

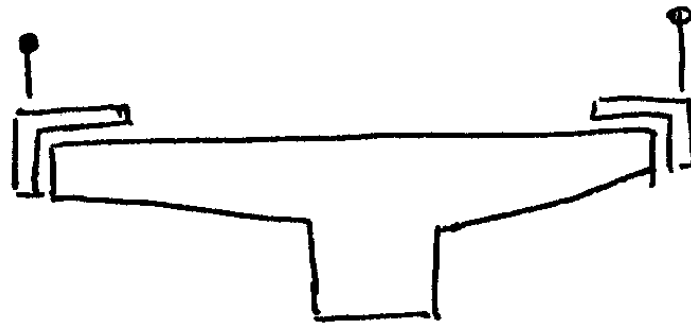
3. Balkenbrücke

Äußeres Kennzeichen:

- Trennung des Überbaus (Brückenträger) vom Unterbau (Stützen, Widerlager)
- Lasten aus dem Überbau gehen auf die Unterbauten
- Die Querschnittsform in Längsrichtung entspricht einem Balken
- unterschiedliche Trägerhöhe
- Untergurt entspricht dem Momentenverlauf und ist gekrümmt
- Der Balken nutzt die Festigkeit des Werkstoffes optimal aus und wird bei üblichen Brücken mit kleinen bis mittleren Stützweiten (ca. 80 m) als statisches System verwendet.
- Wirtschaftliche Stützweiten für Balkenbrücken liegen bei 100 m
- Ab ca. 200 m wirtschaftlich für Schrägseilbrücken
- einfachen Fertigung
- Brücken über Autobahnen, über kleine Flüsse, über Eisenbahnen

3.1. Plattenbrücke

- Vollplatte: ist ein breiter Balken.
- Untergurt stellt statische Höhe dar
- Platte bei Überführungen, insbesondere bei schiefen Bauwerken, mit beschränkter Bauhöhe und bis maximal 30 m Stützweite.
- Vollplatte mit zwei Kragarmen
- ähnlich dem einsteigigen Plattenbalken



Plattenbrücke

3.2. Plattenbalken

Der Plattenbalken verbindet Eigenschaften einer Platte mit denen des Balkens. Um größere Stützweiten zu erreichen oder um Material zu sparen, werden unter einer vergleichsweise dünnen Platte ein oder mehrere Träger in Längsrichtung der Brücke angeordnet.



Zweistegige Plattenbalkenbrücke

3.3. Hohlkasten

- Durch Ergänzung des Plattenbalkens mit einem Untergurt schließt sich der Querschnitt zu einem Hohlkasten.
- Bei Balkenbrücken mit mittleren und größeren Stützweiten
- Bei gekrümmter Linienführung
- Große Biege- und Torsionssteifigkeit
- Große Schlankheit

- Rationelle Bauverfahren, wie das Taktschiebeverfahren
- Weit auskragende Fahrbahnplatten werden oft über Druckstreben auf den Hohlkasten abgestützt.



Hohlkasten

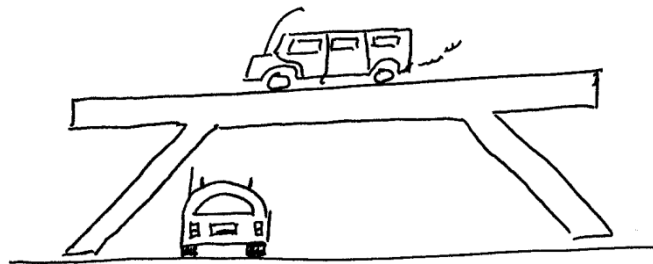


Foto 13: San Diego

3.4. Rahmenbrücke

- Rahmenbrücken entsprechen Balkenbrücken jedoch mit dem Unterschied, dass der Überbau mit den Unterbauten (Widerlagerwände und/oder Stützen) biegesteif verbunden ist.

- Dadurch werden die Biegemomente im Feld des Brückenträgers vermindert, und somit lässt sich dessen Bauhöhe reduzieren, oder bei gegebener Bauhöhe eine größere Stützweite erreichen.
- Häufig bei Autobahnüberführungen genutzt, um auf Mittelpfeiler verzichten zu können.
- Der Entfall der Lager vermindert die Kosten für den Unterhalt und vereinfacht die Wartung der Brücke. Allerdings ist ein Austausch des Überbaus, etwa nach einem Anfahrsschaden, aufwändiger.
- Brücken, bei denen Überbauten keine Fugen und Lager besitzen, d.h. in die Brücken sind die Widerlagerwände und etwaige Stützen eingespannt, werden als integrale Brücken bezeichnet.
- Eine Variante dieser Bauart stellen semi-integrale Brücken dar, bei denen der Überbau nicht komplett mit dem Unterbau monolithisch verbunden ist oder bei denen der Überbau Fugen aufweist.



Rahmenbrücke

3.5. Pendelpfeilerbrücke

- Bei Pendelpfeilerbrücken sind die Pfeiler gelenkig mit dem Überbau und dem Fundament verbunden.
- Die Pfeiler werden dadurch nur von Druckkräften beansprucht, während die Längskräfte, beispielsweise aus Bremsen oder Anfahren von Fahrzeugen, von dem Überbau vollständig in die Widerlager geleitet werden.

4. Fachwerkbrücke

Fachwerke sind aufgelöste Tragwerksstrukturen.

- Vorteil geringerer Materialverbrauch als vergleichbare vollwandige Tragwerke wie Balken (geringeres Eigengewicht).
- Druck- und Zugstäbe.
- Nachteil größere Bauhöhe der Konstruktion.
- Fachwerkbrücken werden vor allem aus Stahl (manchmal auch aus Holz) ausgeführt.
- Häufige Anwendung: Eisenbahnbrücken
- Fachwerke verbergen sich in der Regel auch unter der Verkleidung von gedeckten Holzbrücken.

4.1. Gitterbrücke

- Gitterbrücken oder Gitternetzbrücke sind Fachwerkbrücken mit sehr engmaschigen Abständen.
- Die Technik wurde um 1860 verwendet, weil damals auf dem europäischen Festland noch keine genügend großen Bleche für Vollwandträger zur Verfügung standen.

5. Bogenbrücke

Der Bogen ist geeignet:

- für Massivbaustoffe wie Stein oder Beton mit ihren hohen Druckfestigkeiten
- der Bogen nimmt die Belastung von außen auf und gibt diese als Druckkraft in den Untergrund weiter
- Bei vielen alten Brücken ist diese Konstruktion zu finden
- Untergrund muss tragend sein. Je nach Bogen kommen auch noch horizontale Kräfte dazu
- Bogenbrücken aus Stahl oder Stahlbeton mit aufgeständerter, oberliegender Fahrbahn zum Überwinden tiefer Täler oder Geländeeinschnitte werden heute gewählt. Mit einem Stahlbogen sind Stützweiten von bis zu 500 Metern möglich, mit einem Stahlbetonbogen sind 300 Meter möglich.
- Stahlbogenbrücken mit angehängter, untenliegender Fahrbahn kommen aufgrund der niedrigen Bauhöhe der Fahrbahn vor allem im Flachland oder bei der Überwindung von Gewässern vor.
- Bogenbrücken mit mittenliegender Fahrbahn sind eine weitere mögliche Variante, um Hindernisse zu überwinden.
- Eine moderne Bauart sind die seit 1990 in China häufig gebauten CFST-Brücken (concrete filled steel tube bridges), bei denen der tragende Bogen zunächst aus leeren Stahlrohren hergestellt wird, die anschließend mit Beton verfüllt werden.
- Eine Bogenbrücke besteht aus einem oder mehreren Bögen und der Brückentafel oder Fahrbahn. Die Stahlbogenbrücke besitzt zusätzlich noch Hänger oder Steher, an denen die Brückenfahrbahn befestigt ist.
- Bei Bögen kleiner 180° spricht man von Segmentbogenbrücken.
- Ponte Vecchio: Das Bauwerk gilt als eine der ältesten Segmentbogenbrücken der Welt.



Foto 14: Oporto



Foto 15: Ponte Vecchio



Foto 16: Harbour Bridge Sydney

Die Harbour Bridge gehört zu den schwersten und weitesten Bogenbrücken der Welt. Weltberühmt ist das Bridge climbing. Die granitverkleideten Pfeiler dienen nur als Dekoration.



16-Sydney-'2004112
3 05.13.36.avi



Foto 17: Seufzerbrücke (Ponte dei Sospiri)

6. Hängebrücke

- Die Hängebrücke ist eine Weiterentwicklung der Seilbrücke.
- Steinzeitliche Kulturen hatten einfache Hängebrücken mit durchhängenden Gehwegen.
- Heute werden Hängebrücken als Straßenbrücken über breite Gewässer gebaut (Foto 18: Große Belt-Brücke). Dabei ist die Schifffahrt für die Durchfahrtshöhe wichtig, sonst könnte man auch Balkenbrücken mit geringen Spannweiten und niedrigen Durchfahrtshöhen wählen.
- Bis zu einer Länge von 800 m sind Schrägseilbrücken wirtschaftlich. Ab ca. 1.000 m sind technisch Hängebrücken die einzige Wahl.
- Sie haben die Tendenz zu größeren Verformungen
- Im Allgemeinen werden sie nicht als Eisenbahnbrücke gewählt
- Sie ähnelt statisch betrachtet der Bogenbrücke mit untenliegender Fahrbahn.
- Bei der Hängebrücke werden zwischen Pylonen Tragseile aufgehängt. An diesen Tragseilen werden so genannte Hänger befestigt, senkrechte Seile, welche die Fahrbahn tragen. Wenn die Fahrbahn sehr lang ist und nur geringe Höhe hat, ist die Brücke sehr empfindlich gegenüber dynamischen Erregungen. Der Einsturz der Tacoma-Narrows-Brücke in den USA am 7. November 1940 zeigt dies sehr deutlich.



17-Tacoma_Narrows
_Bridge_destruction.c

Durch Beobachtungen zeigte sich eine Eigenfrequenz der Fahrbahn von 0,5 Hz. Hinter der Fahrbahn bildet sich die so genannte Karmansche Wirbelstraße:

Grafik: Karmansche Wirbelstraße

Die Frequenz der Karmanschen Wirbelstraße errechnet sich (vereinfacht) zu:

$$f = 0,2 \times V / d \text{ mit } V = \text{Windgeschwindigkeit, } d = \text{Dicke des Widerstandes}$$

Bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und einer Fahrbahnhöhe von 2,40 m ergibt dies eine Frequenz von 1,5 Hz.

Dies bedeutet, dass die Erregerfrequenz das Dreifache der Eigenfrequenz ist. Dies bedeutet, dass die Erregerfrequenz nicht gleich der Eigenfrequenz war, denn:

Sind bei einer erzwungenen Schwingung Eigenfrequenz und Erregerfrequenz gleich groß, so nennt man dies Resonanz. Die Frequenzen überlagern sich, so dass die Amplitude sich vergrößert und im Idealfall ihr Maximum erreicht. Bei nur leichter Dämpfung verschiebt sich die Eigenfrequenz und die Amplitude nimmt wieder ab.

Bei Tacoma Brücke jedoch war nicht die Karmansche Wirbelstraße entscheidend, sondern eine andere Schwingung:

Die Brücke wurde erregt und wich dem Wind aus. Sie erreichte ihre maximale Torsionsverbiegung und ging in den Ausgangszustand zurück. Nun wurde sie erneut vom Wind seitlich gedrückt und wich wieder dem Wind aus. Diesen Vorgang machte die Brücke immer weiter, ohne dass sie erneut erregt werden musste. Das schwingende System erzeugte durch den Schwingungsvorgang die Grundlage für weiteres Schwingen. Diese Schwingung nennt man „Selbsterregte Schwingung“.

Selbsterregte Schwingungen sind freie Schwingungen, allerdings von besonderer Art und Weise. Sie unterscheiden sich von freien Schwingungen durch den Mechanismus ihrer Entstehung und ihrer Aufrechterhaltung. Kennzeichnend für selbsterregungsfähige Schwinger ist das Vorhandensein einer Ener-

giequelle, aus der der Schwinger im Takte seiner Eigenfrequenz Energie entnehmen kann, um die unvermeidlichen Verluste durch Dämpfung auszugleichen.

Diese Schwingungen sind nichtlinear. D.h., dass die Ableitungen der gesuchten Funktion nicht in erster Potenz stehen. Ein Beispiel für eine nichtlineare Schwingung ist das mathematische Pendel bei großen Auslenkungen:

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \sin \varphi = 0$$

mit

$$\omega^2 = \frac{g}{l}$$

Formel: Pendel

Also eine nicht lineare DGL, deren Lösung meist nur numerisch gelöst werden kann. Weitere Beispiele: Reibschwingungen, Anblasen von Pfeifen. D. h., dass die Erregerkreisfrequenz nicht linear ist und sich während des Schwingungsvorgangs in Abhängigkeit von der Zeit ändert.

Linear DGL hingegen sehen so aus:

$$m \cdot y'' + D \cdot y' + K \cdot y = 0$$

$$m \cdot y'' + D \cdot y' + K \cdot y = \cos \omega t$$

Formel: Feder-Dämpfer:

Beispiele für selbsterregte Schwingungen

6.1 Echte Hängebrücke

- Bei der echten Hängebrücke hängt die Fahrbahn an vertikalen Seilen, die am Haupttragseil hängen.
- Das Haupttragseil wird über die Pylone geführt und erzeugt dort Druckspannungen in den Pylonen, die bis in die Gründung geführt werden.
- Die Haupttragseile werden an Ende der Brücke in die Widerlager eingespannt.
- Die Fahrbahn, als Durchlaufträger mit großem Mittelfeld, wird nur auf Biegespannung belastet.
- Durch das große Eigengewicht im Gegensatz zur Verkehrslast entstehen keine Wechsellasten für die Fahrbahn.

Zeichnung: Statisches System Hängebrücke



Foto 18: Große Belt-Brücke (Dänemark)



Foto 19: Ein berühmtes Beispiel einer Hängebrücke ist die Golden Gate Bridge in San Francisco.



Foto 20: Lisboa

Die Brücke des 25. April ist die zweitlängste Hängebrücke mit kombiniertem Straße und Eisenbahnverkehr. Sie wurde nach der Nelkenrevolution in Portugal benannt. Um Gewicht zu sparen, wurden zwei Fahrbahnen aus Gitterrosten hergestellt.



20-Portugal-Brücke.a
vi

Weitere Hängebrücken sind die erste (Foto 21) und zweite (Foto 22) Bosphorus-Brücke.

Hinweis: Die Hänger bei der ersten Bosphorus-Brücke und das Fachwerk bei der Golden Gate Brücke (Foto 19).



Foto 21: Erste Bosphorus-Brücke, Brückendeck nur 3 m hoch



Foto 22: Zweite Bosphorus-Brücke, Pylone stehen am Hochufer

6.2 Unechte Hängebrücke

- Bei den unechten Hängebrücken wird die Zugkraft in den Tragseilen nicht erdverankert oder in die Widerlager eingeführt.
- Die Zugkraft wird am Ende der Brücke in die Fahrbahn eingetragen.
- Das führt nun dazu, dass die Fahrbahn nicht nur auf Biegedruck und Biegezug belastet wird, sondern auch noch aus Druckkräften aus dem Eigengewicht und der Verkehrslast.
- An der Lasteinleitungsstelle am Ende der Brücke ergibt sich aus der Zugkraft der Seile und der Druckkraft auf die Fahrbahn eine vertikale Komponente. Diese wird aufgenommen aus dem Eigengewicht aus der Fahrbahn.

Grafik: Statisches System der rückverankerten Hängebrücke

- Infolge Durchbiegung aus den Momenten aus Eigengewicht und Verkehrslast ergeben sich zusätzliche Schnittgrößen durch die horizontale Druckkraft: Momente aus Theorie II. Ordnung.
- Diese Momente führen zu einer weiteren Durchbiegung und zu einer stärkeren Bemessung.

Grafik: Momente aus Theorie II. Ordnung

Vorteil dieser Konstruktion:

- Wenn das Erdreich die hohen Zugkräfte aus den Seilen nicht aufnehmen kann, werden auf diesem Wege die Zugkräfte abgeführt.
- Die Kräfte bleiben sozusagen im System.

Nachteil dieser Konstruktion:

- Eine aufwändige Hilfskonstruktion muss realisiert werden, um diese Brücke konstruieren zu können.
- Hier bieten sich Schrägabspannungen an. Erst am Ende der Bauzeit kann das Tragseil gespannt werden und mit der Fahrbahn verankert werden.

Wegen der aufwändigen Montage haben sich unechte Hängebrücken nicht durchgesetzt.

Relativ neu ist der Neubau der Oakland Bay Bridge. Nach einem Erdbeben und einem Verkehrsunfall, bei denen jeweils die obere Fahrbahn auf die darunter sich befindende stürzte, wurde die Oakland Bay Bridge neu gebaut. Es wurde eine einhüftige unechte Hängebrücke gewählt.

Die unechte Hängebrücke (selbstverankerte) wurde vor 50 Jahren durch die Entwicklung der Schrägseilbrücke abgelöst.



Foto 23: Unechte Hängebrücke: Mühlentorbrücke in Lübeck

6.3 Pylone

Die Pylone tragen die Masse der Brücke:

- das Tragseil, die Hänger
- den Überbau, den Fahrbahnträger
- Verkehrslasten,
- Verkehrslasten aus Wind auf Bauwerke oder Erschütterungen aus Erdbeben

Die Form der Pylone ist sehr vielfältig und ist sicherlich nicht nur der Tragwerksplanung geschuldet, sondern auch dem architektonischen Vorstellungen der Planer:

Bei älteren Brücken haben die Pylon meist eine rechteckige Form: Teile des Pylon sind rechteckig und der ganze Pylon ebenfalls, wie bei der Golden Gate, 25. April Brücke und den Bosphorus Brücken. Schon mo-

derner zeigt sich die Große Belt Brücke.

- Breite Brücken haben auch drei Pylone, wie die Brooklyn Brücke. Ein Mittelpylon ist bei Hängebrücke selten.
- Es wird entweder Stahl oder Stahlbeton verwendet. Bei alten Brücken, vor der Entwicklung von Stahl und Stahlbeton, verwendete man Guss-eisen oder Stein.

6.4 Tragseil

- Bei Hängebrücken verwendet man im Allgemeinen zwei Tragseile.
- Die Tragseile werden über die Pylone geführt und in den Widerlagern verankert.
- Der Kopf der Pylone ist entweder offen oder geschlossen, er hat ein stetiges Sattellager oder besteht sogar aus einem Rollenlager.
- Bei breiten Brücken werden auch mehr als zwei Tragseile verwendet.
- Der Durchhang des Tragseils hat annähernd die Form der so genannten Kettenlinie, das ist die Form eines Seils oder einer Kette, die vorn und hinten aufgehängt wird und dabei die Kurve des \cos hyperbolicus aufweist. Annähernd nur deshalb, weil die Kettenlinie nur durch Schwerkraft unter Eigengewicht entsteht.
- Die Kabel weisen meist einen Durchhang von ca. $1/10$ der Stützweite des Mittelfeldes auf.
- Das Tragseil besteht heute aus einem Paralleldrahtseil. Diese Seile werden auf der Baustelle hergestellt, indem die einzelnen Seile über die Pylone geführt werden und dann von Seilklemmen zusammen gepresst werden.

6.5 Hänger

- Die Hänger verbinden die Tragkabel mit dem Fahrbahnträger
- Sie bestehen meist aus feuerverzinkten Drahtseilen
- Sie müssen in erster Linie die Zugkräfte aushalten und beeinflussen die Eigenfrequenz der Brücke.
- Um Schwingungen zu reduzieren, wurden gelegentlich senkrechte Hänger mit Schrägseilen kombiniert, wie bei der Brooklyn Bridge (Foto 24) oder der Bosphorus-Brücke (Foto 21):

Manchmal werden die Hänger nicht senkrecht, sondern abwechselnd schräg nach vorn und schräg nach hinten gespannt, so dass an den Tragkabeln und am Fahrbahnträger immer zwei Hänger an einem gemeinsamen Befestigungspunkt enden, so dass ein Zick-zack-förmiges Muster entsteht. Damit wird die Steifigkeit des Fahrbahndecks erhöht und seine Durchbiegung bei einseitiger Belastung reduziert. Beispiel: Die erste Bosphorus-Brücke (Foto 21)

6.6 Fahrbahnträger

- Der Fahrbahnträger verteilt die Lasten auf die Hänger
- Entweder als Fachwerkträger, als offener Vollwandträger, oder als geschlossener Kastenquerschnitt, wie bei der Große Belt Brücke (Foto 18), ausgebildet.
- Der Fahrbahnträger kann von Widerlager zu Widerlager durch die Pylone biegesteif durchgeführt werden, oder an den Pylonen unterbrochen und dort gelenkig aufgelagert werden.
- Um eine Stabilität auch bei hohen Windgeschwindigkeiten zu erreichen, müssen die Fahrbahnträger ausreichend torsionssteif ausgebildet werden.
- Sie erhalten eine im Windkanal optimierte Querschnittsgestaltung, die

ein Versagen durch aerodynamische Instabilität, wie bei der Tacoma Narrows Brücke, vermeidet.

- Bei sehr breiten Brücken wird gelegentlich zur Verbesserung der aerodynamischen Stabilität der Fahrbahnträger der Länge nach in zwei Streifen mit einem offenen Zwischenraum geteilt (Foto 20).
- Nach dem Unglück der Tacoma Brücke wusste man noch nicht den Grund für das Versagen. Deshalb baute man zunächst Fachwerkträger in Längsrichtung unterhalb der Brücke ein, um die Steifigkeit zu erhöhen, wie z.B. bei der Golden Gate Brücke (Foto 19).

6.7 Widerlager

- Die Enden der Tragseile echter Hängebrücken werden in den Widerlagern befestigt.
- Die Widerlager sind so schwer oder im Boden rückverankert, dass sie die maximalen Zugkräfte aus den Seilen aufnehmen können.
- Früher wurden Widerlager mit Steinen gemauert, heute bestehen sie aus Stahlbeton.
- Die Widerlager der Große Belt Brücke, die nur auf den Meeresboden gesetzt wurden, wirken allein durch ihre Masse. Sie haben eine Grundfläche von 122 m × 55 m und eine Höhe von 73 m und eine Masse von rund 10^9 kg.

6.8 Bauformen

- Die häufigste Bauform der Hängebrücke ist heute die zweihüftige Brücke mit einer Hauptöffnung zwischen den beiden Pylonen, deren Tragseile außerhalb dieser Öffnung in Widerlagern befestigt sind
- Meist stehen die Pylone in dem zu überquerenden Gewässer oder Tal

und die Widerlager dahinter in der Nähe der Ufer oder des Hanges, so dass auch die Teile des Fahrbanträgers zwischen den Pylonen und den Ufern oder des Hanges an den Tragseilen abgehängt sind.

- Gelegentlich steht ein Pylon oder stehen beide Pylone am Rand, so dass die Kabel zwischen den Pylonspitzen und den Widerlagern nur der Verankerung dienen und keine Hänger haben (Foto 22).
- Beim Neubau der San Francisco - Oakland Bay Bridge stehen vier Pylone hintereinander. Es handelt sich jedoch nicht um eine mehrhüftige Brücke, sondern um zwei eigenständige Hängebrücken, die aneinander gebaut wurden.
- Hängebrücken haben im Allgemeinen nur eine Fahrbannebene, es gibt jedoch Ausnahmen: Die zweietagigen Brücken. Einige von diesen haben eine Bahngleisetage.

Beispiele:

- Brooklyn Bridge mit einer oberen Etage für Fußgänger und Radfahrer.
- Oakland Bay Bridge mit zwei Fahrbannetagen
- Die Brücke des 25. April mit einer Eisenbahnetage
- Die Tsing-Ma-Brücke mit einer unten liegenden Etage für zwei Bahngleise und zwei Fahrbannsuren und einer oberen Etage für sechs Spuren. Die 41 Meter breite Brücke besitzt eine Hauptspannweite von 1377 Meter, die Pylone sind 206 Meter hoch. Keine andere Brücke, auf der sich Gleise befinden, hat eine größere Spannweite.



Foto 24: Brooklyn-Bridge



Foto 25: Oakland-Bay-Bridge



Foto 26: 25. April Brücke



Foto 27: Tsing Ma Brücke

6.8.1 Hohlkastenträger

- Fritz Leonhardt einer der einflussreichsten Bauingenieure des 20. Jahrhunderts hatte schon die erste, von 1938 bis 1941 gebaute Rheinbrücke in Köln mit einem nur 3,30 m hohen vollwandigen Versteifungsträger konstruiert. Sie war mit 378 m seinerzeit die weitestgespannte Hängebrücke Europas.
- 1953 zog er aus dem Tacoma-Unglück den Schluss, dass es besser sei, durch eine windschnittige Formgebung des Brückendecks die Entstehung von Windströmungen zu vermeiden, die zu den Schwingungen und Verwindungen führen, anstatt den Schwingungen durch große Fachwerkträger entgegenzuwirken. Von ihm veranlasste Windkanalversuche bestätigten seine Theorie.
- Freemann Fox & Partners, die gerade die Konstruktion der Severn Brücke begonnen hatten, stellten darauf die Bauweise des Brückendecks von einem Fachwerkträger auf einen flachen Hohlkasten mit auskragenden, dünnen Gehwegplatten um. Die von 1961 bis 1966 gebaute Severn-Brücke in England (Foto 28) war damit die erste große Hängebrücke, bei der keine Fachwerkstrukturen, sondern ein flacher, nur 3 m hoher Stahlhohlkasten verwendet wurde, dessen Profil im Windkanal ermittelt wurde.
- Freeman Fox und Partners konstruierten auch die erste Bosphorus Brücke (1973) (Foto 21) sowie die zweite Brücke über den Bosphorus(1988) (Foto 22) mit flachen, aerodynamisch optimierten Hohlkastenprofilen und etablierten damit diese Bauweise.



Foto 28: Severn-Brücke in England