

1

88. Jahrgang
Januar 2019, S. 22–31
ISSN 0038-9145

Sonderdruck

Stahlbau



Zur Ertüchtigung eines Stabbogentragwerks hinsichtlich statischer und ermüdungstechnischer Belange

Dr.-Ing. Norbert Roman
Dipl.-Ing. Michael Steeger

Zur Ertüchtigung eines Stabbogentragwerks hinsichtlich statischer und ermüdungstechnischer Belange

Die vor dem Hintergrund der Bundesgartenschau 2019 anvisierte Kapazitätserweiterung der Karl-Nägele-Brücke erforderte die Erweiterung und Ertüchtigung der Bestandskonstruktion. Obwohl erst im Jahr 2004 errichtet, zeigt sich insbesondere hinsichtlich der Nachweise der Betriebsfestigkeit die hier rasant stattgefundene Entwicklung der Bemessungsvorschriften gemäß den aktuellen Normenvorschriften. Die Umsetzung und Lösungsfindungen der vorgenommenen Ertüchtigungsmaßnahmen werden nachfolgend anhand von ausgewählten Beispielen dargestellt und diskutiert. Insbesondere soll hier das Zusammenspiel aus normentechnischen Anforderungen und der praxistauglichen Ausführbarkeit diskutiert werden. Neben dem Vorgehen der eigentlichen Montage werden die ermüdungsgerechte Gestaltung einzelner Details sowie Fragestellungen in Zusammenhang mit dem Stabbogenhängeraustausch erörtert. Hinsichtlich der Vermeidung von Ermüdungseinwirkungen in Form von windinduzierten Schwingungsphänomenen an Stabbogenhängern wird ferner auf die Wirksamkeit von Seilverspannungen eingegangen.

Keywords Stabbogenbrücke; Ertüchtigung; Ermüdung; Hängeraustausch; windinduzierte Schwingungen

1 Vorstellung der zu lösenden statisch-technischen Aufgabe

Die Stadt Heilbronn hat im Jahr 2004 die Karl-Nägele-Brücke als Neubau über den Altneckar zur Verbindung der Füger- mit der Kalistraße errichtet. Die Brücke ist als Stabbogenbrücke mit um 10° nach innen geneigten Bögen konzipiert. Die als Verbundquerschnitt ausgebildete Fahrbahnplatte aus Querträgern und Fahrbahnplatte in Stahlbetonbauweise bindet über die Querträger in die Längshauptträger ein.

Damit wurde eine klare statische Lösung umgesetzt. Genutzt wurde die Brücke bisher zur Aufnahme von drei Fahrspuren sowie von rechts und links innerhalb der Bogenebenen geführten Fußwegen (Bild 1).

Im Zuge der Planungen zur Bundesgartenschau 2019 wurde schnell klar, dass die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur gesteigert werden sollte. Im Rahmen des Verkehrsprojekts der Stadt Heilbronn beinhaltet dies für die Karl-Nägele-Brücke die Forderung nach dem vierspurigen Ausbau sowie der Verbreiterung der Geh- und Radwege, um deren zunehmender Bedeutung Rechnung zu tragen. Unter Beibehaltung des statischen Systems ließ sich diese Forderung nur durch das Nach-außen-Verlegen

Tied-arch bridge strengthening regarding static/fatigue issues

Within the scope of the Bundesgartenschau 2019 the addition to capacity of the Karl-Nägele bridge focused and the expansion and upgrading of the existing structure was required. Although only erected in the year 2004 the fast development of the design codes especially in the context of the fatigue design gets obvious. The solution process of the required strengthening of the bridge as well as the implementation at the existing structure will be presented and discussed on the basis of selected detail solutions. In particular, the interplay between standard technical requirements and the practicability on site will be emphasized. In addition to the procedure of the actual assembly, the fatigue-oriented design of individual details will be explained and the procedure of the hanger exchange will be presented. With regard to the avoidance of fatigue effect due to wind-induced vibration phenomena, the effectiveness of cable guying between the hangers also will be considered.

Keywords tied-arch bridge; strengthening; fatigue; hanger change; wind-induced vibrations

der Geh- und Radwege realisieren. Die Stützweite der Brücke ist mit 105 m, die lichte Weite zwischen den Widerlagern mit 103 m gegeben. Die zwei Hauptträger weisen einen Parabelstich von ca. 1,2 m sowie eine variable Länge der Querträger mit einer Breite in der Mitte von ca. 19 m auf. Der Abstand der Querträger ist mit ca. 3 m gegeben; die zwei Bogenkastenträger sind mit einem Parabelstich von ca. 17 m ausgeführt und das erste Hängerpaaar ist vom Auflager jeweils nach ca. 11 m, alle restlichen Hängerabstände nach ca. 9 m angeordnet (Bild 2).

Statisch waren die zusätzlichen Lastenwirkungen aus der zusätzlichen vierten Fahrbahn und den angehängten Rad- und Gehwegen in das Tragsystem einzubringen. Die Steigerung der Hängerzuglasten sowie der Schnittkräfte in Bögen und Längsträgern war die logische Folge. Die Bögenhohlkasten- und Versteifungslängsträger sollten durch aufgeschweißte Stahllamellen, die Hängerquerschnitte durch die Anordnung von jeweils zwei in Form von Halbschalen übergeschweißten Rohren ertüchtigt werden.

In den ersten Planungsgesprächen nach Auftragsvergabe wurde klar, dass – bis dahin unberücksichtigt – vor dem Hintergrund der neuen Normengeneration nun auch Nachweise der Betriebsfestigkeit erforderlich waren. Die

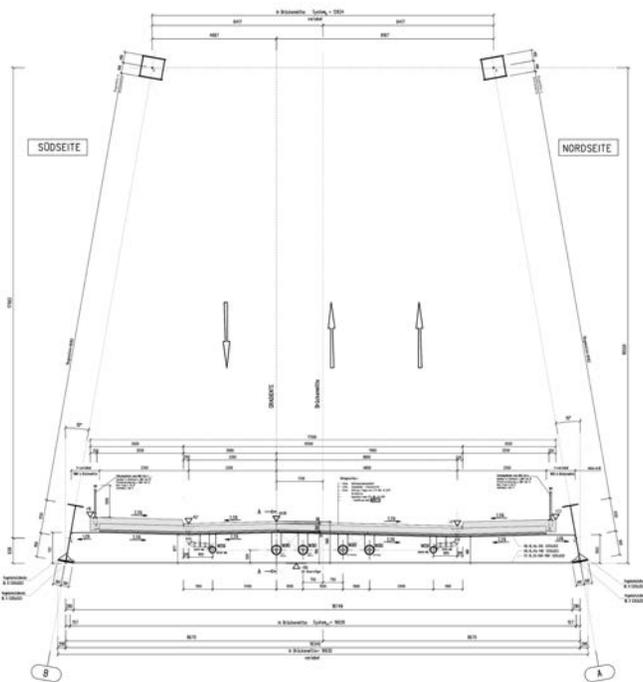


Bild 1 Querschnitt Bestandsbauwerk in Brückenmitte
Cross section through center of originally bridge

statischen Berechnungen einschließlich aller geplanten Detailpunkte waren entsprechend zu prüfen mit der Folge, dass viele Detailpunkte grundsätzlich zu überarbeiten waren. In einem langen, nicht immer einfachen, aber fachlich sehr fundierten Diskussionsprozess wurden konstruktive Lösungen gesucht und gefunden.

Zunächst schienen es drei Themen zu sein, die es zu lösen galt:

- a) Die Hängerertüchtigung zur Abtragung der erhöhten Lasteinwirkungen und insbesondere die Ausbildung von ermüdungsgerechten Anschlüssen. Konsens war, die geplanten Halbschalen zu streichen und die kompletten Hänger zu tauschen. Dies sollte derart erfolgen, dass die Hänger (aus S355) samt Anschlussblechen herausgeschnitten und gegen neue aus S460 ausgetauscht werden sollten. Das System wird einfacher und klarer als die geplante Variante, allerdings erzeugt die neue Planung temporäre Zustände, in der

die Hänger fehlen. In diesem Zusammenhang war zunächst auch die Frage zu beantworten, mit welchen Werten die tatsächlichen Normalkräfte im Eigengewichtszustand im Bestandsbauwerk vorhanden waren und ob ggf. relevante Abweichungen zum statischen Rechenmodell im Bauprozess eingepreßt wurden.

- b) Die geplanten Verstärkungslamellen auf dem Bogen und unter dem Längsträger schienen unproblematisch zu sein, waren es dann aber zumindest in der Ausführung nicht ganz.
- c) Der Anschluss der Querträger an die Längsträger musste neu gelöst werden, da ein 90°-Anschluss ohne runde Ausformung ermüdungstechnisch nicht mehr nachzuweisen und damit nicht zulässig war. Hier galt es, eine Kompromisslösung zwischen der im Wesentlichen für einen Neubau geschaffenen Normung und den im Bestand möglichen Umsetzungen zu finden.
- d) Parallel dazu war auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Machbarkeit und Notwendigkeit und damit zwischen nötigen und möglichen Kosten zu achten. Hierfür ist ein gutes – vor allem gemeinsames – Suchen nach einer Lösung zwischen Bauherr, Planer, Prüfer und Stahlbauer zwingend.

2 Statische und ermüdungstechnische Fragestellungen

2.1 Einwirkungen

Die Bestandsbrücke wurde ursprünglich für die Verkehrslasten BKL 60/30 gemäß DIN 1072 sowie die Militärklassen 50-50/100 nach Stanag 2021 ausgelegt und bemessen. Ferner war ein Sonderfahrzeug der Stadt Heilbronn mit 25 Achsen, einem Achsabstand von 1,40 m und 16 t Achslast in Alleinfahrt in der Brückenmitte als Sonderlast anzusetzen. Die ursprüngliche Bemessung des Stahlbaus erfolgte im Wesentlichen gemäß der zu diesem Zeitpunkt gültigen Normengeneration der DIN 18800.

Die nun geplante, künftig vierspurige Verkehrsführung in Zusammenhang mit den neu anzubauenden und außerhalb der Bogenebene liegenden Geh- und Radwegen in Stahlleichtbauweise hatte neben den zunehmenden Eigenlasten vor allem auch zusätzliche Verkehrslasten zur

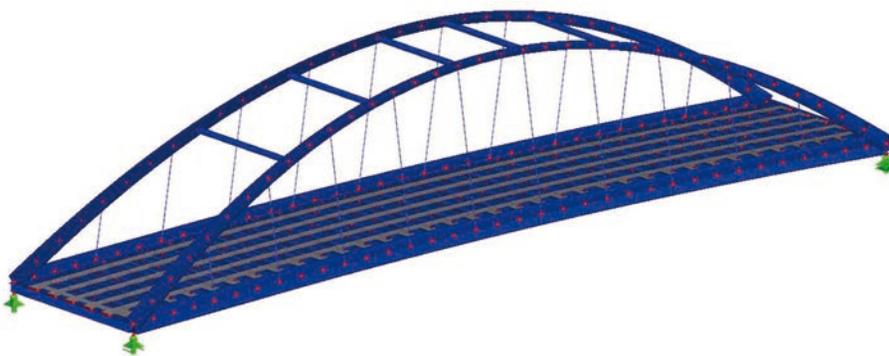


Bild 2 Schematische Darstellung Bestandsbauwerk in 3-D
Schematic model of originally bridge structure

Folge. Darüber hinaus waren gemäß aktueller Normenlage auch die Betriebsfestigkeitsnachweise gemäß dem Ermüdungslastmodell ELM 3 (DIN EN 1991-2:2010-12, Kap. 4.6.4 [1]) zu führen. Die Berücksichtigung der Einwirkungen des Sonderfahrzeugs blieb mit 25 Achsen je 16 t, also einer Gesamtlast von $G_{\text{Sonderfahrzeug,k}} = 25 \cdot 160 \text{ kN} = 4000 \text{ kN}$ (400 t) ohne Änderungen bestehen.

Nachfolgend wird auf einzelne ausgesuchte statische Aspekte der Verstärkungsmaßnahmen aus statischer, vor allem aber aus ermüdungs- und montagetechnischer Sicht eingegangen.

2.2 Stabbogenhängertausch

Der Entschluss, die alten Stabbogenhänger durch neuwertige mit höherer Stahlgüte und im Bereich der jeweils ersten beiden an die Kämpferbereiche anschließenden Hängerpaare zudem mit größerem Durchmesser zu ersetzen, zog die Notwendigkeit der Entwicklung eines entsprechenden Montagekonzepts nach sich. Hierzu wurde eine in der Länge variable Entlastungskonstruktion entwickelt, die mithilfe von zwischengeschalteten Zugzylindern das paarweise Spannungslosstellen der jeweils gegenüberliegenden Stabbogenhänger zwischen Bogenkästen und Versteifungsträger erlaubte. Wie zuvor erläutert, sollten zum Abgleich der rechnerisch ermittelten Hängerkräfte zunächst die tatsächlich im Bestandsbauwerk eingepprägten Kräfte ermittelt werden. Zu diesem Zweck bieten sich im Fall von Stabbogenhängern Eigenfrequenzmessungen an den einzelnen Hängern an, deren Rückrechnung vergleichsweise exakte Rückschlüsse auf deren Vorspannung zulassen. Im Vergleich zum ideellen Seil sind bei Stabquerschnitten die frequenzerhöhenden Biegesteifigkeiten sowie ggf. die Drehfedereinspannungen der Hängeranschlüsse zu berücksichtigen. Dies erfolgte im vorliegenden Fall gemäß [2] Kapitel 22.2.4.2 unter Zuhilfenahme des darin in Bild 14 wiedergegebenen Diagramms nach *Capellen* in Zusammenhang mit nachfolgender Gl. (1).

$$F_{\text{gemessen}} = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot l}{\lambda_2} \right)^2 \cdot \mu - \lambda_2^2 \cdot \frac{EI}{l^2} \quad (1)$$

mit:

$$\lambda_2 = \pi + \frac{1}{2} \cdot \alpha_2: \text{ Eigenwert}$$

EI Biegesteifigkeit Stab

μ Massenbelegung Stab

l Länge Stab

f gemessene Eigenfrequenz

Nach Auswertung der am Bestandsbauwerk durchgeführten Eigenfrequenzmessung der einzelnen Stabbogenhänger konnte ein ausreichend gleichmäßiges Beanspruchungsniveau festgestellt werden. In der Folge wurde beschlossen, dasselbe Beanspruchungsniveau auch in die neu einzubauenden Stabbogenhänger einzuprägen. Hierzu erfolgte zunächst mithilfe eines Stabwerkprogramms die iterative Berechnung der erforderlichen Zugzylinder-

kräfte der Entlastungskonstruktion, um die Hänger spannungslos zu stellen. Diese Kraft nimmt im Vergleich zur in den Hängern vorhandenen Zugkraft unter Eigengewichtslasten etwas höhere Werte an, da zum Einprägen derselben Kraft die Längung der Stabbogenhänger durch eine gewisse verkürzte Einbaulänge vorwegzunehmen ist. Der Faktor zwischen der Eigengewichtshängerzugkraft und der erforderlichen Zugkraft in der Entlastungskonstruktion vor Einschweißen der neuen Hänger ergab sich im vorliegenden Fall in etwa in einer Größenordnung von ca. 27,5%.

Das Prozedere des Hängeraustauschs sah zunächst das Aufbringen von 95% der rechnerisch ermittelten Kraft zum Spannungslosstellen auf die Konstruktion vor. Wie in Bild 13 dargestellt, wurde anschließend der Brennschnitt an den jeweils unteren Anschlussblechen ausgeführt und die in den Zugzylindern stattfindende Laststeigerung gemessen und dokumentiert. Dieser Differenzbetrag zwischen der zunächst aufgebrachten Last $0,95 \cdot F_{\text{gemessen}}$ und der sich tatsächlich einstellenden Last $F_{\text{gemessen}} + \text{Lastzunahme Brennschnitt}$ wurde dann mit dem zuvor ermittelten Erhöhungsfaktor beaufschlagt und der gemessenen Zugkraft wie folgt hinzuaddiert:

$$F_{\text{t,Zugzylinder}} = F_{\text{t,gemessen}} + \text{Erhöhungsfaktor} \cdot \text{Lastzunahme Brennschnitt} \quad (2)$$

Anschließend wurde diese Kraft in den Zugzylindern eingestellt und die neuen Hänger eingeschweißt.

2.3 Untergurtanschluss Querträger-Versteifungsträger

Die Ausgangssituation sah vor, den Untergurt des Versteifungsträgers durch Aufschweißen von Längslamellen zu ertüchtigen. Hinsichtlich der Betriebsfestigkeit war der bestimmende Kerbfall der Bestandskonstruktion durch den Anschluss der Querträger-Untergurte an die Versteifungsträger-Untergurte gegeben, der gemäß Tabelle 8.4 der DIN EN 1993-1-9:2010-12 [3] dem Konstruktionsdetail 5 und damit dem Kerbfall 40 zuzuordnen war. Mit diesem Kerbfall war der Ermüdungsnachweis nicht zu erbringen, zumal dieser gemäß NDP zu 9.6(1), Anmerkung 1 [4] als Konstruktionsdetail für den Stahlbrückenbau die Zustimmung der zuständigen Behörde bedurfte hätte. Insofern war das Auftrennen der Stumpfnahverbindung der Untergurte die logische Folge. Als Anschluss wurden stattdessen Bleche vorgesehen, die auf die Querträgeruntergurte aufgeschweißt und an die Lamellenverstärkung der Versteifungsträger angeschlossen wurden. Zur Gewährleistung eines möglichen weichen und kontinuierlichen Übergangs zur Lamellenverstärkung hin wurden diese Bleche mit entsprechenden Ausrundungen versehen. In der Folge konnte der in Bild 10 dargestellte Anschluss dem Konstruktionsdetail 4 und damit dem Kerbfall 71 der DIN EN 1993-1-9:2010-12 [3] zugeordnet und damit der Ermüdungsnachweis geführt werden.

2.4 Kerbdetail Hängeranschlussbleche-Versteifungsträgerstege

Im Bereich des Obergurts der Versteifungsträger erwies sich u. a. der in diesem Bereich gemäß dem BAST-Leitfaden auf S. 52 anzusetzende Kerbfall 80, der dem Konstruktionsdetail 8 der Tabelle 8.2 der DIN EN 1993-1-9: 2010-12 [3] entspricht, als bemessungsrelevant. Die schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot \phi_2 \cdot \Delta\sigma_p$ in Form von Längsspannungen des Versteifungsträgers waren für den Ermüdungsnachweis zu reduzieren. Als Lösung dieser Problemstellung erwies sich die Einbeziehung der Stahlkonstruktion der Geh- und Radwege als tragendes Bauteil als zielführend. Zu diesem Zweck wurden die Geh- und Radwegkonstruktionen kraftschlüssig an den Versteifungsträger angeschlossen. Dies erfolgte im Bereich der Kopfplattenanschlüsse durch den Einsatz von Passschrauben und durch das Anschweißen des Gehweg-Deckblechs über zwischengeschaltete Passbleche an die Versteifungsträgerstege (Bilder 11, 12a, 12b).

3 Umsetzung am Bauwerk

3.1 Hängemetallurgie und Hängeraustausch

Aus statischem Gesichtspunkt waren Hänger und Hängeranschlussbleche aufgrund der geometrischen Verhältnisse zwingend in der Güte S460 auszuführen. Die verschiedenen schweißtechnischen Problemstellungen (u. a. Arbeiten und Vorwärmen unter Baustellenbedingungen) warfen auf dem Hintergrund der Verbindung von Bestandskonstruktion und neuen Bauteilen zusätzliche Fragestellungen auf, wie z. B. die im System ursprünglich eingepreisten Eigenspannungen aus der Montage im Jahr 2004. In der Folge wurde versucht, den meisten dieser Fragen mit einer speziellen Materialauswahl zu begegnen. Von der Fertigungsüberwachung wurde aus schweißfachtechnischer Sicht deshalb zunächst – fachlich sicher richtig – ein S460M /ML oder alternativ ein S460N, der zusätzlich normalgeglüht werden sollte, festgelegt. Im Zusammenhang mit der unbedingten Forderung, einen Schweißstoß der Hänger zu vermeiden, führte dies auch unter dem Aspekt der Verfügbarkeit und der technischen Möglichkeiten dazu, dass man sich auf einen Stahl der Güte S460N ohne zusätzliches Glühen, jedoch mit einer

EN 10025-1:2004 (D)

Maße in Millimeter

Art der Prüfung	Erzeugnisse mit rundem Querschnitt		Erzeugnisse mit rechteckigem Querschnitt	
Zugversuch ^a	$d \leq 25^a$	$d > 25^b$	$b \leq 25^a$	$b > 25^b$
Kerbschlagbiegeversuch ^c	$d \geq 16$		$b \geq 12$	
^a Bei Erzeugnissen mit kleinen Abmessungen (d oder $b \leq 25$ mm) ist, wenn möglich, der unbearbeitete Probenabschnitt als Probe zu verwenden. ^b Bei Erzeugnissen mit einem Durchmesser oder einer Dicke ≤ 40 mm kann nach Wahl des Herstellers die Probe — entweder entsprechend den für Durchmesser oder Dicken ≤ 25 mm geltenden Regeln — oder an einer näher zum Mittelpunkt gelegenen Stelle als die im Bild angegebene entnommen werden. ^c Bei Erzeugnissen mit rundem Querschnitt muss die Längsachse des Kerbes annähernd in Richtung eines Durchmessers verlaufen; bei Erzeugnissen mit rechteckigem Querschnitt muss sie senkrecht zur breiteren Walzoberfläche stehen.				

Bild A.2 — Stäbe und Walzdraht

Bild 3 Ausschnitt aus der Prüfnorm für Rundstähle EN 10025-1:2004
Excerpt of the code EN 10025-1:2004: general technical delivery conditions

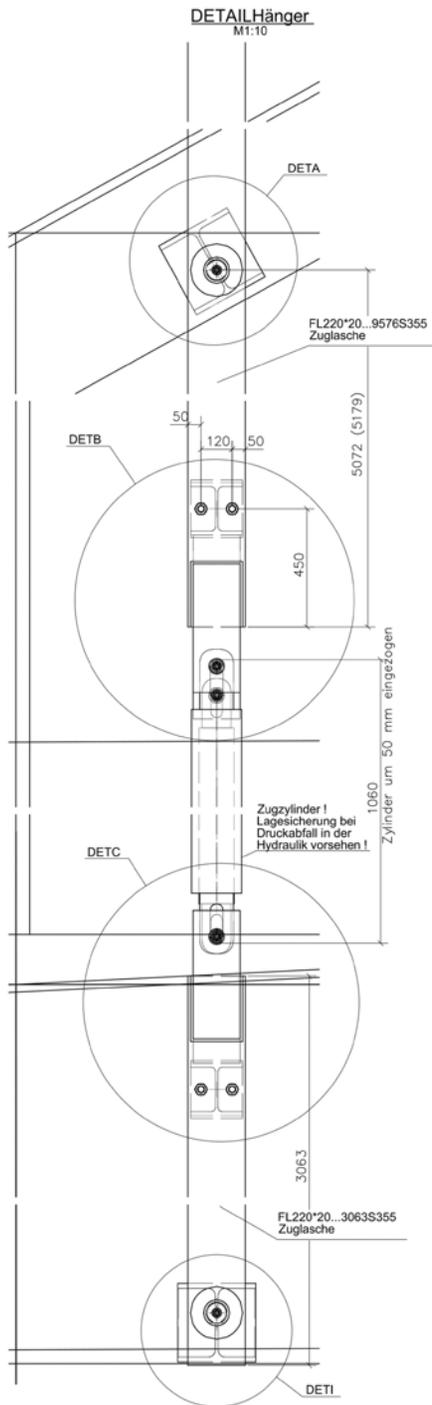


Bild 4 Schnittdarstellung der Hilfskonstruktion zum Hängeraustausch
Side view of the auxiliary construction in order to change the hangers of the tied-arch bridge

Zusatzanforderung an die Einhaltung der Werkstoffkennwerte, einigte. Demnach sollten die normativ im Drittelpunkt (Bild 3) einzuhaltenden Kennwerte auch in der Mitte des Hängers erreicht werden. Diese Forderung ist aus dem bekannten Problem der Abminderung der Werkstoffkennwerte in Richtung Querschnittsschwerpunkt nachvollziehbar, aber eine Forderung, die weit über der Norm liegt. Der Hersteller hat die Forderung nach anfänglichen kritischen Diskussionen zur Frage, wer das Risiko dafür trägt, wenn die über der Norm liegende Forderung nicht erfüllt wird, aber souverän gemeistert und damit ein Qualitätssignal für seinen Stahl gesetzt.



Bild 5 Hilfskonstruktion am Bauwerk, eingebaut während des Hängertauschvorgangs
On-site installed auxiliary construction for hanger change

Für den Hängertausch wurde in der Folge eine mehrfach verwendbare Hilfskonstruktion entwickelt, die in ihrer Grundlänge durch verschiedene Lamellen in der Länge variabel war und die mehrere Zugzylinder aufnehmen konnte, um in der gleichen Konstruktion verschiedene Hängerkräfte aufnehmen zu können (Bild 4). Damit wurden die statisch ermittelten und festgelegten Randbedingungen auf der Baustelle beherrschbar gestaltet (Bild 5). Durch die Auswahl der Konstruktion zum Hängertausch konnte auch die statisch abgestimmte Reihenfolge des Austauschs der Hänger inkl. Sicherung der Randbedingungen am Gesamtbauwerk (z.B. Belastung aus Kran und Baustelleneinrichtung) mit vertretbarem Aufwand realisiert werden.

3.2 Ober- und Untergurtlamellen

Die Montage der Zusatzlamellen auf dem Obergurt des Bogenträgers war technologisch weniger aufwendig als die der Verstärkung des Untergurts des Längshauptträgers, weshalb hier nur auf die technisch aufwendigere Montage der Untergurtverstärkungen eingegangen wird. Vor dem Hintergrund der bereits erläuterten Notwendigkeit, die neue Ertüchtigungskonstruktion in möglichst günstige Kerbfälle einzuordnen, erwuchs die Forderung, Querschweißnähte am vorhandenen Untergurt zu vermeiden. Diese theoretische Festlegung erzeugt aber in der Praxis das Problem, Untergurtlamellen miteinander normgerecht zu verschweißen, aber dies letztlich „freischwebend“ ausführen zu müssen. In diesem Zusammenhang wurde die zunächst angedachte Lösung der Verstärkung mit einer 50 mm starken Lamelle aus montage-technischen Gründen (eine Lamelle hätte mehr als 1,5 t gewogen) verworfen und durch eine Variante, die die



Bild 8 Verstärkung Untergurt, erste Lage, im Untergurtbereich
Strengthening of the stiffening girder bottom flange at the region of the arc bearings

Verstärkung des Untergurts durch zwei Lamellen mit je 20 mm Materialstärke vorsieht, ersetzt. In der logischen Folge wurde die durch die Praktiker entwickelte und in konstruktiven Diskussionen abgestimmte Idee mehr oder weniger in die Planung übernommen (Bilder 6, 7). Die Ausführung erfolgte dann mit einer Art Montagegalgen, auf dem die Lamellen unter den Hauptträger verbracht und mithilfe derer sie dann auch montiert wurden. Die Geometrie der Lamellen konnte somit über die gesamte Länge der Brücke konstant gehalten werden. Lediglich für die Bogenrandbereiche erfolgten aufgrund der hier vorhandenen Untergurtverbreiterungen nach Abstimmungen vor Ort schweißtechnische Angleichungen durch Umschweißen der oberen der beiden Zusatzlamellen (Bild 8).

3.3 Anschluss Querträger am Hauptträger

Der normative Hintergrund des neuen ermüdungsgerechten Anschlusses der Querträger an die Hauptträger als zwingende Zusatzmaßnahme wurde oben bereits beschrieben. Die Schwierigkeit bestand in der Folge darin, eine denkbare normative Variante so zu gestalten, dass auch eine in der Praxis umsetzbare Variante entstand. Auch hier erfolgte die planerische Ausarbeitung der endgültigen Lösung erst, nachdem die technisch machbare Lösung zwischen allen Beteiligten abgestimmt war. Grundlage der gemeinsamen Gespräche waren 1:1-Zeichnungen mit Schweißdetails und Versuche in einer baustellenähnlichen Situation, um zu sichern, dass das, was Ingenieure am Tisch entwickelt hatten, dann auch vor Ort durch Schweißer umgesetzt werden konnte (Bild 9). Dabei zeigte sich, dass ein derartiges gemeinsames Vorgehen deutlich zielführender sein kann als eine Ausführungsplanung, die sich allein an normativen Festlegungen orientiert, aber in der Praxis letztlich zumeist zu Streitigkeiten darüber führt, ob die gewünschte Qualität – insbesondere von Schweißnähten – in der speziellen Situation baupraktisch zu erreichen ist (Bild 10).

3.4 Geh- und Radwege als Teil des Versteifungsträgers, mit diesem monolithisch verbunden

Die grundlegenden Fragestellungen, die zur monolithischen Verbindung der Geh- und Radwege an den Hauptträger führte, wurden bereits ausführlich diskutiert. Der Festlegung dieser Variante ging eine Diskussion voraus, in der die Chancen und Möglichkeiten des hochfrequenten Hämmerns diskutiert wurden. Gegen diese Variante sprach einerseits die Schwierigkeit, die unbestrittene qua-

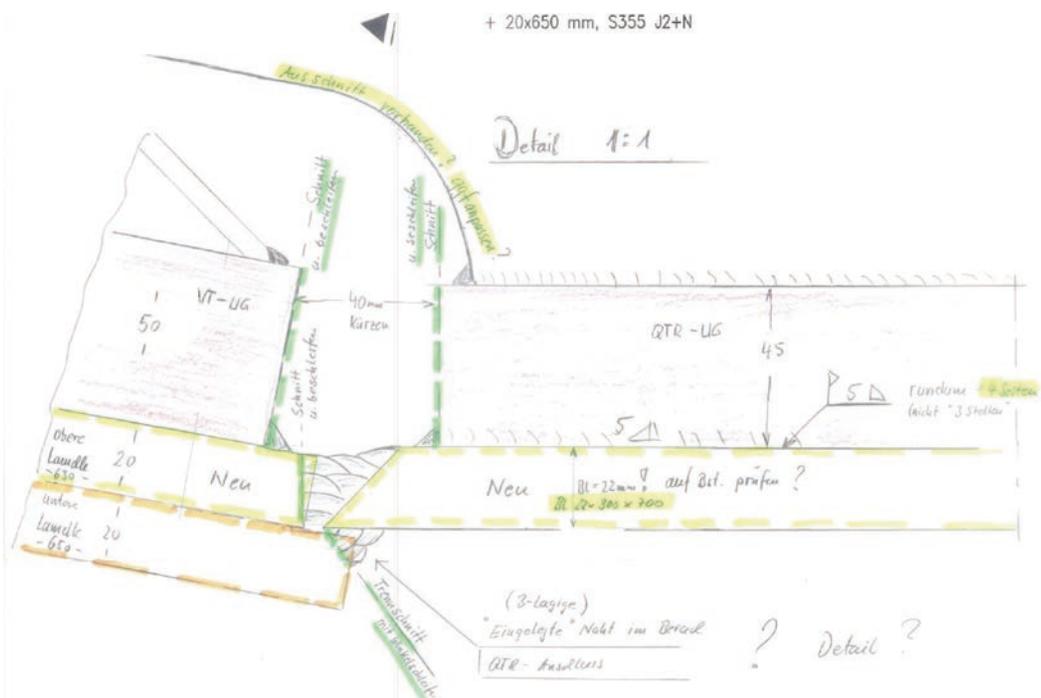


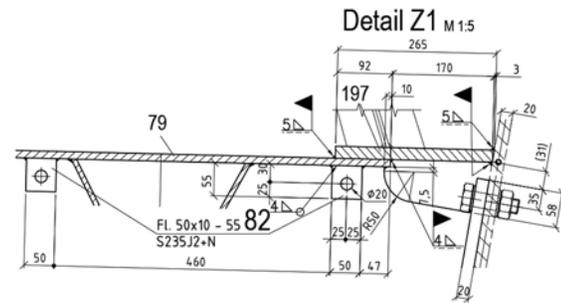
Bild 9 Detailskizze 1:1 für den neuen Anschluss Querträger an Hauptträger
Principal sketch of the connection joint between bottom flange of the cross girder to the stiffening girder



Bild 10 Neuer Anschluss Querträger an Hauptträger
New welded connection between bottom flange of the cross girder to the stiffening girder

litative Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit auch sicher quantifizieren zu können, und andererseits der hohe Aufwand an Überwachung der dann durchzuführenden Maßnahmen bis hin zur grundsätzlichen Schwierigkeit, die genauen Orte festzulegen, an denen hochfrequent gehämmert werden sollte. Insbesondere bei plangeschliffenen, vorhandenen Schweißnähten stellt dies momentan noch eine Problematik dar.

In der Folge waren sinnvolle montagetechnische Lösungen für die gewählte Variante zu finden. Diese mussten einerseits die geplanten geometrischen Verhältnisse zwischen vorhandener Brückenkonstruktion und neuen Rad- und Gehwegbauteilen sichern und andererseits eine Montage ermöglichen, die Fertigungstoleranzen der neuen und vorhandenen Bauteile ausgleichen kann. Aus diesem Grund wurden die jeweils obersten beiden Schrauben jeder Passschraubenverbindung vor Ort eingemessen und nach diesen die Gradienten der neuen Radwege hergestellt. Erst als zweiter Schritt erfolgte die Herstellung der kompletten Passschraubenverbindungen. Zum Schluss wurde mittels eines zusätzlichen Blechs die geschweißte



- Schnitt H-H M 1:10**
1. Schritt obere Reihe Bohrungen in Pos. 202 werksseitig $\varnothing 22$
Reihe 2 - 4 Bohrungen in Pos. 202 werksseitig } Bohrung für HVP-M24 DIN EN 14399-8
Toleranzklasse H11 (-0,113 / -0,001)
 2. Schritt obere Reihe Bohrungen im Steg bauseitig
 3. Schritt Verschraubung der oberen Verbindungsreihe nach Einhub und ausrichten mit M20 x 75 - 10.9/10-HV DIN EN 14399-4/6

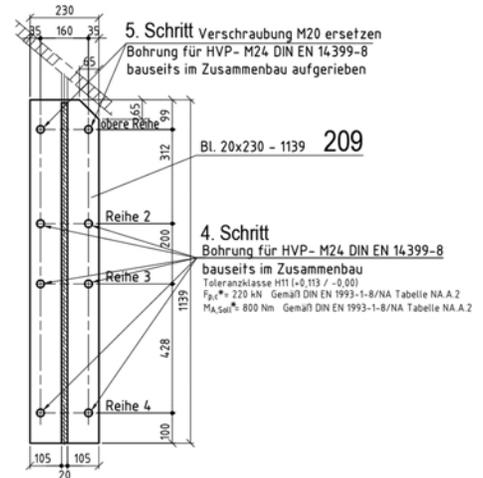


Bild 11 Schnittdarstellung des Anschlusses der Radwege an den Hauptträger im Zuge der Werkplanung (HFR)
Plan excerpt showing the connection details between the steel construction of the bike and footpath fixed laterally at the stiffening girders of the main structure

Verbindung zwischen vorhandenem Hauptträgersteg und neuem Radweg hergestellt (Bild 11). Wesentlich aus dieser, auf den Montagevorgang bezogenen Erwägung wurde die Vermischung von Schrauben und Schweißen in einem Anschluss als sinnvolle Idee angesehen. Auch hier erfolgte die Entscheidung deutlich ziel- und lösungsorientiert (Bilder 12, 13).



Bild 12 An die Hauptträger neu montierte Rad- und Gehwegkonstruktion
At the main structure mounted bike and footpath steel construction





Bild 13 Brennschnitt an den unteren Hängeranschlussblechen
Flame cut at the lower connection joint of the hangers



Bild 14 Seilverspannung der Stabbogenhänger
Guying of arch hangers

4 Ingenieurtechnische Erfahrungen und Schlussfolgerungen

4.1 Spannungsreduktion durch Querschnittserweiterung tragender Bauteile

Ist der Nachweis ermüdungsrelevanter Details bei Spannungsüberschreitungen ohne deren Änderung erforderlich, kann dies nur über die Spannungsreduktion der betroffenen Tragglieder erfolgen. Im Fall der Karl-Nägele-Brücke war neben dem offensichtlichen Aufschweißen von Verstärkungslamellen hier auch das Hinzuziehen sekundärer Bauteile zum Haupttragssystem zielführend. Durch die Einbindung der Geh- und Radwegkonstruktion als Teil des Versteifungsträgers konnten die Spannungsamplituden in den ermüdungsrelevanten Details hier auf ein nachweisbares Maß abgemindert werden. Die bereits im Vorfeld ermüdungsgerechte Ausbildung der orthotropen Platte gemäß dem Konstruktionsdetail 1 der Tabelle 8.8 der DIN EN 1993-1-9:2010-12 erwies sich hier als vorteilhaft. Ein gewisser Mehraufwand resultierte aus der Notwendigkeit der kraftschlüssigen Anbindung an den Versteifungsträgersteg mithilfe von Passschrauben in den Kopfplatten der Auflagerkonsolen sowie der Schweißverbindung zwischen Steg und Deckblech mithilfe von Passblechen.

4.2 Auflösen von Verbindungen mit ungünstiger Kerbfallkategorisierung

Kann der Betriebsfestigkeitsnachweis ermüdungskritischer Details auch durch Querschnittsverstärkungen nicht erbracht werden, oder sind diese durch die Kerbfallkataloge der aktuell gültigen Normengeneration nicht abgedeckt, verbleibt als Lösung nur mehr deren Auflösung. Die Lastpfade sind dann, falls erforderlich, durch ermüdungsgerechte Zusatzkonstruktionen umzuleiten.

4.3 Seilabspannungen zur Vermeidung von windinduzierten Schwingungen

Gemäß Kapitel 6.3.4 des BAST-Leitfadens [5] werden zur Vermeidung von windinduzierten Schwingungen u. a. Seilverspannungen genannt. Zusätzlich zur Steigerung der Dämpfung der Stabbogenhänger leitet sich deren Wirksamkeit vor allem auch aus der Störung der einzelnen Schwingungsformen durch deren Kopplung der nicht gleich langen Hänger ab. Gemäß Leitfaden gilt dies i. d. R. für beide Schwingrichtungen, auch wenn sich die Verspannung nur in der Zuggliedebene befindet. Jedoch konnte dies im Fall der Karl-Nägele-Brücke für die in Bild 14 ersichtliche, in zwei Ebenen geführte Seilverspannung nicht bestätigt werden. Während Schwingungen in Brückenlängsrichtung erwartungsgemäß wirkungsvoll unterdrückt werden, konnten für Schwingungen in Brückenquerrichtung zum Teil nur geringe Dämpfungsmechanismen festgestellt werden. Eine systematische Untersuchung und Erforschung der Wirkungsweise hinsichtlich unterschiedlicher Ausführungsvarianten von Seilverspannungen von Stabbogenbrücken, des Einsatzes unterschiedlicher dämpfungssteigernder Materialien insbesondere an den Anschlussstellen sowie ggf. der Variation der Vorspannung und damit des Durchhangs unter Einbeziehung von Temperatureffekten wäre hier sicherlich von großem Interesse.

5 Praxisideen für ingenieurtechnisches Denken, Technik und Projektabwicklung

Die Umsetzung des Gesamtprojekts hat für alle Beteiligten zu Erfahrungen geführt, die sich beim einzelnen Ingenieur, aber auch bei Stahlbauunternehmen, Ingenieurbüros oder Bauherrnvertretern positiv auf neue und andere Vorhaben oder sogar auf strategische Ideen auswirken sollten. Aus Sicht der Autoren kann man diese so zusammenfassen:

Sanierungs- und Ertüchtigungslösungen sind i. d. R. keine spektakulären Bauwerke, aber sie haben Zukunft. Ertüchtigungslösungen greifen nur bedingt in die angrenzende Umwelt ein und sind i. d. R. weniger materialinten-

siv, weshalb Bauherrn im Sinne von Ressourcenoptimierung in Zukunft eher in eine solche Richtung denken werden oder sollten.

Der Erfolg solcher Projekte liegt immer in guten Detaillösungen. Das können in aller Regel nur gemeinsame Entwicklungen sein, diese wiederum brauchen Baubeteiligte, die sich als Partner verstehen. Bei Infrastrukturprojekten dieser Art wird das Thema Ermüdung in Zukunft mehr im Vordergrund stehen. Die dazu wichtigen Fragen müssen ausreichend zeitnah gestellt werden, damit die Lösungsansätze zu Ende gedacht werden können.

Damit der Bau in Deutschland diese Aufgabe bewältigen kann, braucht ingenieurtechnisches Denken Chancen

und Freiheiten; diese bekommt es nur, wenn deutlich wird, dass Ingenieurleistungen Geld kosten, wenn sie ihr Geld wert sein sollen. Um die Leute zu haben, die solche Dinge umsetzen können, braucht Ingenieurausbildung in Deutschland mehr Fragen nach dem „Warum“ und weniger Antworten darauf, wo das geregelt ist. Es ist gut, dass wir zu vielem klare Regeln haben, jedoch müssen wir dafür sorgen, dass Normen wohl eine stabile Mitte haben, aber auch einen beweglichen Rand.

Zum Schluss: Moderne Ertüchtigungslösungen brauchen mutige und fachlich gut aufgestellte Bauherrn, Prüfingenieure, die sich als Dienstleister für das Projekt verstehen, und Ingenieure und Unternehmen, die darin eine Zukunftschance sehen, wie die Autoren das tun.

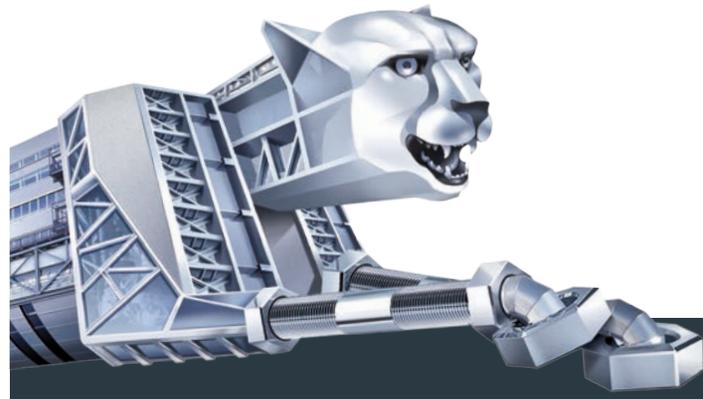
Literatur

- [1] DIN EN 1991-2 (2010) Einwirkung auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Berlin: Beuth. Dez. 2010.
- [2] *Petersen, Chr.* (2000) Dynamik der Baukonstruktionen. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, korrigierter Nachdruck 2000.
- [3] DIN EN 1993-1-9 (2010) Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung. Berlin: Beuth. Dez. 2010.
- [4] DIN EN 1993-2/NA (2014) Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken. Berlin: Beuth. Okt. 2014.
- [5] Leitfaden zum Anhang NA.F der DIN EN 1993-2/NA:2010-12 – Bemessung von Hängern an Stabbogenbrücken der DIN EN 1993-2/NA:2010-12. Ausgabe Juli 2013.

Autoren

Dipl.-Ing. Michael Steeger, LL.M. (com)
Himmelfahrtsgasse 31
09599 Freiberg
m.steeger@cpbau.de

Dr.-Ing. Norbert Romen
Grünwalder Straße 1
81547 München
romen@hfr-ingenieure.de



CHRISTMANN + PFEIFER
BERATEN. BAUEN. BEGEISTERN.

LEISTUNG, DIE BEGEISTERT. FÜR DEN EFFIZIENTEN INDUSTRIEBAU.

Von Planungs- und Ingenieurleistungen über klassischen Stahlhochbau, Leichtmetallbau und Brückenbau bis hin zum baumaterialunabhängigen schlüsselfertigen Bauen bietet CHRISTMANN + PFEIFER maßgeschneiderte Spezialleistungen und intelligente Lösungen für den Industriebau – egal, ob für große oder kleinere Projekte.

Wann dürfen wir Sie begeistern?

Rufen Sie uns an oder besuchen Sie unsere Website:

Tel. 06464 929-0 oder **www.cpbau.de**



Aufstockung eines Verwaltungsgebäudes bei laufendem Bürobetrieb für GÜNTHER Heisskanaltechnik, Frankenberg.