

Netzwerkbögen – Entwurf, Konstruktion und Ausführung

Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler
Technische Universität Berlin
Institut für Bauingenieurwesen
Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau
D-13355 Berlin
Email: ek-stahlbau@tu-berlin.de

Zusammenfassung

Die Bauweise des Netzwerkbogens als fachwerkartig ausgesteifte Stabbogenbrücke erlebt aktuell im deutschen Brückenbau eine Renaissance. Sie kombiniert die Vorteile des Bogens mit denen des Fachwerks. Die möglichen schlanken Querschnitte von Bogen und Versteifungsträger führen in Verbindung mit dem kaum wahrzunehmenden Hängernetz zu einem äußerst transparenten Tragwerk. Aufgrund der großen Tragwerkssteifigkeit sind mit dem Netzwerkbogen größere Stützweiten von bis zu 300m möglich.

Im Folgenden werden die Grundlagen zum Entwurf der Tragkonstruktion von Netzwerkbögen beschrieben und anhand von mehrerer ausgeführter Bauwerke der aktuelle Stand der Konstruktion und Ausführung dieser Bauwerke erläutert.

Summary

The construction method of network arch bridges experiences a renaissance in the German bridge construction during the last five years. The method combines the advantage of arches with those of trusses. The possible small cross sections especially of the arch and the stiffening girder lead to an outmost transparent structure. Due to the large structural stiffness, larger spans of up to 300 meters are possible with the network arches. In the following the basic principles for designing network arch structures are described, and the current state of the construction of this type of structures is explained on the basis of several executed road and railway bridges.

1 Einführung

Josef Langer aus Wien entwickelte bereits 1859 den heute üblichen Stabbogen und ließ sich das Tragprinzip, auch bekannt als Langer'scher Balken, patentieren. Hierbei handelt es sich um einen Brückenüberbau mit einem in sich verankerten Bogen, bei dem die Fahrbahn mit Hängern am Bogen befestigt ist und gleichzeitig als Zugband zwischen den Bogenkämpfern wirkt. Die erste Straßenbrücke dieser Art wurde 1881 in Graz errichtet und weitere Bauwerke dieser Art folgten bald.

Fast zeitgleich näherte man sich dem Prinzip des Netzwerkbogens durch die Variation von Fachwerkbrücken. So wurde 1878 unter Leitung von Claus Koepcke in Riesa ein Brückenzug aus Fachwerkbrücken mit bogenförmigem Obergurt errichtet, die bereits eine Stützweite von 101,4 m aufwies, Abb. 1. Mit zwei nebeneinander liegenden Überbauten wurde sowohl eine Straße als auch die Eisenbahnstrecke Leipzig – Dresden über die Elbe geführt. Die Diagonalen waren rautenförmig gekreuzt und derart miteinander verbunden und ausgesteift, dass sie sowohl Zug- als auch Druckkräfte übertragen konnten. Diese Überbauten können daher als Fachwerk mit an den Momentenverlauf angepasstem Obergurt bzw. als „Bogenfachwerk“

beschrieben werden. Damit werden die Vorteile des Bogens, hohe Druckkräfte (insbesondere infolge symmetrischer Lasten) gut abzutragen, mit denen des Fachwerks, Biegebeanspruchung (also auch Beanspruchungen infolge asymmetrischer Lasten) gut abzutragen, kombiniert.



Abb. 1: Elbebrücken in Riesa

Am Anfang des 20. Jahrhunderts arbeitete der Däne Octavius Nielsen an der Weiterentwicklung des Langer'schen Balkens und meldete schließlich 1926 ein Patent für einen Stabbogen mit V-förmig geneigten Zugstangen an. Er hatte erkannt, dass sich mit geneigten Hängern die Biegemomente in Bogen und Versteifungsträger verringern lassen und damit die Ausführung des Bogens in Stahlbeton auch bei größeren Stützweiten möglich ist. In der Folgezeit entstanden vor allem in Skandinavien zahlreiche dieser Brücken in massiver Bauweise. Die bekannteste Nielsen-Brücke ist die Pont de Castelmoron (Frankreich) mit einer Stützweite von 143m, s. Abb. 2.



Abb. 2: Pont de Castelmoron von Nielsen, 1933

Per Tveit verdichtete ca. ab Mitte des 20. Jahrhunderts das Hängernetz so weit, dass sich die Hänger mehrfach kreuzen [1]. Damit erreichte er ein optimiertes fachwerkähnliches Tragverhalten mit geringen Biegemomenten im Bogen und im Untergurt. Die im Untergurt vorherrschenden Normalkraftbeanspruchungen werden bei Tveit durch dessen Ausbildung als Spannbetonplatte abgetragen. Tveit entwarf 1963 mit den norwegischen Brücken in Steinkjer und über den Bolstadstraumen zwei Straßenbrücken dieser Art mit einer Stützweite von jeweils ca. 80m. Sie besitzen ein ausgesprochen filigranes und transparentes Haupttragwerk und fügen sich daher sehr zurückhaltend in ihre Umgebung ein.

Ebenfalls 1963 wurde die Fehmarnsundbrücke in Deutschland als kombinierte Eisenbahn-Straßenbrücke mit einer Stützweite von 248,4m fertiggestellt [2], s. Abb. 3. Zur Verbesserung des Stabilitätsverhaltens wurden die Bögen korbhenkelartig aneinander geführt. Die 21m breite Fahrbahn wurde in Untergurtebene als orthotrope Platte ausgeführt.



Abb. 3: Brücke über den Fehmarnsund

In den Folgejahren wurden besonders in Japan mehrere Netzwerkbogenbrücken mit größeren Spannweiten von teilweise über 250m gebaut. Obwohl die ausgeführten Netzwerkbögen mit einer ansprechenden Ästhetik für Aufmerksamkeit sorgten, wurden bis zum Ende des vergangenen Jahrhunderts keine weiteren Brücken dieser Art in Deutschland errichtet. Erst in den letzten Jahren ist es wieder vermehrt gelungen, im Straßen- und Eisenbahnbrückenbau Bauwerke mit dieser effizienten und innovativen Bauweise zu realisieren.

2 Entwurfsgrundlagen

2.1 Zum Tragverhalten

Die Entwurfsgrundlagen für den Netzwerkbogen sind umfassend in [3] dargestellt. Das Tragssystem des Netzwerk Bogens lässt sich vereinfachend als eine Kombination aus dem Stabbogen mit vertikalen Hängern und einem Fachwerk beschreiben. In das System eines Bogens mit untenliegendem Zugband werden geneigte und sich mehrfach kreuzende Hänger eingefügt, s. Abb. 4, die eine Schubsteifigkeit zwischen den Gurten bedingen.

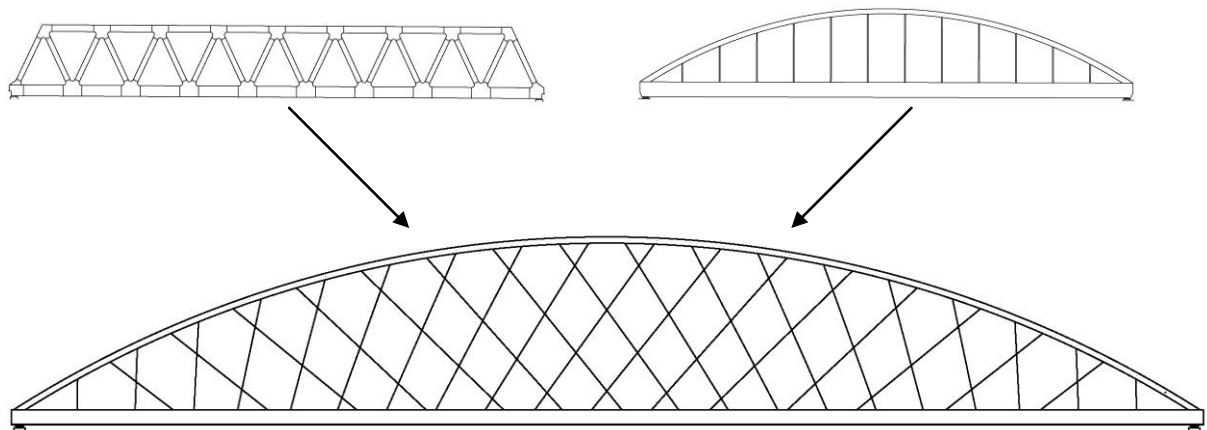


Abb. 4: Kombiniertes Tragprinzip von Fachwerkträger und Stabbogen

Das fachwerkartige Tragverhalten des Netzwerkbogens lässt sich gut mit dem sich einstellenden Verformungsverhalten begründen, s. Abb. 5. Während der klassische Stabbogen bei einer gleichmäßig verteilten Last (z.B. Eigengewicht) nur relativ geringe Durchbiegungen aufweist, kommt es bei seiner halbseitigen Belastung zu großen Vertikalverformungen. Diese entstehen durch ein seitliches Ausweichen des Bogens verbunden mit dem Entzug der Lastaufnahme, weshalb der Bogen den Untergurt in diesem Bereich nur schlecht stützt. Im Gegensatz dazu wird beim Netzwerkbogen das seitliche Ausweichen des Bogens durch die geneigten Hänger deutlich reduziert.

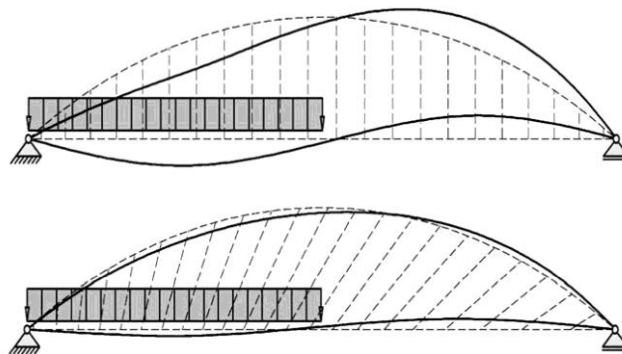


Abb. 5: Stab- und Netzwerkbogen: Verformungen infolge Eigengewicht und halbseitiger Verkehrslast

Der Vergleich der Biegemomente in der Bogenebene zeigt ähnliche Ergebnisse. Beim Netzwerkbogen werden wegen der schubsteifen Verbindung von Bogen und Untergurt sowie der Anordnung der Hänger in relativ geringen Abständen die positiven Biegemomente im Untergurt deutlich verringert. Mit der dann maßgebenden Normalkraftbeanspruchung aller vorhandenen Stäbe im System ist eine schlanke und materialsparende Ausbildung ihrer Querschnitte möglich. Damit kann beispielsweise die Konstruktionshöhe des Versteifungsträgers um ein mindestens Drittel bis auf die Hälfte verringert werden.

2.2 Wirtschaftlicher Einsatzbereich

Es gilt der Grundsatz - je größer die Stützweite umso effektiver ist der Netzwerkbogen. Im großen Stützweitenbereich bis zu 300m begrenzen fast ausschließlich die Anforderungen an die Montage die Spannweite. Netzwerkbögen sollten im Straßenbrückenbau etwa ab 60m und im Eisenbahnbrückenbau etwa ab 80m eingesetzt werden.

Eine ungleichmäßige Eigengewichtsverteilung und besonders die Einspannung des Untergurtes in die Bogenfußpunkte führen zu Störbereichen und Unregelmäßigkeiten in den Normalkrafteinflusslinien der Hänger. Mit steigender Schiefwinkligkeit der Überbauten im Grundriss erhöhen sich deshalb die Probleme in den spitzen Ecken, da die Hänger in diesen Bereichen infolge Eigengewicht nur gering vorgespannt werden, aber eine ungünstig angeordnete konzentrierte Verkehrslast trotzdem relativ stark wirksam wird.

2.3 Ausbildung der Fahrbahn

Da das Haupttragwerk des Netzwerk Bogens sehr leistungsfähig ist und sich Eigengewichtslasten positiv auf die Vorspannkräfte in den Hängern auswirken, kann neben der stählernen orthotropen Platte auch problemlos eine massive Fahrbahnplatte verwendet werden. Gerade bei Straßenbrücken wird in der massiven Fahrbahnplatte derzeit gegenüber der orthotropen Platte die Vorzugsvariante gesehen.

Zur klaren Aufnahme der Untergurt-Zugkräfte und zur Ermöglichung eines konstruktiv einfachen und bewährten Hängeranschlusses wird immer die Anordnung stählerner Versteifungsträger empfohlen. Diese Ausführung ist auch vorteilhaft für die Montage. Eine in Norwegen in der Vergangenheit praktizierte Ausführung mit Verzicht auf den stählernen Versteifungsträger und Aufnahme der Zugkräfte im Versteifungsträger durch Längsvorspannung wird insbesondere wegen der dann konstruktiv ungünstigen Hängeranschlüsse an die Platte – unter Berücksichtigung hoher ermüdungsrelevanter Belastungen in Deutschland - nach derzeitigem Kenntnisstand nicht empfohlen.

2.4 Optimierung des Hängernetzes

Von einer optimalen Netzgeometrie hängt nicht nur die Qualität und die Wirtschaftlichkeit des Entwurfes sondern auch dessen Ausführbarkeit an sich ab, da andernfalls die Gefahr besteht, dass die Hänger infolge einer einseitigen Verkehrsbelastung des Überbaus Druckkräfte erhalten.

Zur Veranschaulichung dieser Problematik sind beispielhaft in Abb. 6 die Normalkrafteinflusslinien von zwei Hängern dargestellt. Jede Einflusslinie besitzt einen negativen und einen flächenmäßig größeren positiven Anteil. Dies bedeutet, dass eine gleichmäßig über die Brückenlänge verteilte Last z. B. aus Eigengewicht immer eine Zugkraft im Hänger hervorruft. Andererseits bewirkt eine begrenzte Verkehrsbelastung im negativen Bereich der Einflusslinie eine Druckkraft im betrachteten Hänger. Ein Hängerausfall infolge Druckbeanspruchung wird nur dann vermieden, wenn die Zugkraft infolge Eigengewicht größer als die Druckkraft infolge dieser begrenzten Verkehrslast ist. Dies kann durch eine ausreichend große Eigenlast der Fahrbahn (z. B. durch Wahl einer Verbundfahrbahnplatte statt einer orthotropen Fahrbahnplatte) besser erreicht werden.

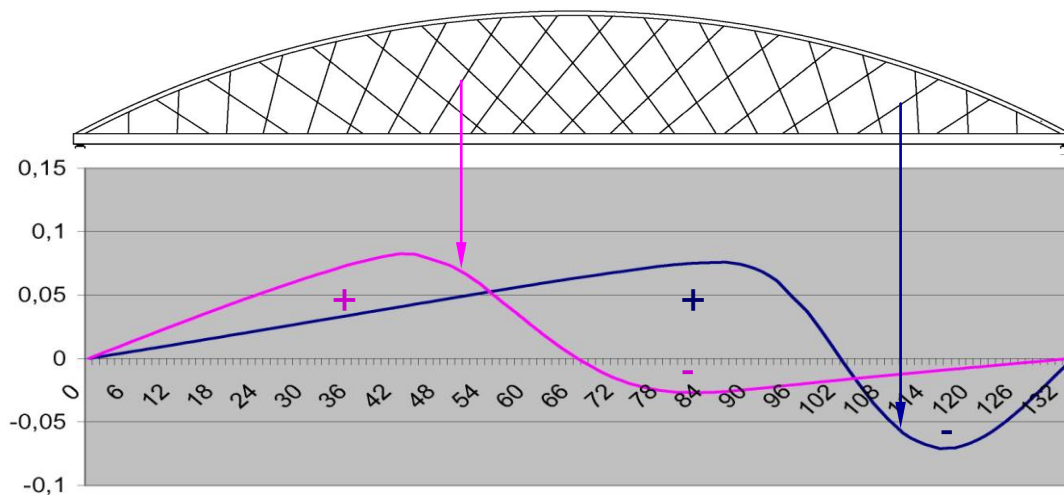


Abb. 6: Normalkraft-Einflusslinien für zwei Hänger

Die wesentliche Methode zur Sicherstellung resultierender Zugkräfte in den Hängern ist eine günstige Veränderung des jeweiligen Einflusslinienverlaufes durch Veränderungen der Hängergeometrie. Dabei wird der Effekt genutzt, dass das Verhältnis von positiver zu negativer Einflussfläche in der Normalkrafteinflusslinie mit zunehmender Neigung größer wird und damit die Anfälligkeit für Hängerausfall sinkt. Gleichzeitig steigt allerdings die maximale Normalkraft mit zunehmender Neigung stark an und führt zu größeren erforderlichen Hängerquerschnitten und Hängeranschlussdetails.

Es ist zu beachten, dass die Normalkrafteinflusslinien nicht nur von den objektspezifischen Eingangsgrößen Stützweite und Bogenstich sowie der Netzgeometrie abhängen, sondern aufgrund des statisch unbestimmten Systems auch von den Steifigkeitsverteilungen in Bogen und Versteifungsträger.

Die Entwicklung der Netzgeometrie mit den geometrischen Kenngrößen Hängeranzahl und Hängerneigung als variable Parameter stellt sich damit als ein Optimierungsprozess dar, bei dem folgende - zum Teil gegensätzliche - Zielgrößen erreicht werden sollen:

- gleichmäßige ästhetische Netzgeometrie,
- kleine negative Einflussfläche für die Normalkraft der einzelnen Hänger zur Vermeidung einer resultierenden Druckkraft,
- Minimierung der Biegemomente in Bogen und Versteifungsträger,
- geringe maximale Hängerzugkräfte (kleine positive Einflussfläche und damit gegensätzlich zu Punkt 2),
- geringe Spannungsdifferenzen in den Hängern zur Reduzierung der Ermüdungsgefährdung insbesondere der Hängeranschlüsse,
- Einhaltung geometrischer Randbedingungen wie z.B. der erforderlichen Durchtrittsfenster durch das Hängernetz bei Bahnbrücken mit außen liegenden Gehwegen.

Bei den bisher ausgeführten Brücken hat sich gezeigt, dass nahe dem Bogenfußpunkt angeordnete Hänger nicht sinnvoll sind. Es wird empfohlen, einen konstanten Abstand der Hängeranschlüsse am Bogen zu wählen und vor allem bei Eisenbahnbrücken die ersten drei möglichen Anschlusspunkte vom Bogenfußpunkt aus gesehen nicht zu besetzen [4], s. Abb. 7.



Abb. 7: Eisenbahnbrücke über die Oder in Frankfurt

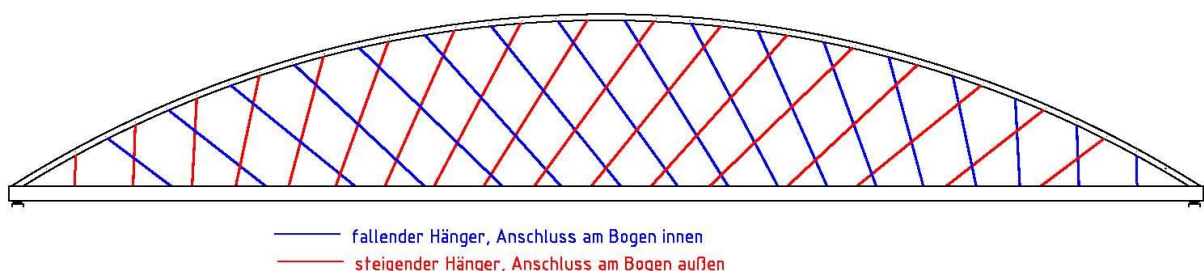
3 Konstruktive Besonderheiten

3.1 Hänger und deren Anschlüsse

Die Besonderheiten der Netzwerkbogenkonstruktionen beziehen sich vor allem auf die Ausführung der Hänger und deren Anschlüsse. Es sind grundsätzlich Flachstähle, Rundstähle oder vollverschlossene Seile denkbar. Rundstähle sollten insbesondere dann zum Einsatz kommen, wenn die Hänger vom Betrachter auch aus geringer Entfernung sichtbar sind. Derzeit ist ein Einsatz von Rundstahlhängern insbesondere bei Straßenbrücken üblich. Zur Ausbildung und Bemessung der Anschlussdetails sind die entsprechenden Regelungen im DIN-Fachbericht 103 [5] bzw. den ergänzenden Empfehlungen der Bundesanstalt für Wasserbau [6] enthalten. Neben höheren zulässigen Dicken für vollwandige Rundstahlquerschnitte sind hier Regelungen zur Konstruktion und Bemessung der Hängeranschlüsse für winderregte Schwingungen enthalten.

Bei Eisenbahnbrücken empfiehlt sich die Verwendung von Flachstahlhängern [7], da diese relativ einfachen Anschlussdetails eine höhere Ermüdungsfestigkeit aufweisen und damit auch wirtschaftlicher sind. Flachstahlquerschnitte sind problemlos in größeren Längen lieferbar bzw. können einfacher durch Schweißung gestoßen werden.

Damit die Hänger an ihren Kreuzungspunkten nicht aneinander reiben, erhalten sie auch in Querrichtung gegensätzliche Neigungen. Ausgehend von der Stegblechebene des Versteifungsträgers werden die „steigenden“ und „fallenden“ Hänger jeweils so ausgeführt, dass sie abwechselnd am inneren und äußeren Stegblech des kastenförmigen Bogens angeschlossen werden können, s. Abb. 8.



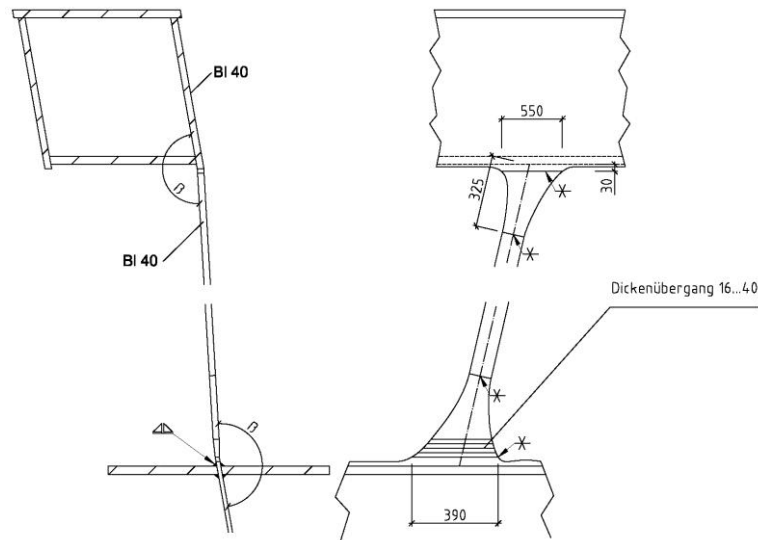


Abb. 8: Geschweißter Anschluss von Flachstahlhängern

Da die Neigung der Hänger im Brückenquerschnitt von der Neigung der Versteifungsträger- bzw. Bogenstegbleche abweicht, müssen die Anschlussdetails die vorhandene (kleine) Umlenkkräfte aufnehmen können. Am oft als offener Schweißquerschnitt ausgeführten Versteifungsträger wird dies durch das Durchführen des Stegbleches durch den Obergurt und das seitliche Anschließen der zweiteiligen Obergurtbleche erreicht. Die Umlenkkräfte können nun kontinuierlich auf der gesamten Anschlussbreite von den Obergurtblechen aufgenommen werden. Diese Versteifungsträgerausbildung ermöglicht den Anschluss der Hänger in variablen Abständen entsprechend der Netzgeometrie.

Am Bogen erfolgt die Befestigung mit Stumpfnähten an den nach unten überstehenden Stegblechen. Damit sind keine zusätzlichen Querschotte im Bogen und auch keine aufwendigen Durchführungen mit Dichtblechen im Bogenuntergurt notwendig.

Der Einbau der schrägen Hänger ist deutlich aufwändiger als bei Stabbögen und muss detailliert vorbereitet werden. Mittels Spanngurten, Hilfstraversen, Abstandhaltern und dgl. sind die Hänger so zu sichern, dass alle Anschlüsse richtungstreu und ohne Knicke hergestellt werden können. Der erhöhte Aufwand beim Einbau der Hänger wird durch die Stahleinsparung aber mehr als ausgeglichen. Ein nicht zu vernachlässigender Vorteil ist das hohe Schweißtempo an den Baustellenstößen durch die deutlich dünneren Bleche der Versteifungsträger und Bögen.

3.2 Hinweise für die statische Berechnung

Die Normalkraftverteilung innerhalb des Hängernetzes ist empfindlich bezüglich Steifigkeitsänderungen im Tragwerk. Besonderes Augenmerk sollte deshalb auf die feinere Modellierung im Bereich der Bogenfußpunkte gelegt werden.

Die rechnerische Erfassung der verschiedenen Montagezustände ist bedeutsam für die Realitätsnähe der ermittelten Beanspruchungen. So muss rechnerisch berücksichtigt werden, dass zunächst der Untergurt und der Bogen montiert und erst nach dem Freisetzen des Bogens die Hänger eingeschweißt werden. Auch der - optimalerweise möglichst späte - Zeitpunkt des Freisetzens des Versteifungsträgers von den Hilfsgründungen auf dem Vormontageplatz muss in den Berechnungen berücksichtigt werden.

Die stark geneigten Hänger hängen bei größeren Längen etwas durch und verhalten sich damit wie ein Seil. Dies ist rechnerisch durch den Ansatz eines fiktiven E-Moduls für die Hänger zu berücksichtigen.

Da insgesamt ein nichtlineares Tragverhalten vorliegt, ist die lineare Superposition von Einzellastfällen nicht möglich. Es sollten gezielt die für jedes Bauteil maßgebenden Laststellungen mit gleichzeitig wirkenden ständigen Lasten untersucht werden. Die Identifikation der maßgebenden Laststellungen kann durch die Ermittlung von Einflusslinien vereinfacht werden.

Sollten die relativ strengen Nachweisbedingungen für die winderregten Schwingungen rechnerisch nicht erfüllt werden, können im Nachgang am fertig gestellten Bauwerk durchzuführende dynamische Messungen insbesondere wegen der dann genaueren Erfassung der Dämpfung zu deutlich günstigeren Bewertungen führen. Es ist möglich, die Hänger an Ihren Kreuzungspunkten mit relativ einfachen, dämpfenden Kopplungselementen zu verbinden und dadurch wirkungsvoll zu verstimmen, s. Abb. 9. Das kann den teilweise bei Stabbogenbrücken angewendeten Einbau von Dämpfern oder Seilverspannungen ersparen. Neben der Veränderung der Eigenfrequenzen bzw. zugehörigen Eigenformen werden auch die Dämpfungen erhöht.



Abb. 9: Elastomerelement zur Kopplung der Hänger gegen winderregte Schwingungen

4 Beispielbauwerke

4.1 Straßenbrücken im Zuge der B2/ 95 über die A38 bei Leipzig

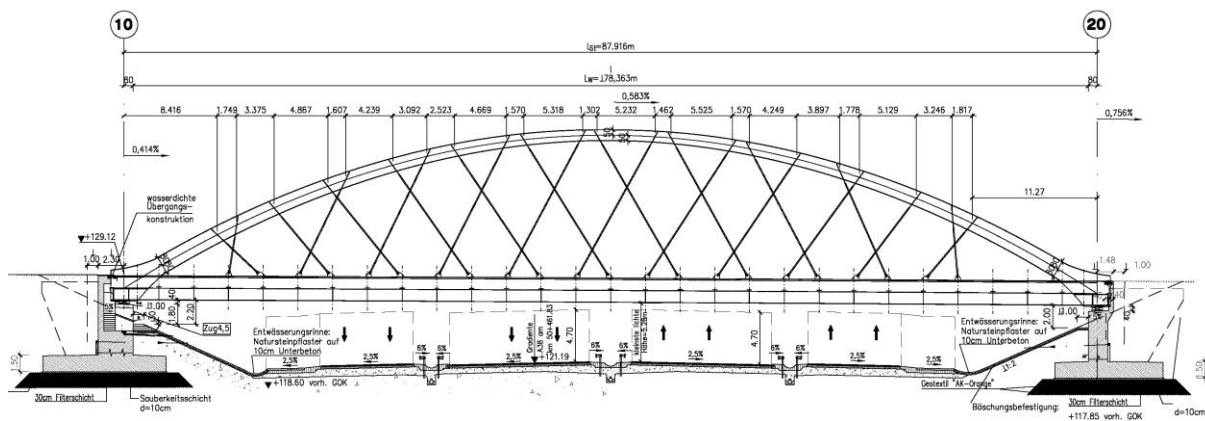
Das 2006 fertig gestellte Bauwerk besteht aus zwei parallelen Überbauten, welche die Bundesstraße B 2/ 95 über die Autobahn A 38 im Süden von Leipzig überführen. Die Überbauten weisen jeweils eine relativ große Breite von ca. 28m auf. Das Bauwerk wurde zunächst als klassische Stabbogenbrücke ausgeschrieben, die Ausführung als Netzwerkbogen resultierte aus einem von der GMG-Ingenieurgesellschaft geplanten Sondervorschlag, der durch das Autobahnamt Sachsen beauftragt wurde.



Abb. 10: Ansicht der Straßenbrücken im Zuge der B2 / 95 über die A 38

Aufgrund der großen Überbaubreite wurden frei stehende Bögen (ohne oberen Windverband) mit einer Breite von 1,2m und einer veränderlichen Höhe von 1,6m am Kämpfer auf 1,0m am Scheitel ausgeführt. Der Bogenstich beträgt 14,0m und ist mit dem resultierenden Verhältnis von 1 : 6,3 reichlich gewählt.

Die Schiefwinkligkeit der Überbauten und die im Verhältnis dazu relativ geringe Stützweite von 87,9m bedingen in den spitzen Ecken Bereiche mit ungenügender Hängervorspannung durch das Eigengewicht. Diesem Problem wurde durch die Ausbildung einer unsymmetrischen Netzgeometrie - verbunden mit einem nicht-konstanten Hängerabstand am Obergurt (der aber optisch nicht störend ist) - begegnet. Insgesamt wurde erreicht, dass im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der günstig wirkenden charakteristischen Eigenlasten keine resultierenden Druckkräfte in den Hängern auftreten.



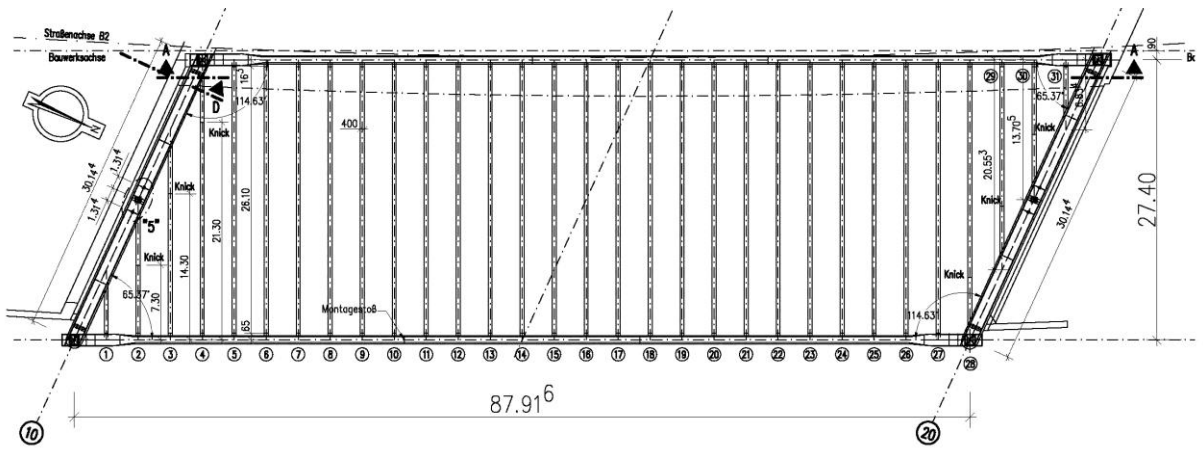


Abb. 11: Längsschnitt und Draufsicht auf das Querträgersystem

Als Hängerquerschnitt wurden Rundstähle aus S 355 mit einem Durchmesser von 90mm gewählt. Sie sind am Bogen exzentrisch angeschlossen, um die Berührung in den Kreuzungspunkten zu vermeiden. Die aus den exzentrischen Anschlüssen resultierende Torsionsbeanspruchung kann der kastenförmige Bogen problemlos aufnehmen. Die geschweißten Hängeranschlüsse wurden zur Erzielung einer hohen Ermüdungsfestigkeit in Anlehnung an [6] ausgebildet, siehe Abb. 12. Es ist anzumerken, dass der Durchmesser der Hänger deutlich unter dem der ausgeschriebenen Stabbogenbrücke mit 130mm liegt.

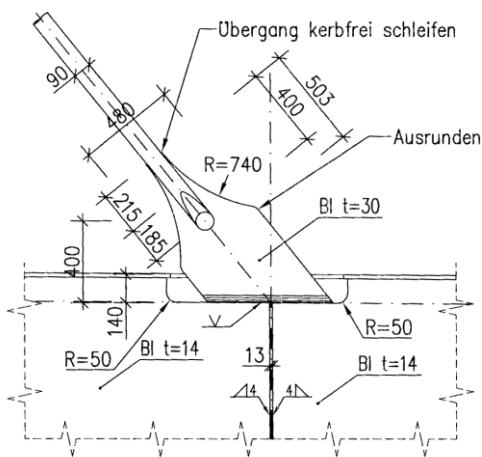


Abb. 12: Anschlussdetail Rundstahlhänger

Als Fahrbahn wurde eine 30cm dicke schlaff bewehrte Stahlbetonplatte aus C 35/45 auf Querträgern im Verbund verwendet. Ausgehend von der notwendigen Bauhöhe der Querträger wurden die Versteifungsträger als offene Schweißträger mit einer Höhe von 2,14m ausgeführt. Dieses konstruktiv gewählte Maß liegt weit über der statisch erforderlichen Bauhöhe für den Versteifungsträger des Netzwerkbogens, aber immer noch unter der ursprünglich vorgesehenen Bauhöhe für den des Stabbogens. Mit dem als Sondervorschlag umgesetzten Netzwerkbogen wurden trotzdem deutliche Einspareffekte für den Baustahl von ca. 25 % gegenüber der ausgeschriebenen klassischen Stabbogenlösung erzielt.

Die Montage der Überbauten erfolgte in Endlage auf Hilfsstützen im Bereich der zu dem Zeitpunkt noch nicht fertig gestellten Autobahn. Dazu wurde zunächst der Trägerrost aus Querträgern und Versteifungsträgern montiert. Danach wurden die Bogensegmente auf Mon-

tagetürme aufgelegt und verschweißt. Der Hängereinbau erfolgte erst nach dem Rückbau der Montagetürme in die sich selbst tragenden Bögen, wobei besonders auf die möglichst ideale Geradheit der Hänger sowie eine gleichmäßige Temperatur beim Einbau geachtet wurde. Durch das anschließende Entfernen der Hilfsstützen unter den Versteifungsträgern erhielten die Hänger ihren ersten Vorspannungsanteil. Der wesentliche Anteil der Vorspannung wurde jedoch mit dem anschließenden Betonieren der Fahrbahnplatte eingetragen.

Gestalterisch fügen sich beide Überbauten sehr gut in das neu gestaltete weitläufige Umfeld eines ehemaligen Tagebaus ein. Trotz ihrer großen Breite wirken die Überbauten leicht und transparent. Das Tragwerk wird gestalterisch durch die Seilverspannungen dominiert, was aber nicht nachteilig ist, s. Abb. 13. Die Netzwerkbögen bilden einen gelungenen Kontrast zu den weiteren Brücken dieses Autobahnabschnittes, die zum Teil als klassische Stabbogenbrücken ausgeführt wurden.



Abb. 13: Ansicht einer Bogenebene

4.2 Eisenbahnüberführung „Flora“ über den Mittellandkanal

Nach erfolgreicher Realisierung mehrerer Netzwerkbögen als Straßenbrücken traf auch die Deutsche Bahn die Entscheidungen für den Bau derartiger Tragwerke. Aufgrund der höheren Verkehrslasten und damit vor allem auch der höheren Anforderungen an die Ermüdungssicherheit bedingen die Eisenbahnbrücken neue Anforderungen gegenüber den Straßenbrücken. Der im Jahr 2006 von der DB Projektbau Leipzig gemeinsam mit der GMG-Ingenieurgesellschaft erarbeitete Entwurf für die eingleisige Überführung der Bahnstrecke Glindenberg-Oebisfelde über den Mittellandkanal westlich von Haldensleben verdeutlicht eindrucksvoll die Vorzüge des Netzwerkbogens für mittlere und große Eisenbahnbrücken. Parallel zum Amtsentwurf als klassische Stabbogenbrücke wurde der Überbau als Netzwerkbogen mit einer Verringerung des Stahlkonstruktionsgewicht von ca. 1.400 t auf etwa 900 t geplant. Dem gegenüber stand der deutlich höhere Aufwand für die von 12 auf 34 vergrößerte Hängeranzahl je Bogenebene. Da seitens des AG der Wunsch zur Klärung bestand, ob trotz der verringerten Stahltonnage der Netzwerkbogen wirtschaftlicher zu fertigen wäre, wurde das Bauwerk als Stabbogenbrücke ausgeschrieben und die Bieter aufgefordert, Sondervorschläge für einen Netzwerkbogen einzureichen. Im Vergabeverfahren stellte sich heraus, dass

der Netzbogen trotz des höheren Fertigungsaufwands wirtschaftlicher als der Stabbogen zu errichten ist.

Das Tragwerk weist aufgrund der höheren Transparenz der einzelnen Bauteile auch gestalterische Vorteile gegenüber dem klassischen Stabbogen auf. Der Bogenstich der kreisförmigen und im Scheitel zusammengeführten Bögen beträgt 19,85m, was einer Schlankheit von $L/7$ entspricht (Abb. 14).

Trotz der großen Stützweite von 132,6m können die Querschnitte des Haupttragwerkes für den Netzbogen sehr filigran ausgeführt werden. So weisen die Bögen einen dichtgeschweißten Kastenquerschnitt mit den konstanten Abmessungen von 70 x 70cm und die Versteifungsträger eine Bauhöhe von nur 170cm auf. Trotz der reduzierten Stahltonnage sind die resultierende Durchbiegung und damit auch der Endtangentialwinkel des Netzbogens unter dem besonders kritischen Fall der halbseitigen Last deutlich geringer als für die klassische Stabbogenbrücke. Aufgrund der Stahlmasseneinsparungen sind deutliche Erleichterungen für den Transport und die Montage der einzelnen Segmente zu verzeichnen.

Die Versteifungsträger sind als I-förmige Schweißträger mit geneigten Stegblechen ausgebildet und befinden sich damit in einer Ebene mit den nach innen geneigten Bögen. Die Fahrbahn wird als stählerne orthotrope Platte ausgeführt und entspricht der Regelausführung für Stabbogenbrücken.



Abb. 14: Längsschnitt und Ansicht der EÜ Flora über den Mittellandkanal

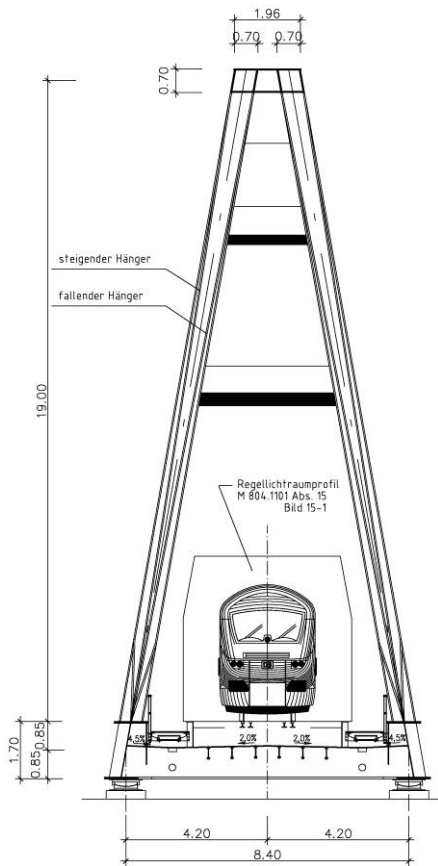


Abb. 15: Querschnitt der EÜ Flora über den Mittellandkanal

Die Neigungen der steigenden und fallenden Flachstahlhänger einer Bogenebene variieren jeweils zwischen 89° und 37° , wobei die Winkeländerungen kontinuierlich, aber in ungleichen Schritten, erfolgen. Damit sich die Hänger an den Kreuzungspunkten nicht berühren, werden die steigenden Hänger am äußeren und die fallenden Hänger am inneren Steg der Bogenkästen angeschlossen. Die hierdurch entstehende Torsion kann vom Kastenquerschnitt problemlos aufgenommen werden. Aufgrund der auf den Erfahrungen des Eisenbahnbrückenbaus beruhenden Anschlussausbildung für die Flachstahlhänger durch Stumpfstoße wird insgesamt eine ausreichende Ermüdungssicherheit für diese Bauteile gewährleistet.

Der Überbau wurde auf einem Vormontageplatz hergestellt und anschließend per Längsverschub unter Verwendung eines Pontons eingeschwommen. Durch die während des Verschubvorganges auftretenden Auflagersituationen mit Kragarm wurden einige Hänger auf Druck beansprucht, was – genau wie für den Verschub einer klassischen Stabbogenbrücke – temporäre Vorspannmaßnahmen zur Aufnahme dieser Druckkräfte notwendig machte.



Abb. 16: Vormontage und Längverschub der Florabrücke

Wegen der Neuartigkeit der Bauweise im Eisenbahnbrückenbau wurden Probelastungen gefordert und durchgeführt, die im Anschluss als automatisierte dynamische Dauermessung unter Regelbetrieb über 3 Monate fortgeführt wurden. Neben der Bestätigung der Normalkräfte in den Hängern über Frequenzanalysen sowie der Auswertung der Last- und Beanspruchungskollektive an bestimmten Bauteilen (s. Abb. 17) wurde besonders auch die Querbiegesteifigkeit des - weit gespannten, aber nicht sehr breiten - Tragwerks unter Realverkehr über den genannten Zeitraum überprüft. Dies wurde erforderlich, da Netzerkbögen deutlich kleinere Bauteilquerschnitte benötigen als Stabbögen und damit in der Querrichtung tendenziell

weicher sind. Nach Auswertung der Dauermessungen zeigte sich die trotzdem sehr hohe Querbiegesteifigkeit des Tragwerkes unter der horizontalen Anregung durch den Zugverkehr, u. a. begründet durch die Mittragwirkung sekundärer Bauteile und des Oberbaus auf Gebrauchslastniveau, s. Abb. 18.

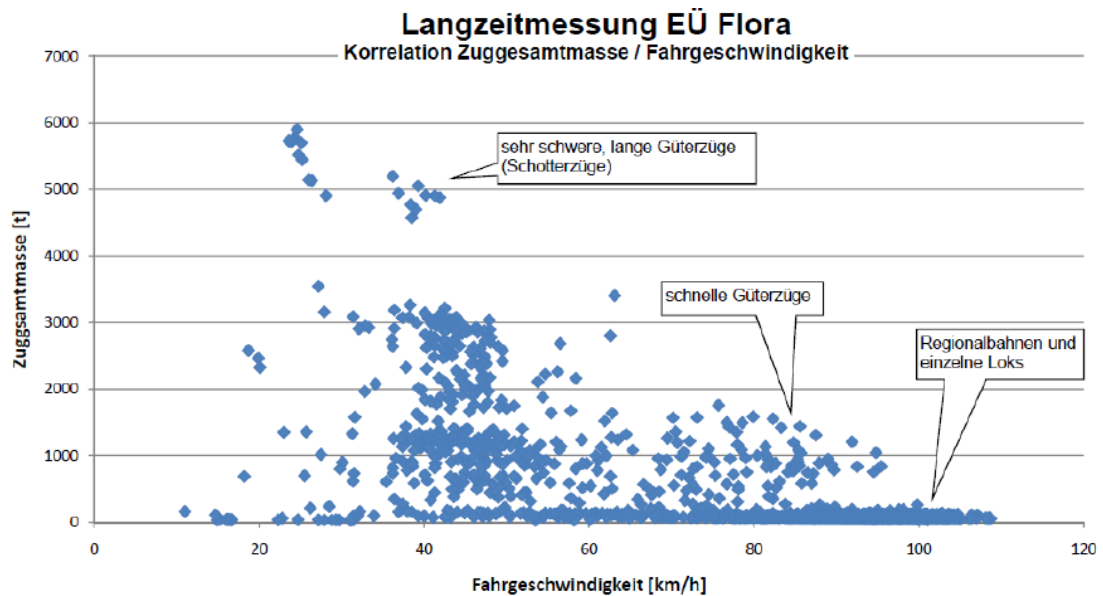


Abb. 17: Geschwindigkeitsabhängiges Lastkollektiv mittels automatisierter Dauermessungen an der Florabrücke

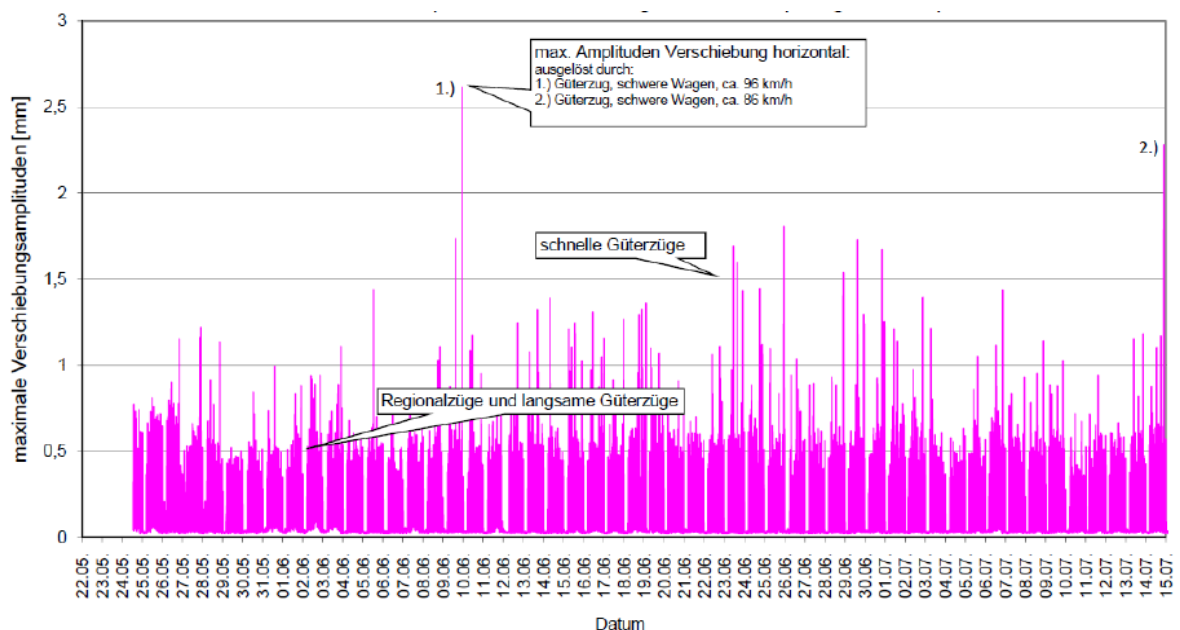


Abb. 18: Tagesextremwerte für die mittels automatisierter Dauermessung ermittelten Horizontalverschiebungen in Bauwerksmitte (Zeitraum 22.05. bis 15.07.)

4.3 Eisenbahnüberführung über die B6 in Halle (Saale)

Für dieses Bauvorhaben wurde durch DB Projektbau zusammen mit der GMG-Ingenieurgesellschaft eine - im Eisenbahnbrückenbau neuartige - Kombination des Netzbogens mit einer schlaff bewehrten Fahrbahnplatte aus Stahlbeton C 35/45 entworfen, s. Abb. 19. Diese Brückenkonstruktion ist sowohl in der Herstellung als auch in der Unterhaltung sehr wirtschaftlich, da sie zusätzlich zum effektiven Haupttragwerk des Netzbogens gleichzeitig eine sehr einfache Fahrbahnkonstruktion aufweist. Das höhere Eigengewicht der Fahrbahnplatte wirkt sich vorteilhaft auf die Vorspannung der Hänger des mit einer Stützweite von 79m eher an der unteren Grenze des Anwendungsbereiches liegenden Netzbogens aus.

Zur definierten Aufnahme der anteiligen Zugkräfte aus Bogenschub sowie zur Vereinfachung einzelner Bauzustände sind in den Bogenebenen stählerne Versteifungsträger angeordnet. Um eine gleichmäßige Einleitung der anteiligen Untergurt-Zugkräfte in die massive Platte zu gewährleisten, wurden steife stählerne Endquerträger mit Kastenquerschnitt angeordnet. Die Vertikallasten aus der Fahrbahnplatte werden kontinuierlich über horizontal angeordnete Kopfbolzendübel in den Versteifungsträger eingeleitet. Durch die stählernen Versteifungsträger wird die Ausführung des üblichen geschweißten Hängeranschlusses ermöglicht. Die Höhe des Versteifungsträgers und der anschließenden Betonaufkantung wurde so gewählt, dass im oberen Bereich die Funktion der Schotterhalterung übernommen wird und unten ein Freiraum zur Aufnahme der geneigten Längsentwässerung entsteht. Der untere Freiraum bietet auch gute Möglichkeiten zum Einsatz einer Schalung unter den beengten innerstädtischen Bedingungen.

Im Zuge der weiteren Planung wurde das Hängernetz vom Ausführungsplaner leider nicht ausreichend optimiert. Die rechnerisch ermittelten kleinen Druckkräfte in seltenen Lastkombinationen in einigen Hängern führten zum Einbau von „Nullstäben“. Dies ist zukünftig durch die notwendige Optimierung des Hängernetzes in der Ausführungsplanung unbedingt auszuschießen, da sonst die Stahltonnage des Tragwerkes deutlich erhöht wird und in diesem Fall sogar instandhaltungsaufwendige Querkraftkopplungen eingebaut wurden.

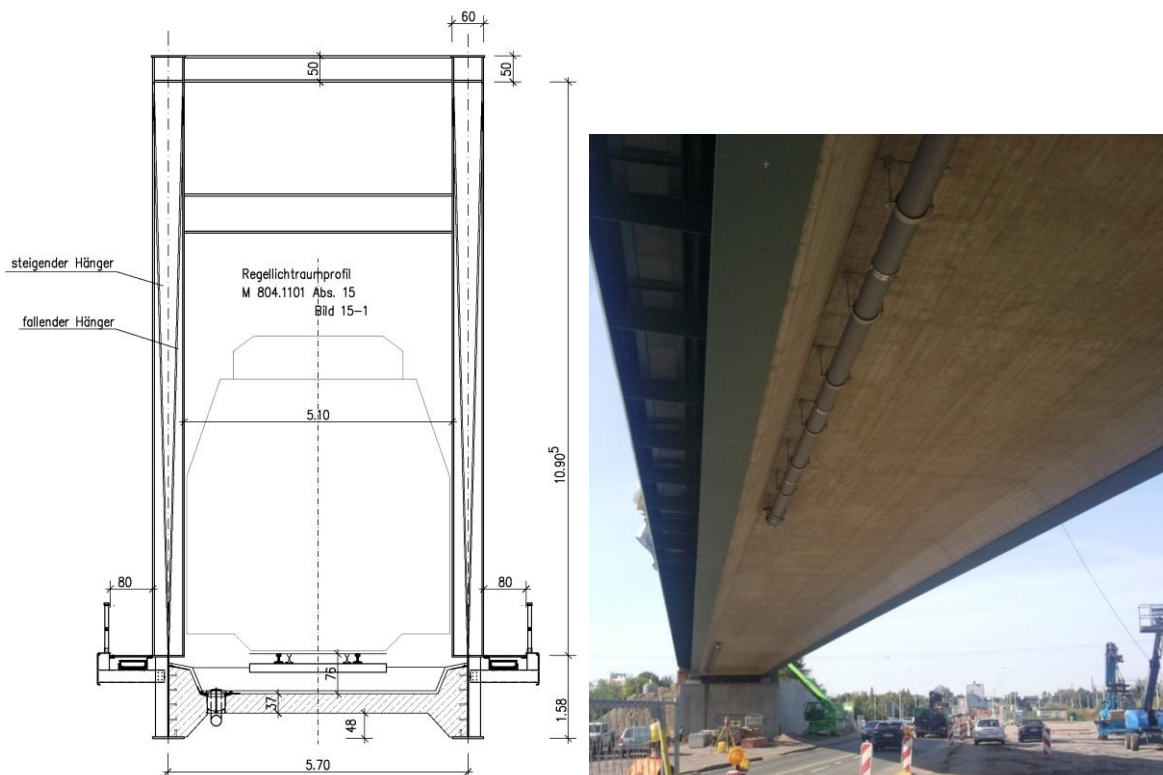


Abb. 19: Querschnitt der Eisenbahnüberführung über die B6 in Halle(Saale)

5 Zusammenfassung

Mit dem Netzwerkbogen wurde ein lange bekanntes - aber über Jahrzehnte vergessenes - Haupttragssystem im Straßen- und im Eisenbahnbrückenbau aktuell wieder mehrfach für Entwürfe genutzt, dabei im Tragsystem und in Konstruktionsdetails optimiert und baulich umgesetzt. Der Netzwerkbogen zeichnet sich wegen der Schubsteifigkeit seiner Bogenebenen durch sehr gute statische Eigenschaften aus, die sich auch in seiner Wirtschaftlichkeit ausdrücken, und überzeugt durch seine Ästhetik aufgrund der deutlich filigraneren Querschnitte.

Literatur

- [1] Tveit, P.: The Network Arch. An extended Manuscript after Lectures in 43 Countries, Agder College Grimstad, Norwegen, 2006
- [2] Stein, P., Wild, H.: Das Bogentragwerk der Fehmarnsundbrücke, Stahlbau 34 (1965), H. 6, S. 171-186
- [3] Geißler, K., Steimann, U., Graße, W.: Netzwerkbogenbrücken – Entwurf, Bemessung, Ausführung, Stahlbau 77 (2008), S. 158 – 171
- [4] Gauthier, P., Krontal, L.: Erfahrungen mit Netzwerkbogenbrücken im Eisenbahnbrückenbau, Stahlbau 79 (2010)
- [5] DIN- Fachbericht 103 – Bemessung von Stahlbrücken, Beuth- Verlag 2009
- [6] TEB Hängeranschluss – Konstruktive Empfehlungen und Nachweise zur Ermüdungssicherheit von Hängeranschlüssen, Bundesanstalt für Wasserbau, 2007
- [7] Ril 804, Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instandhalten, DB AG, 2003