

ETH zürich

Institut für Denkmalpflege und Bauforschung
Professur für Bauforschung und Konstruktionsgeschichte

HÖLZERNE BRÜCKEN IN DER SCHWEIZ

Prof. Dr.-Ing. Stefan M. Holzer
2021

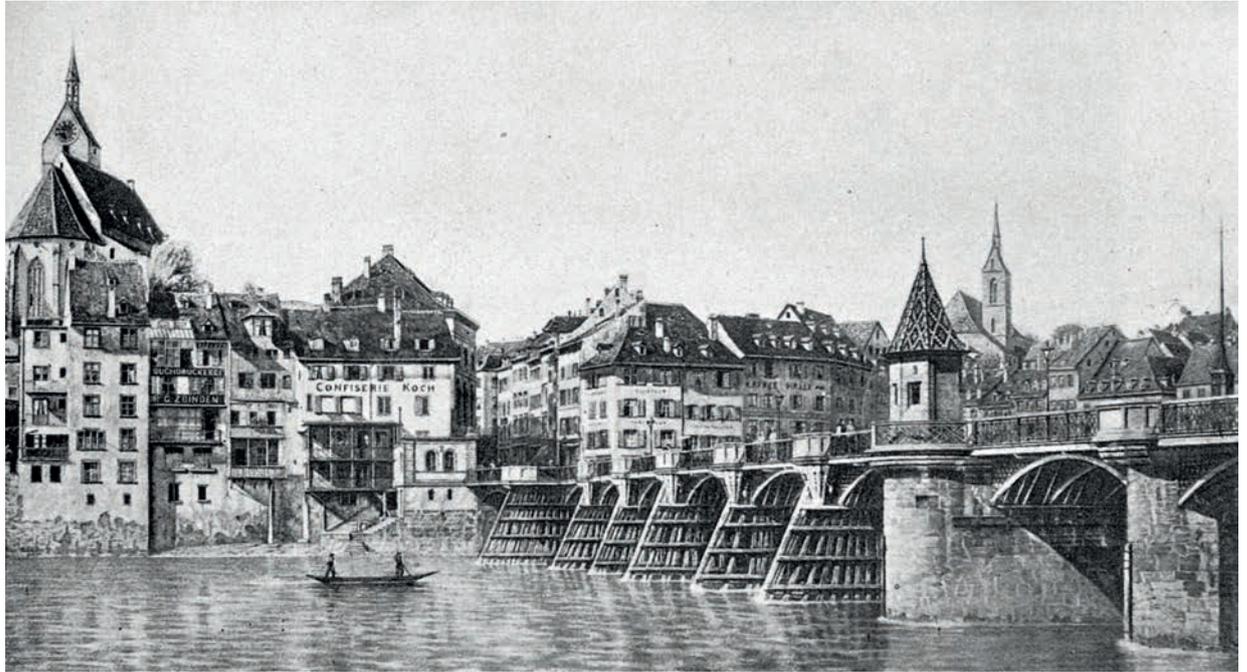


Abb. 1: Basel mit der erst 1903 abgebrochenen hölzernen Rheinbrücke [BRUNNER 1925]

HÖLZERNE BRÜCKEN IN DER SCHWEIZ:

Eine Einführung zum Kernfach «Fallstudien Konstruktionsgeschichte und Bauforschung»¹

Stefan M. Holzer, ETH Zürich,
Institut für Denkmalpflege und Bauforschung (IDB)

Das vorliegende Skriptum erläutert die Entwicklung des Holzbrückenbaus absichtlich ausschliesslich anhand historischer Bild- und Textdokumente. Diese Dokumente bilden den Hintergrund für die Bewertung der innerhalb des Faches «Fallstudien zur Bauforschung und Konstruktionsgeschichte» vor Ort am Objekt selbst aufgefundenen und dokumentierten Befunde.

PFAHLJOCHBRÜCKE UND FAHRBAHNTRÄGER

Holz war bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts das wichtigste Baumaterial des europäischen Brückenbaus überhaupt. Zwar entstanden ab dem 12. Jahrhundert auch wieder steinerne, gewölbte Brücken (beginnend mit der Steinernen Brücke über die Donau in Regensburg), doch Hindernisse wie Flüsse und Schluchten wurden nach wie vor meist mit Hilfe hölzerner Konstruktionen überbrückt. In Westeuropa, vor allem in Frankreich und Eng-

land, strebte man ab dem ausgehenden 16. Jahrhundert danach, möglichst alle hölzernen Brücken durch steinerne zu ersetzen, da die hölzernen Brücken als wenig repräsentativ und als wenig dauerhaft und aufwendig im Unterhalt angesehen wurden. Dennoch blieben hölzerne Brücken bis zum ausgehenden 19. Jahrhundert kennzeichnende Elemente vieler Stadt- und Landschaftsbilder in ganz Europa (Abb. 1). In Gegenden, in denen Holz leicht zu beschaffen war, wie in der Schweiz, bot sich dieses Material für den Brückenbau geradezu an, da das Holz geringes Eigengewicht mit hoher Biegefestigkeit verbindet und auch gute Zug- und Druckfestigkeiten aufweist. Während des 18. Jahrhunderts entwickelte sich die Schweiz zu einem europaweit beachteten High-Tech-Zentrum des Holzbrückenbaus. So schrieb etwa der bekannte französische Ingenieur Émiland-Marie Gauthey in seinem Brückenbau-Lehrbuch: «Während die meisten Holzbrücken Frankreichs mangelhaft konstruiert sind, hat der Entwurf derartiger Bauwerke in der Schweiz allergrösste Fortschritte gemacht und heraus-

¹ Alle Abbildungen, soweit nicht ausdrücklich anders angegeben, stammen vom Verfasser (Fotos, Reprofotos und Zeichnungen).

ragende Werke hervorgebracht.»² Noch heute sind in der Schweiz mehr historische Holzbrücken als in irgend einem anderen Land der Welt erhalten. Sie zählen zu den wertvollsten konstruktionsgeschichtlichen Zeugnissen Europas und prägen das Bild der Schweiz mit. Sie haben sich erhalten, weil sie alle überdacht sind und sich oftmals ausserdem einer sorgfältigen Konstruktion und Pflege erfreuten.

Im einfachsten Falle bildet man eine Brücke, indem man mehrere Baumstämme oder Balken quer über das Hindernis (Bach oder Schlucht) legt und darauf eine Fahrbahn (meist aus Bohlen gebildet) befestigt. Ist der Fluss so breit, dass die maximal verfügbare Baumstamm-länge (meist um die 20 m) nicht ausreicht, so sind Zwischenstützungen notwendig. Im einfachsten Fall werden auch die zur Zwischenauflagerung notwendigen Pfeiler aus Holz gebaut, und zwar in Form von Pfahljochen, die in den Fluss gerammt werden. Die älteste und zugleich wohl berühmteste Beschreibung einer solchen Brücke ist im Bericht des Gaius Julius Cäsar zu seiner Rheinüber-schreitung enthalten (C. I. Caesaris Commentarii de Bello Gallico, Buch IV).

Die Beschreibung gab schon in der Renaissancezeit zu unterschiedlichsten Rekonstruktionen der Brücke Anlass (Abb. 2). Allen gemeinsam ist die Verwendung trapezförmiger Pfahljochs, die aus schräg in den Flussgrund gerammten Pfählen und einem horizontalen Jochbalken bestehen. Die Schrägstellung der Pfähle sollte der Brücke erhöhten Widerstand gegen die Strömung verleihen. Der Jochbalken dient als Auflager der Brückenlängsträger.

Sehr detailliert hat Andrea Palladio in seinen *Quattro Libri* die Brücke Caesars rekonstruiert (Abb. 3). Palladio und seinen Zeitgenossen waren derartige Pfahljochbrücken wohlvertraut, denn die meisten Brücken über die grösseren Flüsse Europas folgten mit ihren Pfeilern damals diesem Bauprinzip. Beispiele sind nicht nur die Brücke von Basel (Abb. 1) sowie die weiteren Rheinbrücken flussabwärts, sondern auch die Brücken über die Rhone in Lyon und Avignon. Die schnell fliessenden, tiefen und unberechenbaren Flüsse Rhein und Rhone machten die Anlage dauerhafter steinerner Pfeiler sehr schwierig, so dass die hölzernen Pfahljochbrücken lange die einzigen machbaren Konstruktionen zur Überwindung dieser Flüsse blieben. Erst mit dem Aufkommen des Eisenbrückenbaus und der Erfindung der Druckluft-gründung um die Mitte des 19. Jahrhunderts nahm die Zahl fester Brücken über solche Ströme dramatisch zu.

In Palladios Zeichnung der Pfahljochbrücke Caesars (Abb. 3) wird die Fahrbahn der Brücke von zahlreichen parallelen Längsbalken getragen, so dass der Bohlenbelag der Fahrbahn die Verkehrslasten auf mehrere benachbarte Längsträger verteilen kann. Dies vermindert die Durchbiegung der Brücke unter Last und erhöht ihre Tragfähigkeit. Möglichst weite Jochabstände sind erwünscht, um im Falle eines Hochwassers oder eines



Abb. 2: Caesar-Ausgabe von 1850 mit Wiedergabe der Rekonstruktion des Fra Giovanni Giocondo zu Caesars Rheinbrücke

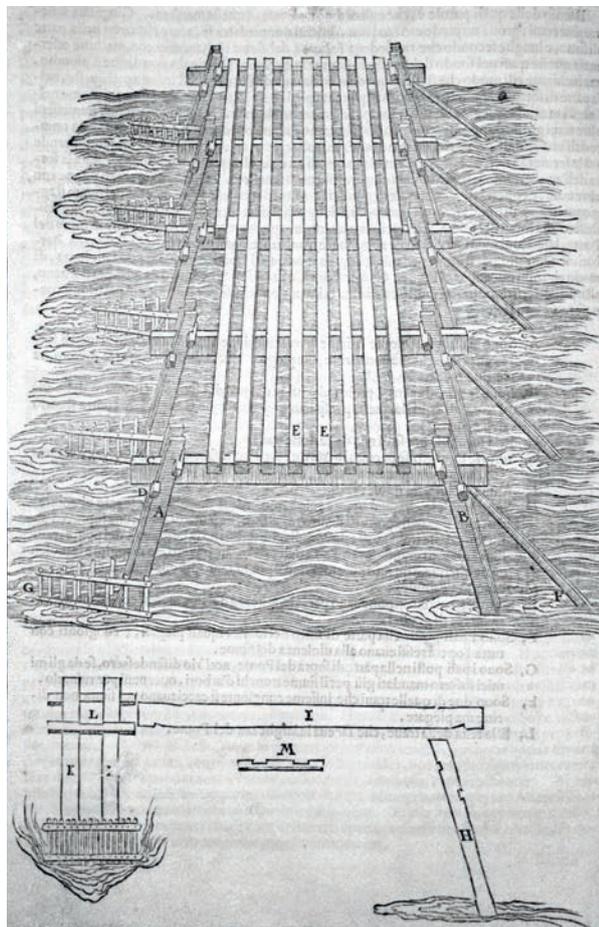


Abb. 3: Andrea Palladio, Rekonstruktion von Caesars Rheinbrücke (PALLADIO 1570, III. Buch).

Eisgangs möglichst wenig Angriffsfläche zu bieten, so dass die Brücke keinen Schaden nimmt. Jedoch sind die maximal möglichen Spannweiten der Felder einer reinen Pfahljochbrücke recht begrenzt. Selbst sehr grosse Bäume bieten selten Balken von mehr als ca. 30 cm Breite und ca. 40 cm Höhe.

2 GAUTHEY 1813, S. 57.

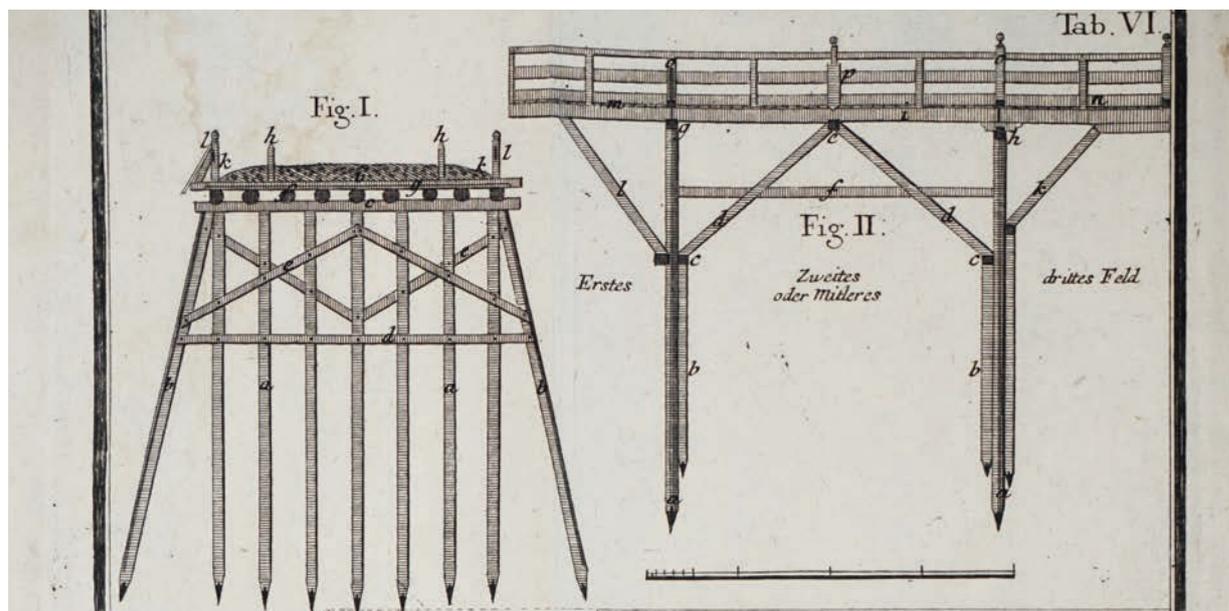


Abb. 4: Pfahljochbrücke mit zusätzlicher Stützung der Fahrbahn durch Sprengwerke (WALTER 1766)

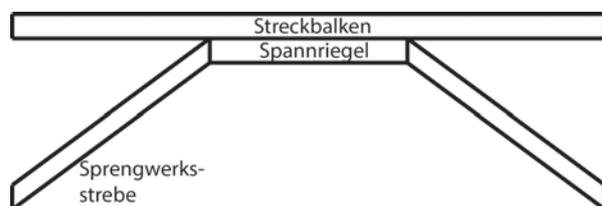


Abb. 5: Sprengwerk, Bezeichnungen

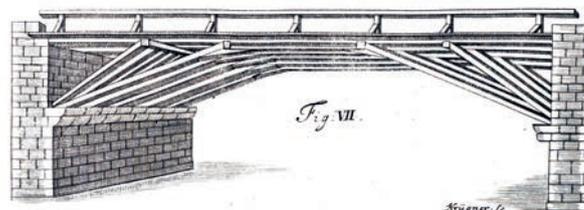


Abb. 6: Sprengwerksbrücke mit fächerförmigen Streben (LEUPOLD 1726 nach WILHELM 1668)

Bei grösseren Spannweiten müssen die Längsbalken der Brücke daher durch schräge Streben von den Widerlagern bzw. Pfeilern her gestützt werden (Abb. 4). Im einfachsten Falle treffen sich die von beiden Stützen her aufsteigenden Streben in der Feldmitte und halten dort einen Querbalken. Bei grösseren Spannweiten ist es allerdings sinnvoller, die beiden schrägen Sprengwerksstreben etwa zu den Drittelpunkten der Spannweite zu führen. Als Abstandhalter zwischen den Streben ist dann ein horizontales, auf Druck beanspruchtes Holz nötig, der sogenannte «Spannriegel» (Abb. 5). Er verdoppelt in der Feldmitte den durchlaufenden Brückenlängsträger, der nunmehr meist als «Streckbalken» oder «Streckbaum» bezeichnet wird. Das Sprengwerk mit Spannriegel wird manchmal in Unterscheidung zu jenem mit mittig sich treffenden Streben als «doppeltes Sprengwerk» bezeichnet.

Im Laufe der Zeit entwickelten sich diverse Varianten dieses Schemas. Zum Beispiel kann der Streckbalken auch durch fächerförmig angeordnete Sprengwerksstreben gestützt werden (Abb. 6), oder durch geschachtelte Anordnung einzelner Sprengwerke mit jeweils eigenem Spannriegel.

Die Pfahljoche selbst sind der empfindlichste Bauteil solcher Brücken, und nach dem Winter und dem Frühjahrshochwasser mussten die Pfahljochbrücken regel-

mässig repariert werden. Um sie stabiler zu machen und gegen Beschädigung durch Strömung, Eisgang und aufgestauten Treibgut bei Hochwasser besser zu schützen, bildete man die Pfahljoche aus mehreren in einer Reihe hintereinander gerammter Pfähle und verband sie durch zangenartige Hölzer sowie durch diagonal verlaufende Aussteifungen. Stromaufwärts sicherte man sie durch vorgelagerte dreieckige «Eisbrecher» gegen Treibgut und Eisgang (Abb. 7). Die Streckbalken laufen bei kleineren Pfahljochbrücken oft auch über dem Jochbalken durch, oder der Streckbalken wird im Auflagerbereich durch ein untergelegtes Sattelholz unterstützt (Abb. 7). Bei grösseren Brückenlängen befindet sich der Stoss des Streckbalkens an dieser Stelle.

Pfahljochbrücken können aus Rundholz (Abb. 7) oder aus Kantholz (Abb. 8) hergestellt werden. Die Kantholzbauweise erlaubt eine stabilere Verbindung der einzelnen Konstruktionshölzer untereinander – auch ohne Zuhilfenahme eiserner Verbindungsmittel – und war daher bei permanenten Brücken die Regel. Um die Pfahljoche gegen Beschädigung zu schützen, wurden sie meist mit Bohlen verkleidet und präsentierten sich dann als trapezförmige Scheiben. Der zeitgenössischen Brückenbauliteratur, die ab dem frühen 18. Jahrhundert einsetzte, sind solche Konstruktionsdetails zu entnehmen (Abb. 8).

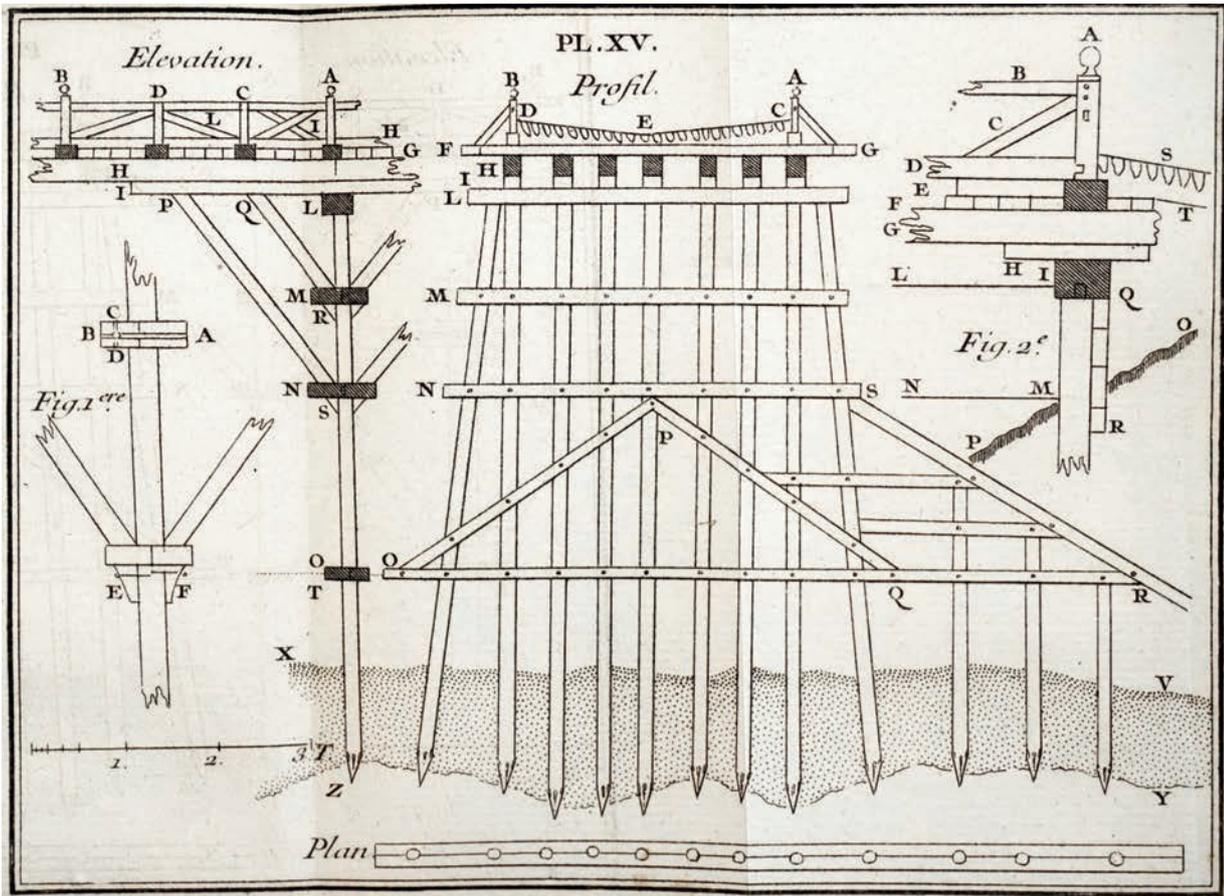


Abb. 7: Konstruktion eines Pfahljochs mit Rundholzpfählen und durch Streben gestütztem Sattelholz (GAUTIER 1716)

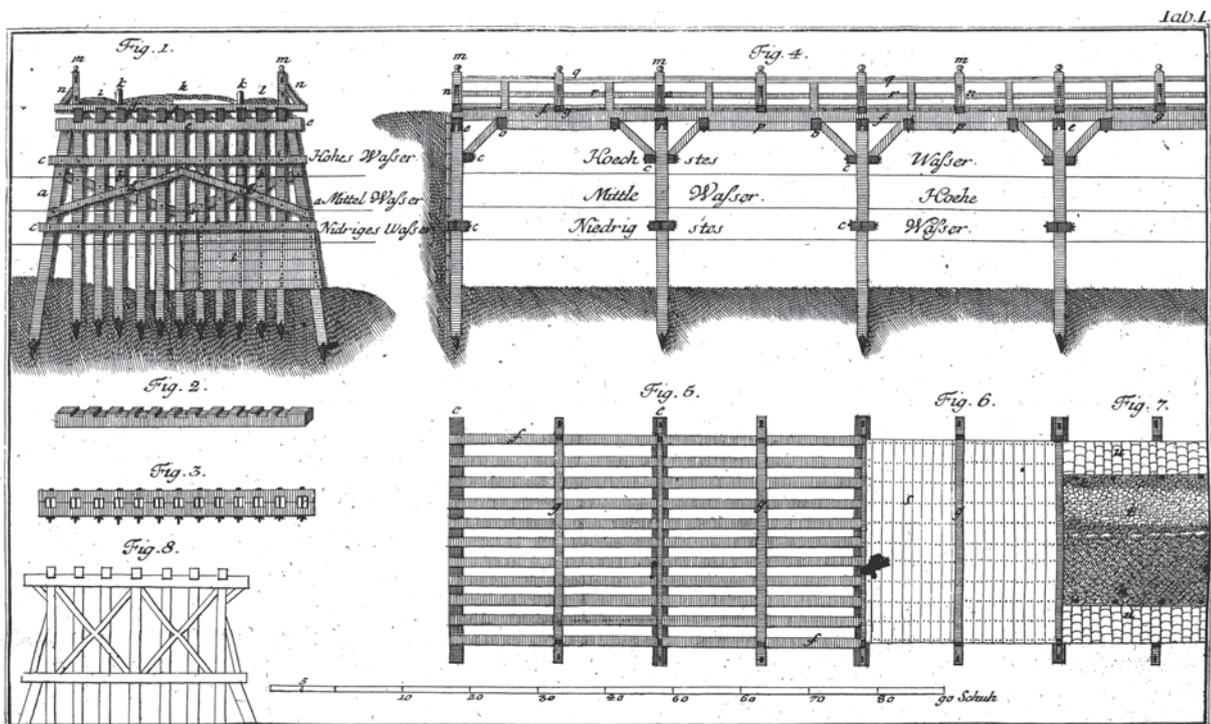


Abb. 8: Konstruktion einer Pfahljochbrücke mit Details der Zangenhölzer und der Fahrbahnkonstruktion (VOCH 1780)

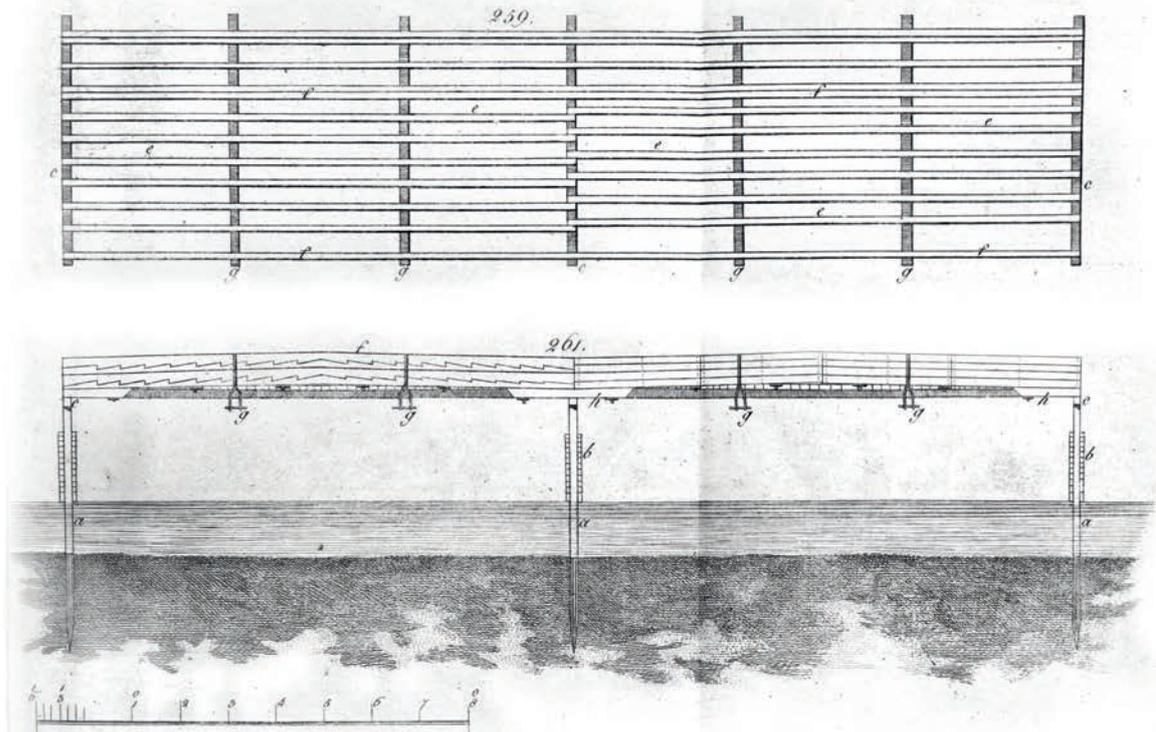


Abb. 9: Pfahljochbrücke mit verstärkten Randträgern, die über untergehängte Querträger die übrigen Längsträger der Fahrbahn unterstützen (SAX 1814)

Die Pfähle der Pfahljochbrücken befinden sich je nach Wasserstand im Zustand ständig wechselnder Durchfeuchtung, einer Umweltbedingung, die die Haltbarkeit des Holzes stark einschränkt. Nur Eichen- und Lärchenholz sind unter solchen Bedingungen einigermaßen dauerhaft. Alle anderen Konstruktionshölzer müssen möglichst so weit über der Wasseroberfläche angeordnet werden, dass sie allenfalls in seltenen Fällen durchnässt werden. Dennoch ist die Lebensdauer von Pfahljochbrücken begrenzt, und die Pfähle müssen in aller Regel nach spätestens 20–30 Jahren ausgetauscht werden.

Der Nachteil der Verwendung von Sprengwerken besteht daher darin, dass sie viel Platz zwischen Wasseroberfläche und Fahrbahn benötigen, also nur bei ausreichender Höhe der Fahrbahn über dem Fluss angewendet werden können. Andernfalls sind sie durch Verfaulen der Strebenfußpunkte und im Hochwasserfall durch Treibholz und Aufstau bedroht. Daher musste man nach Möglichkeiten suchen, das Tragwerk der Brücke über der Fahrbahn anstatt *unter* ihr anzuordnen. Möglich ist dies nur dann, wenn man sich beim Haupttragwerk der Brücke auf zwei Randträger oder allenfalls noch einen mittleren Längsträger beschränkt und die übrigen Längsträger der Fahrbahn über Querträger an den Hauptträgern aufhängt.

Abb. 9 zeigt als Beispiel aus dem frühen 19. Jahrhundert die Abbildung einer Pfahljochbrücke, deren Randträger aus mehreren übereinander gelegten Balken gebildet werden. Mittels eiserner Schlaufen sind an diese Hauptträger kurze Fahrbahn-Querträger angehängt. Diese stützen die übrigen Längsbalken der Fahr-

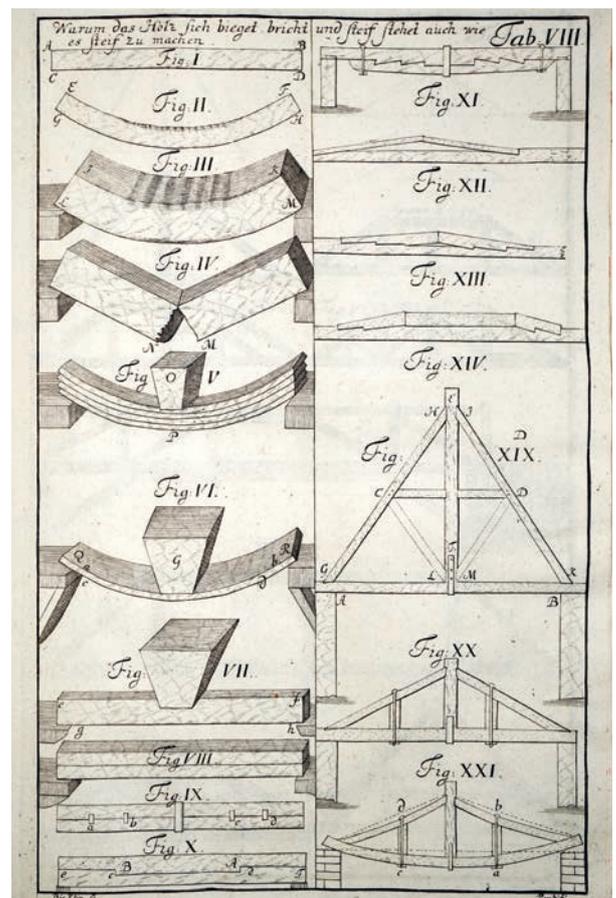


Abb. 10: Verstärkung von Balken durch blosses Aufeinanderlegen, Verdübelung, Verzahnung, «gesprengte Balken» und Hängewerke (LEUPOLD 1726)

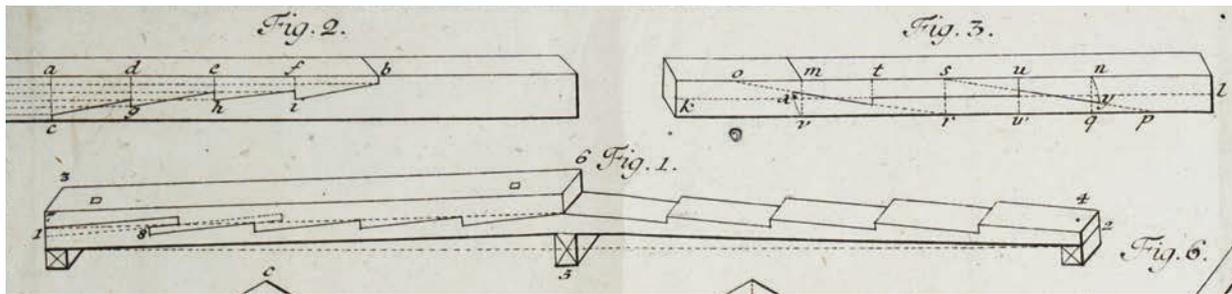


Abb. 11: Herstellen einer Verzahnung (VOCH 1777). Der obere Balken kann in der Feldmitte, wo die Zahnrichtung sich umkehrt, gestossen werden, da er auf Druck beansprucht wird.

bahn. Die verstärkten Randträger bilden gleichzeitig das Geländer der Brücke. Abb. 9 zeigt verschiedene Varianten der Ausbildung des verstärkten Randträgers. In der rechten Bildhälfte sind die Balken einfach übereinander gelegt. Diese Lösung ist nicht besonders effizient, denn zwei übereinander gelegte Balken tragen bei gleicher Spannweite nur doppelt so viel Last wie ein einfacher Balken, und auch die Durchbiegung ist nur halb so gross wie bei Verwendung eines einzelnen Balkens. Verbindet man die beiden übereinander gelegten Balken jedoch derart, dass sie sich nicht aufeinander rutschen können («schubfeste Verbindung»), so wirken sie im Idealfall wie ein einziger Balken doppelter Höhe. Dieser trägt bei gleicher Spannweite die vierfache Last wie ein einfacher Balken und biegt sich unter gleicher Last nur um ein Achtel so viel durch.

Diese Zusammenhänge waren schon im ausgehenden 17. Jahrhundert bekannt, dank der epochalen Arbeiten Galileo Galileis, der 1638 die Festigkeitslehre begründet hatte. Jacob Leupold schlug daher in seinem Brückenbau-Lehrbuch von 1726 vor, die Balkenverstärkung auf jeden Fall in Form einer Verzahnung oder Verdübelung durchzuführen (Abb. 10). Bei der Verzahnung (Abb. 9 links und Abb. 11) wird jeder der beiden Balken sägezahnförmig eingeschnitten. Die Richtung der Zähne muss derart sein, dass der obere Balken nicht auf dem unteren nach aussen rutschen kann. Sind beide Balken sorgfältig vorbereitet, so wird der untere Balken ein wenig nach oben gebogen und der obere Balken mit seinen Zähnen eingesetzt. Nun wird der untere Balken losgelassen, und die Zähne drücken sich kraftschlüssig ineinander. Der obere Balken kann in Feldmitte, wo sich die Zahnausrichtung umdrehen muss, gestossen werden, da er nur auf Druck beansprucht ist, während der untere Balken auf Zug belastet wird und daher durchlaufen muss oder allenfalls mit einer komplizierten, zugfesten Verbindung, dem «Schaffhauser Schloss», versehen werden muss. In der Praxis der historischen Baukonstruktion lassen sich allerdings durchaus auch falsch ausgerichtete Zähne und auf der falschen Seite stumpf gestossene Balkenteile beobachten. Die Verzahnung erfordert sehr sorgfältiges und präzises Arbeiten, damit alle Zähne passgenau ineinandergreifen und die Lasten sofort übernehmen können und damit alle Zähne gleich stark beansprucht werden. Sind die Zähne nicht passge-

nau oder haben die Hölzer ihre Form durch Schwinden verändert, so schliessen sich unter Belastung zunächst die Lücken zwischen den Zähnen, und der Balken biegt sich zunächst stark durch, oder einzelne Zähne brechen infolge Überlastung ab. Um diese Effekte zu vermeiden, haben die Zimmerleute die Zähne oft durch in die «Zahnlücken» eingetriebene Keile (in der Regel aus Hartholz, z.B. Eiche) «vorgespannt». Bei allen Verzahnungen ist zu prüfen, ob solche Keile vorhanden sind. Manchmal werden die Zähne auch durch eingelegte dünne Metallstreifen in der Fuge geschützt.

Trotz aller dieser Massnahmen erreicht ein verzahnter Balken niemals die Steifigkeits- und Festigkeitswerte eines «monolithischen» Balkens, ist aber deutlich leistungsfähiger als zwei aufeinandergelegte Balken ohne Verbindung. Verzahnte Balken sind schon seit dem Spätmittelalter bekannt und wurden z.B. auch als Unterzüge weitgespannter Decken verwendet (in der Schweiz z.B. im Plantaturm des Klosters Münstair GR um 1500). Bei weitem die grösste Verbreitung erreichten sie allerdings im Brückenbau. Auch bei komplizierteren Tragsystemen sind die Streckbalken oft als verzahnte Balken ausgeführt. Leichter herzustellen und auch nicht schlechter in der Tragwirkung sind *verdübelt* Balken. Dabei werden kleine Hartholzklötzchen in entsprechende Aussparungen beider Balken eingesetzt, um die gegenseitige Verschiebung der Trägerhälften zu verhindern (Abb. 10, Fig. IX). Ab dem frühen 19. Jahrhundert wird der verzahnte Balken zunehmend durch den verdübeltten Balken abgelöst. Die beiden Balkenhälften des verdübeltten Balkens müssen zusätzlich durch Bolzen oder Eisenbänder miteinander verbunden werden. Solche zusätzlichen Verbindungsmittel sind auch bei verzahnten Balken oft zu sehen, und sei es als spätere Reparaturen.

Mit der Verzahnung oder Verdübelung können nur begrenzte Trägerhöhen erreicht werden. Je grösser die Trägerhöhe, desto höher die erzielbare Tragfähigkeit und desto geringer die Durchbiegung. Am wirkungsvollsten sind wandartige Träger. Sie haben sich historisch aus dem «Hängewerk» entwickelt. Das Prinzip des Hängewerks (Abb. 12) basiert darauf, einen langen, biegebeanspruchten Balken in der Mitte aufzuhängen. Dazu wird ein zugbelastetes vertikales Konstruktionselement benötigt, das entweder aus Holz besteht und dann «Hängesäule» genannt wird, oder als eiserne (eventuell mit einer

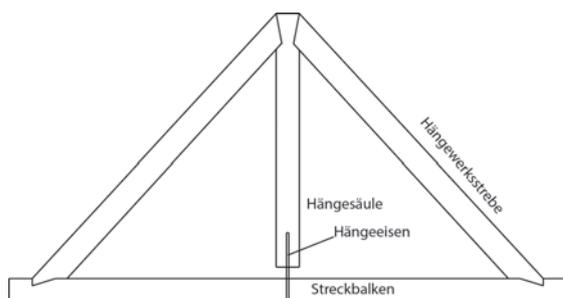


Abb. 12: Prinzip des Hängewerks (sog. «einfaches Hängewerk»).

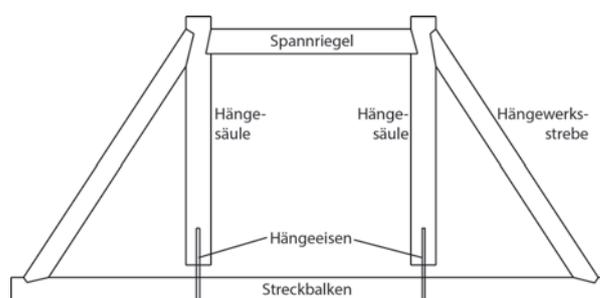


Abb. 13: Prinzip des «doppelten Hängewerks».

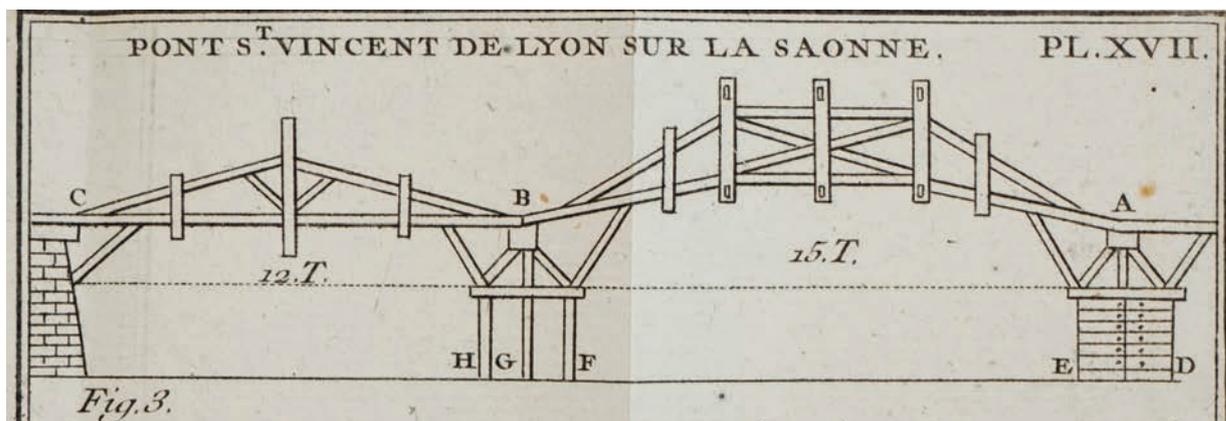


Abb. 14: Zwei Joche der Saone-Brücke in Lyon mit einfachem und doppeltem Hängewerk (GAUTIER 1716)

Mutter anspannbare) Hängestange ausgeführt wird. Die Hängesäule verhindert durch die von ihr aufgenommene Zugkraft eine Durchbiegung des Streckbalkens in Feldmitte. Die Zugkraft wird am oberen Ende der Hängesäule durch zwei symmetrisch von den Balkenenden nach oben ansteigende Hängewerksstreben aufgenommen und in ein Paar von Druckkräften in den Streben verwandelt. Die Streben geben ihrerseits die schrägen Druckkräfte an die Enden des Streckbalkens weiter. Die horizontale Komponente der Strebekräfte belastet den Streckbalken auf Zug. Die gesamte dreieckförmige Konstruktion befindet sich daher im inneren horizontalen Gleichgewicht und gibt keine Horizontalkräfte auf den Unterbau ab – ein Vorteil gegenüber dem Sprengwerk, dessen Streben seitlich auf die Widerlager drücken. Das Hängewerk ist eine charakteristische Konstruktionsidee des Brückenbaus. Da die Last der Brücke tatsächlich vorwiegend über den Streckbalken eingetragen wird (und nicht wie beim Dach über die schrägen Streben), ist das korrekte Funktionieren der Hängesäule von essentieller Bedeutung für die Tragfähigkeit der Brücke.

Die Verbindungen des Hängewerks sind daher mit äusserster Sorgfalt auszuführen. Zunächst einmal muss die Hängesäule an ihrem unteren Ende zugfest mit dem Streckbalken verbunden sein. Dies kann z.B. dadurch gewährleistet werden, dass an der Hängesäule eine eiserne Schlaufe befestigt ist («Hängeeisen»), die den Streckbalken umgreift. Alternativ kann die Hängesäule als doppeltes Holz ausgebildet sein, das den Streckbalken beiderseitig zangenartig umgreift, so dass der Streckbal-

ken wie in einer Klammer festgehalten ist. Auch zugfeste Anschlüsse ohne eiserne Verbindungselemente mit schwalbenschwanzförmigen Zapfen- oder Blattanschlüssen kommen vor. Der Fusspunkt der Hängesäule zählt wegen seiner schwierigen Ausbildung und hohen Belastung zu den interessantesten Details vieler Brückentragwerke. Bei einer Bauuntersuchung einer historischen Holzbrücke kommt der genauen Erkundung dieses Punktes besondere Bedeutung zu.

Die Hängewerksstreben sind an ihrem oberen und unteren Ende in der Regel mit einem Versatz in die Hängesäule bzw. den Streckbalken eingesetzt. Im Detail können diese Versatzanschlüsse auch sehr unterschiedlich ausgebildet sein (Stirn- oder Fersenversatz, doppelter oder mehrfacher Versatz, Sicherung durch Bolzen oder Zapfen, mit oder ohne Holznagel, usw.). Die Details der Anschlussausführung haben einen wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Hängewerks.

Das Hängewerk ist sicher schon in der Antike erfunden worden. Spätestens in der Römerzeit war es unabdingbar, um die damals errichteten weiträumigen Bauten ohne Zwischenstützung überdachen zu können. Das Hängewerk blieb von da an bis in die Gegenwart das wichtigste Konstruktionsprinzip des Holzbaus im ganzen Mittelmeerraum. Im Brückenbau ist es in ganz Europa seit langer Zeit ein Standardelement (vgl. Abb. 10).

Neben dem einfachen Hängewerk kommt auch das «doppelte Hängewerk» sehr häufig vor (Abb. 13). Bei

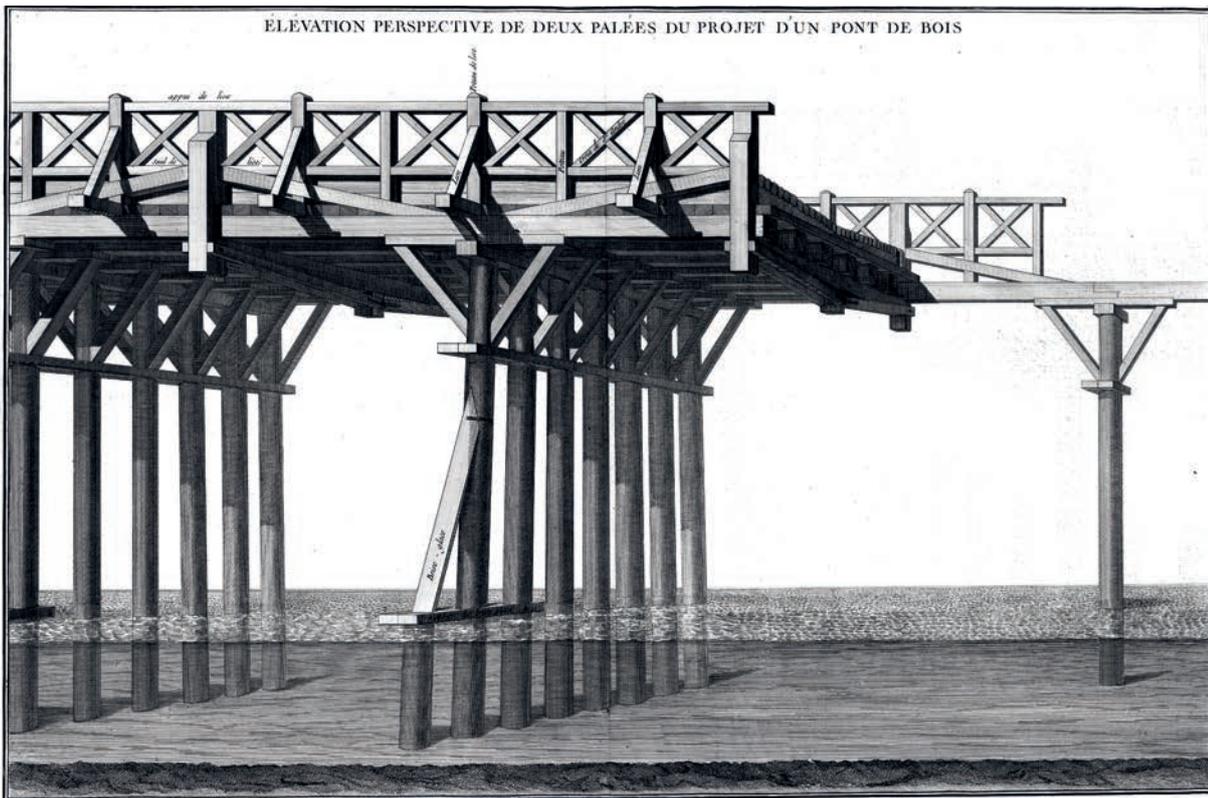


Abb. 15: Perspektive einer Pfahljochbrücke mit verstärkten Fahrbahnrandträgern (PITROU 1756)

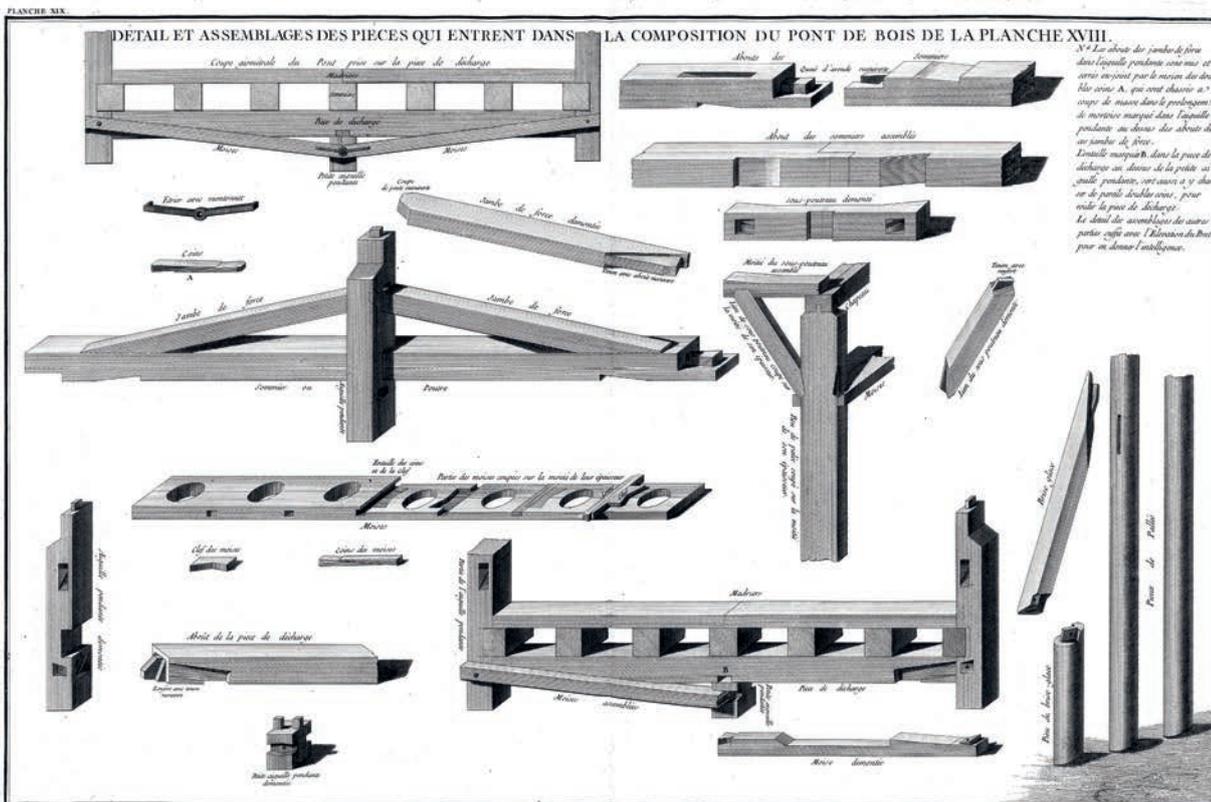


Abb. 16: Explosionszeichnung der Pfahljochbrücke mit verstärktem Randträger (PITROU 1756)

dieser Variante des Hängewerks sind zwei Hängesäulen vorhanden, die jeweils durch eine seitlich zum Auflager des Streckbalkens führende Strebe gehalten werden. Gegeneinander stützen sich die Hängesäulen über einen dazwischen gelegten, horizontalen Druckbalken, der «Spannriegel» genannt wird (wie beim Sprengwerk). Auch beim doppelten Hängewerk sind in der Regel die wichtigen Holz-Holz-Verbindungen als Versätze ausgeführt. Der Streckbalken wird wiederum durch Hängeisen oder andere zugfeste Verbindungsmittel an den beiden Hängesäulen aufgehängt. Auch das doppelte Hängewerk existiert sicherlich schon seit der römischen Antike und findet sich häufig in Dachwerken des Mittelmeerraums bis zur Gegenwart.

Im Holzbrückenbau waren bei grösseren Spannweiten einfache und doppelte Hängewerke jahrhundertlang das wichtigste Konstruktionsprinzip überhaupt (Abb. 14). Ohne grundsätzliche Änderung des Prinzips lassen sich auch weitere Hängesäulen hinzufügen, die z.B. die Hängewerksstreben umfassen. Je nach Höhe des Hängewerkes kann dieses in die Brüstung der Brücke einbezogen werden oder geht weit über das Fahrbahnniveau hinaus. Der wandartige Träger, der durch das Hängewerk ausgebildet wird, muss durch seitliche Streben in der Lotrechten gehalten werden.

Das doppelte Hängewerk ist nur dann formstabil, wenn der Streckbalken ungestossen durchläuft. Besteht er aus mehreren Stücken, so bildet das rechteckige Mittelfeld einen verschieblichen Viergelenkrahmen und muss daher wie in Abb. 14 rechts durch Andreaskreuze ausgesteift werden.

Abb. 15 und 16 zeigen Abbildungen einer Pfahljochbrücke aus der französischen Brückenbauliteratur. Die Brückenfahrbahn liegt hier über Sattelhölzer auf den Jochbalken der Pfahljoche. Die Sattelhölzer sind zu den Tragpfählen hin durch kurze Kopfbänder abgestrebt und stützen sich auf Zangenhölzer, die die ganze Pfahlreihe umfassen. Die Brückenrandträger sind durch einfache, in die Brüstung integrierte Hängewerke verstärkt, die die Fahrbahn in Feldmitte mittels eines Fahrbahnquerträgers unterstützen. Erst die Explosionszeichnung (Abb. 16) verdeutlicht, wie viele komplizierte Holzverbindungen schon in einer auf den ersten Blick so einfach aussehenden Brückenkonstruktion stecken. Der Fahrbahnquerträger ist hier in Art eines «unterspannten Balkens» ausgeführt. Dieser entspricht einem auf den Kopf gestellten Hängewerk. Dabei wird die «Hängesäule» zur druckbelasteten Strebe, während die «Hängewerksstreben» sich in eine zugbelastete «Unterspannung» verwandeln und daher an ihren Enden zugfest angeschlossen werden müssen.

Die entscheidenden Bauteile einer Hängewerkbrücke sind die Hängesäulen. An ihnen konzentrieren sich die für die Tragwirkung der Brücke massgebenden Anschlüsse. Im Rahmen der Lehrveranstaltung sind daher mindestens für eine Hängesäule des Brückentragwerks die Verbindungen in ähnlicher Art wie in Abb. 16

als Explosionsdarstellung zu zeichnen. Das «Innenleben» der Verbindungen kann durch Stochern mit einem dünnen Metall-Lineal meist ohne grössere Probleme ermittelt werden, da selten alle Verbindungen einer Brücke absolut passgenau und lückenlos schliessen.

VOM HÄNGE- UND SPRENGWERK ZUR TRAGWAND

In den meisten Fällen zeigen reale Brücken keines der bisher diskutierten Konstruktionsprinzipien in Reinform, sondern sind meist als Mischung und Überlagerung verschiedener Tragwerksideen konzipiert. Die Überlagerung oder Addition verschiedener Tragwerksideen ist ein Charakteristikum der Bautechnik von ca. 1600 bis ca. 1850. Insbesondere treten Spreng- und Hängewerk meist gemeinsam auf. Da die Versatzanschlüsse der Hängewerksstreben ausreichend Vorholz benötigen, um die hohen Kräfte schadlos in den Streckbalken einleiten zu können, rücken die Anschlusspunkte der Hängewerksstreben meist etwas nach innen in das zu überspannende Feld. Die an dieser Stelle aufzunehmende vertikale Auflagerkraft wird sodann durch unter der Brückenfahrbahn angeordnete kurze Streben in die Widerlager bzw. Pfeiler weitergeleitet. Zur Verminderung der Beanspruchung der einzelnen Streben werden diese oft durch mehrere parallel zueinander verlaufende Hölzer oder durch verdoppelte Balken gebildet. Die Streben können dann auch noch fächerförmig mit unterschiedlichen Neigungen ausgeführt werden. So ergibt sich schon aus der Anwendung der fundamentalen Prinzipien eine Vielfalt verschiedener Brückenträgerformen. Ein Beispiel aus der Mitte des 18. Jahrhunderts ist in Abb. 17 dargestellt. Die Hauptkonstruktion der Brücke wird durch ein doppeltes Hängewerk gebildet. Unter der Brücke liegt ein doppeltes Sprengwerk. Am Auflager werden die Streckbalken durch Verzahnung verstärkt. Das doppelte Hängewerk wird durch zusätzliche Hängesäulen ergänzt, die die Grundkonstruktion zangenartig umgreifen. Die Hängesäulen sind hier so weit hochgeführt, dass eine rechteckige Brückenwand entsteht und die Brücke durch ein Satteldach überdeckt werden kann. Überdachung war bis um 1800 die Regel bei allen hölzernen Brücken.

Bei Systemen wie dem in Abb. 17 dargestellten kann man auch auf den Gedanken kommen, die Streben des Hängewerks an den Auflagerenden der Brücke bis unter die Brückenfahrbahn weiterzuführen. Auch diese Konstruktionsweise ist bei vielen historischen Brücken zu sehen. Das Grundprinzip ist in Abb. 18 dargestellt. Diese Konstruktionsart wird manchmal als «Hängesprengwerk» bezeichnet.

Dieses Brückensystem hat den Nachteil, dass die Horizontalkräfte der Hängewerksstreben nicht mehr durch den Streckbalken kurzgeschlossen werden, sondern in die Widerlager abgeleitet werden. Solche Brücken eigneten sich daher vor allem für tief eingeschnittene

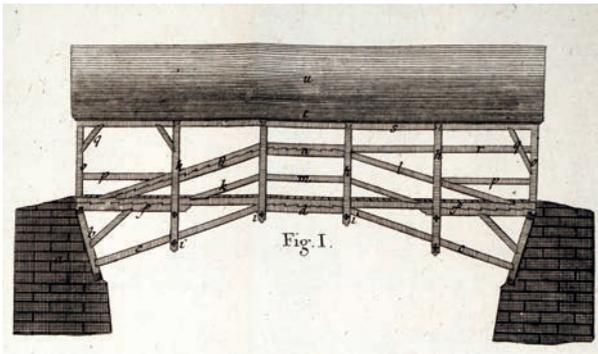


Abb. 17: Brückentragwerk als Kombination aus Hänge- und Sprengwerk (WALTER 1766)

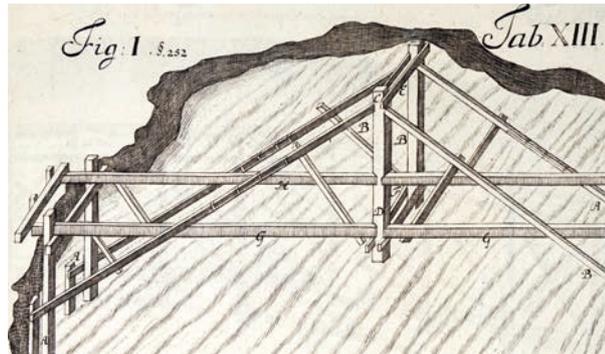


Abb. 18: Prinzip einer Hängewerksbrücke mit unter der Fahrbahn weitergeführten Streben (LEUPOLD 1726 nach GROLIER DE SERVIÈRE 1719)

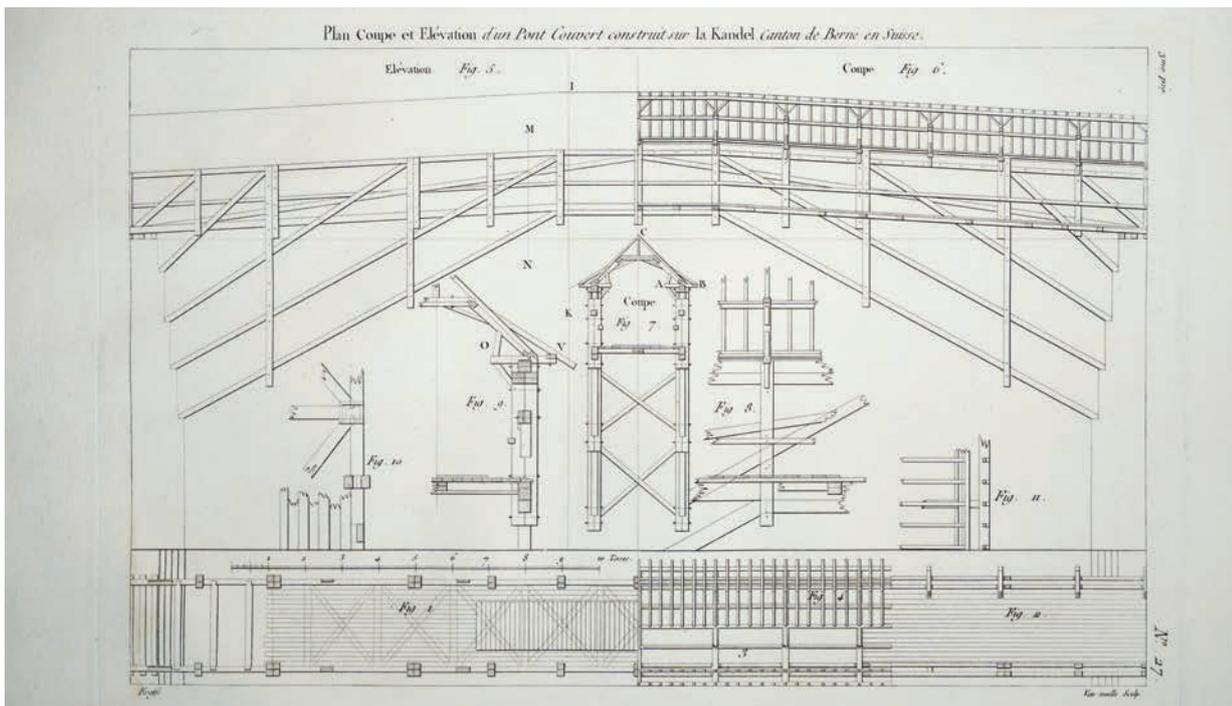


Abb. 19: Im Jahre 1764 von dem Zimmerer Joseph Ritter aus Luzern errichtete Brücke über die Kander (KRAFFT 1805)

Schluchten, in deren Seitenwände die Horizontalkräfte ohne Probleme abgetragen werden konnten. Zu den bekanntesten in der Literatur immer wieder erwähnten Brücken eines solchen Systems gehörte eine Brücke über die Kander bei Spiez (Abb. 19). Beim gezeigten Beispiel überlagern sich überdies die Systeme des Hängewerks und des reinen Sprengwerks (gebildet durch das unterste Strebenpaar und den Spannriegel unter der Fahrbahn). Dass die Fahrbahn wie bei diesem Beispiel leicht nach oben überhöht ist, ist ein oft bei Brücken anzutreffender konstruktiver Kunstgriff: Durch das Spiel in den Holzverbindungen setzt sich jedes hochbelastete Holztragwerk anfänglich etwas. Wird die Fahrbahn perfekt horizontal ausgerichtet, so hängt sie infolgedessen nachher etwas durch. Das Durchhängen war einer der von den Zimmerern meistgefürchteten Effekte, dessen Vermeidung sie als Ehrensache ansahen. Um einem Durchhängen vorzubeugen, ist die Fahrbahn meist leicht nach

oben gekrümmt, um die erwarteten Senkungen zu kompensieren. In ähnlicher Weise wurden auch steinerne Brückenbögen absichtlich überhöht hergestellt. Meist war die real eintretende Senkung geringer als die durch Überhöhung antizipierte. In solchen Fällen lässt sich auch heute eine leichte Überhöhung des Brückentragwerkes nachweisen (genau nachmessen!).

Abb. 19 zeigt ausserdem im Grundriss ein weiteres wesentliches Konstruktionselement von Brücken mit wandartigen Hauptträgern, den unter der Fahrbahn liegenden «Windverband», hier in Form liegender Andreaskreuze, die die beiden Brückenträger miteinander verbinden und die Widerstandsfähigkeit der Brücke gegen horizontale Windlasten verbessern. Die aussteifende Wirkung des Bohlenbelages der Fahrbahn allein reicht in der Regel nicht aus, um die horizontalen Windlasten auf die Brücke angemessen aufzunehmen. Man braucht vielmehr einen gut ausgeführten Windverband. Bei

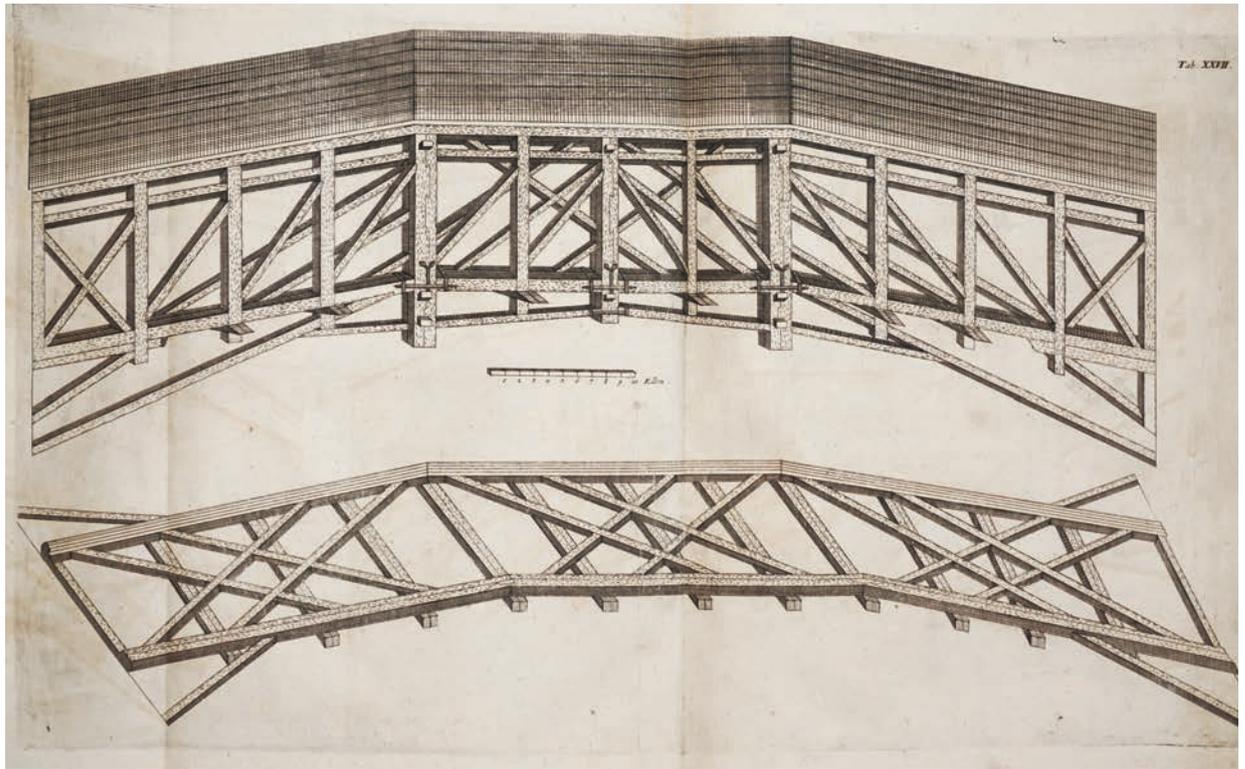


Abb. 20: Entwurf einer Brücke mit der Grundstruktur eines doppelten Hängewerks und perspektivischer Darstellung der Fahrbahnträger mit rautenförmigem Windverband (VOGEL 1708)

überdachten Brücken liegt ein zweiter Windverband in der Ebene der Dachtraufe. Der Windverband kann auch die Form überlagerter Andreaskreuze haben (Abb. 20), also den Charakter eines «Rautenverbandes» annehmen. Bei der Betrachtung der Konstruktion einer Holzbrücke darf niemals die Untersicht vergessen werden, da nur dort der Windverband unter der Fahrbahn sichtbar ist!

Ausserdem sind bei dem Brückenentwurf von Abb. 20 alle Rechteckfelder zwischen Streckbalken, Hängesäulen und dem oberen Begrenzungsholz der Tragwand, dem «Rähm», konsequent durch Diagonalen ausgesteift, da der Streckbalken nicht über die gesamte Brückenlänge durchläuft, sondern sich aus drei Stücken zusammensetzt und leicht polygonal gebrochen ist.

Die seitliche Stabilität der Konstruktion ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Langlebigkeit der Brücke. Bei Brücken mit Dach können auch die Hängesäulen der beiden Tragwände durch horizontale Balken und Eckaussteifungen (Kopf- und Fussbänder) zu stabilen portalartigen Queraussteifungsrahmen verbunden werden. Abb. 21 zeigt einen Brückenentwurf des frühen 18. Jahrhunderts, bei dem nicht nur die den Streckbalken umgreifenden Hängesäulen, sondern auch die Fahrbahnträger und die Dachbalken verdoppelt und durch Eckaussteifungen zu einem massiven Rahmen verbunden sind.

Hänge- und Sprengwerke können nicht nur durch Vervielfachung der Streben verstärkt werden, sondern auch durch Überlagerung. Zu den frühesten Bildzeugnissen für diese Idee gehören Brückenentwürfe aus

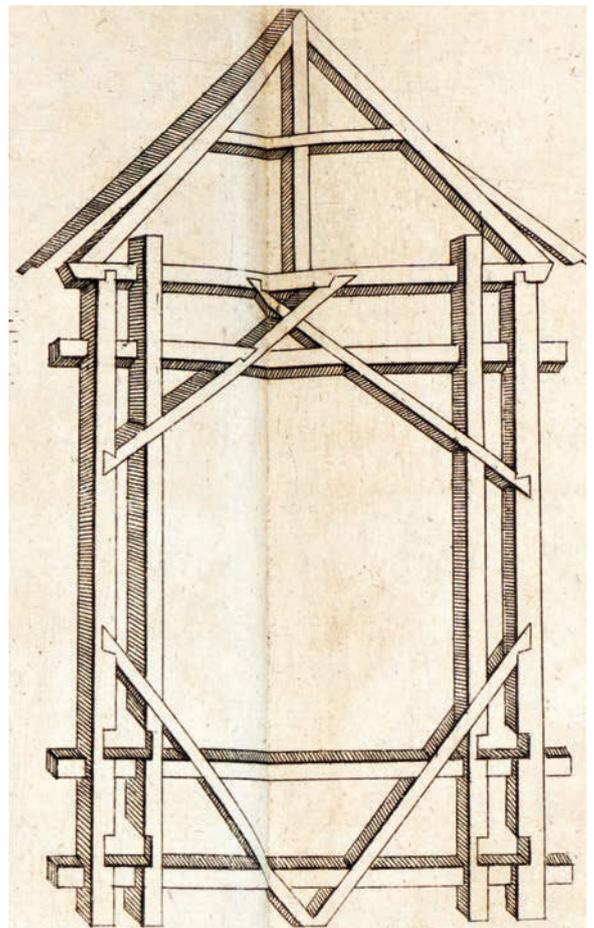


Abb. 21: Queraussteifung der Brücke durch Kopf- und Fussbänder (VOGEL 1708)

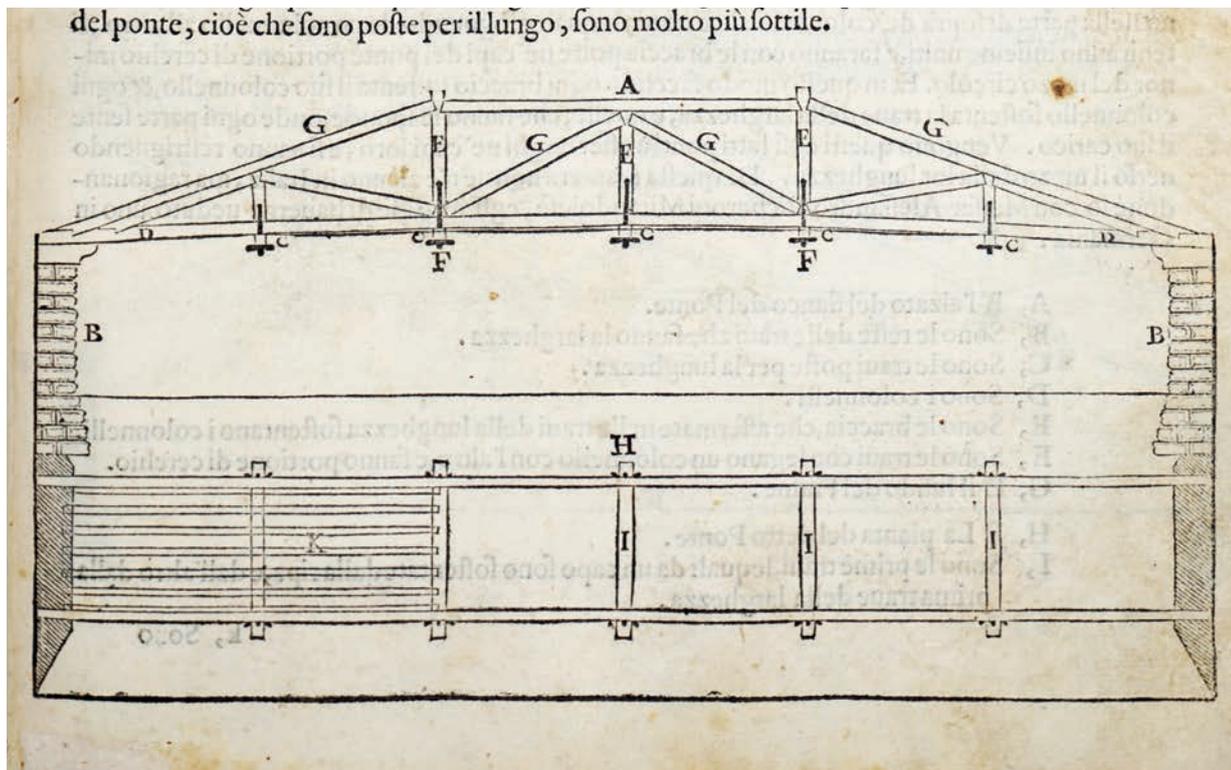


Abb. 22: Überlagerung doppelter und einfacher Hängewerke (PALLADIO 1570)

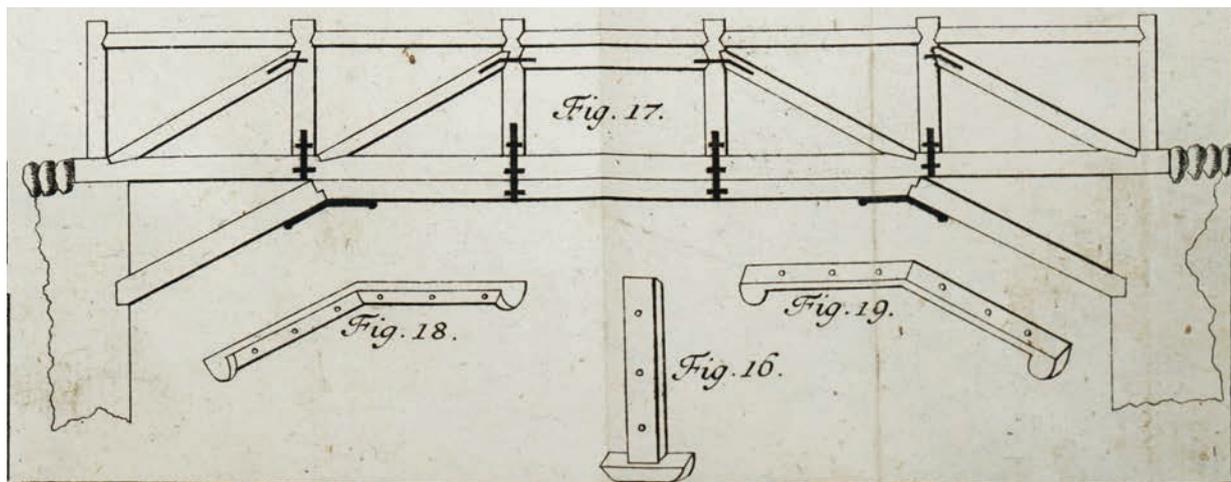


Abb. 23: Ineinander eingestellte doppelte Hängewerke in Kombination mit einem Sprengwerk [VOCH 1777 nach Sturm oder Leupold auf Grundlage von PALLADIO 1570]

Andrea Palladios *Quattro Libri* (Abb. 22). Palladio lernte diese sehr zweckmässigen Konstruktionen im Alpenraum kennen und übernahm ihre Konstruktionsidee. In die drei- und viereckförmigen Gefache eines doppelten Hängewerks werden hier weitere einfache Hängewerke eingestellt, so dass sich im Gesamtbild eine Struktur ergibt, die der einer «Fachwerkbrücke» des 19. Jahrhunderts verblüffend ähnelt, die sich aus «Dreiecksmaschen» zusammensetzt. Die dahinterstehende Denkweise ist jedoch eine völlig andere. Rekursiv ineinander geschachtelte Tragwerke sind auch bei Schweizer Holzbrücken anzutreffen.

Die Idee der Superposition von geschachtelten Hängewerken lässt sich auch noch mit zusätzlichen stützenden Sprengwerken kombinieren. In Abb. 23 ist eine Prinzipskizze aus einem Lehrbuch des späten 18. Jahrhunderts zu sehen, die das Prinzip ganz klar verdeutlicht. Bis hin zu den Versatzanschlüssen und den eisernen Verbindungselementen ist hier die Zeichnung Palladios als Vorbild klar erkennbar. Jedoch wurden solche Brücken vom 18. Jahrhundert bis um die Mitte des 19. Jahrhunderts auch sehr häufig gebaut. Abb. 24 zeigt als Beispiel eine Abbildung aus einem Holzbaulehrbuch des späten 18. Jahrhunderts. Hier wird das Prinzip der

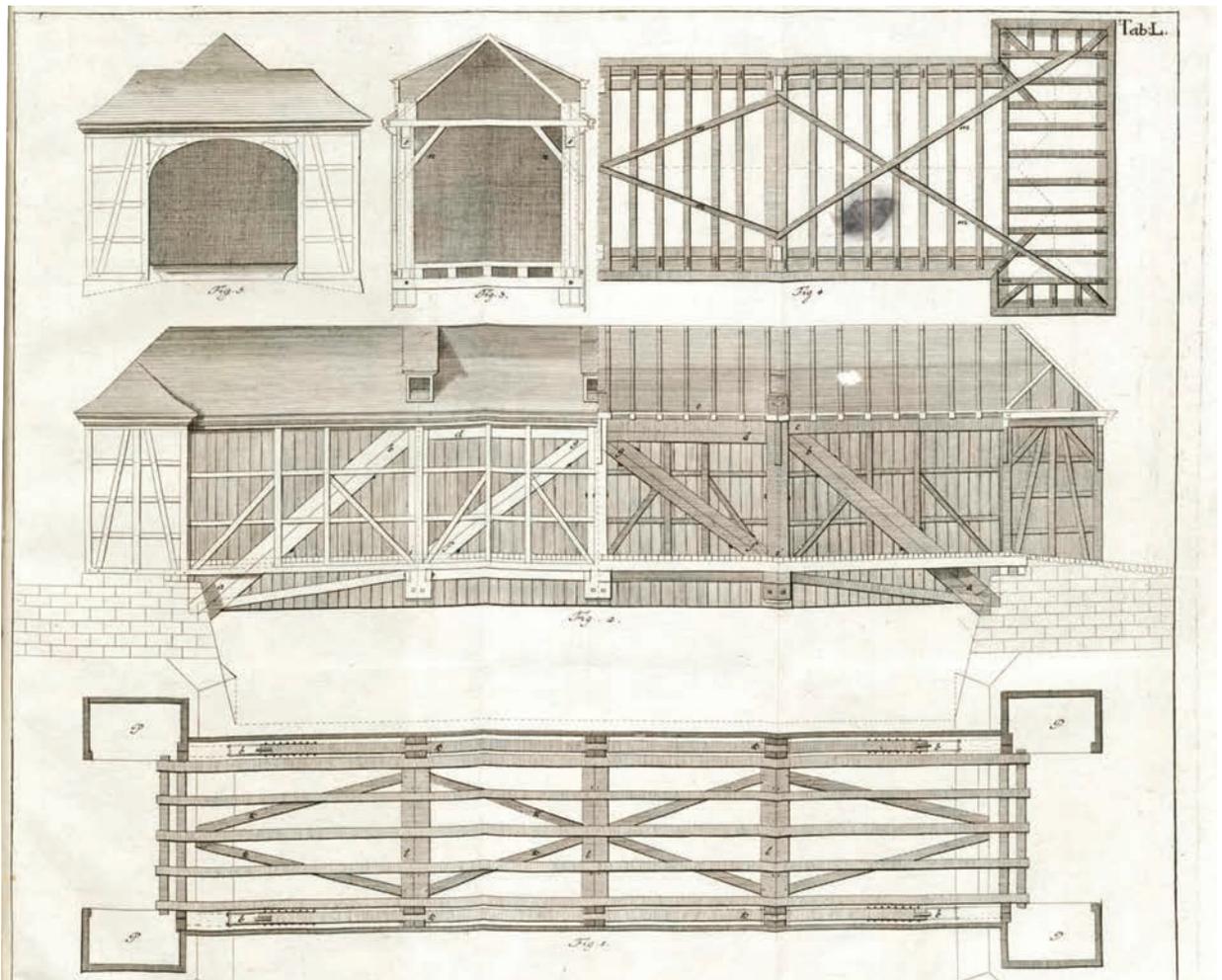


Abb. 24: Brücke mit doppeltem Hängewerk, in dessen Mittelfeld ein einfaches Hängewerk eingestellt ist und das durch ein flaches Hängewerk unterstützt wird (KOCH 1783)

geschachtelten Hängewerke mit einem Satteldach kombiniert. Solche klar strukturierten Hänge- und Sprengwerke sind bei vielen erhaltenen Holzbrücken der Zeit in der Schweiz tatsächlich anzutreffen.

Im Laufe des 18. Jahrhunderts setzte allerdings eine Tendenz ein, durch Häufung derartiger überlagerter Grundkonstruktionen die bis dahin gültigen Spannweitengrenzen von Holzbrücken von höchstens ca. 30 m zu überwinden. Es entstehen nunmehr sehr verwirrende, redundante, vielfach statisch unbestimmte Tragwerke (Abb. 25), bei denen nicht mehr klar ist, welcher Lastanteil den einzelnen Konstruktionselementen zufällt. Je mehr Systeme überlagert werden, desto komplizierter stellen sich auch die Anschlüsse dar, und es bilden sich vielfältige Balkenüberschneidungen, die ihrerseits die Konstruktion wieder schwächen. Manche dieser in den Traktaten dargestellten Brücken können nur auf dem Papier existieren, da sich in der dreidimensionalen Realität unüberwindliche Schwierigkeiten mit der Knotenpunktausführung ergäben.

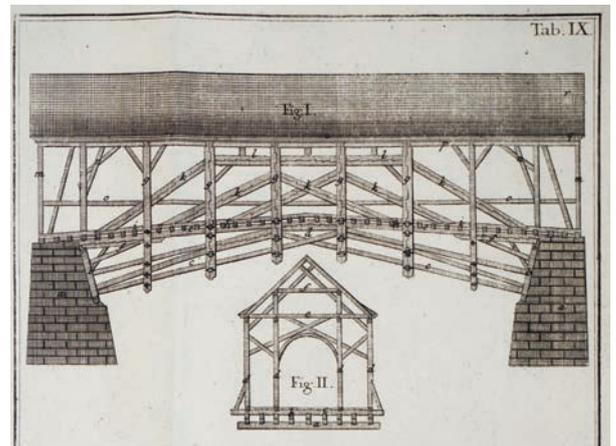


Abb. 25: Überlagerung doppelter und einfacher Hängewerke (WALTER 1766)

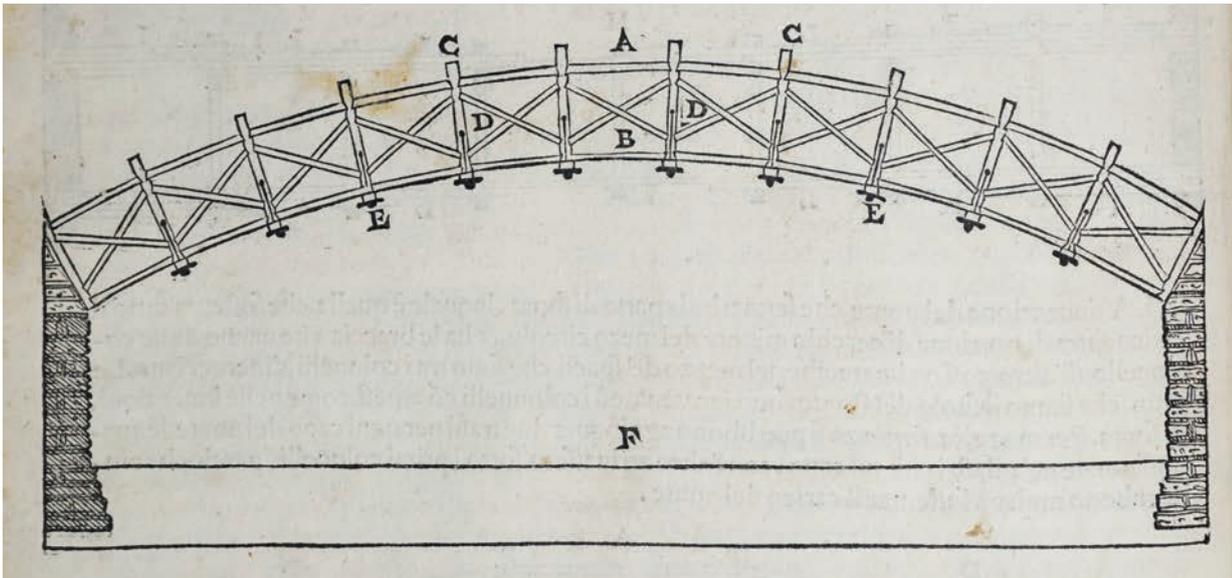


Abb. 26: Holzbrücke in Nachbildung eines aus Keilsteinen zusammengesetzten Steingewölbes (PALLADIO 1570)

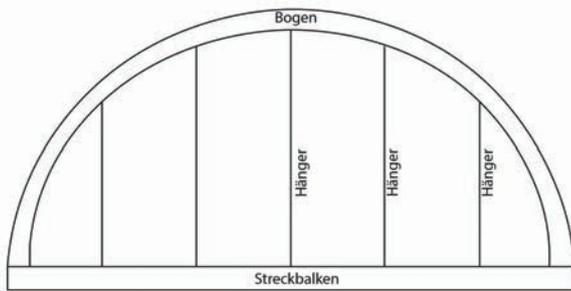


Abb. 27: Prinzip des Bogenhängewerkes

BÖGEN UND STABPOLYGONE

Wenngleich das Standardrepertoire des Holzbrückenbaus vor allem aus den Komponenten «Hängewerk» und «Sprengwerk», allenfalls in Überlagerung der Einzeltragwerke und in Kombination mit verdoppelten Balken, besteht, so wurden doch auch schon sehr früh weitere Konstruktionsideen ausprobiert. Zu den im späten 18. Jahrhundert extrem populär werdenden Konzepten zählt dabei die Idee, aus den Holzbalken einen Bogen wie beim Bau steinerner gewölbter Brücken zu bilden. Dem Bogen aus Keilsteinen traute man von jeher fast unbegrenzte Tragkraft zu. Will man einen Bogen aus hölzernen Balken bilden, so muss der Bogen allerdings gegenüber der Idee des Steinbogens abstrahiert werden: Man kann die «Keilsteine» als ausgesteifte Gefache nachbilden, den Bogen durch einen polygonal gebrochenen Stabzug (oder mehrere geschachtelte Stabzüge) ersetzen oder aber einen massiven Bogen aus entsprechend zurechtgeschnittenen oder zurechtgebogenen Hölzern zusammensetzen. Alle drei Methoden finden sich in der historischen Brückenbau-Literatur, erfreuten sich aber

jeweils zu verschiedenen Zeiten besonderer Beliebtheit.

Die erste Idee – also der aus hölzernen «Keilsteinen» zusammengesetzte Bogen – findet sich zum ersten Mal in der gedruckten Literatur wiederum bei Palladio (Abb. 26). Palladio zeigt einen Bogen, der aus radial ausgerichteten Hängesäulen besteht, zwischen die jeweils eine Aussteifung in Form eines Andreaskreuzes eingespannt ist. Die Fahrbahn wird von Querträgern gehalten, die mit Hängeeisen an den Hängesäulen befestigt sind. Obwohl eine solche Konstruktion bei gleichmässiger Belastung auf der ganzen Brückenlänge gut funktioniert, ist sie doch mangelhaft, da die Anschlüsse der Ausfachungen nicht zugfest sind. Bei Überfahrt einer Last wechselt in den einzelnen Streben die Belastung von Druck zu Zug, die Lastpfade müssen sich umsortieren, und die Brücke erleidet dabei eine wellenförmige Bewegung. Durch die Be- und Entlastung der Anschlüsse werden diese recht schnell schadhaft, und die Tragfähigkeit der ganzen Brücke leidet recht schnell. Erhaltene historische Holzbrücken nach diesem System gibt es daher nicht. Erst mit der Einführung des Gusseisens in den Brückenbau gegen Ende des 18. Jahrhunderts erfuhr Palladios Idee eine Neubelebung.

Wesentlich erfolgreicher war die Idee des Bogenhängewerkes (Abb. 27). Das Bogenhängewerk besteht aus einem Bogen, dessen horizontaler Schub nicht auf die Widerlager abgegeben wird, sondern durch den Streckbalken wie durch eine gespannte Sehne aufgenommen wird. Der Streckbalken, der zugleich als Fahrbahnträger fungiert, wird an dem Bogen durch Hängesäulen (aus Holz) oder Hängestangen (aus Eisen) aufgehängt. Somit kann seine Biegebeanspruchung stark reduziert werden, und er kann eine grosse Spannweite erhalten. Die Aufhängelasten werden in den Bogen eingetragen und belasten diesen auf Druck und auf Biegung. Wegen der punktwisen Einleitung der Aufhängekräfte in den

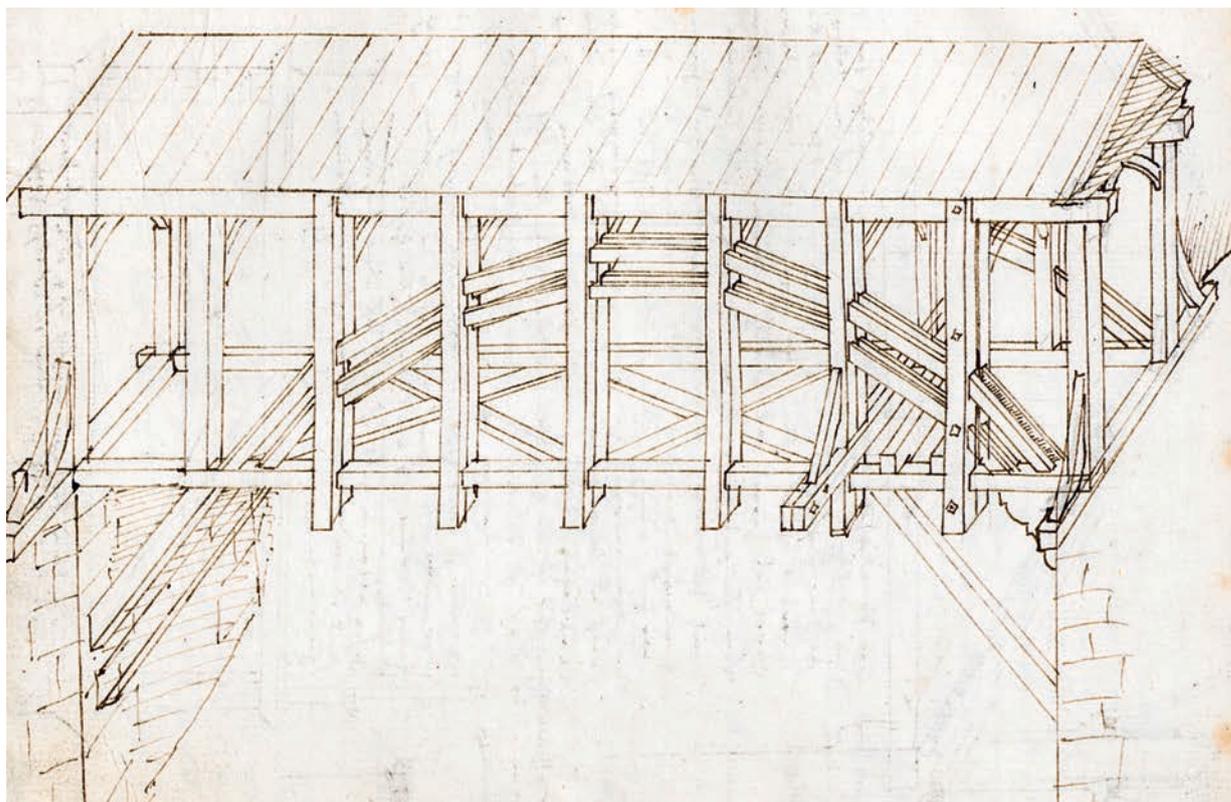


Abb. 28: Holzbrücke mit bogenartigem, polygonal gebrochenem Stabzug als Grundlage eines Hängewerks (Heinrich Schickhardt, 1598, Raiss in Italia, Manuskript Cod. hist. qt. 148, Württembergische Landesbibliothek Stuttgart)

Bogen ist es günstiger, diesem eine polygonale Form anstelle der gerundeten Form zu geben. So kommt man zu einem eckigen «Stabpolygon» oder «Stabbogen», dessen einzelne Stäbe ausschliesslich durch Druckkräfte beansprucht werden. Das ganze System funktioniert allerdings nur dann zuverlässig, wenn der Streckbalken tatsächlich dazu in der Lage ist, die auftretenden Zugkräfte aufzunehmen, wenn der Bogen fest in den Streckbalken eingesetzt ist und wenn auch die Hänger am oberen und unteren Ende ausreichend zugfest angeschlossen sind. Das Bogenhängewerk in seiner in Abb. 27 gezeigten Grundform ist allerdings auch unter diesen Voraussetzungen nicht besonders formstabil. Nur wenn der Streckbalken auch für Biegebeanspruchung als durchlaufender Träger funktioniert, können unsymmetrische Lasten einigermaßen verformungsarm aufgenommen werden. Sowohl der Streckbalken als auch der Bogen sind jedoch wegen ihrer Schlankheit nur bedingt zur Aufnahme von Biegebeanspruchungen geeignet. Zur zusätzlichen Stabilisierung des Bogenhängewerks empfiehlt sich daher die Aussteifung der einzelnen durch die Hänger, den Bogen und die Bogensehne gebildeten Gefache durch diagonale Streben.

Das Bogenhängewerk auf Grundlage eines Stabpolygons hat ebenfalls eine lange Geschichte. Schon 1598 sah der aus Stuttgart kommende Architekt und Baumeister Heinrich Schickhardt auf dem Weg nach Venedig in Klausen/Südtirol eine Holzbrücke, deren Haupttragwerk durch einen Stabbogen gebildet wurde (Abb. 28). Genau

besehen handelt es sich sogar um zwei nebeneinanderliegende und zudem auch noch in radialer Richtung verdoppelte polygonale bogenförmige Stabzüge. An diesem Stabbogen ist die Brückenfahrbahn mit doppelten Hängesäulen aufgehängt. Die verdoppelten Hängesäulen werden offenbar durch eiserne geschraubte Bolzen zusammengehalten. Die Hängesäulen tragen oben ein horizontales Rähm als oberen Abschluss der Tragwand. Dieses Rähm dient als Basis für das Satteldach der Brücke. Nicht ganz klar ist aus Schickhardts Zeichnung die Verbindung zwischen Stabpolygon und Streckbalken. Ausserdem liegt offenbar der Fusspunkt des Stabbogens innerhalb der Lichtweite der Brücke, weshalb zusätzliche Sprengstreben vom Widerlager her den Streckbalken stützen. Dieser konstruktive Mangel ist bei vielen historischen Bogenhängewerken zu finden. Er wurde durch die Notwendigkeit eines ausreichenden Vorholzes zum Versatz des Bogens in den Streckbalken mitveranlasst. Manchmal sind historische Bogenhängewerke auch in Art eines «Bogen-Hängesprengwerkes» ausgeführt, d.h. der Bogen stemmt sich unterhalb der Fahrbahn gegen die Widerlager, und der Streckbalken fungiert lediglich als Fahrbahnträger, ohne den Bogenschub aufzunehmen, oder nimmt nur einen Teil des Bogenschubes auf. Wie ein normales Hängesprengwerk funktioniert eine solche Konstruktion nur bei unverschieblichen Widerlagern. Auch die Bogenhängewerke und Bogenhängesprengwerke wurden aus dem Holzbau im 19. Jahrhundert in den Eisenbau übernommen, zum Beispiel in Form der

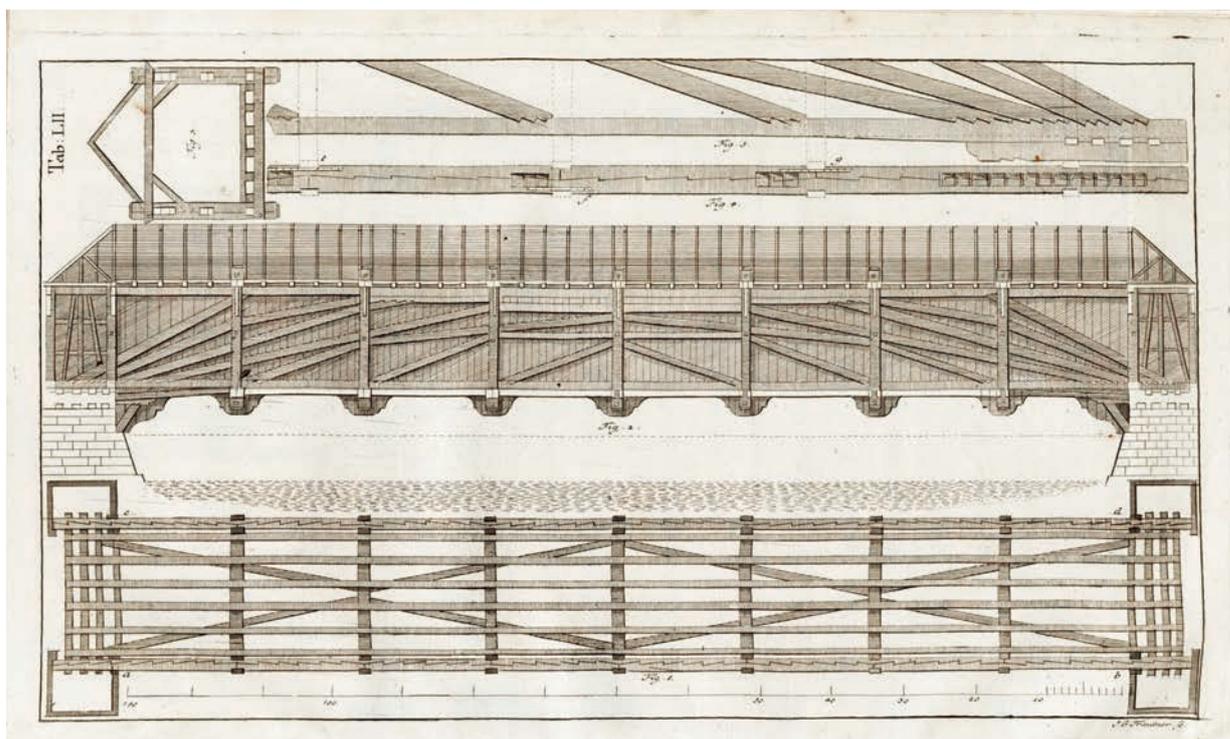


Abb. 30: Überlagerte Hängewerke oder Stabpolygon? (KOCH 1783)

«Pons Vergniais» des aus Lyon stammenden Ingenieurs Jean-Louis Vergniais (1850er Jahre).

Schon im 18. Jahrhundert erfreuten sich die hölzernen Bogenhängewerke mit Stabpolygon wachsender Beliebtheit, und sie stellten ein Markenzeichen gerade des Schweizer Holzbaus dar – bei Brücken wie auch bei Dachwerken. Im Prinzip ist es auch möglich, einen polygonalen Stabzug unter der Fahrbahn anzuordnen und die Fahrbahn dann über vertikale oder radiale Streben auf diesen Bogen abzustützen. Die Streben sind dann auf Druck belastet, werden aber trotzdem ähnlich wie Hängesäulen konstruiert. Das Gesamttragwerk ähnelt dann jenem einer Massivbogenbrücke mit aufgeständerter Fahrbahn. Diese Idee kam jedoch weitaus seltener zur Anwendung – schon allein wegen des unter der Fahrbahn notwendigen Platzes – und ist eher für die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts typisch.

Der Stabbogen wird immer durch zangenartig ausgebildete, durch eiserne Bolzen und ggf. zusätzlich durch Verzahnungen zusammengehaltene Hängesäulen gefasst (Abb. 29). Bei zahlreichen Brücken erweis sich das Bogenhängewerk als nicht ausreichend formstabil – so auch bei der in Abb. 29 dargestellten Brücke des württembergischen Zimmermeisters Etzel über den Neckar bei Plochingen. In solchen Fällen mussten zusätzliche Aussteifungen in den Gefachen angebracht werden. Aus diesen schlechten Erfahrungen heraus kam das Bogenhängewerk ab dem ausgehenden 18. Jahrhundert meist nicht in Reinform zur Anwendung, sondern in redundanten Kombinationen mit anderen Tragwerksformen.

Die Grenzen zwischen der Überlagerung von Hänge-

werken und dem «echten» Stabbogen sind fließend. Bild 30 zeigt als Beispiel einen Brückenentwurf des späten 18. Jahrhunderts mit einem vielfachen Hängewerk. An jeder Hängesäule ist mindestens ein Stabzug geknickt, so dass man das Tragwerk wahlweise als Überlagerung klassischer Hängewerke oder als aus mehreren ineinander geschachtelten Stabpolygonen bestehenden Bogen lesen kann. Abb. 30 zeigt schön den Versatz der Stäbe des Bogens in den Streckbalken. Dieser Anschluss stellt sicher, dass der Bogenschub nicht in die Widerlager eingeleitet wird, sondern durch die Bogensehne aufgenommen wird. Um die langen Streckbalken auch als Ganzes zugfest zu machen, schlägt der Entwerfer von Abb. 30 vor, ihn aus zwei Hälften durch Verzahnung zusammenzusetzen. An den Stossstellen (siehe Grundriss in Abb. 30) muss allerdings jeweils eine Balkenhälfte allein die Zugkraft übertragen, was zu exzentrischer Beanspruchung – zudem noch an einer durch die Zähne besonders geschwächten Stelle – führt und daher keine überzeugende Lösung ist. Schweizer Zimmerleute führten den zugfesten Stoss meist als «Schaffhauser Schloss» aus, eine mehrfach verkämte, kompliziert herzustellende Überblattung.

Die grössten überhaupt je errichteten handwerklichen Holzbrücken Europas, die Brücken über den Rhein in Schaffhausen und Reichenau sowie über die Thur in Lütisburg, alle erbaut im letzten Viertel des 18. Jahrhunderts von Schweizer Zimmerleuten aus dem Appenzell, verwendeten alle den in die Tragwand integrierten Stabbogen mit Zugband. Abb. 31 zeigt als Beispiel die zu ihrer Zeit weltberühmte Rheinbrücke Schaffhausen von

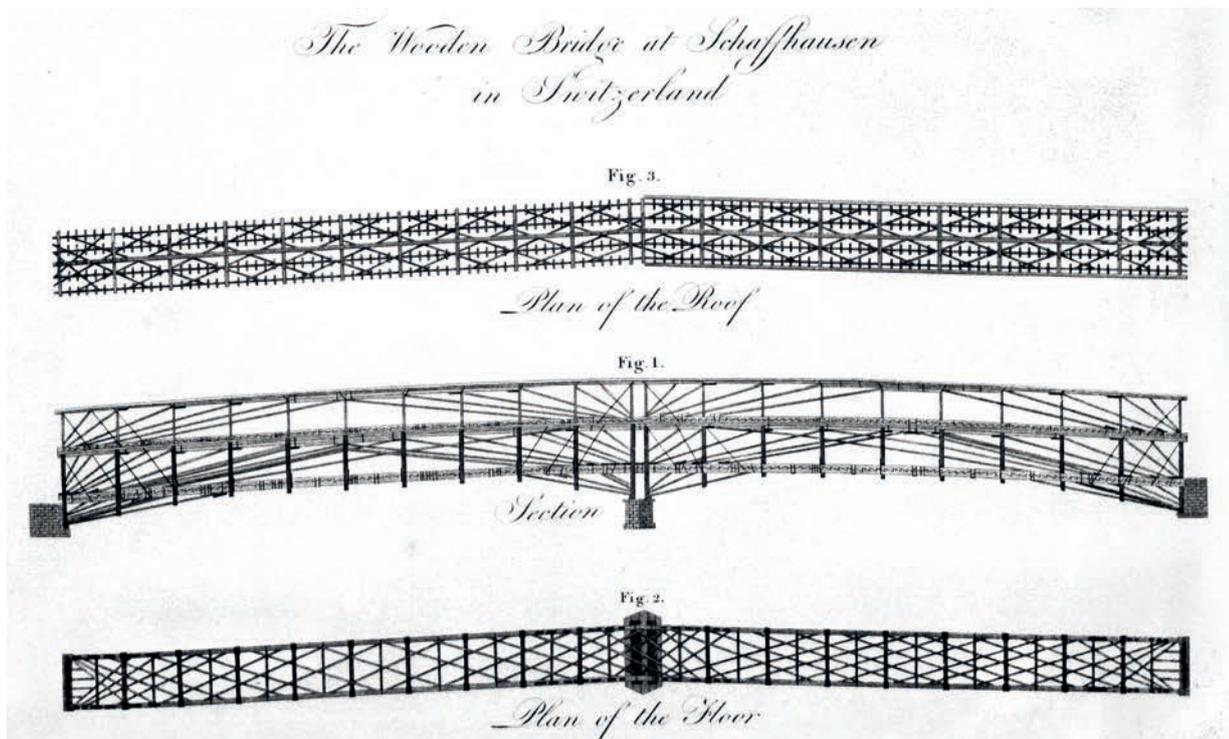


Abb. 31: In die Tragwand und in das Dachwerk integrierte Stabbögen der Rheinbrücke bei Schaffhausen von Johann Ulrich Grubenmann, 1758 (Brewster, Edinburgh Encyclopaedia 1830)

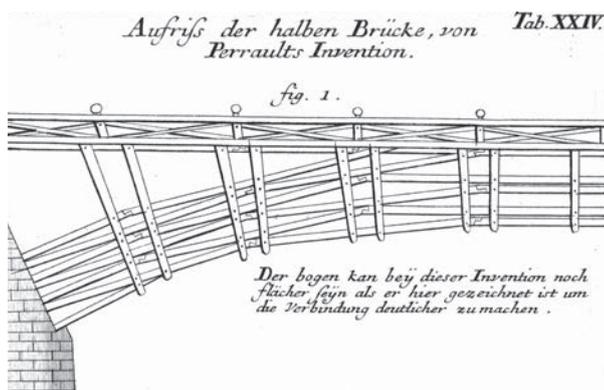


Abb. 32: Brückenmodell Claude Perraults mit geschachtelten Stabbögen (STURM 1719)

Johann (Hans) Ulrich Grubenmann aus Teufen (Appenzell-Ausserrhoden). Diese Brücke war namensgebend für den zugfesten Stoss des Streckbalkens. Sie besteht aus einer Überlagerung eines die gesamte Flussbreite überspannenden Bogens mit zwei halb so weit gespannten Hängewerken, die sich auf den Zwischenpfeiler in Flussmitte stützen, was zu der unzutreffenden Legende Anlass gab, Grubenmann habe die Brücke so errichtet, dass sie auch ohne den Zwischenpfeiler stehen würde. Auch im Dachwerk der Schaffhauser Brücke waren Hängewerke angeordnet. Solche im Dachaufbau untergebrachten Verstärkungen können entweder eine Art firstunterstützende Längswand bilden, oder aber sie liegen als Aussteifungen in den Dachflächen, manchmal auch hier als Stabbögen. Beide Konstruktionsarten kommen auch ausserhalb des Brückenkontextes bei weitgespannten

Dachwerken vor, und es ist unklar, wo diese Ideen zum ersten Mal verwirklicht wurden. Grubenmanns Schaffhauser Brücke fand in der kurzen Zeit ihrer Existenz bis zur Vernichtung durch französische Truppen 1799 europaweite Beachtung und ist in fast jedem Brückenbau-Lehrbuch des 19. Jahrhunderts abgebildet. Als Beispiel für diese internationale Rezeption des Schweizer Holzbaus zeigt Abb. 31 einen Stich aus einer englischen Enzyklopädie.

DER ÜBER ECK GESCHACHELTE STABBÖGEN

Von der Vielzahl der Stabbögen hebt sich eine besondere Variante ab, die meist als unter der Fahrbahn liegender Bogen vorgeschlagen wurde (Abb. 32): Der Stabbogen wird dabei aus mehreren geschachtelten Polygonen gebildet, die so angeordnet sind, dass die Ecken des einen Stabzuges jeweils genau auf die Mitten der Stäbe des nächstfolgenden Stabbogens treffen. Diese Idee kann bis in das 17. Jahrhundert, und zwar zu Claude Perrault, dem Architekten der Louvre-Ostfassade und Übersetzer und Kommentator Vitruvs, zurückgeführt werden. Perrault schlug die Konstruktion (neben anderen Varianten) in den 1680er Jahren für eine Brücke über einen Arm der Seine bei Sèvres vor, die diesen ohne Zwischenpfeiler überspannen sollte. Die Brücke wurde zwar nie gebaut, aber dafür ein massstäbliches Modell, das im Louvre ausgestellt wurde und dort über Jahrzehnte zu bewundern war. Das Modell wurde mit einer aus Steinen errichteten, rund zwei Meter hohen Mauer belastet,

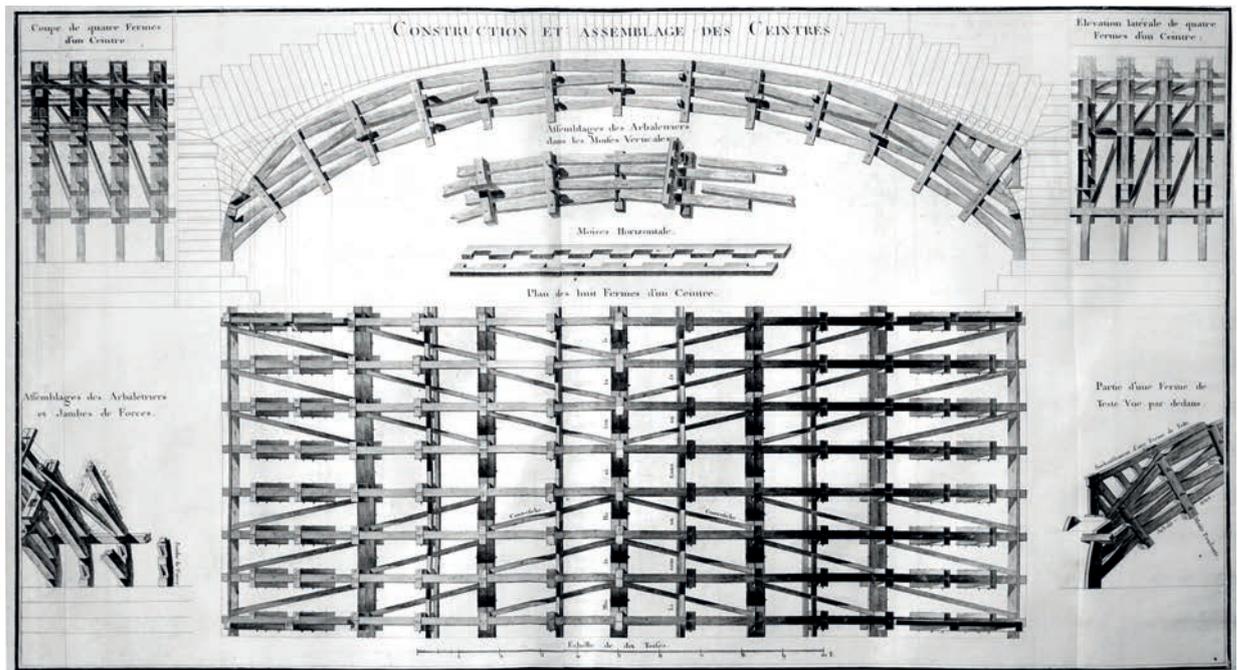


Abb. 33: Anwendung der geschachtelten Stabpolygone Claude Perraults bei der Konstruktion eines Lehrgerüsts für eine steinerne Brücke durch Jean-Rodolphe Perronet (PERRONET 1788)

um die Tragfähigkeit der Konstruktion zu «beweisen». Der deutsche Mathematiker und Architekturtheoretiker Leonhard Christoph Sturm besichtigte das Modell auf einer Studienreise, berichtete über seine Konstruktion und publizierte eine Zeichnung davon in seinen *Architectonischen Reise-Anmerkungen*. Die «Hängesäulen» der Stabpolygonbrücke sind nunmehr radial ausgerichtet wie bei Palladio, allerdings als doppelte, zangenförmige Hölzer ausgebildet, die die Stöße der Stäbe der Polygone fassen. In Frankreich sind solche «Hängezangen» mit radialer Ausrichtung seit dem 18. Jahrhundert sehr häufig und werden dort als «moises pendantes» bezeichnet. Sie werden fast immer durch geschraubte Eisenbolzen zusammengehalten. Sie laufen nach oben bis zur Fahrbahn weiter und tragen diese, wirken also nicht als Aufhängung, sondern als druckbelastete Streben.

Die Idee Perraults fand um die Mitte des 18. Jahrhunderts Eingang in den französischen Steinbrückenbau, und zwar als Konstruktion zum Bau der Lehrgerüste für die weitgespannten Brückengewölbe (Abb. 33). Allerdings sind auch die übereck geschachtelten Stabpolygone nicht ausreichend ausgesteift für einseitige oder ungleichmässige Belastung. Daher war die Konstruktion für Lehrgerüste eigentlich denkbar ungeeignet, doch traute man jeglicher Bogenkonstruktion geradezu unbegrenzte Tragfähigkeit zu und tröstete sich über die offenkundigen Nachteile damit, dass man die Verformbarkeit des Lehrgerüsts geradezu zur Tugend erklärte – damit sei es den Keilsteinen möglich, sich umso besser aufeinander zu pressen und somit nachher ein besonders stabiles und dauerhaftes Gewölbe zu bilden. Durch den Einfluss des Leiters der Pariser Ecole des Ponts et Chaussées, Jean-Rodolphe Perronet, hielt sich diese Art von Lehr-

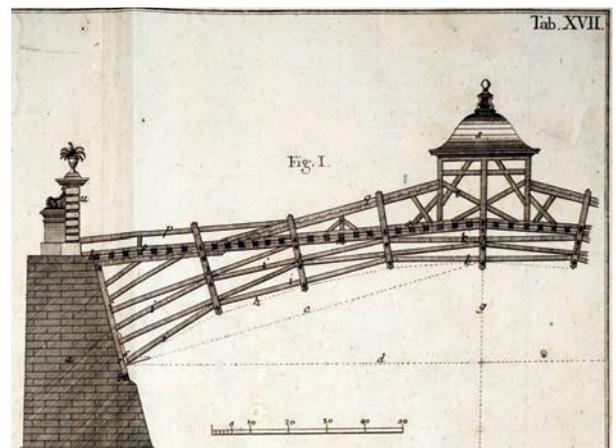


Abb. 34: Brücke mit geschachtelten Stabbögen (WALTER 1766)

gerüst in Frankreich bis in die 1830er Jahre, obwohl im ersten Drittel des 19. Jahrhunderts die eindeutig nachteiligen Effekte bereits wissenschaftlich bewiesen waren (u.a. von C.L.M.H. Navier).

Um die Mitte des 18. Jahrhundert taucht Perraults Vorschlag auch in der deutschen Zimmermannsliteratur auf. Selbst gestandene, erfahrene Praxis-Experten wie der Augsburger Caspar Walter konnten sich der Faszination der Idee nicht entziehen. Walter publizierte in seinem Lehrbuch zum Brückenbau gleich mehrere Entwürfe derartiger Brücken (Abb. 34). Walter liess sich auch von der Perraultschen Methode der «Modell-Statik» inspirieren und konstruierte seinerseits ein Modell einer nach ähnlichem Prinzip konstruierten Brücke, allerdings mit zusätzlichen traditionellen Tragwänden (Abb. 35).

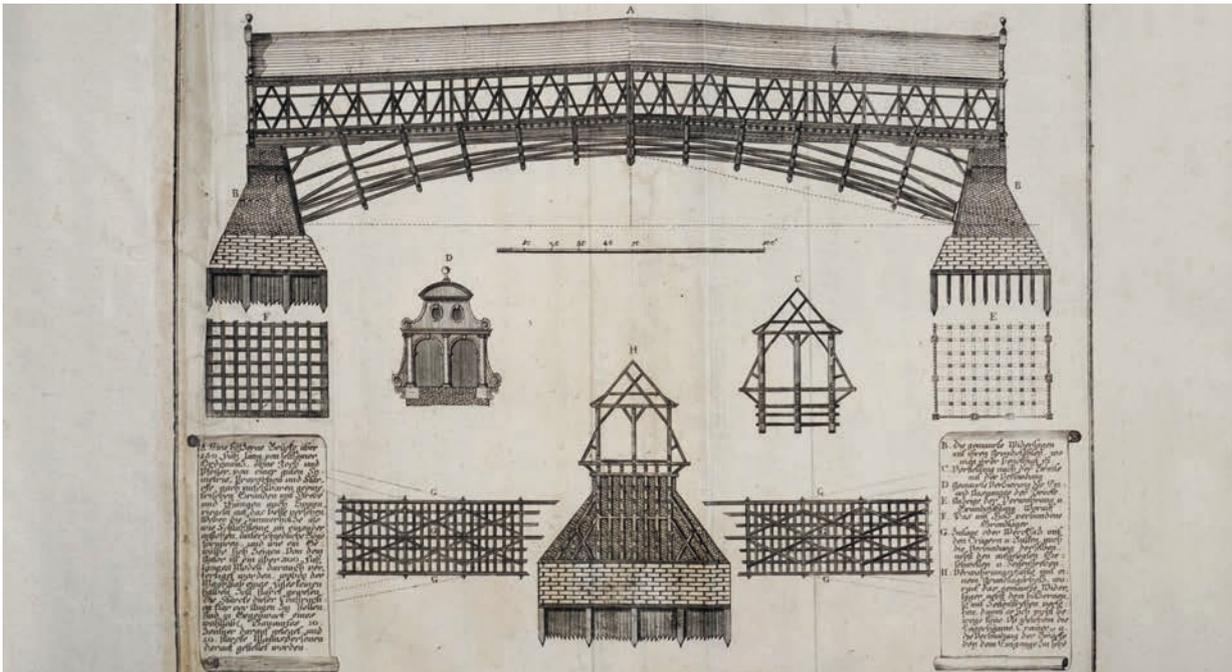


Abb. 35: Brücke mit geschachtelten Stabbögen (WALTER 1766)

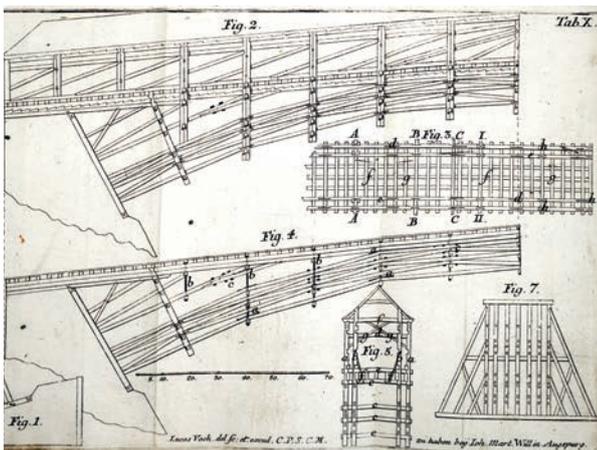


Abb. 36: Brücke mit geschachtelten Stabbögen und Hängewerken (VOCHO 1777)

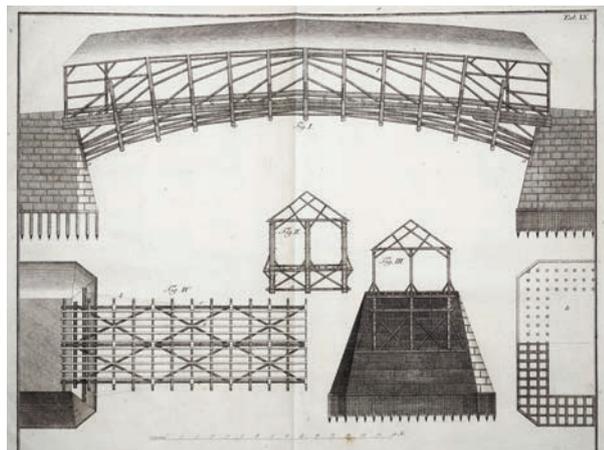


Abb. 37: Brücke mit geschachtelten Stabbögen und Hängewerken (BRUST 1801)

Von einer gedachten Brücke dieser Bauart von 80 Metern (250 Fuss) Spannweite (!) baute Walter ein Modell im Massstab 1:25 und belastete es mit 10 Zentnern und zusätzlich, wie die Legende seiner Abbildung besagt (Abb. 35), mit «zehn starcken Mannspersonen», um die vermeintliche Realisierbarkeit von Riesenbrücken dieser Art zu beweisen: Die Brücke in Originalgrösse, so die Idee dieser «Modellstatik», würde dann eine gewaltige, proportional vergrösserte Last tragen können. Diese Überlegung ist natürlich offenkundig falsch, und schon mit Galileis Mechanik von 1638 (*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Leiden: Elzevir 1638) hätte man dies zeigen können. Es blieb jedoch dem grossen Basler Mathematiker Leonhard Euler vorbehalten, 1775 in einem Aufsatz *Regula facilis pro diiudicanda firmitate pontis* (in den *Acta Academiae Petropolitanae*)

endgültig die Unrichtigkeit dieser Idee mathematisch präzise vorzuführen sowie die korrekten Skalierungsregeln anzugeben: Da das Gewicht des Modells mit seinem Grössenmassstab L in der dritten Potenz L^3 wächst, der Widerstand der Konstruktion jedoch nur mit L^2 , wird ein genau nach den Proportionen des Modells konstruiertes reales Tragwerk bei einer gewissen Spannweite schon allein unter seinem Eigengewicht zusammenbrechen (Dasselbe, was hier für die Belastungen eines biegunsfreien Stabwerks angegeben wurde, gilt auch für Biegetragwerke: Das Biegemoment des Trägers aus Eigengewicht wächst mit der Dimension L wie L^4 , der Biege- widerstand wie L^3 , also wieder langsamer als die Beanspruchung). Es dauerte trotzdem noch einige Jahrzehnte, bevor sich die Eulerschen Erkenntnisse bis zu den Praktikern herumgesprochen hatten.

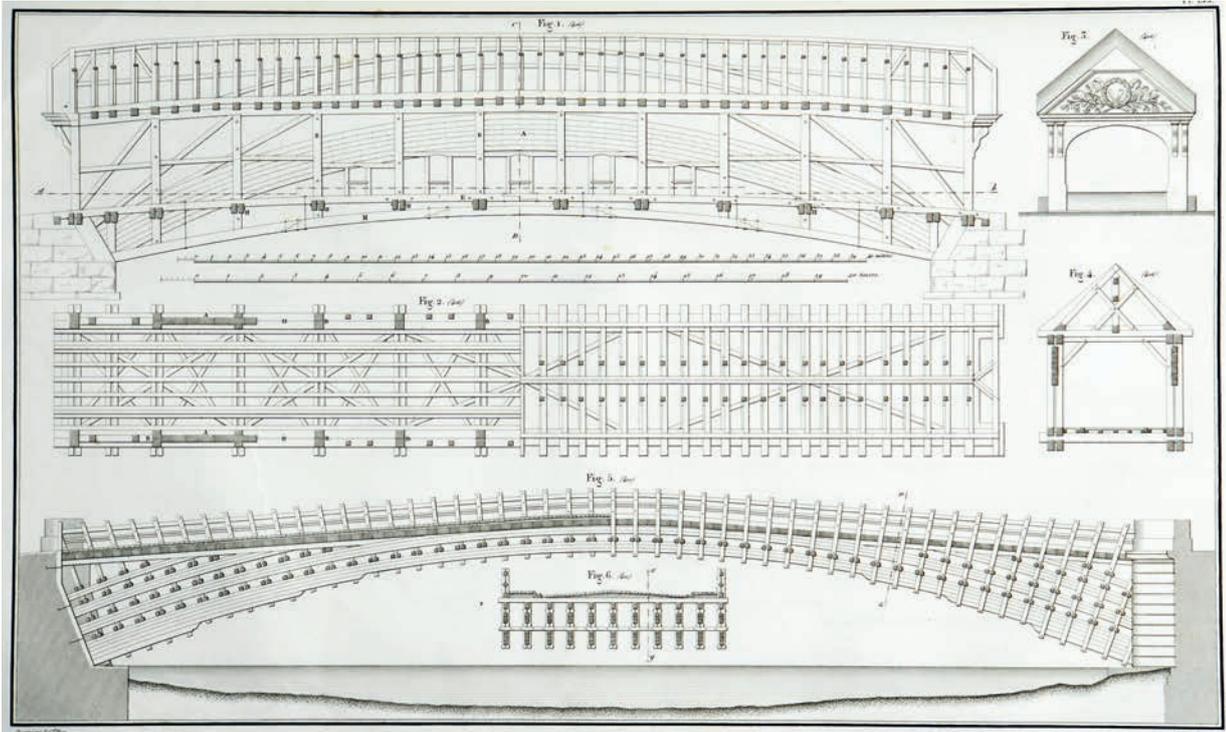


Abb. 41: Brücke über die Reuss in Mellingen, 1794 [EMY 1837–41 nach MECHEL 1803]



Abb. 42: Die Mellinger Reussbrücke kurz vor dem Abriss 1927 (BRUNNER 1925)

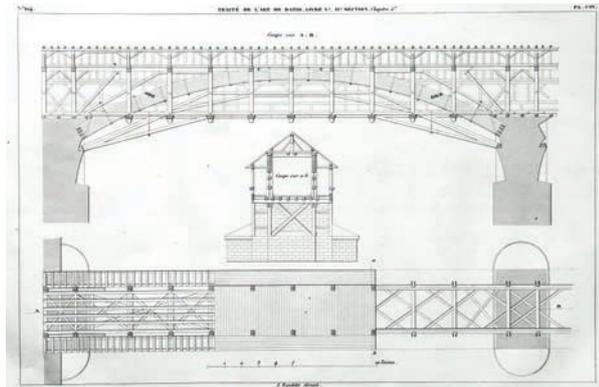


Abb. 43: Die Rheinbrücke Eglisau (RONDELET 1830)

Natürlich liess sich der verzahnte Bogen auch unter der Brückenfahrbahn anordnen und mit einem weiteren System in der Trägerwand der Brücke kombinieren. Eine Brücke dieser Art von phantastischer Spannweite stellte der Prager Hofzimmermeister M. Brust in seinem 1801 erschienenen Holzbaubuch vor (Abb. 40). Der verzahnte Massivholzbogen wird hier von radial angeordneten Hängesäulenzangen umfasst, die gleichzeitig jeweils mittlere Hängesäule eines ganz flachen Hängewerkes sind. Die Hängewerksstreben überlagern sich dabei so kompliziert, dass man sich fragt, wie sich M. Brust die Lösung der vielfältigen Überschneidungen im Detail vorstellte.

Grubemanns Beispiel machte auch in der Schweiz Schule. Die Idee der Massivbogen-Hängewerke wurde von dem Zimmerer Josef Ritter aus Luzern übernommen, der unter anderem 1794 die Brücke über die Reuss

in Mellingen errichtete (Abb. 41). Die Verzahnung der Bogenbalken war extrem arbeitsaufwendig. Daher lösten schon bald unverzahnte Balkenpakete die verzahnten Bögen ab. Allerdings ist ein unverzahrter Bogen wesentlich weniger steif als ein verzahrter. Wohl deshalb ergänzte Amand-Rose Emy die fehlenden Zähne, als er nach Mechel 1803 die Konstruktionszeichnung der Mellinger Brücke in sein Holzbau-Lehrbuch *Traité de l'Art de la Charpenterie* aufnahm (Abb. 41). Wie historische Fotos beweisen, war der Bogen dieser Brücke tatsächlich entsprechend Mechels Darstellung unverzahrt (Abb. 42).

Auch die ebenfalls in der zeitgenössischen Literatur vielfach abgebildete Rheinbrücke von Eglisau, die 1810 erbaut wurde, bestand aus unverzahrten Balken (Abb. 43). Bei dieser Brücke wie bei zahlreichen anderen derselben Zeit wurde der massive Holzbogen durch konven-

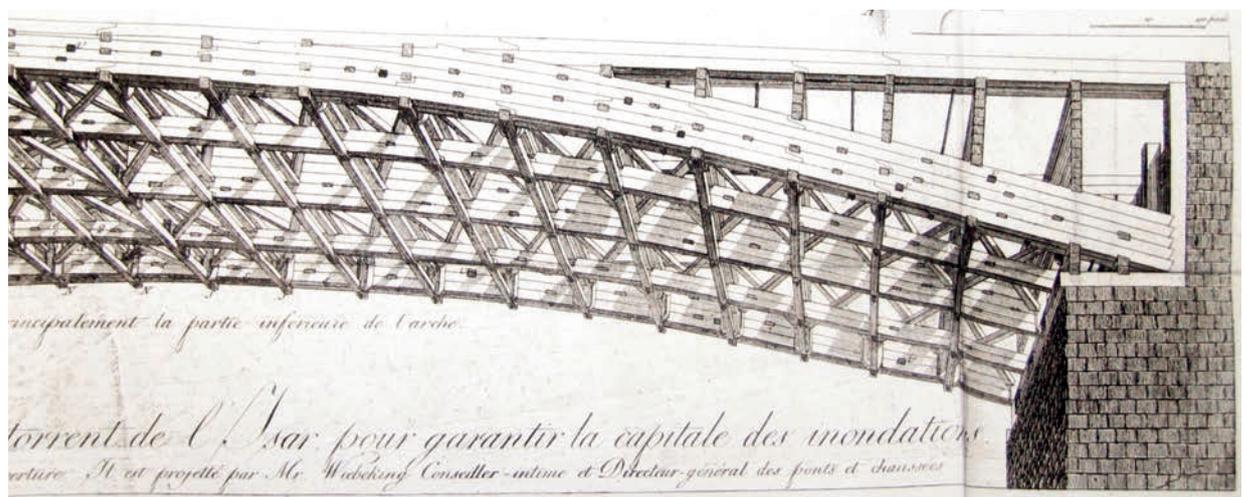


Abb. 44: Projekt einer Bogenbrücke über die Isar von C.F. Wiebeking. Deutlich ist hier die Verdübelung der Balken anstelle der wesentlich aufwendiger herzustellenden Verzahnung zu erkennen (WIEBEKING 1811–17)

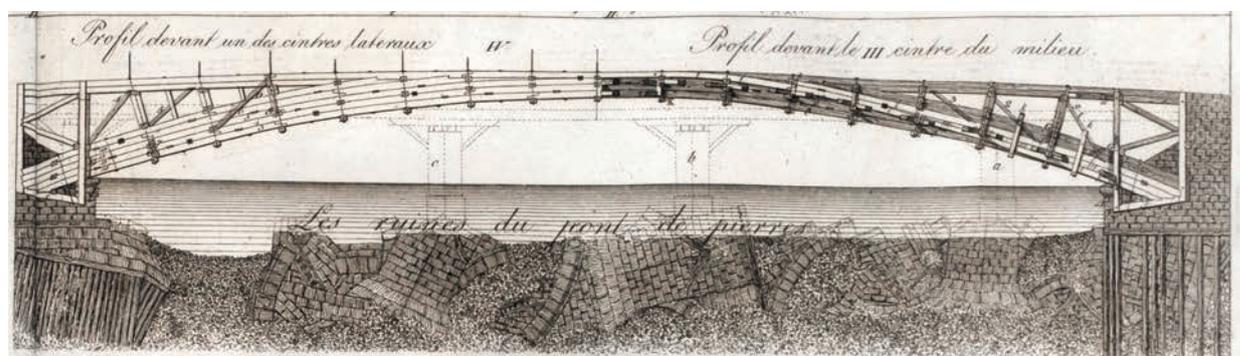


Abb. 45: Wiebekings Brücke über die Regnitz in Bamberg (WIEBEKING 1811–17)

tionelle Häng- und Sprengwerke ergänzt, was der Bogenkonstruktion zusätzliche Steifigkeit verlieh. Die Brücke, die den Rhein in zwei Bögen von je 45 m Spannweite mit einem Zwischenpfeiler überquerte, wurde erst im frühen 20. Jahrhundert abgebrochen. Noch spektakulärer war die von Richard La Nicca erbaute Brücke über das Versamer Tobel (GR) von 1828, die sich in einem einzigen Bogen von 55 m über die Schlucht spannte. Auch diese Brücke kombinierte den mehrlagigen Holzbogen über der Fahrbahn mit einem mehrfachen Sprengwerk unter der Fahrbahn.

Weniger aufwendige und dennoch wirksame Alternativen zur Verzahnung waren insbesondere Verdübelung und Verschraubung, gegebenenfalls ergänzt durch den ganzen Bogen umgreifende Eisenbügel. Offenbar war der Erste, der verdübelte Balkenbögen einsetzte, der bayerische Baubeamte Carl Friedrich von Wiebeking (Abb. 44). Wiebekings massive Holzbögen bestanden wie die der Schweizer Brückenbauer aus ganzen Balken, die gewaltsam aufeinander gebogen wurden. Die Unverschieblichkeit der einzelnen Lagen gegeneinander wurde durch entsprechende, in Aussparungen eingesetzte Hartholzklötze (Dübel) gewährleistet. Ausserdem waren Wiebekings Bögen in regelmässigen Abständen verschraubt. In einer Brücke – der Brücke über die Alz bei Altenmarkt – experimentierte Wiebeking sogar schon

mit verleimten Balkenlagen. Der damals verfügbare Knochenleim erwies sich freilich als nicht ausreichend dauerhaft, vor allem unter Feuchtigkeitseinwirkung.

Wiebeking erbaute vor allem im 1. Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts zahlreiche Brücken in Bayern nach seinem System, darunter auch die grösste Holzbrücke seiner Zeit mit 72 m Spannweite über die Regnitz in Bamberg (Abb. 45). Da die Brücken jedoch allesamt nicht überdacht waren, wurden sie schon nach sehr kurzer Zeit schadhaf und mussten ersetzt werden. Ausserdem klagte man auch bei Wiebekings Bogenbrücken über mangelnde Formstabilität. Dies lag daran, dass Wiebeking mit seinen Holzbrücken die flachgespannten französischen Steinbrücken imitieren wollte und daher den Bogen immer unter der Fahrbahn anordnete, ohne aussteifende Trägerwand über der Fahrbahn. Zur Aussteifung mit Streben standen daher nur die Bogenzwickel zur Verfügung, und dies reichte offenkundig nicht aus, um die Brücken vor vorzeitiger Zerstörung durch starke Verformungen zu bewahren.

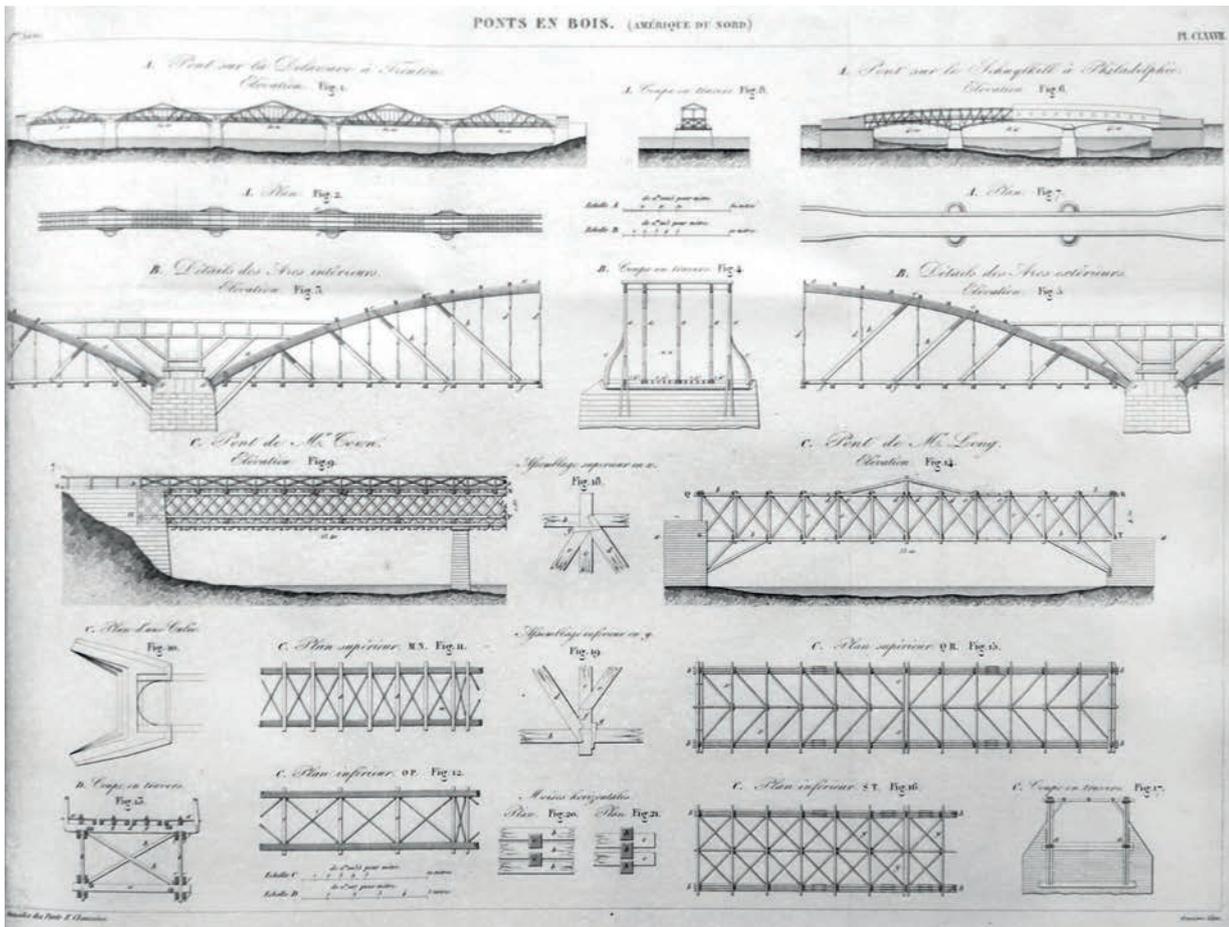


Abb. 46: Bericht in den Annales des Ponts et Chaussées von 1839 mit Abbildung nordamerikanischer Holzbrückensysteme (STEVENSON 1838)

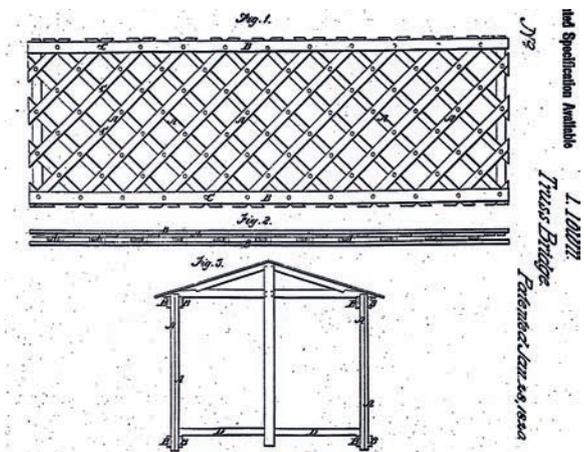


Abb. 47: Zeichnung der Townschen Lattenbrücke aus dem Patent an Ithiel Town von 1820 (United States Patent and Trademark Office, Patent Nr. 3169)

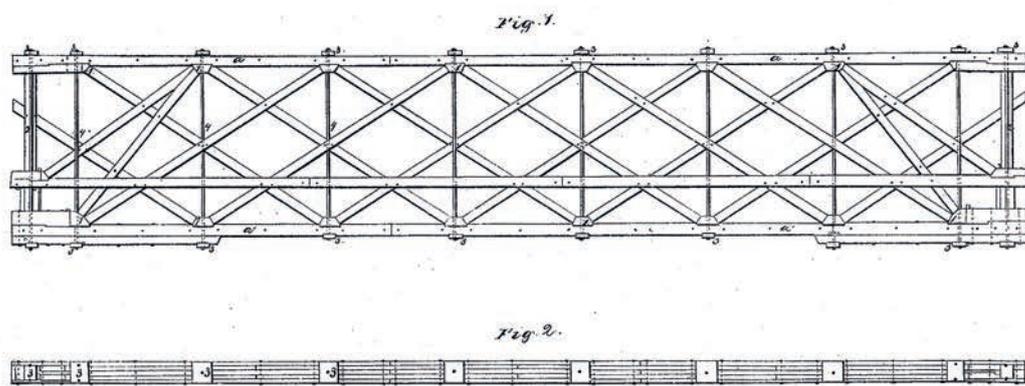
DER NORDAMERIKANISCHE BRÜCKENBAU UND DIE ANFÄNGE DES INGENIEURBAUS

In den 1830er und 1840er Jahren reisten zahlreiche europäische Eisenbahningenieure in die USA, um die dortigen Bahnbauten zu bestaunen, und publizierten sodann Reiseberichte über ihre Beobachtungen. Einen der ers-

ten Berichte, die auch den amerikanischen Holzbrückenbau in den Fokus nahmen, veröffentlichte 1838 der schottische Ingenieur David Stevenson, und Auszüge dieses Berichtes erschienen in deutscher Übersetzung 1839 in der in Wien erscheinenden *Allgemeinen Bauzeitung* und in französischer Version in den *Annales des Ponts et Chaussées* in Paris (Abb. 46).³ Dank des Holzreichtums Amerikas war dort das Holz das billigste und effizienteste Baumaterial für die zügige Herstellung der Eisenbahnlinien zur Erschließung des Landes. Der amerikanische Holzbau profitierte einerseits vom Knowhow ausgewanderter europäischer Zimmerleute (u.a. auch aus armen Regionen der Schweiz), hatte aber andererseits häufig mit dem Problem des Fehlens ausreichend qualifizierter Handwerker für die Ausführung der traditionellen europäischen zu kämpfen. Diverse Erfinder und experimentierfreudige Unternehmer führten daher neue Brückensysteme ein, die teils mit dem traditionellen europäischen Holzbrückenbau nichts mehr zu tun hatten.

Zu den älteren genuin amerikanischen Systemen zählte das Gitterträger-System von Ithiel Town (patentiert 1820 mit späteren Verbesserungen). Dieses Brückensystem wurde im Reisebericht Stevensons beschrieben (Abb. 46, links unten, und Abb. 47). Die Townschen

3 Auch der erst 1841 erschienene Tafelband zu Émy 1837-41 enthält eine Beschreibung und Zeichnung der amerikanischen Brücken nach System Town.

N^o 1711W. Howe.
Truss Bridge.

Patented Aug. 3, 1840.

Abb. 48: Zeichnung der Brücken-Tragwand zum Patent von William Howe (U.S. Patent Nr. 1711)

«lattice girder bridges» verzichten völlig auf zimmermannsmässige Holzverbindungen. Die Tragwand der Brücke besteht aus einem engmaschigen Netz aufeinander gelegter und an den Kreuzungspunkten vernagelter Bohlen bzw. Bretter sowie einem angenagelten Ober- und Untergurt. Als Holzverbindungen kamen ausschliesslich eichene Holznägel an den Kreuzungspunkten zum Einsatz, eigentlich zimmermannsmässige Anschlüsse gab es hingegen nicht. Dies kam der Ausführung unter Einsatz nicht weiter qualifizierter Hilfskräfte entgegen. Die Tragwände der Townschen Brücken litten allerdings unter unzureichender seitlicher Steifigkeit, und es stellte sich schnell heraus, dass sie die in sie gesetzten Erwartungen bezüglich Tragkraft und Dauerhaftigkeit (Lockerung der Nagelungen) nicht erfüllten. Dennoch wurden auch in der Schweiz einige Brücken dieses Typs ausgeführt, und mindestens ein Exemplar (die Rotenbrücke nahe der Lochmühle bei Teufen AR) ist heute noch erhalten.

Grösseren Erfolg als das Townsche Konstruktionschema hatte das ebenfalls in den Vereinigten Staaten patentierte (1840) System von William Howe (Abb. 48). Der Howesche Brückenträger besteht aus einem durchgehenden Ober- und Untergurt. Die beiden parallelen Gurte werden durch ein im Vergleich zum Townschen «Lattengitter» grobmaschiges Netz aus Vollholzstreben miteinander verbunden. Ober- und Untergurt sind durch eiserne Stangen zusammengespant. Die Zugspannung in diesen Stangen kann durch Muttern reguliert werden. Sie wird so eingestellt, dass alle Diagonalstreben des «Gitterwerkes» unter allen denkbaren Lasten keinesfalls Zugspannungen erleiden, sondern immer auf Druck beansprucht sind (Prinzip der Vorspannung). Aus diesem Grund können die Streben des Gitterwerkes auch beim Howeschen Träger ohne zimmermannsmäs-

sige Anschlüsse bleiben, sondern stossen einfach stumpf auf eichene Klötze von dachförmigen Querschnitt. Durch diese Klötze sind auch die Zugstangen durchgefädelt, so dass der ganze Träger nach Anziehen der Spannmuttern fest zusammengehalten wird. Der später durch den Bau der Semmeringbahn berühmt gewordene österreichische Eisenbahningenieur Karl v. Ghega sowie der ebenfalls später als Statik-Professor am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich bekannt gewordene bayerische Eisenbahningenieur Karl Culmann berichteten um die Mitte des 19. Jahrhunderts in Veröffentlichungen von diesem genialen Brückensystem. Es wurde insbesondere in den ausgehenden 1840er und den 1850er Jahren und ganz besonders bei Eisenbahnbrücken im deutschsprachigen Raum häufig eingesetzt, so auch in der Schweiz, hier allerdings oft auch für Strassenverbindungen. Erhalten sind z.B. die Brücke über den Rhein zwischen Vaduz und Sevelen SG und der Punt Russein über das Val Russein bei Disentis GR (Abb. 49). Die zeitgenössischen Abbildungen des Bauvorganges der letztgenannten Brücke zeigen eindrucksvoll das grosse, ebenfalls aus Holz konstruierte Aufstellgerüst.

Zwar war das Howesche System statisch keinesfalls einfach rechnerisch zu analysieren, da sich der Einfluss der Vorspannung nur schwer bestimmen liess und letztlich stark von der Ausführung auf der Baustelle abhing. Dennoch bildeten Systeme wie das von Town und jenes von Howe den Ansatzpunkt für Karl Culmann, seine «Fachwerktheorie», also eine Theorie der Stabtragwerke mit ausschliesslich längsbelasteten Stäben, zu entwickeln. Diese Theorie machte ab 1851 die rechnerische Dimensionierung von hölzernen Brückentragwerken möglich, also die Konstruktion optimierter Tragwerke, bei denen kein Holz stärker zu sein brauchte, als es die

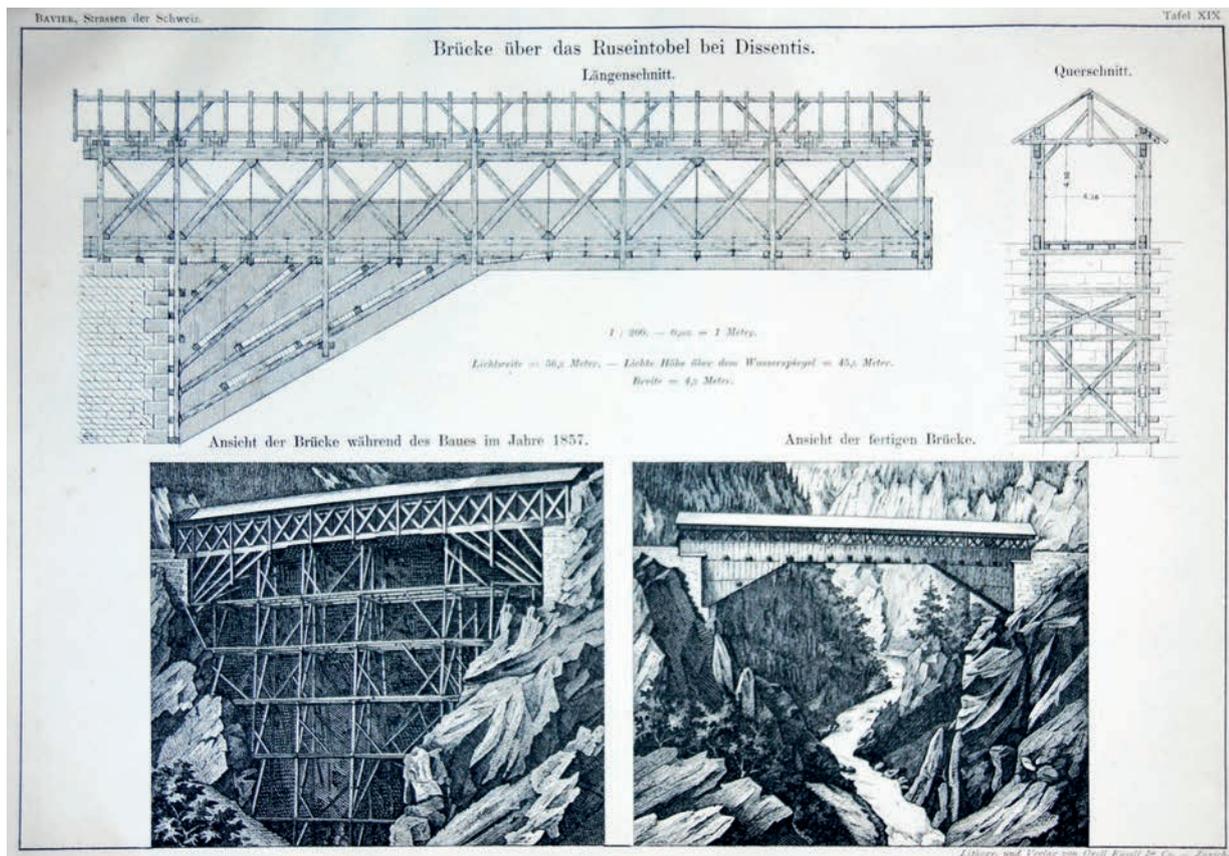


Abb. 49: Die heute noch existierende Brücke nach System Howe über die Russein-Schlucht bei Dissentis GR (1857; BAVIER 1878)

Belastung erforderte, und bei denen ein klar definierter, statisch bestimmter Lastabtrag stattfand.

Mit den amerikanischen Systemen und der Culmannschen Fachwerktheorie wurde das Ende der jahrhundertelangen Tradition des Holzbrückenbaus auch in der Schweiz eingeleitet. Rationale, aus Dreiecksmaschen zusammengesetzte Brückentragwerke verdrängten die komplizierten, aus mehreren sich überlagernden Tragsystemen gebildeten Brücken der handwerklichen Zeit. Überhaupt wurden Holzbrücken nach 1851 seltener: In Eisenbahnlinien lehnte man sie wegen der Brandgefahr (Dampflokotiven mit Funkenflug!) zunehmend ab,

bei Strassenbrücken hatte man Bedenken wegen der kurzen Lebensdauer und des hohen Unterhaltungsaufwandes. Zunächst wurden die Holzbrücken durch Eisenbrücken, ab dem ausgehenden 19. Jahrhundert dann zunehmend wieder durch die langlebigen und unterhaltsarmen Steinbrücken, im 20. Jahrhundert schliesslich durch Betonbrücken verdrängt. Beim Bau der Aufstell- und Lehrgerüste der Stahl-, Stein- und Betonbrücken spielte allerdings bis weit ins 20. Jahrhundert das Holz immer noch eine entscheidende Rolle, und die grosse Tradition des Schweizer Holzbrückenbaus lebte wenigstens in diesen temporären Konstruktionen fort.

QUELLEN

- PALLADIO 1570**
Palladio, Andrea: I quattro libri dell'architettura. Venezia: Franceschi, 1570.
- WILHELM 1668**
Wilhelm, Johann: Architectura Civilis. Nürnberg: Paul Fürst o. J. [1668].
- VOGEL 1708**
Vogel, Johann: Die moderne Bau-Kunst. Hamburg: Benjamin Schiller, 1708.
- GAUTIER 1716**
Gautier, Henri: Traité des Ponts. Paris: André Cailleau, 1716.
- STURM 1719**
Sturm, Leonhard Christoph: Architectonische Reise-Anmerckungen. Augsburg: Jeremias Wolff, 1719.
- GROLLIER DE SERVIÈRE 1719**
Grollier de Servièrre, Gaspard: Recueil d'ouvrages curieux de mathématique et de mécanique. Lyon: David Forey, 1719.
- LEUPOLD 1726**
Leupold, Jacob: Theatrum Pontificale oder Schauplatz der Brücken und Brücken-Baues. Leipzig: Gledisch 1726.
- PITROU 1756**
Pitrou, Robert: Recueil de differents projets d'architecture de charpente. Paris: Veuve de l'auteur, 1756.
- WALTER 1766**
Walter, Caspar: Brücken-Bau. Augsburg: Veith, 1766.
- SILBERSCHLAG 1773**
Silberschlag, Johann Esaias: Ausführlichere Abhandlung der Hydrotechnik oder des Wasserbaues. Leipzig: Caspar Fritsch, 1773.
- VOCH 1777**
Voch, Lucas: Anleitung zur Verfertigung schöner Zimmerwerksrisse. 2. Aufl. Augsburg: Johann Martin Will, 1777.
- VOCH 1780**
Voch, Lucas: Abhandlung der Brückenbaukunst. Augsburg: Matthäus Rieger, 1780.
- KOCH 1783**
Koch, Friedrich: Der geübte Werkmeister oder die deutsche Zimmermannskunst. Erlangen: Palm, 1783.
- PERRONET 1788**
Perronet, Jean-Rodolphe: Description des projets et de la construction des ponts de Neuilli, de Mantes, d'Orléans, de Louis XVI, etc. Paris: François-Ambroise Didot, 1788.
- BRUST 1801**
Brust, Michael: Praktische Darstellung wichtiger Gegenstände der Zimmerbaukunst. Prag: Verfasser, 1801.
- MECHEL 1803**
Mechel, Christian v.: Plan, Durchschnitt und Aufriß der drey merkwürdigsten hölzernen Brücken in der Schweiz. Basel: Verfasser, 1803.
- KRAFFT 1805**
Krafft, Jean-Charles: Plans, coupes et élévations de diverses productions de l'art de la charpente. Paris und Strasbourg: Levraux, 1805.
- WIEBEKING 1811-17**
Wiebeking, Carl Friedrich v.: Theoretisch-practische Wasserbaukunst. 2. Aufl. München: Joseph Zängl, 1811-17.
- GAUTHEY 1813**
Gauthey, Émiland-Marie: Traité de la Construction des Ponts. Bd. 2. Paris: Firmin Didot, 1813.
- SAX 1814**
Sax, Franz: Bau-Technologie und Bau-Oekonomie. Bd. 3: Von der Zimmermannskunst. Wien: Anton Doll, 1814.
- BREWSTER 1830**
Brewster, David: The Edinburgh Encyclopædia. Bd. 4. Darin Lemma «Bridge», verfasst von Thomas Telford, m. Ill.. Edinburgh: William Blackwood, 1830.
- RONDELET 1830**
Rondelet, Jean Baptiste: Traité théorique et pratique de l'art de bâtir. 6. Aufl. Paris: Rondelet Fils, 1830.
- ÉMY 1837-41**
Émy, Amand-Rose: Traité de l'art de la charpenterie. Paris: Carilian-Goery und Anselin, 1837-41.
- STEVENSON 1838**
Stevenson, David: Sketch of the civil engineering of North America. London: John Weale, 1838.
- BAVIER 1878**
Bavier, Simon: Die Strassen der Schweiz. Zürich: Orell Füssli, 1878.
- BRUNNER 1925**
Brunner, J.: Der Bau von Brücken aus Holz in der Schweiz. Beilage zum Diskussionsbericht Nr. 5. der E.M.P.A.: «S.I.A.-Normen für Holzbauten». Zürich: E.M.P.A., 1925.