 9, S. 628–641.
- [1.3] Blum, M.: Die Schweißverbindung in der Instandsetzung von Stahlbetonbauten und in der Erweiterung bzw. Ertüchtigung historischer Stahlbauten zu Stahlverbundbauten. URL: <http://www.marx.blum@arcelor.com> (Stand 12.3.2008).
- [1.4] Schöler, R.: Die Eisenkonstruktionen des Hochbaus. Leipzig, Reprint-Verlag, 2. verbesserte Auflage, 1904.
- [1.5] Königer, O.: Die Konstruktionen in Eisen. Hannover, Reprint im Verlag Th. Schäfer, 6. vermehrte und umgearbeitete Auflage, 1902.
- [1.6] URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Siemens-Martin-Ofen> (Stand 25.9.2008).
- [1.7] Stahl im Hochbau – Handbuch für Entwurf, Berechnung und Ausführung von Stahlbauten. Düsseldorf, Verlag Stahleisen GmbH, 13. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 1967.
- [1.8] Petersen, Ch.: Stahlbau – Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten. Braunschweig/Wiesbaden, Vieweg-Verlag, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, 1993.
- [1.9] Backe, H., Hiese, W.: Baustoffkunde. Düsseldorf, Werner-Verlag, 10. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2004.
- [1.10] Stahl-Informations-Zentrum: Wirtschaft & Politik / Stahl in Zahlen. URL: <http://www.stahl-online.de> (Stand 15.3.2008).
- [1.11] Bargmann, H.: Historische Bautabellen – Normen und Konstruktionshinweise 1870 bis 1960. Düsseldorf, Werner-Verlag, 1. Auflage, 1993.
- [1.12] Möll, R.: Altstahlschweißen und Nietten im Zuge der Grunderneuerung des „Eisernen Steges“ in Frankfurt am Main. Stahlbau 66 (1997) Heft 1, S. 1–11.
- [1.13] Wulf, M.: Stahlkonstruktionen von Luftschiffhallen – Zur Konstruktionsgeschichte deutscher Luftschiffhallen 1899–1940. Bauingenieur 74 (1999), S.239–250.
- [1.14] Werner, E.: Der Kristallpalast zu London 1851. Düsseldorf, Werner-Verlag, 1. Auflage, 1970.
- [1.15] Schild, E.: Zwischen Glaspalast und Palais des Illusions, Form und Konstruktion im 19. Jahrhunderts. Berlin, Frankfurt/M., Wien, Ullsteinverlag, 1967.
- [1.16] Stahl im Hochbau – Taschenbuch für Entwurf, Berechnung und Ausführung von Stahlbauten. Düsseldorf, Verlag Stahleisen GmbH, 10. Auflage, 1938
- [1.17] Hartung, G.: Eisenkonstruktionen des 19. Jahrhunderts. Mit einer Einführung von G. Behnisch. München, Verlag Schirmer-Mosel, 1983.
- [1.18] Major, A., Zeidler, H.: Industriehallen, Entwurf und Ausführung. Berlin, VEB Verlag für Bauwesen, 1961.
- [1.19] Faszinierende Bauten – Wunderwerke der Technik. Herausgegeben von der Buchredaktion der National Geographic Society Washington D.C., Deutsche Ausgabe, Steiger Verlag, 1998.
- [1.20] Volz, M., Schröter, F., Steidl, G.: Baustähle im konstruktiven Ingenieurbau. Stahlbau 77 (2008), Heft 11, S. 781–790.
- [1.21] Schröter, F.: Höherfeste Stähle für den Stahlbau. Bauingenieur 78 (2003), S. 426–432.
- [1.22] Schröter, F.: Stähle für den Stahlbau – Anwendung moderner Baustähle und Neuerungen im Regelwerk. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbaukalender 2007. Berlin, Ernst & Sohn, 2007, S. 245–316.
- [1.23] Büttner, O., Stenker, H.: Stahlhallen. Entwurf und Konstruktion. Berlin, VEB Verlag für Bauwesen, 1986.
- [1.24] Helmerich, R.: Alte Stähle und Stahlkonstruktionen – Materialuntersuchungen, Ermüdungsversuche an originalen Brückenträgern und Messungen von 1990 bis 2003. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Forschungsbericht 271, Berlin, Oktober 2005.
- [1.25] Gappoev, M., Graefe, R.: Rettungsaktion für Suchov – Bauten in der Region Niznij Novgorod. Stahlbau 77 (2008), Heft 2, S. 99–104.
- [1.26] Beck, M., Barthel, R.: The First Doubly Curved Gridshell Structure – Shukovs Building for the Plate Rolling Workshop in Vyksa. In: Proceedings of the Third International Congress on Construction History. Cottbus, Brandenburgische Technische Universität, 2009, S. 159–166.
- [1.27] Reichsbahndirektion Stettin: Statische Berechnung für die Hubbrücke über den Peenestrom bei Karnin. Stettin, 1932, S. 1–259.