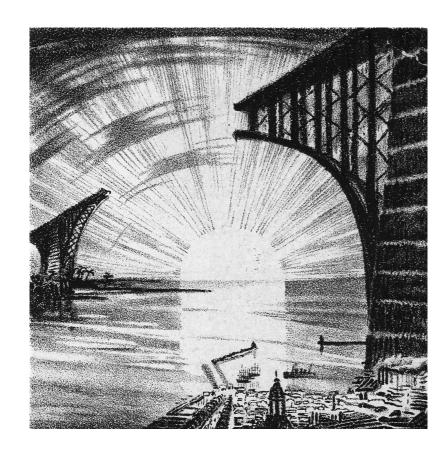
Kapitel 1

Warum Brücken mit Stahlrohrtragwerken?

"Von allem, was der Mensch in seinem Lebenstrieb errichtet und erbaut, scheint meinen Augen nichts besser und wertvoller zu sein als die Brücken. Sie sind wichtiger als Häuser, heiliger, weil gemeinsamer, als Kirchen. Allen gehörig und allen gegenüber gleich nützlich, immer sinnvoll errichtet an dem Orte, an dem die meisten menschlichen Bedürfnisse sich kreuzen; sie sind ausdauernder als andere Gebäude und dienen keinem heimlichen oder bösen Zweck." Ivo Andric, Die Brücke über die Drina



1.1 Motivation

Es gibt viele Gründe über Brückenbau nachzudenken, Wenige tun es.

Noch nie in der Geschichte der Menschheit gab es so viele Straßen und Eisenbahnlinien und noch nie so viele Brücken. Noch nie sind so viele Brücken baufällig geworden. Noch nie wurden so viele neue Brücken gebraucht. Noch nie wurden im Verhältnis zur Menge so wenige technisch und ästhetisch überzeugende Brücken geplant und gebaut.

Die meisten heute bestehenden Brücken sind aus Beton. Eine angesagte, effiziente und schlicht schöne Alternative sind Brücken mit Stahltragwerken, insbesondere Stahlrohrtragwerken.

Das vorliegende Buch soll nicht nur zeigen warum Brücken mit Stahlrohrtragwerken gestaltet und realisiert werden sollten, sondern auch wie
sie geplant, gebaut und langfristig erhalten werden können. Es soll gezeigt werden, welche Vorteile Stahlbrücken grundsätzlich gegenüber den
heute üblichen Betonbrücken haben und welche besonderen technischen
und gestalterischen Vorteile Stahlrohre für den Bau von Brückenkonstruktionen haben.

Stahlrohre werden seit Jahrzehnten erfolgreich an dynamisch belasteten Konstruktionen wie Mobilkränen großer Tragfähigkeit oder Offshore-Anlagen eingesetzt. Für diese Anwendungen gibt es auch entsprechende bauaufsichtlich eingeführte Regeln. Aber für die im Brückenbau zum Einsatz kommenden Profilabmessungen liegen zurzeit noch keine derartigen bauaufsichtlichen Regeln vor. Dies betrifft vor allem die Verbindungstechnik.

Seit vielen Jahren arbeiten Universitätsinstitute in Deutschland und in der Schweiz an spezifischen Forschungsprojekten. Im Rahmen des Projekts 816 der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA), "Optimaler Einsatz von Hohlprofilen und Gussknoten im Brückenbau aus Stahl S355 bis S690" wurden die Ergebnisse zusammengeführt.

Die Forschungsprojekte betreffen insbesondere die Untersuchung und Optimierung der Knoten und Anschlüsse von Stahlrohrstabwerken mit im Brückenbau verwendbaren Abmessungen vor allem in Bezug auf die Ermüdung der Schweißnähte unter der im Brückenbau gegebenen dynamischen Belastung.

Heute liegen die Ergebnisse dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vor und eine Übernahme in die aktuellen Regelwerke (EC3, CIDECT, IIW) steht bevor.

Kapitel 1 dieses Handbuchs dient der Motivation, warum man Brücken mit Stahlrohrtragwerken gestalten und realisieren sollte.

In den Kapiteln 2 und 3 werden Anregungen zur technisch und gestalterisch optimierten Planung und Realisierung von Brücken mit Stahlrohrtragwerken gegeben.

Im Kapitel 4 werden Beispiele entsprechend geplanter Brücken gezeigt und bewertet. Des Weiteren findet sich dort ein Kostenvergleich der verschiedensten Brücken mit Stahlrohrtragwerken.

Im Kapitel 5 werden die technisch-konstruktiven Werkzeuge für den Einsatz und die Bemessung von Stahlrohrtragwerken im Brückenbau vorgestellt.

Kapitel 6 stellt den aktuellen Stand der Forschung dar und in Kapitel 7 wird anhand eines Beispiels die Bemessung eines Tragwerks aus Stahlrohren präsentiert.

Kapitel 1 bis 4 wurden von *Dipl.-Ing. Richard J. Dietrich* bearbeitet; er ist freier Architekt und Ingenieur und betreibt ein Büro für Ingenieur-Architektur. Seit 1978 plant und realisiert er Brücken der besonderen Art im Sinne einer integralen Ingenieur-Architektur. 1984 entstand die deutschlandweit erste Stahlbrücke unter konsequenter Verwendung von Rundrohrprofilen, eine Hängebrücke über den Mittleren Ring in München, inzwischen langzeitbewährt (Bild 1.2). Im Laufe der Jahre wurde eine Anzahl weiterer Brückenprojekte unter Anwendung von Stahlrohrkonstruktionen geplant und zumeist auch realisiert. Es zeigte sich, dass sich Rundrohre in mehrfacher Hinsicht hervorragend eignen, technisch und gestalterisch überzeugende Brückentragwerke zu bauen.

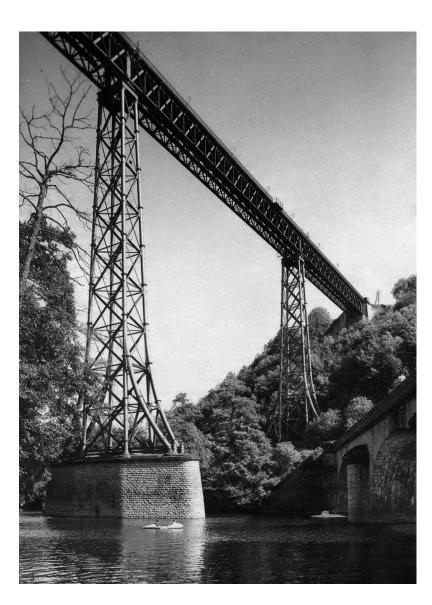
Kapitel 5 bis 7 bearbeitete *Dr.-Ing. Stefan Herion*. Er ist Leiter des Kompetenzzentrums für Rohre und Hohlquerschnitte (CCTH) und koordinierte bis 2017 die Forschung und Lehre der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Seit mehreren Jahren hält er einen Lehrauftrag für Hohlprofilkonstruktionen am KIT.

Seite 9:

Bild 1.1 Die Brücke als Zeichen der Verbundenheit. Detail einer Postkarte mit Aufruf zur Völkerversöhnung nach dem Ersten Weltkrieg (Otto Fürle)

Bild 1.2 Fußgängerbrücke über den Mittleren Ring in München, Stahlrohrkonstruktion als Raumseil-Hängebrücke, 1984, bis heute 33 Jahre ohne Rost und Reparaturen, R. J. Dietrich (Fa. Maurer Söhne)





Auf der Basis der Erfahrungen und Erkenntnisse und auch anhand von Beispielen von Brücken anderer Provenienz sollen konkrete Anregungen und Mittel gegeben werden, wie Planer und Bauherrenschaft technisch und gestalterisch optimierte Brückenbauwerke planen und realisieren können.

I.2 Historischer Hintergrund und Ausgangspunkt

Stahl ist ein Baumaterial, das sich optimal für große weitspannende Konstruktionen, speziell im Brückenbau einsetzen lässt. Mit Stahl oder Flussstahl bezeichnet man Eisenlegierungen, die sich ohne Vorbehandlung gießen, schmieden oder walzen lassen.

1735 hatte Abraham Darby im englischen Coalbrookdale als erster Roheisen industriell in größerer Menge hergestellt. 1796 wurde der erste Kokshochofen im deutschen Gleiwitz in Betrieb genommen. Im 19. Jahrhundert tritt Stahl, vor allem mit der Entwicklung der Eisenbahn, seinen Siegeszug im Brückenbau an. Es entstehen spektakuläre Brückenbauten von hoher Qualität, sowohl in technischer als auch in gestalterischer Hinsicht, z. B. Gustave Eiffels spektakuläre Brücken (Bild 1.3), großartige Brücken über den Rhein oder die wunderbare Mississippi-Brücke in St. Louis.

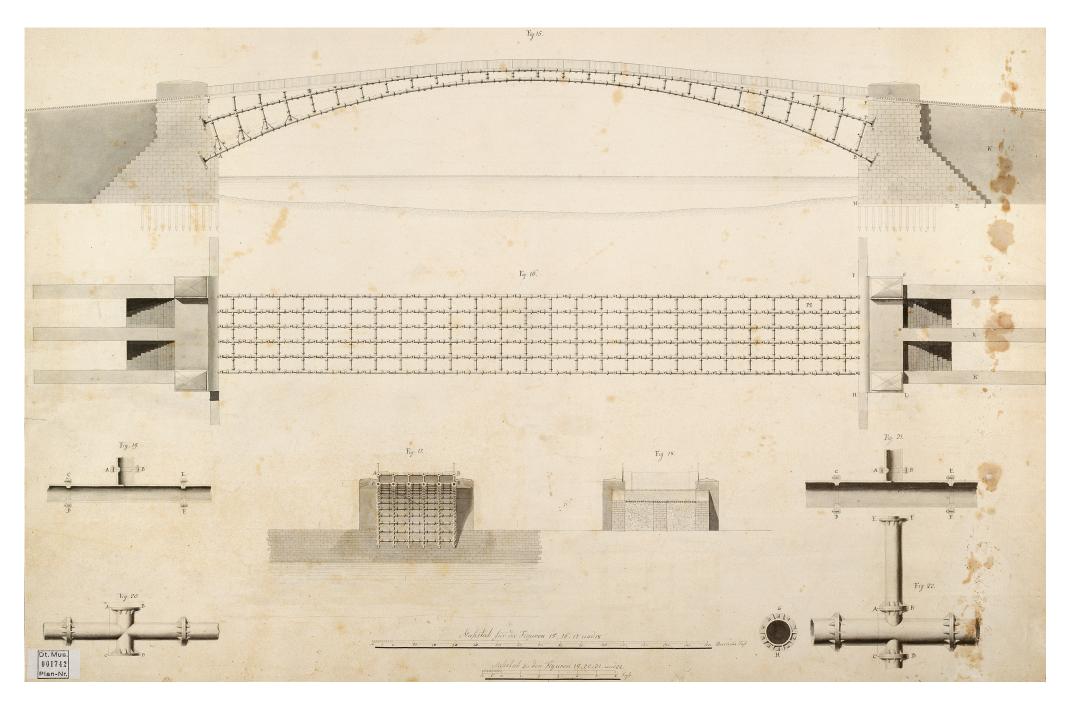
Zunächst standen neben Gusselementen nur Bleche und einfache Profile wie Winkel zur Verfügung, die man mittels Nietverbindungen zu komplexeren Profilen kombinierte. Auch Rohre wurden so hergestellt bis die deutschen Brüder Max und Reinhard Mannesmann 1886 das Schrägwalzverfahren zur Herstellung von nahtlosen Stahlrohren erfanden.

Sehr früh hatte man die besonderen konstruktiven Möglichkeiten von Rohren erkannt, obwohl man noch keine Stahlrohre walzen konnte. Brückentragwerke aus gusseisernen Röhren sind zuerst in Deutschland konzipiert worden.

Schon im Jahr 1811 veröffentlichte Georg Friedrich von Reichenbach (1771–1826) seine "Theorie der gusseisernen Röhrenbrücken". Er schlug

Bild 1.3 Eisenbahnviadukt von Rouzat über die Sioule, Pfeiler aus gusseisernen Rohren, erste Großbrücke von Gustave Eiffel, 1867 bis 1869, bis heute in Betrieb, Entwurf von W. Nordling, von Eiffel überarbeitet und mit seiner jungen Eisenbaufirma realisiert

Bild 1.4 Entwurf einer gusseisernen Röhrenbrücke, G. F. von Reichenbach, um 1820 (Dt. Museum)



bogenförmige Tragwerke aus gusseisernen Röhren zusammengesetzt vor, die mit Flanschen und Bolzen miteinander verbunden wurden (Bild 1.4). Eine der ersten Brücken nach diesem System war eine 1824 erbaute Okerbrücke in Braunschweig. Nach Reichenbach war es der königlich-bayerische Generaldirektor der Straßen und Brücken Carl Friedrich von Wiebeking (1762–1842), der Vorschläge für den Bau gusseiserner Röhrenbrücken machte. Derartige Brückenkonstruktionen mit Gusseisenrohren erwiesen sich jedoch bald als wenig dauerhaft, da sie aus sprödem Grauguss hergestellt waren. Kaltzäher Stahlguss war erst ab der Mitte des 20. Jahrhunderts verfügbar.

Um 1870 verwendete der geniale Selfmade-Ingenieur-Architekt James Eads (1820–1887) für das Tragwerk seiner großartigen St. Louis-Brücke über den Mississippi Stahlrohre, die wie mit Fassdauben aus Stahlblechstreifen zusammengesetzt wurden. Diese Eads-Brücke existiert bis heute und gilt immer noch als eine der schönsten Brücken der Welt.

Exkurs

St. Louis Bridge, ein historisches Meisterwerk mit Rohrkonstruktion (1870)

Diese Brücke, auch Eads-Brücke genannt, wurde um 1870 über den Mississippi in St. Louis gebaut. Sie ist nicht nur bis heute eine der schönsten Brücken der Welt, sondern auch eine bedeutende Pionierleistung des Stahlbrückenbaus (Bilder 1.5 bis 1.8).

Ihr Erbauer, James Eads, war ein typischer Selfmademan und wie es heißt von jener Art "Yankee-Genialität, die sich mehr um das Know-how kümmerte, als um das Know-why" (Woodward 1881). Als selbststudierter Ingenieur-Architekt hat Eads die Gestalt der Brücke bis in alle Einzelheiten bestimmt, die Realisierung organisiert und durchgesetzt und obendrein noch für die Finanzierung gesorgt. Es war die einzige Brücke, die er baute.

Das monumentale Bauwerk überspannt den Mississippi mit drei harmonisch aufeinander abgestimmten Bogenfeldern, rd. 500 m weit, ein





Bild 1.7 St. Louis Bridge, Ansicht, James Eads, 1870 (zeitgenössischer Stich)

Bild 1.8 St. Louis Bridge, Details, James Eads, 1870 (aus Woodward: The St. Louis-Bridge)

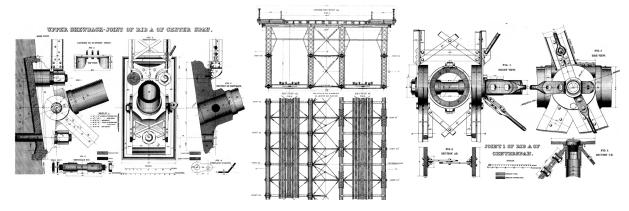


spektakuläres Bauwerk und absolut innovativ (Bild 1.7). Die tragenden Fachwerkbögen bestehen aus rohrförmigen Gurten, die mit elaborierten, mechanischen Knoten verbunden sind (Bild 1.8). In Ermangelung eines Herstellungsverfahrens für große dickwandige Rohre wurden diese Rohre aus einzelnen Segmenten, wie bei Holzfässern, aus jeweils sechs "Blech-Dauben" zusammengesetzt und gebündelt. Für seine Brücke setzte Eads das damals noch neuartige Eisenmaterial Stahl ein und testete die Tragfähigkeit der einzelnen Rohrelemente in Ermangelung von Materialkennwerten mit einer eigens dafür konstruierten Maschine. Er hatte die optimale Profilform von axial druckbelasteten Stäben erkannt und genutzt. Organisch und maßstäblich entwickelt sich das Bauwerk mit seinen steinernen Vorbrücken aus dem steinernen Kontext der Stadt heraus und schwingt sich stahlfiligran über den Fluss.

Die Schönheit der Brücke ist bis heute unbestritten. Wie viele andere bescheinigte der bedeutende amerikanische Dichter und Eads' Zeitgenosse Walt Whitman (1819–1892) dem Bauwerk eine "unübertreffliche Perfektion und Schönheit". Für den berühmten amerikanischen Architekten Louis Sullivan (1856–1924) war die Brücke lebenslang eine Quelle der Inspiration, wegen der sensationellen, architektonischen Vereinigung von Idee und Wirklichkeit, von Form und Funktion. Er sah darin ein besonders überzeugendes Exempel für sein berühmtes Motto "form follows function", welches die klassische Moderne der Architektur im 20. Jahrhundert stark beeinflusst hat.

Wenige Jahre nach der St. Louis Brücke wurde in Schottland eine gigantische Brücke über den Firth of Forth gebaut. Im Rahmen der Planung dieser Brücke wurden durch systematische Untersuchungen die Vorteile von Rohren für leichte und effektive Konstruktionsteile bestätigt.





Exkurs

Stahlrohre an der Eisenbahnbrücke über den Firth of Forth (1890)

Die Erbauer Sir John Fowler und sein Assistent Benjamin Baker untersuchten zunächst verschiedene Varianten von Konstruktionen für die damals extremen Spannweiten von über 500 m vor allem hinsichtlich der zu erwartenden Kosten. Nachdem mehrere Varianten von Bogen- und Hängebrücken, damals noch mit Kettenhängewerken, ausgeschieden waren, kam man schließlich zur ausgeführten gigantischen Ausleger-Fachwerkkonstruktion mit Mittelträgern nach einem System, das Heinrich Gerber in Deutschland perfektioniert hatte (Bild 1.11).

Für die druckbeanspruchten Untergurte und Streben der riesigen Fachwerke wählte man konsequenterweise Rohre (Bild 1.10), denn man hatte durch Experimente herausgefunden, dass Rundrohre unter Druck stärker sind als jedes andere Profil. Für die zugbeanspruchten Obergurte und die versteifenden Streben kamen filigrane Gitterträger zum Einsatz. Für alle Glieder der Konstruktion kam es auf maximale Festigkeit und zugleich Leichtigkeit und geringen Materialeinsatz an. Damals war das Material Stahl sehr teuer, die Arbeitskraft aber im Verhältnis dazu billig. Das ist heute umgekehrt.

Da es aber gewalzte Stahlrohre noch nicht und schon gar nicht in den gewünschten Dimensionen gab, wurden diese aus gewölbten Blechtafeln mittels Nietverbindungen zusammengesetzt. Diese Stahltafeln sind abgestuft zwischen 10 und 30 mm dick und rund 5 m lang. Die Stahltafeln wurden in Öfen an der Baustelle rotglühend erhitzt und in hydraulischen Pressen gekrümmt, um sodann zur Rohrform einander überlappend zusammengenietet zu werden. Der Durchmesser der Untergurtrohre beträgt circa 3,6 m (Bild 1.9).

Die Nietlöcher wurden mit einer speziell dafür entwickelten Mehrfachbohrmaschine gebohrt, die an den zusammengesetzten Rohren entlanglief und zehn Bohrspindeln besaß, die alle gleichzeitig über Transversalen von einer Dampfmaschine angetrieben wurden. Anschließend wurden die Nieten mit einer speziellen, hydraulischen Nietmaschine gesetzt, die mit einem Druck von 40 t die Nieten kalt verpresste und verschweißte. Die überlappten Blechtafeln wurden innen am Stoß mit Steifen verstärkt. Im Abstand von rund 2,5 m wurden Ringe und ab und zu auch ganze Scheiben zur Verstärkung und Wahrung des exakten Kreisquerschnitts eingebaut. So erhielt man besonders stabile und biegesteife Rohrträger, die an der Baustelle polygonal aneinandergesetzt wurden. An den besonders hoch beanspruchten Auflagerpunkten wurden die Rohre zusätzlich durch innere und äußere Steifen verstärkt.

In systematischen Voruntersuchungen hatte man die konstruktiven Vorteile von Rundrohren unter Druck erkannt und das Tragwerk den auftretenden Spannungen entsprechend konstruiert. Die entwickelte Konstruktion hatte überdies den Vorteil, dass sie im freien Vorbau errichtet werden konnte.

Das gigantische Bauwerk ist in gestalterischer Hinsicht offenbar mehr von technisch konstruktiven Absichten bestimmt als von ästhetischen. Die Gestaltung folgt konsequent der Aufgabe, eine Eisenbahnlinie mit ihren hohen und über die Länge stark wechselnden Lasten über extreme Spannweiten zu führen und das mit den damals wirtschaftlichen Mitteln.

Anders als die zeitlos schöne St. Louis Brücke wurde die Firth of Forth Brücke schon zur Zeit ihrer Entstehung als besonders hässlich kritisiert. Andererseits aber repräsentiert sie eine neue Ästhetik, – die Ästhetik der Eisenkonstruktionen, an die man sich erst gewöhnen musste. Damals galten die neuen Eisenkonstruktionen grundsätzlich als hässlich und wo man diese Hässlichkeit beseitigen wollte, wurde eine Art Maskierung mit architektonischem Beiwerk, Türmen, Ornamenten etc. vorgenommen, um so das Bauwerk in den Bereich der Baukunst zu heben.

Diese Auffassung änderte sich mit den neuen Tendenzen in der modernen Architektur nach dem 1. Weltkrieg. Für junge und einflussreiche Architekten wie Gropius oder Le Corbusier wurden technisch orientierte Konstruktionen wie Flugzeuge oder Ozeandampfer zu inspirierenden Vorbildern. In den 30er-Jahren des 20. Jahrhunderts bemühte sich in Deutschland allen voran der Architekt Paul Bonatz um die Gestaltung von Brücken. Zusammen mit dem noch nach dem 2. Weltkrieg führenden

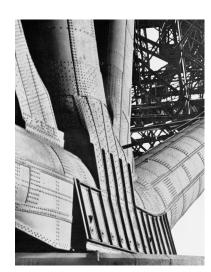
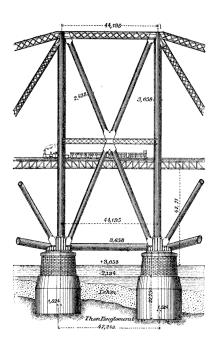
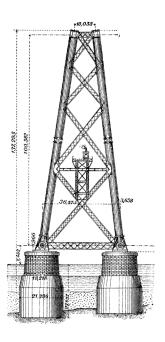
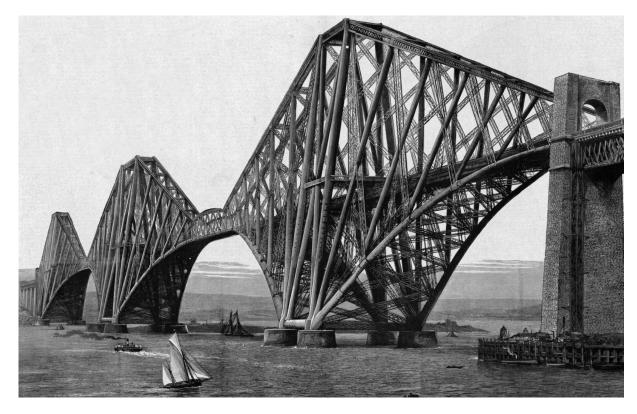


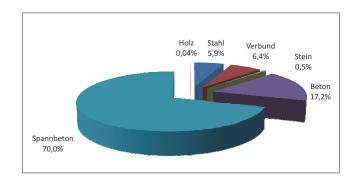
Bild 1.9 Firth of Forth-Bridge, Auflagerpunkt und Untergurt, J. Fowler und B. Baker, 1890 (K. Wachsmann: Wendepunkt im Bauen)

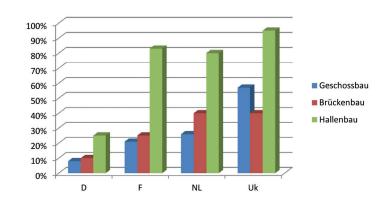
Bild 1.10 Firth of Forth-Bridge, Details, alle Druckglieder Stahlrohre, J. Fowler und B. Baker, 1890 Bild 1.11 Firth of Forth-Bridge, Ansicht, J. Fowler und B. Baker, 1890 (zeitgenössischer Stich)

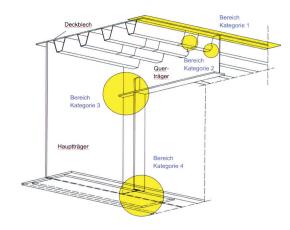












Brückenbauingenieur Fritz Leonhardt schuf er u. a. die immer noch bewundernswerte Rodenkirchner Rheinbrücke.

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts aber nahmen die gestalterische Qualität und die ingeniöse Kreativität im Brückenbau allgemein ab, während gleichzeitig die technischen Möglichkeiten immer mehr zunahmen. Man erreicht zwar immer größere Spannweiten, andererseits aber wird das gestalterische Defizit immer deutlicher (Bild 1.15), von wenigen Ausnahmen abgesehen. Auch verliert ab etwa der Mitte des 20. Jahrhunderts Stahl im deutschen Brückenbau immer mehr an Bedeutung. Beton ist nun der Baustoff der Wahl, obwohl es prima vista wenig sinnvoll erscheint, größere Spannweiten mit Beton-Konstruktionen zu überwinden, deren Eigengewicht in äußerst ungünstigem Verhältnis zur Nutzlast steht.

Tatsache ist, dass heute in Deutschland 87% aller Brücken im Zuge von Bundesstraßen und Autobahnen aus Beton bestehen (Bild 1.12). Dies ist in anderen europäischen Ländern vor allem in Großbritannien anders. Während heute die Marktanteile von Stahl für den Brückenbau in Deutschland bei rd. 10% liegen, sind es in England rd. 40% (Bild 1.13). In den USA ist der Anteil der Stahlbrücken noch wesentlich größer.

Andererseits sind heute auf deutschen Straßen tausende Brücken aufgrund der stetig zunehmenden Verkehrsbelastung geschädigt. Für Beton-

brücken heißt dies oft Abbruch und Verlust, während Stahlbrücken in der Regel ertüchtigt und erhalten werden können.

Es kommt aber auch bei Stahlbrücken auf die jeweilige Konstruktion an. Hier sind die heute üblichen Konstruktionen nicht nur durch Korrosion, sondern auch durch Mängel im Detail gefährdet. Das gilt vor allem für die zusammengesetzten Blechkonstruktionen mit ihren vielen Schweißnähten und Kanten. Hier ergeben sich besondere Risikobereiche für Schäden (Bild 1.14).

Als eine in mehrfacher Hinsicht optimale Alternative zu diesen problematischen Brückenkonstruktionen bieten sich solche mit Stahlhohlprofilen, speziell mit Rundrohren an, die nach den Erkenntnissen dieses Buchs der Praxis des Brückenbaus entschieden große Vorteile gegenüber den üblichen Konstruktionen mit kantigen Profilen bieten. Bild 1.12 Bauweise Brücken auf Bundesstraßen in Deutschland anteilig (BASt 2016)

Bild 1.13 Marktanteile Stahlbau in verschiedenen europäischen Ländern (Peiner Träger) (Quelle: Daten des Stahlhandels)

Bild 1.14 Problemzonen an komplexen Brückenkonstruktionen aus Stahlblechen an Schweißnähten (BASt)

Bild 1.15 Autobahnbrücke A8 bei Bergen, Ersatz einer sachlich gestalteten Stahlbrücke durch eine neue ungestaltete Betonbrücke: Ungestalt ersetzt Zweckgestalt (Foto: R. J. Dietrich)



1.3 Brückenbau gestern und heute

In der Praxis des Brückenbaus haben sich im 20. Jahrhundert erhebliche Veränderungen ergeben, die auch den Stahlbrückenbau betreffen. Als es im 19. Jahrhundert mit der Entwicklung der Eisenbahnen zum Bau immer größerer Brücken kam, entwickelte sich der Stahlbrückenbau sehr schnell. Es entstanden große und leistungsfähige Industrien und zahlreiche auf den Stahlbrückenbau spezialisierte Werke.

In Deutschland war es u. a. die Süddeutsche Brückenbauanstalt in Gustavsburg, als Zweigwerk der Maschinenfabrik-Cramer-Klett & Co. Nürnberg, die später mit der Maschinenfabrik Augsburg zur Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg (MAN) fusionierte. Dort entstanden u. a. unter der Leitung des herausragenden Ingenieurs Heinrich Gerber bedeutende Großbrücken wie die gewaltige, leider verschwundene Eisenbahnbrücke über den Rhein bei Mainz (1862) oder später unter der Leitung von Anton von Rieppel die berühmte heute noch existierende Müngstener Brücke (1894–1897) über die Wupper. In Frankreich war es vor allem Gustave Eiffel, der spätere Erbauer des Eiffelturms in Paris, der sich mit seinem Eisenbauunternehmen G. Eiffel & Cie weltweit im Stahlbrückenbau hervortat und unter anderem das berühmte heute noch existierende Garabit-Viadukt (1880–1884) baute.

Damals waren Planung und Ausführung meist in einer Hand. Die Stahlbaufirmen verfügten über das nötige Know-how und hochqualifiziertes Personal, nicht nur für die Werkstatt, sondern auch für die Planung. Es war fast noch so wie im Mittelalter, als in der Bauhütte beim Bau der erstaunlichen gotischen Kathedralen alle theoretischen und praktischen Kompetenzen vereinigt waren und sich das Wissen aller Beteiligten im Werk potenzierte.

Das ist heute grundsätzlich anders geworden. Der Beruf des Baumeisters wurde im 19. Jahrhundert in Architekten und Ingenieure aufgespaltet und deren Interessen und Fähigkeiten haben sich in der Folge auseinanderentwickelt. Die Architekten haben sich auf die Gestaltung bis hin zum Formalismus beschränkt. Die Ingenieure glauben an die Macht des Faktischen, dem sie mit immer raffinierteren Rechenverfahren und immer komplizierteren Vorschriften auf der Spur sind.

In der Fertigung andererseits hat sich das ökonomische Verhältnis von Arbeitsaufwand zu Materialaufwand umgekehrt. Wo früher Material, hier Stahl, teuer und Arbeit billig war, ist es heute umgekehrt. Es scheint sich nicht mehr zu lohnen, sich raffinierte Konstruktionen auszudenken. Andererseits jedoch sind heute die technischen Möglichkeiten wesentlich weiter entwickelt.

Der Brückenbau in Deutschland ist heute im Wesentlichen auf die Betontechnologie konzentriert. Das beginnt schon in der Ausbildung der Ingenieure und setzt sich in der Praxis in den mit Brückenbau befassten Büros und Ämtern fort. Demzufolge gibt es in Deutschland immer weniger im Stahlbrückenbau tätige und qualifizierte Ingenieurbüros und Stahlbauunternehmen. Allgemein beklagt man in der Branche einen zunehmenden Mangel an Innovationskraft.

Die staatlichen Straßenbauämter bevorzugen bislang den Betonbrückenbau. 87% der Brücken auf Bundesstraßen und Autobahnen in Deutschland sind Betonbrücken, 70% in Spannbeton (Bild 1.12).

Zudem haben sich einige, vor allem große Baufirmen weitgehend ihres gewerblichen Personals entblößt und arbeiten fast nur noch mit Subunternehmern. Diese Subunternehmer sind kleinere Firmen, deren Dienste billig eingekauft werden, indem man sie gegeneinander ausspielt. Die auf diese Weise ausgenutzten Subunternehmer müssen ihrerseits mit möglichst billigem und entsprechend unqualifiziertem Personal arbeiten. Bautechnisch bleibt da nur die vergleichsweise einfache Betontechnologie. Der anspruchsvollere Stahlbau hingegen ist auf entsprechend qualifizierteres Personal angewiesen. Auch vernachlässigt die Stahlindustrie im Gegensatz zur Betonindustrie ihrerseits den Brückenbau.

Aufgrund von Lebensdauer und begrenzter Revitalisierbarkeit reiner Betonkonstruktionen haben sich Stahlverbundkonstruktionen bewährt und finden zunehmend Anwendung. Die Einsicht, dass Stahlbrücken aus Stahlrohren auch hinsichtlich vieler Randbedingungen wie z. B. Schallabstrahlung intelligent sind, dürfte zu einer Steigerung der Nachfrage nach Stahlverbundbrücken und auch reinen Stahlbrücken seitens der Bauherr-

schaften sowie der mit Brückenbau befassten staatlichen und kommunalen Ämter führen.

Mit der Entwicklung von Know-how und Technik kann der Stahlbrückenbau auch in wirtschaftlicher Hinsicht mithalten und ermöglicht i.d.R. zudem einen hohen Vorfertigungsgrad, der in vielen Fällen von großem Vorteil ist.

Angesichts dieser Umstände hat ein Umdenken bei den Verantwortlichen eingesetzt. Die verbleibenden Stahlbaufirmen werden ihr Knowhow und die Verfahrenstechnik weiterentwickeln. Auch werden neue Firmen hinzukommen. Bauherrschaften und Planer werden verstärkt auf Stahlbrückenbau setzen.

Die im vorliegenden Handbuch angezielte Technologie der Stahlrohrkonstruktionen wird dabei aufgrund technischer und gestalterischer Vorteile eine besondere Rolle spielen.

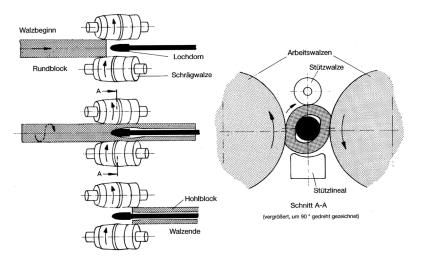
1.4 Herstellung von Stahlrundrohren

Stahlrundrohre, definiert als kreisförmige Hohlprofile nach DIN EN 10210-2 und 10219-2, haben für den Brückenbau eine größere konstruktive und gestalterische Bandbreite als alle anderen Profile. Sie sind warm gefertigt, nahtlos oder geschweißt oder auch kalt gefertigt und geschweißt verfügbar, in vielen Dimensionen, Durchmessern und Wanddicken und in allen üblichen Stahlgüten. Seit der Erfindung des Schrägwalzverfahrens durch die Gebrüder Mannesmann um 1886 ist die Herstellung von nahtlosen Stahlrohren möglich. Bei diesem Verfahren werden auf Umformtemperatur erhitzte Stahlblöcke kontinuierlich zu Rohren gewalzt (Bilder 1.16 und 1.17). Das Schrägwalzen sowie nachfolgende Umformschritte wurden immer weiter perfektioniert, sodass die heute verfügbare Abmessungsvielfalt möglich ist.

Seit 2009 sind durch das Radial-Schmiedeverfahren auch nahtlose Rohre mit wechselnden und konischen Querschnitten und Wanddicken möglich. Daneben gibt es für Großrohre das Press- und Ziehverfahren



Bild 1.16 Rohrproduktion im Werk (Foto: Vallourec-Mannesmann) Bild 1.17 Mannesmann-Schrägwalzen mit Stopfen, Schema (Vallourec-Mannesmann)



und das automatische Hochfrequenz-Induktiv-Schweißverfahren. Bei Letzterem werden kalt oder warm eingeformte Bleche längs zu Rohren verbunden. Der Unterschied zu nahtlosen Rohren besteht vor allem in der Schweißnaht und deren Einfluss auf ihr Umfeld. Geschweißte Rohre sind bei dünnen Wanddicken oft kostengünstiger. Die Profilkataloge der Herstellerfirmen weisen lieferbare Standarddimensionen aus. Sonderwalzungen sind möglich, aber zeitraubender und teurer. Es empfiehlt sich also, Standardprofile zu verwenden.

1.5 Konstruktive und gestalterische Vorteile von Stahlrundrohren

Stahlrundrohre (Fachbezeichnung Rundhohlprofile) haben gegenüber offenen Stahlprofilen wie etwa T-Profilen hinsichtlich ihres Tragverhaltens wesentliche Vorteile. Ihre Widerstands- und Steifigkeitswerte sind richtungsunabhängig. Sie weisen eine geringe Knickgefährdung sowie einen hohen Torsionswiderstand auf.

In der Natur finden sich vergleichbare Rohrkonstruktionen von hoher Effizienz. So erreicht das verholzte Riesengras Bambus mit seiner schlanken, röhrenförmigen Struktur Höhen von rd. 40 m und hält starken Winden stand (Bild 1.18). Andererseits ist die Ähnlichkeit der Rundrohre mit natürlichen Konstruktionen wie Bäumen und Ästen ein starker ästhetischer Faktor.

Konstruktiv eignen sich Stahlrundrohre aufgrund ihres optimalen Tragverhaltens vor allem für axial wirkende Druckkräfte in fachwerkartigen Tragwerken. Sie sind aber auch für Bogentragwerke mit abgehängtem Geh- und/oder Fahrbahndeck optimal einsetzbar, weil sie gegenüber den üblichen kastenförmigen Querschnitten eine höhere Knick- und Torsionssteifigkeit aufweisen.

Die konstruktiven und gestalterischen Möglichkeiten beim Konstruieren filigraner Brückentragwerke mit Stahlrohren sind damit weit gefächert. Für die Knotenverbindungen der Stahlrohrstäbe in Brückentragwerken gibt es diverse Möglichkeiten – von mechanischen Knoten angefangen über Rohr-an-Rohr-Schweißungen bis zu eingefügten Stahlgussknoten.

Der Einsatz von Gusselementen in den Knotenverbindungen von Stahlrohrtragwerken erweist sich auch hinsichtlich des Dauerstandverhaltens als vorteilhaft, da die Schweißverbindungen außerhalb der konstruktiven Brennpunkte liegen. Auch sind bei Gussknoten nur einfachere Stumpfnähte auszuführen.

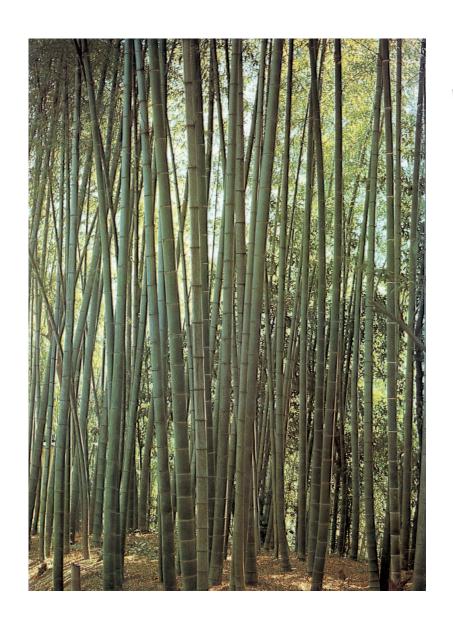
Der Einsatz von Knotenelementen aus Gussstahl ermöglicht zudem stufenlose Übergänge und besondere Effekte in Konstruktion und Gestaltung.

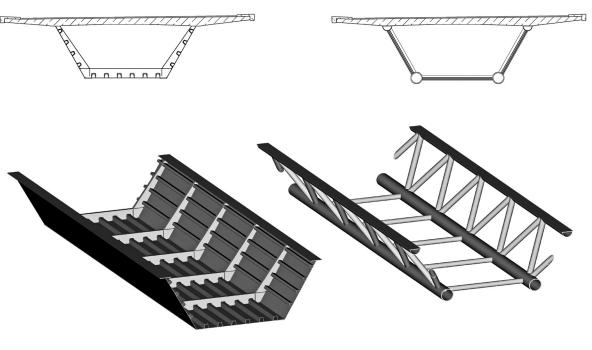
Einen besonderen Vorteil bieten Konstruktionen mit Stahlrundrohren für den Korrosionsschutz durch die Vermeidung von scharfen Kanten, an denen sich die Beschichtung leicht lösen kann, und das Fehlen von Ecken, in denen sich korrosionsfördernder Schmutz sammeln kann. Auch haben Stahlrohre verglichen mit offenen Profilen ein weitaus günstigeres Verhältnis von Querschnittsfläche zu Oberfläche, womit eine sparsamere Korrosionsbeschichtung möglich ist.

Der Vergleich von geschlossenen Stahlblechkonstruktionen wie Hohlkästen mit offenen Fachwerken lässt auf den ersten Blick erkennen, dass letztere geringeren Materialaufwand und weit geringere Schweißarbeit erfordern (Bild 1.19). Auch hinsichtlich der Kontrolle bei den obligatorischen Brückenprüfungen sind filigrane Rohrkonstruktionen grundsätzlich besser zugänglich und die Menge der zu kontrollierenden Schweißnähte und der Korrosionsflächen wesentlich geringer. Allerdings konzentrieren sich die Kräfte auf die Knoten, die damit Brennpunkte im Schadensfall sind.

Zusammengefasst haben Stahlrohre eine größere konstruktive und gestalterische Bandbreite als alle anderen Walzprofile und bieten optimales Tragverhalten. Es sind zahlreiche Durchmesser, Wanddicken und auch wechselnde Querschnitte in allen üblichen Stahlgüten von S355 bis S690 (nach DIN EN 10027-1) herstellbar.

Bild 1.18 Effiziente Rundrohrkonstruktionen im Bambuswald Bild 1.19 Vergleich von Kastenquerschnitt Stahlblech und Rundrohrfachwerk: gleiche Funktion – verschiedener Aufwand





typischer Hohlkastenträger aus Stahlblech

Fachwerkträger aus Stahlrohren

1.6 Knotenverbindungen in Stahlrohrtragwerken

Um mit Stahlrohren Stabwerke zu konstruieren, sind entsprechende Knotenverbindungen notwendig, für die es verschiedene Lösungen gibt (siehe Abschnitt 3.3.2).

Die zunächst naheliegende Verbindung der Rundrohre in Stabwerkkonstruktionen sind Schweißnähte bei sogenannten Rohr-an-Rohr-Schweißungen. Passgenaue Konturschnitte können auf CNC-gesteuerten Anlagen exakt und mit Schweißnahtvorbereitung hergestellt werden. Die Schweißung selbst ist wegen der dynamischen Belastungen allerdings anspruchsvoll hinsichtlich Qualität und Dauerhaftigkeit im Brückenbau. Das gilt besonders für Straßen- und Bahnbrücken (Bilder 1.20 und 1.21).

Gussknoten haben gegenüber Rohr-an-Rohr-Schweißungen Vorteile. Sie werden außerhalb der Knoten mit den Rohren verbunden und ermöglichen damit einfachere Schweißnähte mit geringeren Beanspruchungen und geringeren Ermüdungslasten. Die Formen und Wanddicken können den Kräften angepasst werden. Übergänge von stärkeren auf schwächere Querschnitte können quasi organisch wie bei Baumästen gestaltet werden. Sie ermöglichen damit große gestalterische Freiheiten mit komplexen Knotengeometrien (Bilder 1.22 und 1.26). Vor dem Einbau müssen die Gussknotenelemente selbstverständlich auf ihre Qualität geprüft werden. Grundsätzlich sind alle üblichen Stahlgüten auch in Stahlguss herstellbar.

Neben diesen Rohrknoten gibt es auch die Möglichkeit der Verbindung mit Knotenblechen oder auch mit mechanischen Knoten, die vorteilhaft für die Verbindung von vorgefertigten Stabwerk-Elementen eingesetzt werden können (Bilder 1.23 bis 1.25).





Bild 1.20 Rohrknoten, Rohr-an-Rohr geschweißt, Konturschnitt mit Schweißnahtvorbereitung Bild 1.21 Rohrknoten, Rohr-an-Rohr geschweißt, mit HV-Naht und Übergang zur Kehlnaht









Bild 1.22 Autobahnbrücke St. Kilian, Stahlgusslagerknoten, Weyer Ingenieure

Bild 1.23 Fußgängerbrücke
Oberföhring, mechanische Stahlgussknoten in Holzfachwerk, R. J. Dietrich
Bild 1.24 Straßenbrücke Thalkirchen,
mechanischer Knoten, Guss- und
Schmiedestahl, Raumfachwerk,
R. J. Dietrich
Bild 1.25 Viaduc de Lully

Bild 1.25 Viaduc de Lully, mechanischer Montageknoten, DIC s.a. ingénieurs

Bild 1.26 Fußgänger- und Notstraßenbrücke in Zirndorf, Baumstützen-Strebenwerk mit organisch wirkenden Stahlgussknoten und Verbunddeck auf Stahlblechschale, R. J. Dietrich





1.7 Status quo im Brückenbau mit Stahlrohrtragwerken

Wie bereits erwähnt ist der Stahlbrückenbau in Deutschland, im Gegensatz zu vielen anderen Ländern, derzeit eher von untergeordneter Bedeutung. Unter den wenigen Stahlbrücken die in den letzten Jahren gebaut wurden, gibt es entsprechend nur vereinzelt solche mit Stahlrohrtragwerken. Letztere sind meist im Rahmen kommunaler Projekte entstanden. Dort wo ein Bürgermeister oder ein Stadtbaumeister mit dem Stadtoder Gemeinderat eine besondere Lösung haben wollte, konnten diese Brücken realisiert werden.

Bei den großen staatlichen Straßenbauämtern herrscht jedoch bislang noch Zurückhaltung und Skepsis gegenüber Stahlrohrtragwerken im Brückenbau, auch mit Rücksicht auf die oben erläuterten Strukturen im Brückenbau (siehe Abschnitt 1.3).

Die Bahn war zwar traditionell auf Stahlbrücken konzentriert, hat neuerdings aber auch den Betonbrückenbau übernommen. Immerhin hat man aber am Hauptstadtbahnhof in Berlin eine erste große Eisenbahnbrücke mit Stahlrohrtragwerk realisiert, eine klassische Bogenbrücke mit aufgeständerter Stahlbeton-Fahrbahn als Versteifungsträger. Die Knoten und Lager sind in Stahlguss ausgeführt (Bild 1.27).

Während es im europäischen Ausland wie in der Schweiz oder in Frankreich einige Großbrücken mit Stahlrohrtragwerken gibt, sind in den

letzten Jahren in Deutschland seitens der staatlichen Straßenbauverwaltungen nur sehr wenige größere Straßenbrücken mit Rohrtragwerken gebaut worden. Beispiele sind die Autobahnbrücke bei Suhl, St. Kilian (Bild 1.28 und Bild 1.30), geplant von Weyer Ingenieure, und eine Autobahnüberführung bei Lichtenfels, geplant von SSF Ingenieure (Bilder 1.32 bis 1.35).

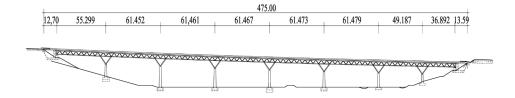
Die Autobahntalbrücke St. Kilian wurde 2006 im Rahmen des Verkehrsprojekts Deutsche Einheit der staatlichen Straßenbauverwaltung (DEGES) gebaut. Sie ist 475 m lang mit Spannweiten von meist ca. 61,5 m. Hier kamen Gussstahlknoten zum Einsatz. Die beiden Ortbeton-Fahrbahnplatten mit insgesamt 29 m Breite liegen jeweils auf einem Dreigurtfachwerk im Verbund und wurden mit Schalwagen betoniert (Bilder 1.28 und 1.29).

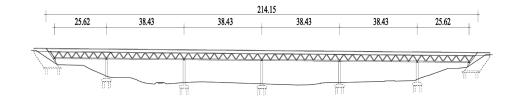
Die Talbrücke Dättwil auf der A1 im Schweizer Kanton Aargau ist 214 m lang mit Spannweiten von 25,6 m, 4 × 38,4 m, 25,6 m und einer Breite von 16,60 m. Hier wurde das tragende Dreigurt-Rohrfachwerk Rohr-an-Rohr geschweißt und die Fahrbahnplatte aus Fertigteilen mit Verbund nachträglich auf das Fachwerk gelegt, untereinander verklebt und längs vorgespannt (Bilder 1.30 und 1.31).

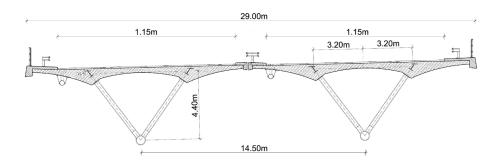
Die innovative Brückenkonstruktion wurde vom Schweizer Büro DIC s.a. ingénieurs geplant, welches auch die große Autobahnbrücke Viaduc de Lully in Frankreich entworfen hat, die weltweit erste Verbundstraßenbrücke mit Dreigurtrohrfachwerken (Bild 3.57).

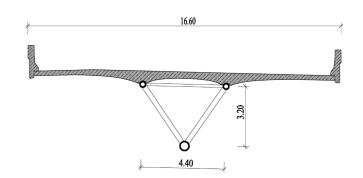
Bild 1.27 Eisenbahnbrücke am Hauptbahnhof in Berlin, Stahlrohrbogentragwerk mit Stahlguss-Lagerknoten und Spannbetondeck (GMP und Schlaich-Bergermann)

Bild 1.28 Autobahnbrücke St. Kilian, Ansicht und Regelschnitt, Weyer Ingenieure Bild 1.29 Autobahnbrücke St. Kilian, Dreigurt-Fachwerke aus Stahlrohr mit Stahlgussknoten und Betondeck, Weyer Ingenieure Bild 1.30 Autobahnbrücke Dättwil, Ansicht und Regelschnitt, DIC s.a. ingénieurs Bild 1.31 Autobahnbrücke Dättwil, Dreigurt-Fachwerk aus Stahlrohr mit Betonfertigteildeck, DIC s.a. ingénieurs













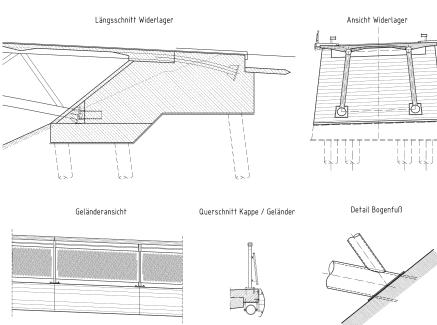
Beim Viaduc de Lully wurde das Fahrbahndeck auf den Rohrfachwerken noch mithilfe eines Schalwagens in Ortbeton hergestellt. Die Bauweise der Brücke von Dättwil stellt eine Weiterentwicklung dar. Der Einsatz von Betonfertigteilen auf dem Rohrfachwerk ohne Aufbeton wurde dort weltweit zum ersten Mal ausgeführt und diente vor allem einer entscheidenden Verkürzung der Bauzeit. Nachträglich wurde untersucht, ob die Klebetechnik auch zur Verbundherstellung herangezogen werden kann (Bild 3.25).

In Deutschland ist eine der ersten Rohrfachwerkbrücken der Staatlichen Brückenbauverwaltung die Autobahnüberführung bei Lichtenfels mit Rohr-an-Rohr geschweißten Knoten und mit einer Ortbetonfahrbahnplatte im Verbund. Sie wurde 2008 fertiggestellt (Bilder 1.32 bis 1.35). Die Brücke ist 90,82 m weit gespannt. Es handelt sich um eine Rahmenkonstruktion mit zwei getrennten, ebenen Fachwerken, die ohne bewegliche Lager tief und fest in die Widerlager eingebunden sind (Bild 1.33). Die Obergurte sind direkt auf ihrer runden Oberfläche über Kopfbolzen mit der Betonfahrbahnplatte verbunden (Bild 1.35).

Diese Konstruktionsweise erforderte einigen Entwicklungsaufwand und große Durchsetzungsbemühungen beim zuständigen Staatlichen Brückenbauamt.

Aber mit der Ausführung dieses Projekts konnte gezeigt werden, "... dass mit dem heutigen Stand der Technik sichere und dauerhafte Brücken mit geschweißten Rohrknoten gebaut werden können, wenn eine Grundkonstruktion mit einem erkennbaren Tragverhalten und mit Verständnis für den rechnerischen Bruchzustand gewählt wird. Etwaige Rissbildungen sind im Unterhalt leicht zu erkennen und instand zu setzen" (Bericht SSF Ingenieure).

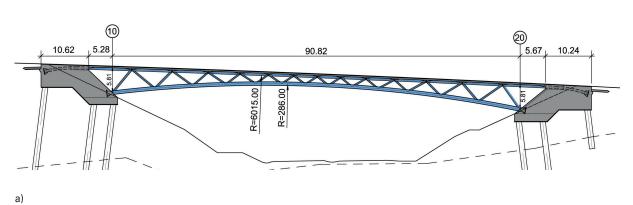


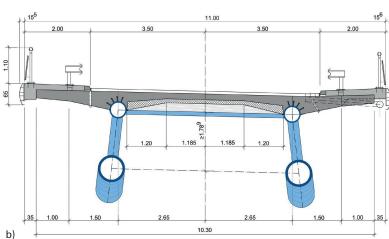




Seite 28:
Bild 1.32 Autobahnüberführung
Lichtenfels, zwei ebene Stahlrohrfachwerke, Rohr-an-Rohr geschweißt, mit
Verbunddeck, SSF Ingenieure
Bild 1.33 Autobahnüberführung
Lichtenfels, Widerlagerdetail mit
eingespannten Fachwerken als
integrale Bauweise, SSF Ingenieure

Bild 1.34 Autobahnüberführung Lichtenfels, SSF Ingenieure Bild 1.35 Autobahnüberführung Lichtenfels, a) Längs- und b) Regelschnitt, SSF Ingenieure





Exkurs

Brücke über den Rhein-Herne-Kanal BUGA 1997, Gelsenkirchen

Stefan Polónyi, ein besonders kreativer Ingenieur, hat in den 1990er-Jahren eine Serie außergewöhnlicher Rohrkonstruktionen für Fußgängerbrücken entwickelt. Hier werden großformatige Rohre scheinbar willkürlich, wie entfesselte Schlangen oder als monumentale Bögen über oder unter, an oder neben den eigentlichen Brückentafeln als Haupttragwerke angeordnet. Gerne kreuzen oben liegende triumphale Bögen die Gehbahntafel diagonal, wobei diese mit unkonventionell angeordneten Seilen oder Stäben abgehängt wird. So merkwürdig wirr diese Konstruktionen auch aussehen mögen, sie folgen konsequent einer konstruktiven Logik. Bei dem hier gezeigten Beispiel einer BUGA-Brücke sind die tragenden Rohrbögen und die Hänger durchaus rational angeordnet, was sich jedoch nur im Grundriss erschließt (Bild 1.36). Der Gehbahnträger kreuzt diagonal den überbrückten Kanal. Die beiden tragenden Rohrbögen sind jedoch quer dazu orthogonal über den Kanal gespannt und damit mit der geringsten Spannweite. Andererseits akzentuieren die steilen Bögen das Bauwerk effektvoll in der umgebenden flachen Landschaft (Bild 1.37).

Obwohl die tragenden Bögen unorthodox weit außerhalb der eigentlichen Brücke gelagert sind, bilden sie zusammen mit der abgehängten Brückentafel ein stabiles System. "Die charakteristische asymmetrische Bogenform", sagt Polónyi, "ergab sich durch die Bedingung, die Krümmung der Rohrbögen dort vorzusehen, wo die Abhängungen der Platte angreifen; die Hochpunkte liegen jeweils über dem Schnittpunkt der Bogenebene mit der Gehbahnachse."

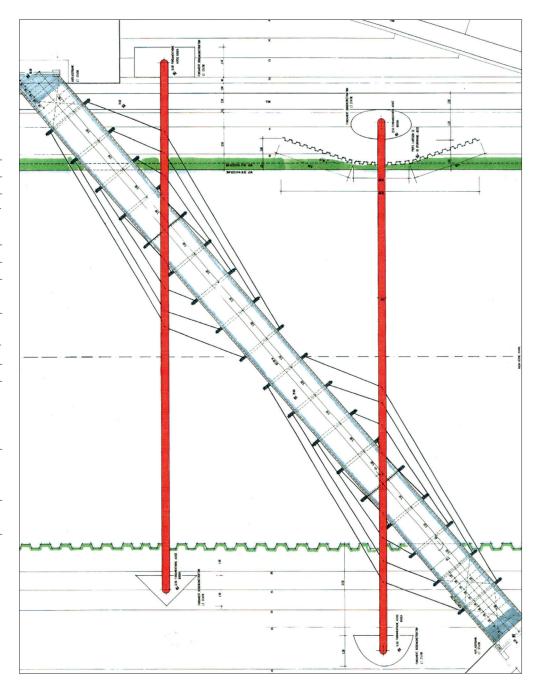
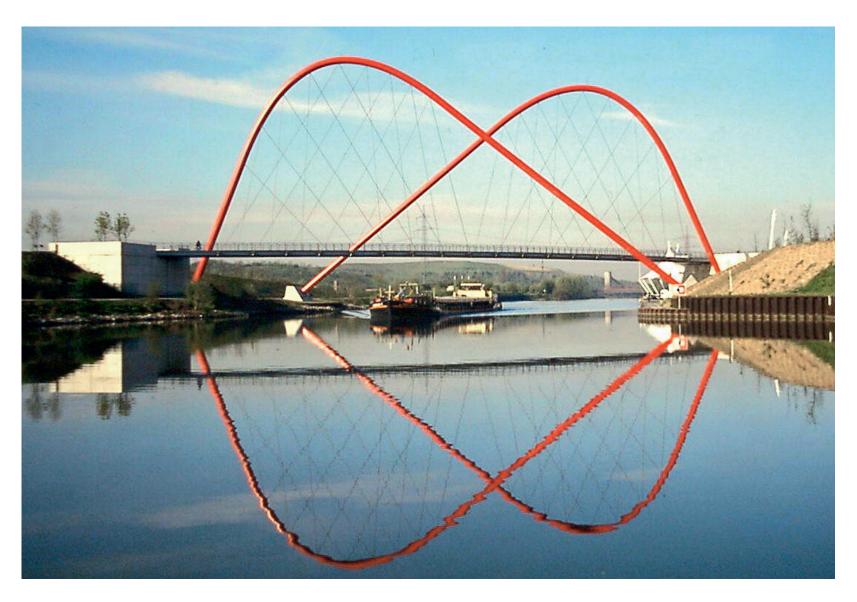


Bild 1.36 Fußgängerbrücke über den Rhein-Herne-Kanal Gelsenkirchen, Rohrbogen-Hängebrücke, Grundriss, S. Polónyi, Feldmeier + Wrede (Bild: Archiv Polónyi)

Bild 1.37 Fußgängerbrücke über den Rhein-Herne-Kanal Gelsenkirchen (Bild: Archiv Polónyi)



			_	_
			_	_