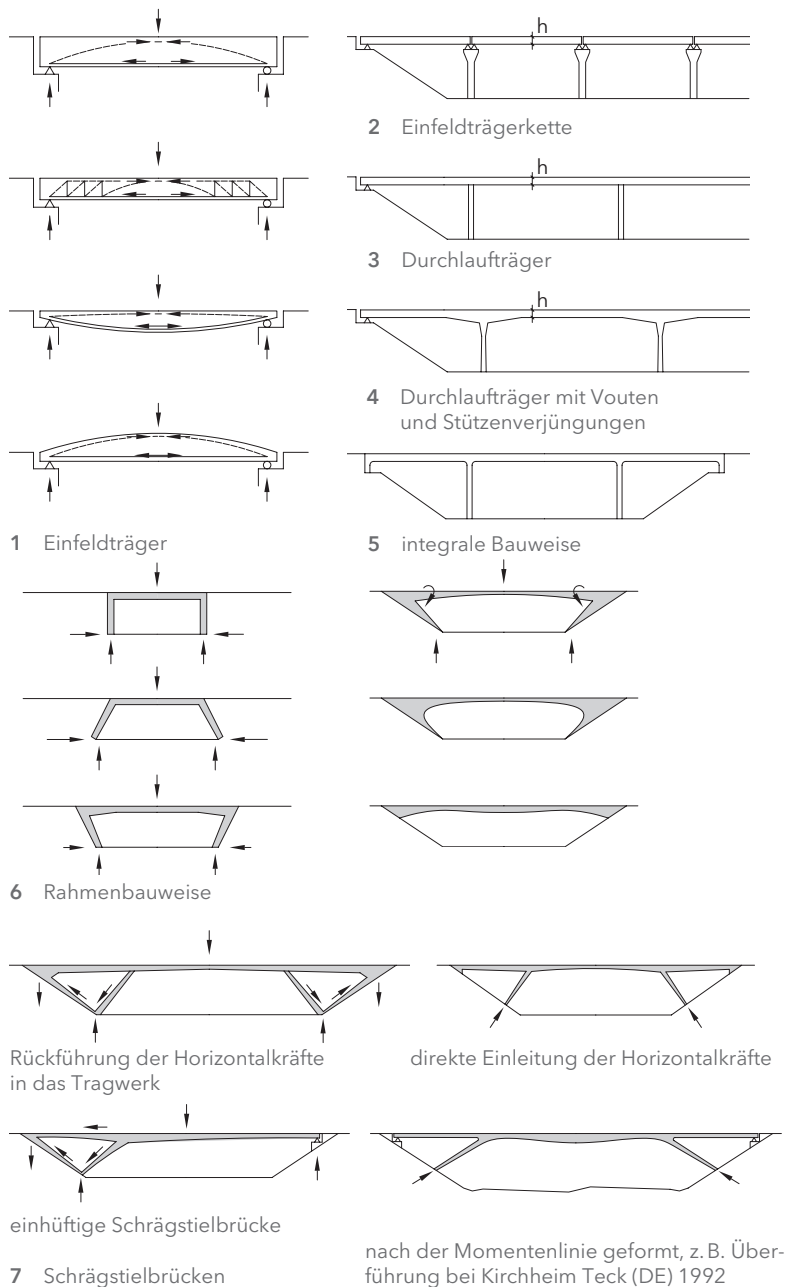


# Konstruktionen

## Katalog der Möglichkeiten



Brücken tragen Lasten. Für den Lastabtrag lässt sich eine Vielzahl möglicher Tragwerkstypologien verwenden, die sich jedoch hinsichtlich funktionaler Anforderungen, geeigneter Spannweiten und sinnvoller Materialwahl unterscheiden. Effiziente Tragssysteme bauen auf einer klaren Ordnung und Einheitlichkeit auf. Sie erweisen sich als schlüssig, wenn nichts hinzugefügt oder entnommen werden kann. Schlankheit allein ist jedoch kein Gradmesser für die Effizienz. Viel wichtiger sind logisch angeordnete Tragstrukturen, die sich aus der Aufgabe, ein Hindernis zu überbrücken, und den Randbedingungen am Ort begründen.

### Balken/Rahmen

Baumstämme oder flache Steinquader zum Überbrücken kleinerer Hindernisse wie Bäche oder Moore sind erste Beispiele einfeldriger Balkenkonstruktionen (Abb. 1). Diese Balken tragen durch Biegung, also durch Stauchen der Oberseite und Dehnen der Unterseite des Querschnitts. Der innere Kraftzustand ist vereinfacht als Druckbogen mit Zugband oder bei schlanken Trägern als idealisiertes Fachwerk abbildbar.

Die Dicke eines rechteckförmigen Balkens unter dem Lastfall des Eigengewichts wächst im Quadrat zur Spannweite. Das bedeutet, dass Balkenbrücken im Verhältnis somit deutlich überproportional schwerer und kräftiger werden, je größer die Spannweite ist. Balkenbrücken mit kurzen Spannweiten wirken aus diesen Gründen immer wesentlich schlanker als solche mit großen Stützweiten [1].

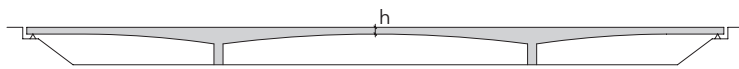
Größere Brückenlängen werden durch Einfeldträgerketten (Abb. 2) oder mittels Durchlaufträger erzielt (Abb. 3). Beim Durchlaufträger wechselt über der Stütze die Beanspruchung: Auf der Oberseite entsteht Dehnung (Zug) und auf der Unterseite wird der Balkenquerschnitt gestaucht (Druck). Meistens ist dieses negative Biegemoment über der Stütze maßgebend für die Bemessung.

Parallelgurtige Balkentragwerke, die das Gros der existierenden Brücken bilden, wirken unspektakulär und sind meist aus Stahlbeton-, Spannbeton- oder als Verbundtragwerke ausgeführt.

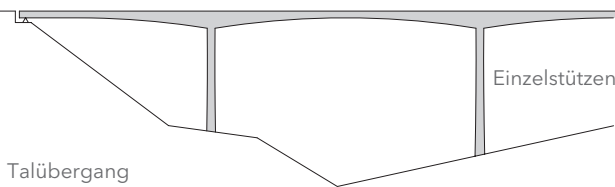
Ein Anformen der Stützen oder Vorsehen von Trag-



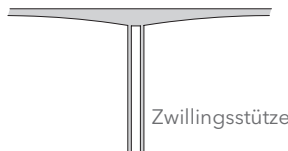
8 Trogbrücke



Flussbrücke

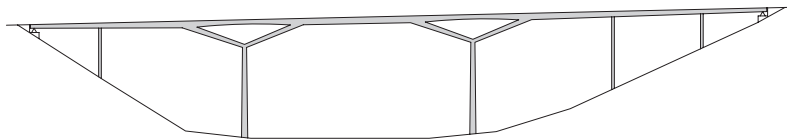


Talübergang

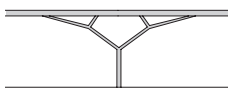


Zwillingssstütze

9 gevoutete Spannbetonbrücken



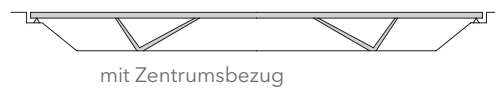
sprengwerkartige V-Stützen in Einheit mit dem Überbau, z.B. Filstalbrücke, Neubaustrecke Wendlingen-Ulm (DE) 2021



10 Baumstütze



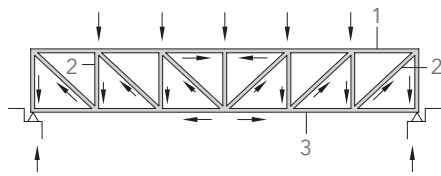
V-Stützen als separate Einheiten



mit Zentrumsbezug

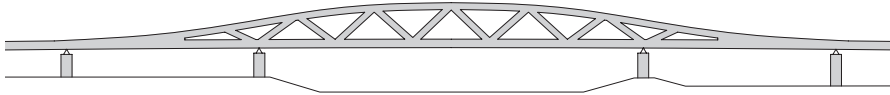
11 Schrägstützenvarianten

werksvouten entsprechend der Querschnittsbeanspruchung erzeugt eine höhere Ausdruckskraft, es macht das innere Tragverhalten erlebbar (Abb. 4). Gevoutete Balkenbrücken aus Spannbetonhohlkästen verlagern Eigengewicht von Brückenmitte zu den Stützen und haben sich deshalb im Spannweitenbereich von ca. 80–200 m als Flussbrücken oder Talübergänge durchgesetzt (Abb. 9). Das gleiche Prinzip der günstigen Verteilung von Steifigkeit und Masse kann bei geringeren Brückenbreiten auch durch Trogquerschnitte realisiert werden (Abb. 8). Bei Rahmentragwerken ist grundsätzlich der Überbau mit dem Unterbau biegesteif zu verbinden. Dabei treten horizontale Abstützkräfte auf, die sich durch eine Schiefstellung der Stiele jedoch beeinflussen lassen (Abb. 6). Bei größeren Längen bezeichnet man Rahmenbrücken auch als integrale Konstruktionen, deren vorrangiges Ziel ein Verzicht auf Lager- und Übergangskonstruktionen ist und die eine hohe Dauerhaftigkeit versprechen (siehe „Übergangszone zur freien Strecke“, S. 67ff.). Die speziell temperaturbedingten Zwängungskräfte werden durch eine schlanke und flexible Konstruktion sowie Stützen mit entsprechender Verformungsfähigkeit aufgenommen (Abb. 5). Eine Weiterentwicklung der Rahmenbauweise ist die Schrägstielbrücke, deren Horizontalkräfte bei weichen Böden durch Erdstreben wieder in das Tragwerk zurückgeführt oder direkt vom Boden aufgenommen werden (Abb. 7). Weitere Anwendungen von Schrägstützen sind Durchlaufträger in symmetrischer Anordnung oder asymmetrischer Stellung bei Brücken mit ausgeprägtem Zentrumsbezug (Abb. 11). Dabei können Stützen als bewusst formal und materiell getrennte Einheiten oder mit dem Überbau zusammenhängend ausgeführt werden. Die sprengwerkartige Ausführung einer Talbrücke mit V-Stützen als separate Einheiten in Abb. 11 entspricht der materialreduzierten Auflösung des Auflagerbereichs eines gevouteten Durchlaufträgers in Zuggurt und Druckstrebe (Abb. 9). Brücken mit stählernen Baumstützen ermöglichen durch die verzweigten multiplen Stützpunkte ein schlankes Brückendeck und kommen oft bei leichten Fußgängerbrücken zur Anwendung (Abb. 10).

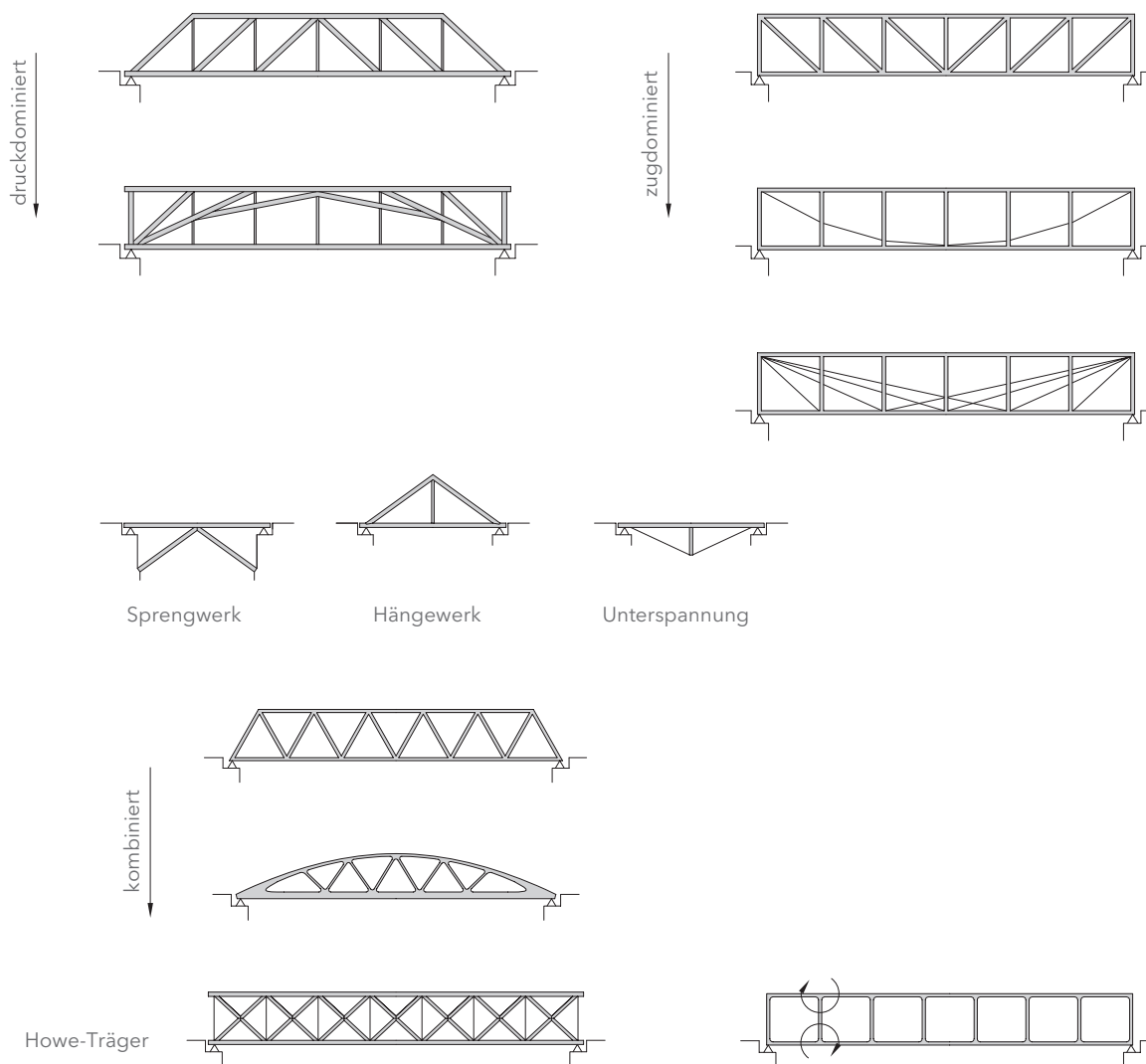


- 1 Obergurt
- 2 Füllstäbe aus Diagonal- und Vertikalstäben
- 3 Untergurt

12 Wirkungsweise eines Fachwerks

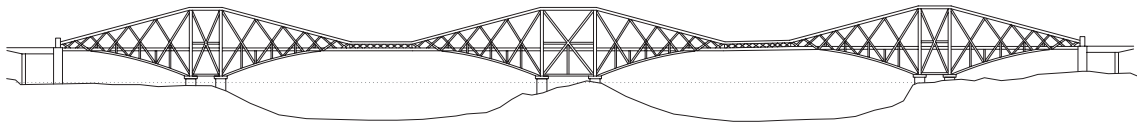


13 oben liegendes Stahlfachwerk, z. B. Ijsselbrücke bei Zwolle (NL) 2011

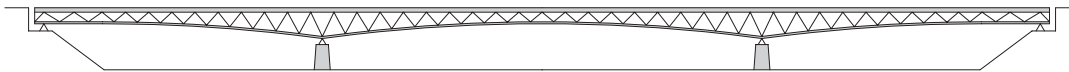


14 Variationen von oben liegenden Fachwerken

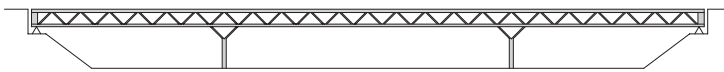
15 Viereckelträger (biegeorientiert)



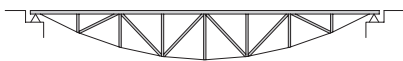
16 Stahlbrücke über den Firth of Forth, Queensferry (GB) 1890



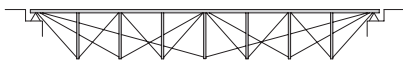
17 gevoutetes, unten liegendes Fachwerk mit Verbundplatte



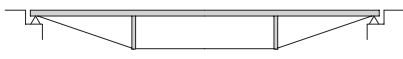
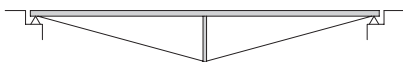
18 Raumfachwerk mit Verbundplatte



Fischbauchträger



Finkträger



unterspannte Träger

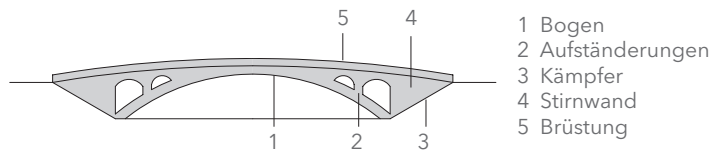
19 Variationen von unten liegenden Fachwerksystemen bzw. unterspannten Trägern

## Fachwerke

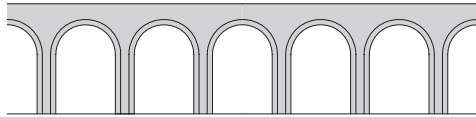
Die Auflösung der inneren Kraftlinien des Balkens in stabile Dreiecke führt zum Fachwerk, das für enorme Materialersparnisse sorgt, da die Kräfte in einzelnen, zug- und druckdominierten Stäben konzentriert werden und Füllmasse ohne statische Funktion wegfällt (Abb. 12). Dadurch können größere Spannweiten bei geringerem Eigengewicht erreicht werden, wie schon die Brückenskizze über den Firth of Forth (Abb. 16) oder eine moderne Ausführung in Abb. 13 zeigen. Der massive Durchlaufträger (Abb. 9, S. 95) wird mit schrägen Füllstäben als unten liegendes gevoutetes Stahlfachwerk mit Verbundfahrbahnplatte aufgelöst (Abb. 17). Genauso kann der Träger als parallelgurtiges Raumfachwerk über mehrere Felder ausgeführt werden (Abb. 18).

Das klassische Fachwerk als Einfeldträger gliedert sich in horizontale Gurtstäbe und in Diagonal- und Vertikalstäbe, die zwischen den Gurten verlaufen (Abb. 12). Die Druck- und Zugkräfte sammeln sich in den Gurtstäben in Spannweitenmitte, während die Querkräfte von den Füllstäben aufgenommen werden, die zu den Auflagern hin ihr Maximum erreichen. Holz und Stahl lassen sich einfach als vorgefertigte Stabbauteile zu einem Fachwerk fügen. Im Gegensatz zu Stahl sollten bei Holzfachwerken die Diagonalen werkstoffgerecht und vorteilhaft in die Druckrichtung gelegt werden, wie in Abb. 14 die unterschiedlichen Entwicklungspfade von druck-, zugdominierten und weitere Fachwerkvariationen zeigen. Variationen von oben und unten liegenden Fachwerken bzw. von unterspannten Systemen vermitteln eine Formen- und Konstruktionsvielfalt, bei der sich der Kraftverlauf in beeindruckender Weise vom Betrachter nachvollziehen lässt (Abb. 14 und Abb. 19).

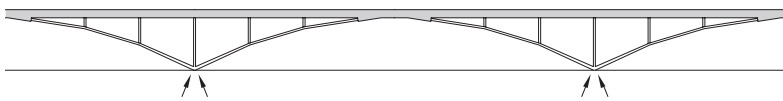
Eine Sonderstellung nimmt der Vierendeelträger, der Fachwerkträger ohne Diagonalen, ein. Die Querkraft wird hier nicht direkt über die Diagonalen, sondern über Rahmenbiegemomente der Gurt- und Vertikalstäbe zu den Auflagern geleitet (Abb. 15).



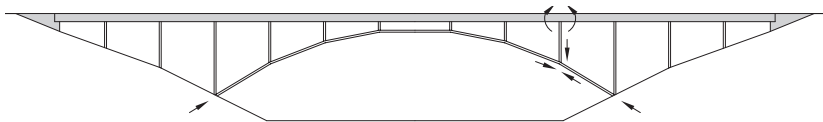
20 Steinbogenbrücke Anji Qiao, Zhao Xian (CN) 605 n. Chr., Li Chun



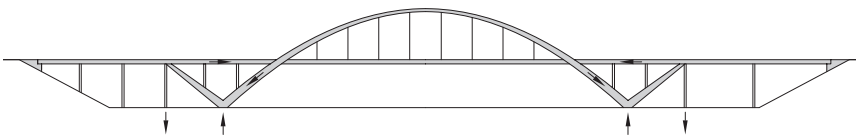
21 klassisches Viadukt



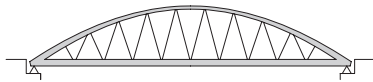
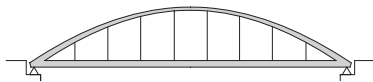
22 Stabbogen als Durchlaufträger



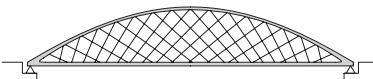
23 Stabbogen als Unterstützung der Fahrbahn



24 Bogen mit Rückhängung der Zugkraft in der Fahrbahn



25 Langerscher Balken



26 Netzwerkbogen

## Bögen

Der Bogen ist nach dem Balken das älteste Tragsystem. Schon früh wurde ein Nutzen darin erkannt, Steinblöcke radial aufzuschichten und den Bogen Schub als Kraftabtrag ausschließlich über Druckkräfte zu aktivieren (Abb. 20). Steinviadukte als Eisenbahnbrücken, die die Bauform der Viadukte und Aquädukte des Römischen Reichs wieder aufnehmen, sind imposante Zeitzeugen eines robusten, jedoch nicht mehr modernen Brückentyps (Abb. 21). Bei gleichmäßiger vertikaler Belastung entfaltet der Bogen seine volle Wirksamkeit. Halbseitige Lasten aus Verkehr müssen durch Biegemomente abgetragen oder durch hohes Eigengewicht überdrückt werden. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Bogentragwerken bei größeren Spannweiten nur sinnvoll, wenn die Verkehrslasten im Verhältnis zur Eigenlast klein sind und der Baugrund sehr steif ist (z. B. Fels).

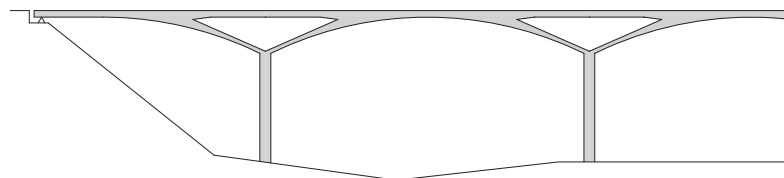
Ausgehend vom gevouteten Balken (Abb. 9, S. 95) über das aufgelöste Fachwerk (Abb. 17, S. 97) wird bei Stabbogenkonstruktionen die Voute nach unten weiter aufgeweitet und gegliedert, sodass die Druckkraft nicht über Füllstäbe hoch gehängt, sondern über Bogenwirkung direkt zum Auflager als Stabbogen geführt werden kann (Abb. 22). Die einwirkenden Kämpferkräfte an den Auflagern müssen entweder direkt in den Untergrund eingeleitet (Abb. 23) oder wieder in das Brückendeck zurückgehängt bzw. dort kurzgeschlossen werden, wie das Beispiel des Stabbogens in Abb. 22 zeigt. Der Stabbogen in Abb. 23 wirkt als unterstützende Konstruktion des Brückendecks, das vom Bogen abgesetzt ist und die Biegemomente aus halbseitigen Lasten übernimmt. Das Tragverhalten ist anhand der Bauteildimensionen klar nachvollziehbar.

Für Fahrbahnen mit geringer Höhe über dem Gelände eignen sich Bogentragwerke, die über der Fahrbahn angeordnet sind und die Horizontalkraft in die Fahrbahn zurückführen (Abb. 24). Beim sogenannten Langerschen Balken verläuft der Bogen

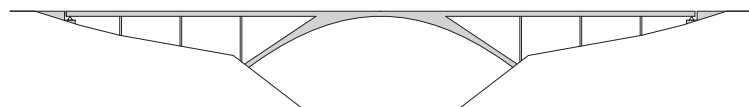
gänzlich über der Fahrbahn, und dessen Kämpferkräfte werden durch den in die Fahrbahn integrierten Streckträger als Zugband verbunden (Abb. 25). Durch die vertikalen Hänger muss vorwiegend dieser Streckträger die halbseitigen Lasten über Biegung aufnehmen und in der Regel größer als der Bogenquerschnitt dimensioniert. Im Gegensatz dazu funktioniert der Netzwerkbogen durch die diagonal und überkreuzt angeordneten Zugelemente ähnlich wie ein Biegeträger (Abb. 26). Das Tragwerk stellt hier eine Symbiose zwischen Bogen und Fachwerk dar und ist äußerst steif im Verhältnis zum reinen Stabbogen. Asymmetrische Verkehrslasten werden durch die Hängeranordnung effektiv auf den Bogen und den Versteifungsträger verteilt, wodurch sich die Biegebeanspruchungen dort reduzieren und das Tragwerk sehr schlank ausgeführt werden kann.

In Analogie zum Sprengwerk (Abb. 11 ganz oben, S. 95) und zum Stabbogen (Abb. 22) zeigen Abb. 27 und Abb. 28 zwei Varianten, bei denen der Bogenscheitel mit dem Deck verschmilzt. Im Gegensatz zur Durchlaufwirkung (Abb. 27) leitet hier der Bogen die Kräfte in die Felsflanken ein. Es ist dabei ein eindeutigerer Zentrumsbezug zur Scheitelachse feststellbar, der den Bogen als geeignetes, dynamisch wirkendes Tragwerk über Hindernisse wie tiefe Schluchten kennzeichnet. Abb. 29 zeigt den klassischen, echten Bogen mit aufgeständerter Fahrbahn, der im Gegensatz zum Stabbogen in Abb. 23 als dominierendes Bauteil auftritt. Er stemmt sich kraftvoll gegen den Felsen, übernimmt die Biegemomente aus halbseitiger Last und hebt sich aus diesem Grund in den Dimensionen entsprechend hervor.

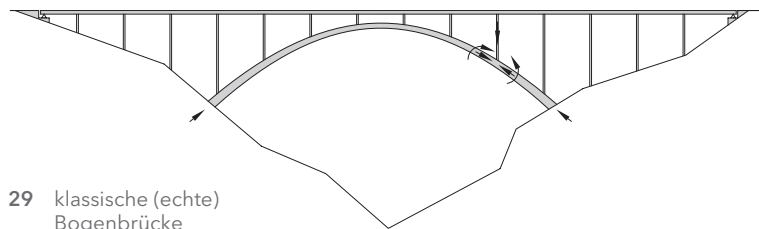
Als Fußgängerbrücken können Bogenbrücken auch in unterschiedlichen Variationen wie z. B. mit aufliegendem Spannband, das die Bogenhorizontalkraft wieder kurzschließt, ausgeführt werden (Abb. 30).



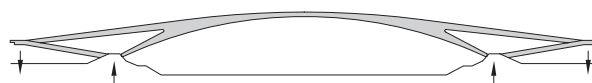
27 Bogen als Durchlaufwirkung



28 Bogen mit ausgeprägtem Zentrumsbezug



29 klassische (echte) Bogenbrücke

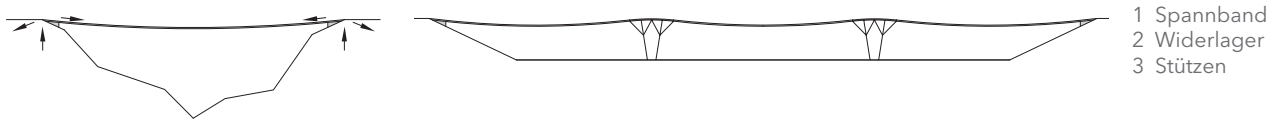


Bogen mit Gegengewicht (z. B. Dyckerhoft-Brücke, Wiesbaden, 1967)

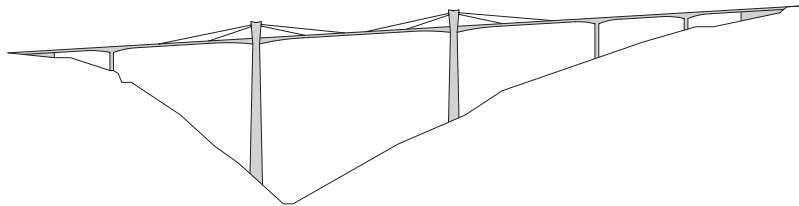
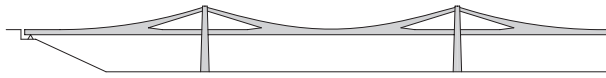


Bögen mit aufliegenden Spannbandern (z. B. Überführung bei Olmütz, 2007)

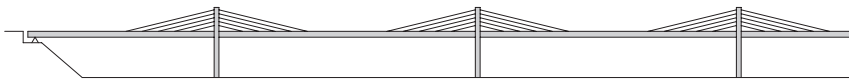
30 Bogenvariationen für Fuß- und Radwegbrücken



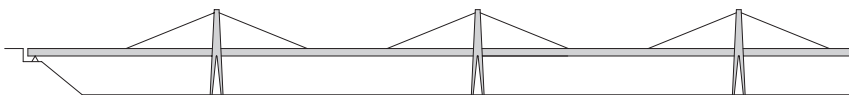
31 Spannbandbrücken als Einfeld- und Mehrfeldkonstruktion



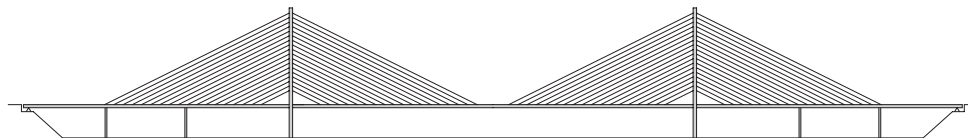
32 Zugsegel als Unterstützung der Durchlaufwirkung (z. B. Neckarbrücke (DE) Baubeginn 2014 und Ganterbrücke, Ried-Brig (CH) 1980



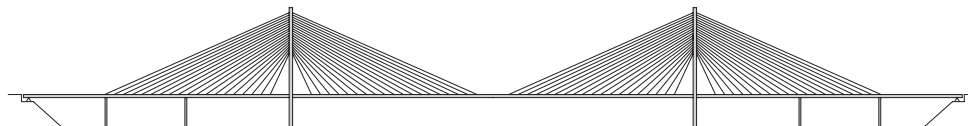
33 Extradosed-Brücke



34 Zügelgurtbrücke

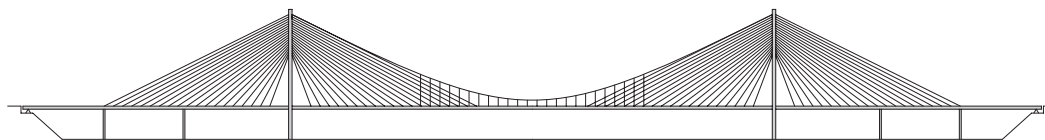


Harfenanordnung



(Halb-)Fächeranordnung

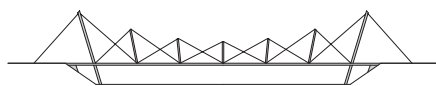
35 Schrägkabelbrücke



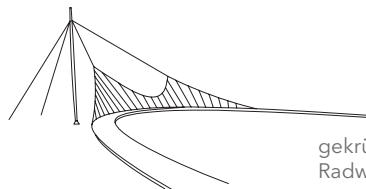
unterstützendes Hängkabel

36 kombinierte Hänge- und Schrägkabelbrücke

Anmerkung:  
[1] Schlaich 2004

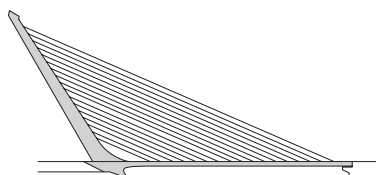


nach dem Prinzip einer Leonardo-Brücke

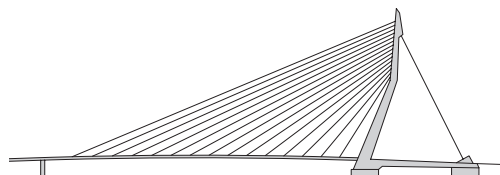


gekrümmte Seilbrücke, z. B. Fuß- und Radwegbrücke, Gelsenkirchen (DE) 2009

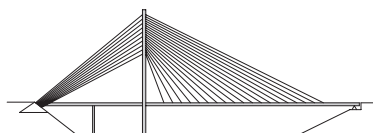
### 37 weitere Variationen für Fuß- und Radwegbrücken



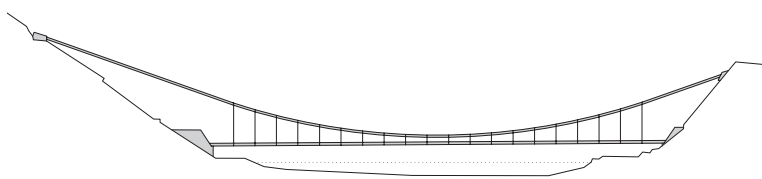
z. B. Alamillobrücke, Sevilla (ES) 1992



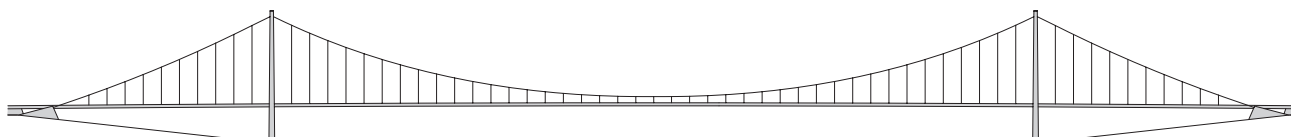
z. B. Erasmus-Brücke, Rotterdam (NL) 1996



### 38 einhüftige Schrägkabelbrücke mit Variationen



### 39 Hängebrücke A26, Linz (AT) ca. 2024



### 40 echte Hängebrücke

## Seiltragwerke

Das Spannband ist die einfachste Form einer Überbrückung und somit Urform der Hängebrücke. Beidseitig verankerte Zugglieder können über ein oder mehrere Felder geführt werden (Abb. 31). Wegen der Verformungsfähigkeit kommt dieser Brückentyp meist nur für Fußgängerbrücken zur Anwendung. Als Umkehrung der druckdominierten Tragwerke (Abb. 11 ganz oben, S. 95; Abb. 27, S. 99) zeigt Abb. 32 zwei Durchlaufträgervarianten mit externer Zugverstärkung. Diese Zugseile können aus Stahlblechen oder einbetonierten Kabelelementen ausgeführt werden. Ähnlich funktioniert eine Extradosed-Brücke (Abb. 33), bei der externe Spannglieder die Durchlaufwirkung unterstützen, wobei die Spannglieder wie eine aufgelöste, über der Stütze liegende Voute eines Durchlaufbalkens wirken. Vorgänger waren die Zügelgurtkonstruktionen mit einzelnen Zugelementen, die nur mehr in Ausnahmefällen gebaut werden, da ein redundanter Lastabtrag nicht möglich ist (Abb. 34).

Im Gegensatz zur Extradosed-Brücke übernimmt der Kabelfächer einer Schrägkabelbrücke die dominierende Tragfunktion. Die Versteifungsträger können durch die enge Kabelführung sehr schlank sein (siehe „Weitspannen“, S. 26ff.). Abb. 35 zeigt zwei Kabelanordnungen in Harfen- und (Halb-)Fächerform, hier sind die Kabelkräfte im Brückendeck verankert und erzeugen dort Druckkräfte.

Abb. 38 zeigt Ausführungen von asymmetrischen Schrägkabelbrücken mit lotrechten, schrägen und abgeknickten Pylonen von hoher Ausdruckskraft. Generell sind seilgestützte Brücken auch für Fußgänger und Radfahrer in unterschiedlichsten Variationen vom Prinzip der Leonardo-Brücke bis hin zu gekrümmten und räumlich verspannten Lösungen möglich (Abb. 37). Spektakulär präsentieren sich einseitig abgehängte Konstruktionen, die durch Kreisringwirkung im Grundriss die Torsionsbeanspruchung über Zug und Druck im Versteifungsträger abfangen (Abb. 37 unten).

Wie Abb. 31 zeigt, sind gekrümmte Zugelemente als Seile oder Kabel auch Grundlage der meist endverankerten Hängebrücke (Abb. 39), die auch extreme Spannweiten ermöglicht (Abb. 40). Selbstverankerte Hängebrücken, bei denen die Kabelzugkraft in den Überbau als Druckkraft eingeleitet wird, werden heute aufgrund der aufwendigen Herstellung – das Zugband muss vor dem Seiltragwerk funktionsfähig sein – seltener realisiert. Mit dem Vorteil der steiferen Schrägkabelbrücke, jedoch mit dem Nachteil höherer Pylonen im Vergleich zu Hängebrücken, werden auch kombinierte Konstruktionen ausgeführt (Abb. 36).