

# **Beitrag zur Optimierung von Netzwerkbogenbrücken**

Contribution to Optimizing Network Arch Bridges

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt an der

Technischen Universität Dresden  
Fakultät Bauingenieurwesen

von

Dipl.-Ing. Stephan Teich

verteidigt am 14.02.2012

**Kurzfassung und Thesen**

Abstract and Theses

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann  
Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

„Von allem, was der Mensch baut und aufbaut, gibt es nichts Besseres und Wertvolleres als Brücken.“

Ivo Andrić, Literatur-Nobelpreisträger, 1892-1975

# Kurzfassung

Der heutige Brückenbau wird immer öfter von der Forderung nach möglichst schlanken Tragwerken dominiert, um den Materialverbrauch und damit den Kostenaufwand zu reduzieren sowie um ein ästhetisches Erscheinungsbild zu erzielen. Gleichzeitig besteht aber auch der Wunsch nach größeren Spannweiten. Dieses Ziel ist unter Berücksichtigung der Forderungen nach ausreichender Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit nur durch die Optimierung der Brückentragwerke zu erreichen. Die konstruktive Durchbildung der einzelnen Tragwerksteile ist daher von enormer Bedeutung.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer optimalen Tragstruktur für Netzwerkbogenbrücken. Dabei wird die systematische Nutzung der Optimierungspotentiale dieses Brückentragwerkes an ausgewählten Tragwerkselementen erarbeitet. Es werden Lösungsvorschläge für die System- und Detailausbildung sowie Berechnungs- und Entwurfsgrundlagen entwickelt. Die Schwerpunkte der Arbeit bilden die Entwicklung von ermüdungssicheren Hängeranschlusskonstruktionen, statisch effizienten Hängernetzen sowie Bögen, die sich durch eine hohe Tragfähigkeit bei gleichzeitig geringem Materialverbrauch auszeichnen.

Um eine ausreichende Ermüdungssicherheit der in dieser Hinsicht maßgebenden Hängeranschlusskonstruktionen zu gewährleisten, ist es notwendig, die risserzeugenden Spannungsspitzen zu minimieren und möglichst einen homogenen Spannungsverlauf über das gesamte Bauteil zu erzeugen. Mit Hilfe einer parametergestützten Gestaltoptimierung und anschließender Topologieanpassung wird zunächst eine optimale Lösung für die Hängeranschlusskonstruktion entworfen. Anschließend erfolgt die Entwicklung einer Bestimmungsgleichung für die Kerbwirkungszahl dieser Anschlusskonstruktion, welche die Anwendung des Kerbspannungskonzeptes für Hängeranschlüsse ermöglicht.

Zur effizienten Nutzung der statischen Vorteile von Netzwerkbogenbrücken ist die Anordnung der Hänger von großer Bedeutung. Um die vorteilhafteste Hängeranordnung zu ermitteln, werden fünf mögliche Hängernetze mit variierenden Hängerneigungsparametern, Hängeranzahlen und Stützweiten hinsichtlich gezielt ausgewählter statischer Kriterien untersucht und bewertet. Daraus resultierend werden Empfehlungen formuliert, die dem Ingenieur die Wahl eines für entsprechende Rahmenbedingungen geeigneten Hängernetzes erleichtern.

Auch die konstruktive Ausführung des Bogens sowie des oberen Windverbandes und das damit verbundene Tragverhalten sind beim Entwurf einer effizienten Netzwerkbogenbrücke von großer Bedeutung. Deswegen wird der Einfluss von Form, Geometrie und Steifigkeit des Bogens sowie die Ausführung und Konstruktion anderer Tragwerksteile auf die Bogenstabilität analysiert. Darauf aufbauend erfolgt die Optimierung dieser Konstruktionsparameter, um die Stahlmasse des Bogens ohne maßgebliche Reduzierung der Tragfähigkeit zu minimieren. Zusätzlich werden verschiedene Ersatzimperfektionen bezüglich ihrer Auswirkung auf die rechnerische Bogenstabilität untersucht und die maßgebenden Vorverformungen hinsichtlich ihrer Form und ihrer Größe herausgestellt.

In ausgewählten Beispielen werden abschließend die entwickelten Lösungen mit Bauwerken aus der Praxis verglichen, um die Effizienz des optimierten Tragwerkes zu demonstrieren.

# Thesen

- 1.) Durch die netzartige Anordnung der Hänger von Stabbogenbrücken können im Vergleich zu klassischen Stabbogenbrücken mit vertikalen Hängern erhebliche Materialeinsparungen erzielt werden.
- 2.) Die in der Praxis häufig ausgeführten Hängernetze mit konstanter Hängerneigung weisen größere statische Defizite auf. Dagegen können, unabhängig von Hängeranzahl, Bogenstich und Spannweite, Hängernetze mit gleichmäßig steigender Hängerneigung sowie mit radialer Hängeranordnung als statisch optimal bezeichnet werden.
- 3.) Die Hängeranzahl je Bogenebene sollte im Falle von Netzwerkbogenbrücken auf maximal 50 begrenzt werden.
- 4.) Aufgrund des durch die Einspannung des Bogens in den Versteifungsträger hervorgerufenen Störbereiches ist es erforderlich, die Hänger in den Randbereichen des Brückentragwerkes separat und damit losgelöst vom geometrischen Ansatz anzuordnen.
- 5.) Durch die Ausführung von ellipsenförmigen Bögen oder Bögen mit unterschiedlichen Radien im Portal- und Scheitelbereich können die Bogennormalkräfte sowie die Bogen-Biegemomente aus der Bogenebene im Vergleich zum herkömmlichen Parabelbogen reduziert und somit eine höhere Bogentragfähigkeit erreicht werden.
- 6.) Unter alleiniger Berücksichtigung der statischen Aspekte sollte der obere Windverband einer Netzwerkbogenbrücke als Fachwerk ausgeführt werden, da somit die Beanspruchungen im Bogen im Vergleich zu Vierendeel-Aussteifungssystemen um bis zu 20% reduziert werden können. Dem gegenüber stehen ästhetische Vorteile und ein erheblich geringerer Montageaufwand beim Einsatz der Vierendeel-Systeme. Die Wahl des Windverbandes sollte daher durch gründliches Abwägen der Vor- und Nachteile beider Aussteifungsarten erfolgen und bei jedem Bauvorhaben individuell geprüft werden.
- 7.) Durch gezielte Anpassung des Bogenquerschnittverlaufs an die auftretenden Beanspruchungen lassen sich in Abhängigkeit vom Aussteifungssystem Materialeinsparungen von bis zu 40% erzielen, ohne dabei die Bogentragfähigkeit maßgeblich zu reduzieren. Im Hinblick auf einen geringen Fertigungsaufwand und damit geringe Fertigungskosten ist dabei eine Abstufung der Blechdicken des Bogenquerschnittes als vorteilhaft anzusehen. Die Ausführung von Bögen mit linearem Verlauf der Bogenbreite oder Bogenhöhe stellt eine sinnvolle Alternative dazu dar.
- 8.) Bei konstantem Bogenquerschnitt ist senkrecht zur Bogenebene stets die zum niedrigsten Knickeigenwert zugehörige Knickbiegeline als Imperfektion auf das Tragwerk anzusetzen. Bei veränderlichem Bogenquerschnitt wird die Wahl der maßgebenden Imperfektionsform senkrecht zur Bogenebene durch die Art des Windverbandes bestimmt, wobei entweder der Ansatz der niedrigsten Knickeigenform oder

eine mehrwellige Knickfigur, deren Wendepunkte in den Anschlusspunkten der Verbandsstäbe liegen, maßgebend wird. Durch die Reduzierung des Bogenquerschnittes im Scheitelbereich ist im Gegensatz zum konstanten Querschnitt auch die Analyse des Stabilitätsversagens in der Bogenebene erforderlich.

- 9.) Durch den Einsatz sich kontinuierlich, kreisförmig verbreiternder Hängeranschlussbleche mit geringem Überstand am Übergang Hänger / Blech und vor allem durch Anfasung und nachträgliches Verschleifen der Schweißnaht im Übergangsbereich Hänger / Blech kann eine signifikante Spannungsminimierung und somit eine erhebliche Erhöhung der Ermüdungssicherheit der Hängeranschlusskonstruktion erreicht werden.
- 10.) Durch Verschleifen der Schweißnähte im Übergangsbereich Hänger / Anschlussblech können die Kerbwirkung und damit die bemessungsmaßgebenden Spannungen von Hängeranschlüssen im Vergleich zu unverschliffenen Nähten um 30 – 40% reduziert werden.
- 11.) Die in der Arbeit entwickelte Hängeranschlusskonstruktion kann mindestens der Kerbgruppe 90 zugeordnet werden.
- 12.) Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach dem Kerbspannungskonzept liefert im Vergleich zum normativen Nennspannungskonzept die genauesten Ergebnisse, da die auftretenden Kerbwirkungen exakter berücksichtigt werden. Somit können Auslastungsreserven erschlossen werden, die eine wirtschaftlichere Dimensionierung der Hängeranschlusskonstruktion ermöglichen.

# Abstract

In order to reduce the material consumption and consequently the costs as well as to meet aesthetic standards, the construction of recent bridges is dominated by a demand for slender structures. Simultaneously, however, there is a request for greater spans. Taking into account a sufficient load carrying capacity, serviceability and durability, this aim can only be achieved by optimizing bridge structures. The constructional design of the individual bridge components is, therefore, of enormous importance.

This work of research will tackle the development of an optimal structure for network arch bridges. The systematic employment of potentials to optimize these bridge structures will be examined for selected structural members. Suggestions for the construction of the bridge system and of selected details as well as basics for calculation and design will be developed. This paper will focus mainly on the design of fatigue-proof hanger connections, statically efficient hanger networks as well as arches, which have a high load carrying capacity along with low material consumption.

In order to provide sufficient security against fatigue failure for the decisive connections of the hanger bars, stress peaks that cause cracks have to be minimized and homogeneous stress distribution within the whole element has to be ensured. Initially, this paper will delineate an optimal solution for hanger connections by means of parameter-based shape optimization and subsequent topology adaptation. In the following, an analytic formula for the stress concentration factor of this connection will be developed in order to enable the application of the notch stress concept for hanger connections.

To apply the static advantages of network arch bridges efficiently, the arrangement of the hangers is essential. In order to determine the most efficient hanger arrangement, five possible hanger arrangements with varying parameters (slope of the hangers, number of the hangers and span of the bridge) will be analyzed and evaluated with respect to systematically selected static criteria. On the basis of these investigations, recommendations for engineers how to choose an optimized hanger arrangement according to different geometrical bridge parameters will be made.

Additionally, the constructive design of the arches and the upper wind bracing as well as the associated structural behavior are significant when an efficient network arch bridge is to be designed. For this reason, this paper will analyze the influence of the arch-shape, the arch-geometry and the arch-stiffness as well as the design and construction of other structural members on the stability of the arch. Based on these results, the constructive parameters will be optimized in order to reduce the steel weight of the arch without significantly reducing the load carrying capacity. Furthermore, the influence of different imperfections on the arch stability will be analyzed and the form and size of the decisive initial deflections emphasized.

Finally, systematically selected examples will provide a comparison between the developed solutions and existing bridge structures in order to demonstrate the efficiency of the optimized structure.

# Theses

- 1.) In comparison to classical tied arch bridges with vertical hangers, arch bridges with a net-like arrangement of hangers have a significant positive effect on material consumption.
- 2.) Hanger arrangements with constant hanger slopes, as frequently constructed in practice, have greater static deficits. In contrast and independent of span, arch rise and the number of hangers, hanger networks with evenly rising hanger slopes and a radial hanger arrangement are statically optimal.
- 3.) In the case of network arch bridges, the number of hangers per arch should be limited to a maximum of 50.
- 4.) Because of the disturbance area at both ends of the bridge caused by the restraint between arch and stiffening girder the hangers in these areas should be arranged independently from the geometrically approach.
- 5.) In comparison to the conventional parabolic arch, the axial forces in the arch and the bending moments out of the arch plane can be reduced by constructing an elliptical arch or an arch with different radii in the area of the wind portal and the arch apex. Thus, the load carrying capacity of the arch can be increased.
- 6.) Exclusively considering static aspects, the upper wind bracing of a network arch bridge should be a truss. In comparison to the Vierendeel-systems, the stresses in the arch can be reduced up to 20%. Vice versa, however, the Vierendeel-systems imply aesthetic advantages and a significantly lower complexity of the constructing process. Therefore, the wind bracing should only be chosen by thoroughly weighing the pros and cons of both bracing systems. Also, choosing the wind bracing should be verified anew for each individually planned construction.
- 7.) Depending on the bracing system, a saving of 40% of material consumption can be achieved by systematically modifying the arch cross-section without a decisive reduction of the load carrying capacity. With regard to a low complexity of the constructing process and thereby low production costs, grading the plate thicknesses of the arch cross-section is considered beneficial. The design of arches with a linear reduction of the width or the height of their profile represents a reasonable alternative.
- 8.) In the case of a constant arch cross-section, the buckling form belonging to the lowest buckling value must be used as imperfection for the structure. In the case of a variable arch cross-section, the decisive imperfection form out of the arch plane depends on the type of wind bracing. In this context, either the critical buckling form or a buckling form, whose inflexion points lies at the connection points of the bracing beams, is decisive. In contrast to a constant arch cross-section, an analysis of stability failure in-plane is also necessary because of the reduction of the cross-section in the apex region of the arch.
- 9.) Applying continuously and circularly broadened hanger connection plates with a small overhang at the transition between hanger and connection plate and, essentially, chamfering and grinding the welds at the transition between hanger and connection

plate, result in a significant reduction of the stresses and a significantly higher fatigue resistance.

- 10.) Grinding the welds at the transition between hanger and connection plate ensures that the notch effect and, simultaneously the stresses of hanger connections can be reduced by 30 – 40 % compared to untreated welds.
- 11.) The hanger connection plate developed in this paper can be assigned at least to detail class 90.
- 12.) In comparison to the normative nominal stress concept, the fatigue strength assessment according to the notch stress concept provides the most accurate results, since the occurring notch effects are considered more accurate. Thus, lack in capacity utilization can be recognized and a more economical rating of the hanger connection can be facilitated.