

# Seilverspannte Brücken

Reiner Saul

Leonhardt, Andrä und Partner GmbH

## Zusammenfassung:

Es wird über den Entwurf, Besonderheiten der Berechnung und die Bemessung der beiden wichtigsten seilverspannten Brücken, der erdverankerten Hängebrücke und der Schrägseilbrücke, berichtet.

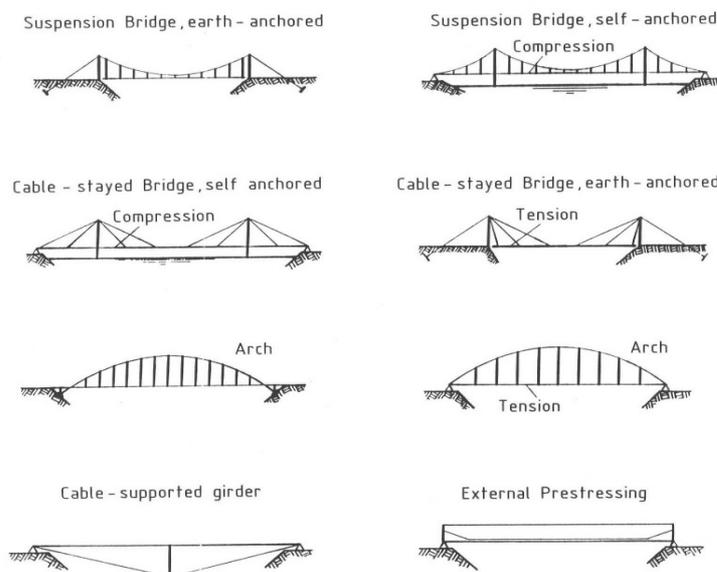
## 1. Einleitung

Brücken mit hochfesten Zugglieder können eingeteilt werden in

- Hängebrücken
- Schrägseilbrücken
- Bogenbrücken
- Unterspannte Brücken,

Bild 1, wobei die einzelnen Systeme erdverankert oder in sich verankert sein können.

Wir beschränken uns hier auf die beiden wichtigsten Typen: die erdverankerte (echte) Hängebrücke und die in sich verankerte Schrägseilbrücke.



**Bild 1:** Seilverspannte Brücken, Übersicht

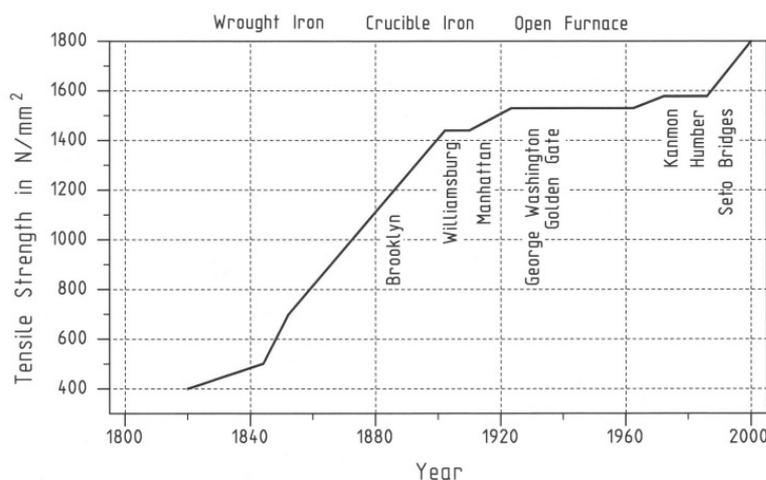
## 2. Entwurf

### 2.1 Hängebrücken

#### 2.1.1 Allgemeines

Hängebrücken sind das älteste System für weitgespannte Brücken; schon vor 3000 Jahren wurden in China Ketten-Hängebrücken gebaut, und in Südamerika in präkolumbianischer Zeit Lianen-hängebrücken. Ketten- und unversteifte Hängebrücken wurden noch bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts gebaut, viele von ihnen stürzten aber wegen unzureichender Materialien und fehlender statischer Kenntnisse ein [1].

Der Bau moderner Hängebrücken begann mit der Erfindung des hochfesten Stahldrahtes durch Albert, Lang und Roebling in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts: zunehmend mit der Drahtfestigkeit wuchsen auch die Stützweiten, Bilder 2 und 9. Der Spannweitenrekord wird zurzeit von der Akashi Strait Bridge mit 1990 m gehalten, und der Entwurf für die Brücke über die Straße von Messina hat eine Mittelöffnung von 3300 m.



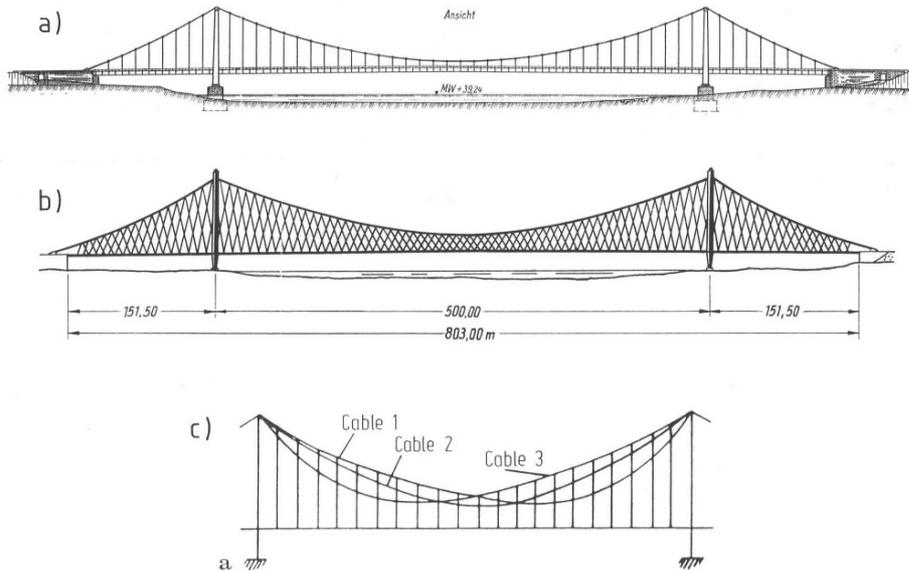
**Bild 2:** Entwicklung der Drahtfestigkeit

#### 2.1.2 Längssystem

Die Seitenöffnungen entsprechen etwa 25 %, die Pylonenhöhe etwa 10 % der Mittelöffnung. Die Hänger sind i. a. vertikal, Bild 3a, zur Reduzierung der spannungsfreien Verformungen werden aber auch geneigte Hänger eingesetzt, Bild 3b, die aber eine sehr hohe dynamische Beanspruchung erhalten.

Weitere Möglichkeiten zur Reduzierung der spannungsfreien Verformungen sind

- Verbindung des Hauptkabels mit dem Überbau, der an den Widerlagern in Längsrichtung gehalten wird
- zwei oder mehr Hauptkabel mit unterschiedlicher Geometrie, Bild 3c.

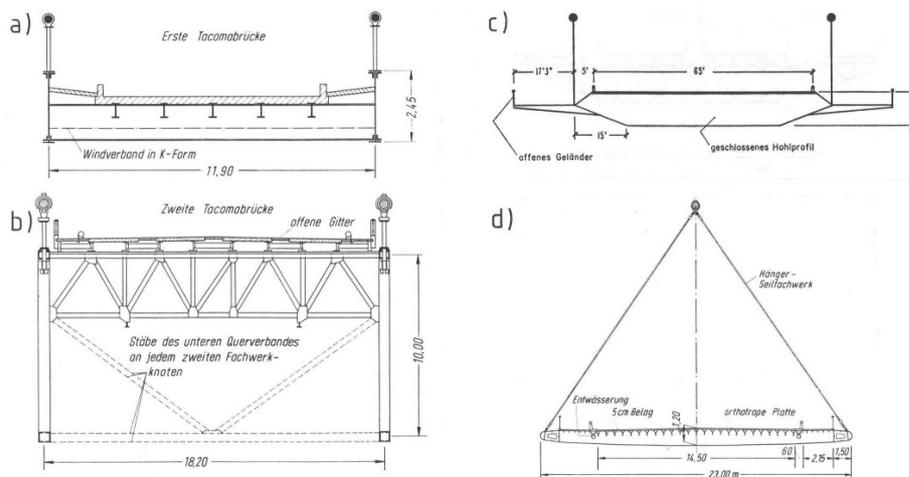


**Bild 3:** Haupttragwerk von Hängebrücken:  
 a) Vertikale Hänger, b) Geneigte Hänger. Nach [2], c) mehrere Hauptkabel.

### 2.1.3 Überbau

Der Überbau war früher ein Vollwand- oder Fachwerkträger. Die nach dem - durch widerregte Schwingungen ausgelösten - Einsturz der Tacoma Narrows Bridge eingeleitete Forschung führte zu aerodynamisch günstigen Querschnitten und Gesamtsystemen, Bild 4.

Leonhardt entfernte die bei amerikanischen Hängebrücken traditionellen Dehnfugen an den Pylo- nen - vergrößerte also die horizontale Steifigkeit mittels eines verbesserten statischen Systems - und entwickelte die Monokabelbrücke mit einem hohen Verhältnis von Torsions- zu Biegeeigen- frequenz, das vorteilhaft für die aerodynamische Stabilität ist.

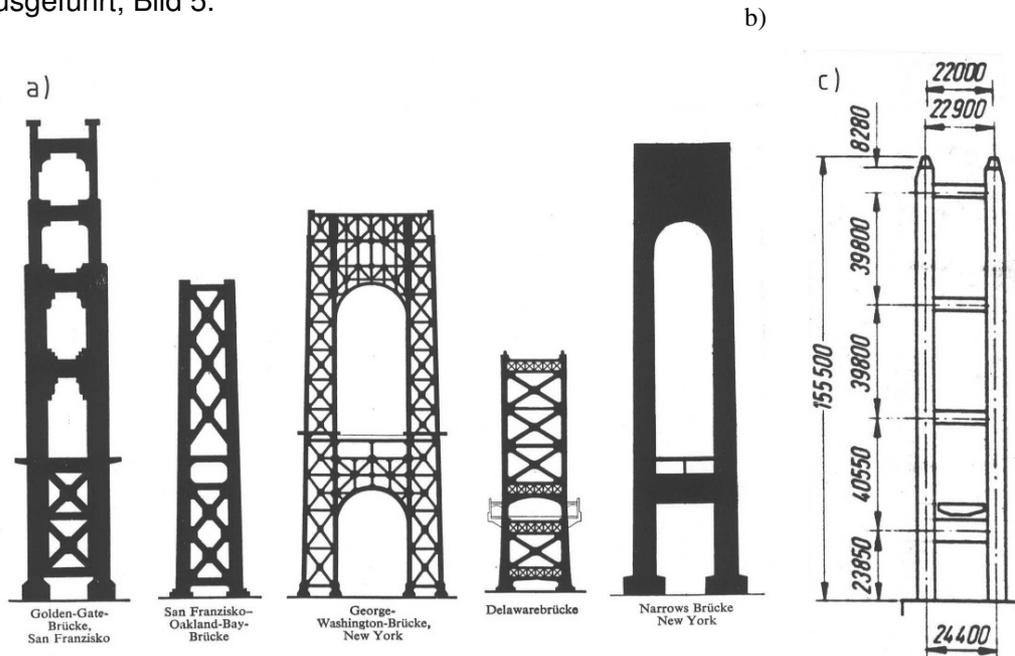


**Bild 4:** Querschnitt von Hängebrücken:  
 a) Vollwandträger, Tacoma Narrows 1940,  
 b) Fachwerkträger, Tacoma Narrows 1942,

- c) Nach aerodynamischen Gesichtspunkten gestaltete Kastenträger, Severn 1962,
- d) Monokabelbrücke, Entwurf Leonhardt für die Rheinbrücke Kleve-Emmerich, 1963. Nach [2]

### 2.1.4 Pylone

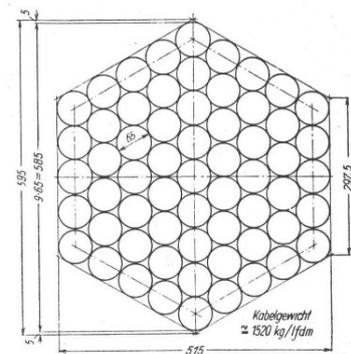
Die Pylone waren früher aus Mauerwerk oder Stahl, heute werden sie im Allgemeinen in Beton ausgeführt, Bild 5.



**Bild 5:** Pylone von Hängebrücken:  
 a) Stahlpylone von Brücken in den USA, b) Betonpylone der Humber-Brücke

### 2.1.5 Kabel

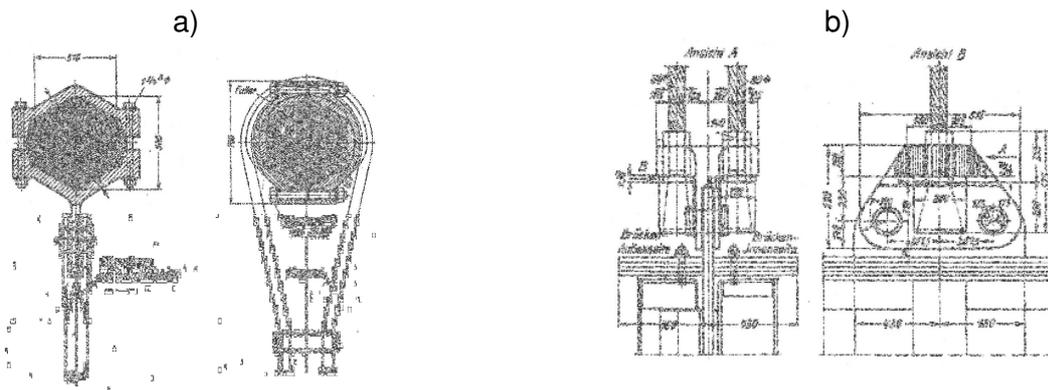
Die Kabel bestehen entweder aus verschlossenen Seilen oder Paralleldrahtbündeln, oder sie werden aus Einzeldrähten im Luftspinnverfahren hergestellt, Bild 6. Am Pylonenkopf werden die Kabel umgelenkt, in den Widerlagern mit Traversen oder Seilschuhen verankert.



**Bild 6:** Hauptkabel - Querschnitt aus Seilen oder Paralleldrahtbündeln

### 2.1.6 Hänger

Die Hänger werden um die Kabelschellen gelegt oder mit Augenstäben angeschlossen und am Überbau mit speziellen Seilköpfen verankert, Bilder 7 a, b. Im ersten Fall sind sie vollverschlossene Seile mit kurzer Schlaglänge, im zweiten können auch Paralleldraht- oder Litzenbündel oder auch Stäbe verwendet werden. Die Kabelschellen müssen zur Verminderung des Gleitens geklemmt werden. Durch geeignete Wahl der Schellenform kann das Verhältnis der wirksamen zur aufbrachten Klemmkraft gesteigert werden.



**Bild 7:** Hänger: a) Verankerung am Kabel, b) Verankerung am Überbau. Nach [3]

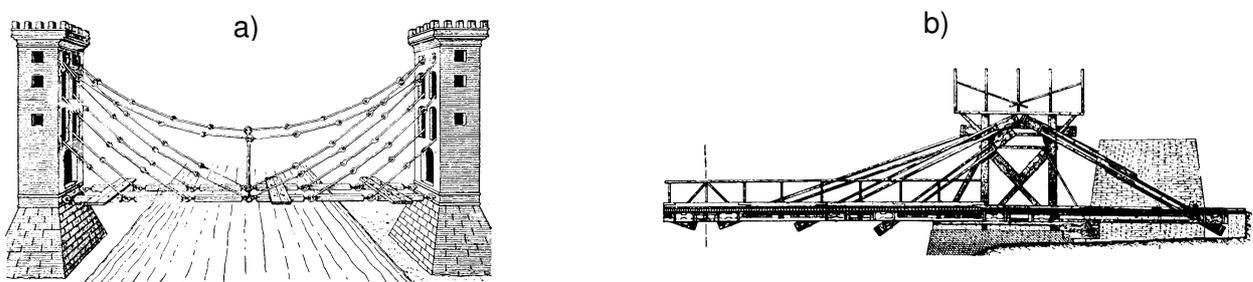
## 2.1.7 Widerlager

Die Widerlager sind ein ganz wesentliches Element von Hängebrücken, ihre Kosten können je nach Baugrund in der gleichen Größenordnung liegen wie die des Überbaus.

## 2.2 Schrägseilbrücken

### 2.2.1 Einleitung

Erste Schrägseilbrücken in neuerer Zeit werden von Faustus Verantius im 17. und Immanuel Löscher im 18. Jahrhundert entworfen, Bild 8.



**Bild 8:** Frühe Schrägseilbrücken:  
a) Kettenbrücke von Faustus Verantius 1617, b) Holzbrücke von Immanuel Löscher, 1784

Da hochfeste Seile und genaue Berechnungsmethoden damals noch unbekannt waren, stürzten viele dieser frühen Brücken ein, worauf Navier 1824 empfahl, dieses Brückensystem nicht weiter zu benutzen.

Ab 1950 haben Schrägseilbrücken dann aber im Spannweitenbereich von etwa 200 m bis 500 m die konkurrierenden Brückensysteme fast vollständig verdrängt. Ihr wesentlicher Vorteil ist gegenüber erdverankerten Hängebrücken

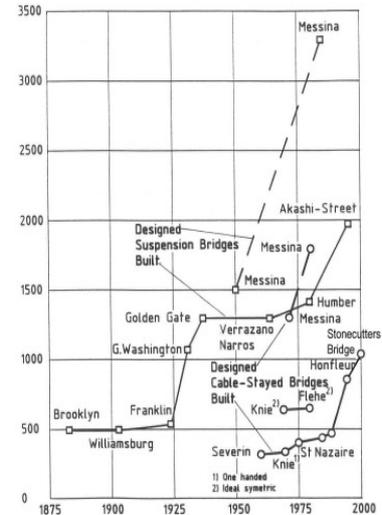
- anstelle des aufwendigen Widerlagers genügt ein einfacher Trennpfeiler
- der Überbau kann bis zu Spannweiten von ca. 300 m aus Beton und bis zu 500 m als Verbundkonstruktion ausgeführt werden

- gegenüber in sich verankerten Hängebrücken und Bogenbrücken die leichte Montierbarkeit.

Weitere Vorteile sind

- da Schrägkabelbrücken in sich verankert sind, kann erforderlichenfalls die ganze Brücke verschoben werden
- die Verformungen unter konzentrierten oder ungleichmäßig verteilten Lasten sind deutlich geringer als bei Hängebrücken, was vor allem bei Eisenbahnbrücken wichtig ist.

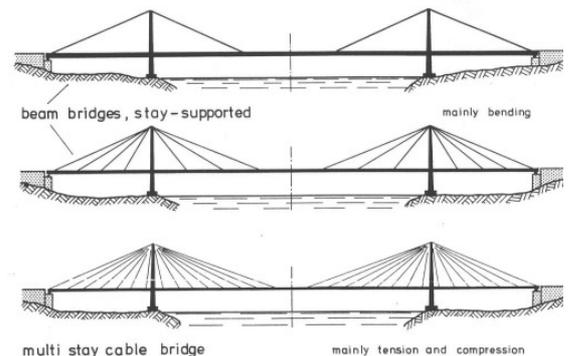
Im letzten Jahrzehnt ist ein sprunghafter Anstieg der maximalen Stützweite festzustellen, die 1000 m-Marke wird erstmals mit der Stonecutters Brücke in Hong Kong übersprungen werden, Bild 9.



**Bild 9:** Spannweite in Abhängigkeit von dem Baujahr

### 2.2.2 Haupttragwerk

Parallel zum Fortschritt der Computerberechnung entwickelte sich das Haupttragwerk vom abgespannten Balken zum Vielseilsystem, Bild 10. Die Seitenöffnungen entsprechend etwa 35 bis 40 % und die Pylonhöhe etwa 20 % der Hauptöffnung, die Pylone sind also etwa doppelt so hoch wie bei einer Hängebrücke gleicher Stützweite. Bei Vielseilsystemen können die Seile fächer- oder harfenförmig angeordnet werden.



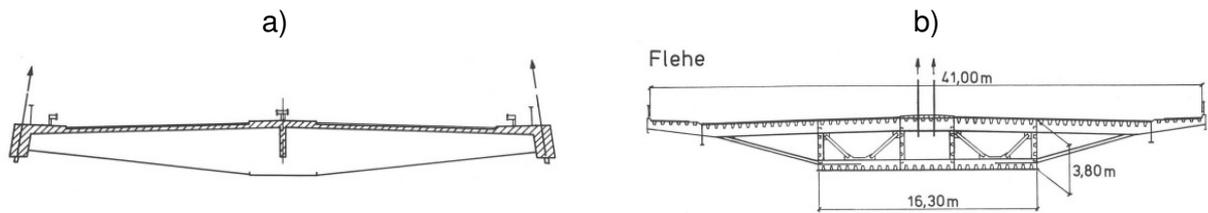
**Bild 10:** Entwicklung des Haupttragwerks von Schrägseilbrücken

### 2.2.3 Überbau

Der Überbau wird im Wesentlichen durch Druck und Biegung beansprucht. Die Seilabstände sind etwa

- 10 m bei Betonüberbau
- 15 m bei Verbundüberbau
- 20 m bei Stahlüberbau.

Die Seile können an den Brückenrändern oder in Brückenachse verankert sein, Bild 11. Im ersten Fall genügt ein - einfach herzustellender - offener Querschnitt, im zweiten ist für die Abtragung der exzentrischen Verkehrslasten ein Hohlkasten erforderlich.

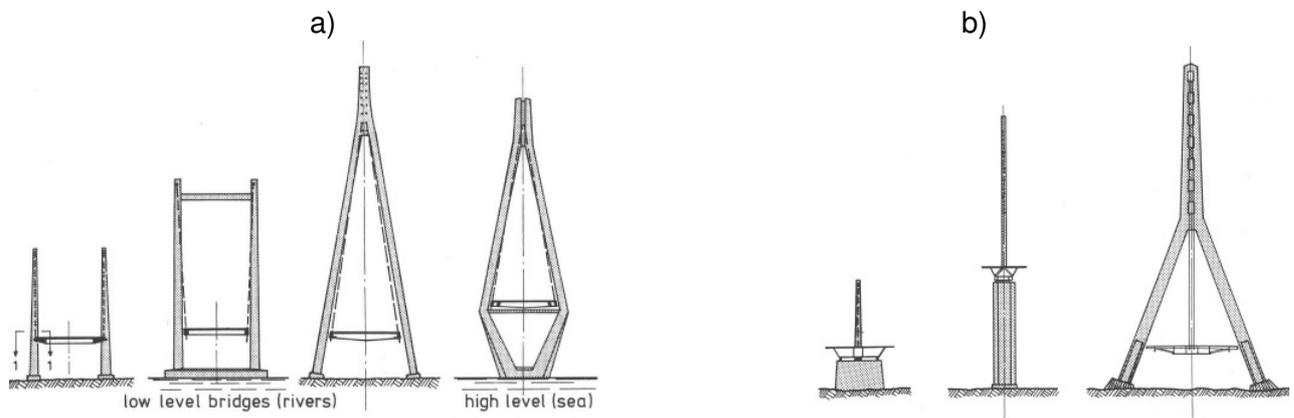


**Bild 11:** Querschnitt von Schrägseilbrücken:  
 a) Außenaufhängung Spannbetonüberbau, b) Mittelträgerbrücke mit orthotroper Platte

### 2.2.4 Pylone

Die Pylone der frühen Schrägseilbrücken waren aus Stahl, heute sind sie aus Kostengründen im Allgemeinen aus Beton.

Da die Seitenansicht der Vielseilsysteme nur wenig variiert, sind die Pylone das Tragglied, das über das Aussehen der Brücke entscheidet, Bild 12; entsprechend sorgfältig müssen sie gestaltet sein.



**Bild 12:** Pylonenformen: a) 2 Seilebenen, b) 1 Seilebene

### 2.2.5 Schrägseile

Die Schrägseile sind in Deutschland nahezu ausschließlich vollverschlossene Seile, im Ausland meistens Bündel aus parallelen Drähten oder Litzen, Bild 13.

	a)	b)	c)
d)			
E [10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> ]	1,65	2,05	1,95
zul. σ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,42 x 1570 = 660	0,45 x 1670 = 750	0,45 x 1770 = 800
zul. Δσ [N/mm <sup>2</sup> ]	150	200	200
E / zul. σ [÷]	250	276	244

**Bild 13:** Querschnitt von Schrägseilen: a) Modernes vollverschlossenes Seil, b) Paralleldrahtbündel, c) Parallellitzenbündel, d) Kennzeichnende Größen

### 3. Besonderheiten der Bemessung

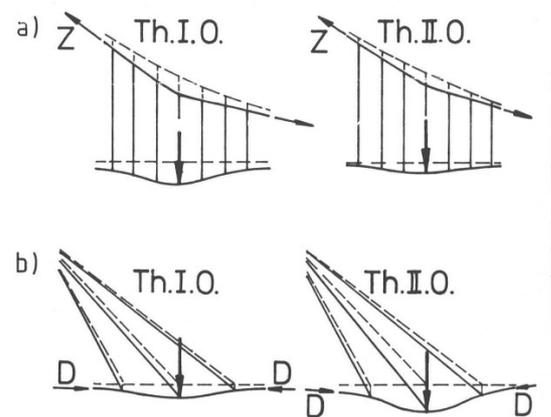
#### 3.1 Allgemeines

Im Zeitalter hochentwickelter Computer und Programme kann die Berechnung der - im Allgemeinen hochgradig statisch unbestimmten - seilverspannten Brücken als gelöst angesehen werden - zum Beispiel die Bestimmung der extremen Kernpunktmomente und der Eigenfrequenzen und -formen. Es wird daher nur auf zwei Punkte eingegangen.

#### 3.2 Theorie 2. Ordnung

Wegen der großen Verformungen ist bei seilverspannten Brücken das Gleichgewicht am verformten System zu prüfen.

Bei Hängebrücken tragen die Normalkräfte zur Stabilisierung des Systems und zur Reduzierung der Biegemomente des Überbaus bei, Bild 14a, bei Schrägseilbrücken führen sie zu einer Destabilisierung bzw. zu einer Erhöhung der Biegemomente, Bild 14b.



**Bild 14:** Einfluss der Theorie 2. Ordnung:  
a) Erdverankerte Hängebrücke,  
b) Schrägseilbrücke

#### 3.3 Betriebsfestigkeit der Überspannung

Die Betriebsfestigkeitsbeanspruchung hängt stark von dem Brückentyp und, natürlich, vom Verhältnis Verkehrslast zur ständigen Last ab. Für  $p = 0,25$  g ergibt sich z. B., Bild 15,

die Kraft der Hauptkabel einer Hängebrücke variiert zwischen 100 % und 124 % (Entlastung durch Theorie 2. Ordnung)

die Kraft im Rückhalteseil einer Schrägseilbrücke schwankt zwischen

- 0,57 g bei Verkehrslast im Seitenfeld
- 1,67 g bei Verkehrslast im Hauptfeld.

Bei diagonalen Hängern einer Hängebrücke kann die Kraft sogar zwischen 0 und 2,0 g schwanken.

LOADING	SUSPENSION BRIDGE	CABLE STAYED BRIDGE
	100%	100%
	120%	167%
	115%	57%
	124%	124%
$\Delta = \text{max} - \text{min}$	24%	110%

**Bild 15:** Schwingbreite der Kabelspannungen

## 4. Montage

### 4.1 Hängebrücke

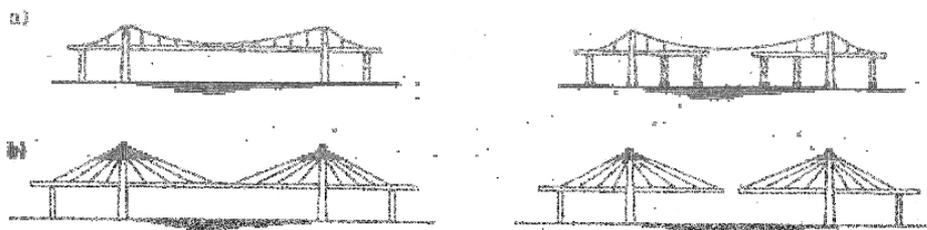
Die Montage einer Hängebrücke beginnt mit der Herstellung der Hauptkabel entweder im Luftspinnverfahren oder durch Zusammenbau aus vollverschlossenen Seilen oder vorgefertigten Paralleldrahtbündeln.

Der Überbau wird wie folgt montiert

- bei kleinen Stützweiten und geringer Höhe über dem Grund zunächst die Seitenöffnungen auf Hilfsjochen und danach die Mittelöffnung
- bei großen Stützweiten und großer Höhe über dem Grund wird in der Mitte der Mittelöffnung begonnen, um das Hauptkabel möglichst frühzeitig etwa in seine endgültige Form zu bringen.

### 4.2 Schrägseilbrücken

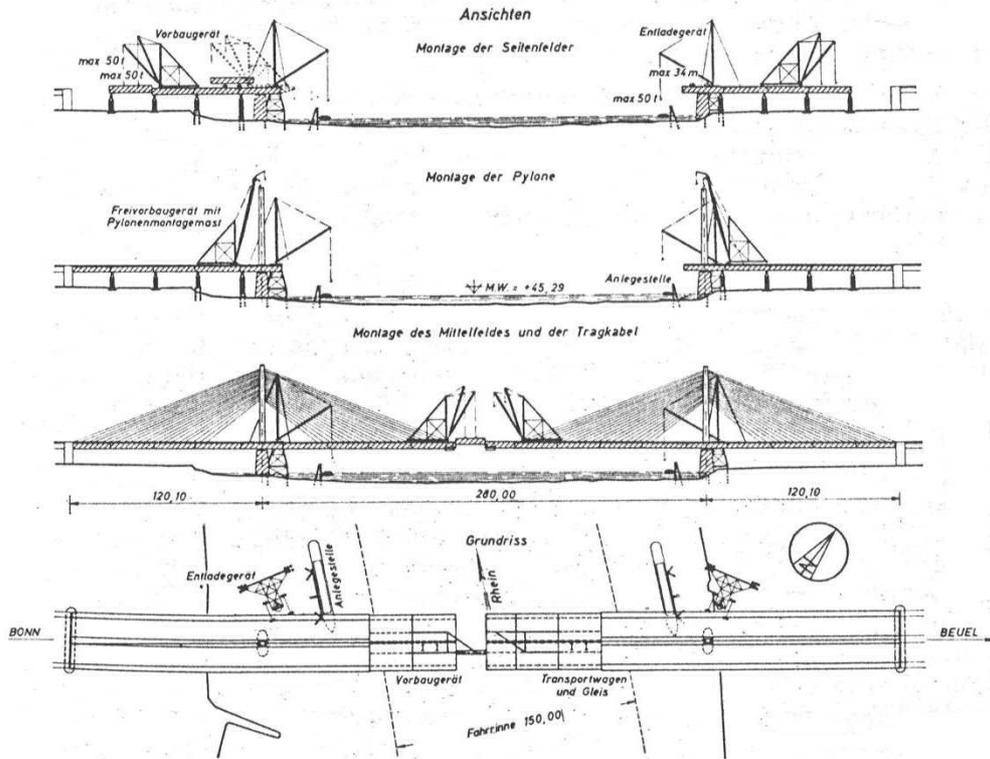
Einer der Gründe für den großen Erfolg von Schrägseilbrücken ist, dass sie in allen Zwischenzuständen selbsttragend sind, Bild 16.



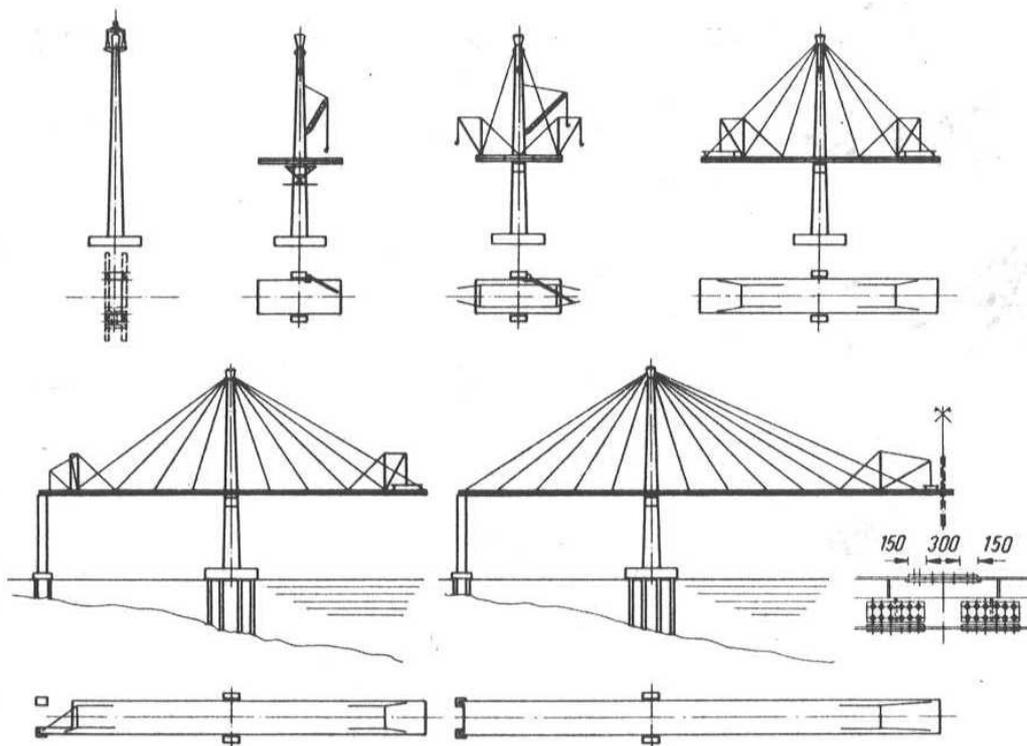
**Bild 16:** Vergleich von Endsystem und Bauzustände: a) In sich verankerte Hängebrücke, b) Schrägseilbrücke

Für die Montage des Überbaus gibt es unabhängig vom Material zwei Möglichkeiten. Wo die Brücke dicht über dem Grund ist, werden - wie bei der Hängebrücke - zunächst die Seitenöffnungen auf Hilfspfeilern montiert und danach die Hauptöffnung im Freivorbau, Bild 17. Wo die Brücke da-

gegen hoch über dem Wasser ist und Hilfspfeiler gegen einen Schiffsanprall gesichert werden müssten, wird der Überbau im symmetrischen Freivorbau errichtet, Bild 18.



**Bild 17:** Montage von Schrägseilbrücken: Seitenöffnungen auf Hilfspfeilern, Mittelöffnung im Freivorbau: Rheinbrücke Bonn-Nord, Mittelöffnung 280 m. Nach [4]



**Bild 18:** Montage von Schrägseilbrücken: Symmetrischer Freivorbau: Brücke Zárate-Brazo Largo über den Paraná, Argentinien, Mittelöffnung 330 m. Nach [5]

## Literatur

- [1] Wilder, Th.: Die Brücke von San Luis Rey. Fischer Taschenbuch 1290, Frankfurt am Main 1976.
- [2] Leonhardt, F.: Zur Entwicklung aerodynamisch stabiler Hängebrücken. Die Bautechnik (1968) Heft 10 und 11.
- [3] Leonhardt, F. et al: Die Autobahnbrücke über den Rhein bei Köln. Bautechnik (1950), Heft 7, 8, 9, 11, (1951) Heft 8, 10, 11, 12, Stahlbau (1951) Heft 7, 9, 11 und Bauingenieur (1951), Heft 2, 3, 5 und 7.
- [4] Thul, H.: Die Friedrich-Ebert-Brücke über den Rhein bei Bonn. Bauingenieur 46 (1971), S. 327 - 333.
- [5] Leonhardt, F., Zellner, W., Saul, R.: Zwei Schrägkabelbrücken für Eisenbahn- und Straßenverkehr über den Rio Paraná, Argentinien. Der Stahlbau 48 (1979) Heft 8 und 9, S. 225 - 236, 272 - 277.