

# BERICHTE

aus der Stahlanwendungsforschung

## Steel Application Research Reports



Ausgabe / Edition 1/2015

### Inhalt / Content

#### Neue Forschungsberichte

#### New Research Reports:

- P 813** Deminisionierungsgrundlagen für Tragbohlen  
Design principles for king piles
- P 757** Stahlleichtverbund  
Steel Light Composite
- P 771** Verbunddeckenträgersysteme  
Slim-floor deck systems
- P 815** Ermüdungsgerechte Fachwerke  
Fatigue-resistant trusses
- P 816** Hohlprofile und Gussknoten im Brückenbau  
Hollow sections and cast steel nodes in bridge construction
- P 766** Sicherheitsgewinn bei feuerverzinkten Stahlbauteilen  
Hot dip galvanised construction components
- P 846** Frei geformten Hüll- und Fassadenelemente  
Free formed cladding and façade elements
- P 853** Versagensmodell für die Blechumformung  
Damage model for sheet metal forming



[www.stahl-innovationspreis.de](http://www.stahl-innovationspreis.de)



[www.metec-estad2015.com](http://www.metec-estad2015.com)

### Burst test of unfired pressure vessels made of P690Q



High strength low alloy (HSLA) steels are not widely used for unfired pressure vessels despite advantages of their

use in terms of costs and sustainability. It is a matter of fact that the increasing toughness requirements for HSLA steels mainly result from an extrapolation of conventional design principles into the range of higher yield strength. The specific task of the FOSTA research project P 950 "Strain-based design criteria for unfired pressure vessels" is to improve the European rules towards a strain-based design. With this target in view a burst test on a pressure vessel made of high strength carbon steel P690Q was carried out on 30 January 2015 at Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH in Duisburg. In cooperation with research institutes from RWTH Aachen (Ferrous Metallurgy and Steel Construction), the vessel has been calculated and manufactured by Evonik AG and Linde AG with the following dimensions:  $\varnothing$  1200 mm, wall thickness 50 mm and pressure medium water. It has been designed for 300 bar internal pressure and bursts at 680 bar.

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.



Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.  
Research Association for Steel Application



## New Chair at Advisory Council of FOSTA, February 5, 2015



Dipl.-Ing. Oliver Hoffmann, ThyssenKrupp Steel Europe AG, Duisburg, took the chair of the advisory council of FOSTA. He follows Dr. Peter Schwab, voestalpine Stahl GmbH, Linz, who was the chairman for almost 10 years. Mr. Hoffmann is head of application technology in his company and curator in the FOSTA advisory council since 2005. He has broad experience in steel application and the evaluation of research proposals. For the future his idea is, to create more main research topics at FOSTA to establish several approaches in FOSTA's research management: top-down and bottom-up. These main research topics should reflect the current needs from industry. FOSTA will start calls for these topics (top-down approach). Nevertheless the principle of free submission of ideas will be preserved (bottom-up approach).

We are looking forward to good cooperation!

Dr.-Ing. Hans-Joachim Wieland

## Neue Forschungsberichte

### Entwicklung von effizienten Dimensionierungsgrundlagen für die Tragbohlen kombinierter Stahlpundwände (P 813)

Mit dem seit Jahrzehnten stetig zunehmenden Welt-handel steigen über die Zahl der transportierten Container und die Vergrößerung der Schiffe auch die Anforderungen an die Größe der Kaimauern von Hafenanlagen. Die dafür gängigste Stahlbaulösung im Tiefwasserhafenbereich ist die kombinierte Stahlpundwand, die aus bis zu 45 m langen H-förmigen Tragbohlen und Z-förmigen Zwischenbohlen besteht. Für diese Konstruktion ist ein Stabilitätsnachweis zu führen. Mit der Umstellung der Normen von der nationalen DIN 18800 (2008) auf die europäische DIN EN 1993-1-1 (2010) haben sich die Stabilitätsnachweise im Stahlbau verändert. Während früher separate Nachweise für Biegeknicken und Biegedrillknicken geführt werden konnten, gibt es jetzt einen kombinierten Stabilitätsnachweis. Vergleichsrechnungen im Hafenbau haben gezeigt, dass der neue Nachweis zu massiveren Konstruktionen führt.

Was bei der Bemessung derzeit nicht berücksichtigt wird, ist die Bauwerk-Boden-Interaktion. Daher diente dieses Projekt der Abschätzung des Bodeneinflusses und der Entwicklung von Möglichkeiten, bisher nicht berücksichtigte Bettungen anzusetzen. Dazu wurde



## New Research Reports

### Development of efficient design principles for king piles of combined steel piling walls (P 813)

With the steadily increasing world trade, among the last decades the number of containertransported raised and the vessels were enlarged. Hence the demands on the size of the quay walls of port facilities grow as well. The most common structural steel solution in deep water harbour area is the combined steel piling wall, which consists of up to 45 m long H-shaped bearing piles and Z-shaped intermediate piles. For this kind of construction a stability check is necessary. With the change in the standards from the national DIN 18800 (2008) in Germany to the European EN 1993-1-1 (2010), the stability verification of steel constructions has changed. While previously separate verification of flexural buckling and lateral torsional buckling could be performed, there is now a combined design formula for stability. Sample calculations have shown that this leads to more massive harbour constructions.

Currently, the structure-soil interaction is not taken into account in the calculations. The scope of this project was to estimate the influence of soil on the piles and the development of ways to incorporate previously overlooked beddings. First, a parameter field was

zunächst ein Parameterfeld abgesteckt, das die derzeitige Situation und die Entwicklungen in näherer Zukunft in Europa berücksichtigt. Hierbei wurden auf Beckentiefe und Bodenbeschaffenheiten ebenso eingegangen wie auf konstruktive Variationen der Spundwand und deren Belastung. Experimentell wurden das Verformungsverhalten einer eingebetteten Einzeltragbohle und das Verhalten sowie die Steifigkeit durch den Spülsandboden ermittelt. Mit den Werten wurde ein Stabwerksmodell erstellt, das zu einer Parameteruntersuchung und der Ermittlung von ansetzbaren Bodenkennwerten führte. Parallel wurden mit Stabwerksmodellen der Einfluss von Imperfektionen und Bodenbettung auf das Stabilitätsverhalten von Tragbohlen untersucht. Hierbei wurden Einzel- und Doppeltragbohlen, verschiedene Lagerbedingungen (vor allem Bettung der Bohle über die volle Länge oder über eine Teillänge) und Biegeknick- und Biegedrillknickverhalten betrachtet. Zudem wurde experimentell und numerisch untersucht, welchen Einfluss Verschweißungsmuster und -grad auf die Torsionssteifigkeit teilverschweißter Doppeltragbohlen haben.

Aus den Erkenntnissen wurden Lösungen erarbeitet, die es dem Anwender ermöglichen, eine vorhandene Bodenbettung im Stabilitätsnachweis zu berücksichtigen. Schließlich wurden aus den Bodenkennwerten, den Formeln zum Einbringen der Werte in den Stabilitätsnachweis und den Nachweisformeln aus DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.3 (2010) vereinfachte Kriterien hergeleitet, mit denen Knicken um die schwache Achse und Biegedrillknicken ganz ausgeschlossen werden können. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit Hilfe ausführlicher experimenteller und numerischer Untersuchungen die Boden-Bauwerk-Interaktion von kombinierten Stahlspundwänden untersucht wurde und Ansätze sowie vereinfachte Kriterien entwickelt wurden, mit denen der Einfluss des Bodens beim Stabilitätsnachweis berücksichtigt werden kann.

Das IGF-Vorhaben 16493 N der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde an der Universität Stuttgart vom Institut für Konstruktion und Entwurf und an der Technischen Universität Hamburg-Harburg vom Institut für Geotechnik und Baubetrieb durchgeführt.

Der Abschlussbericht umfasst 306 Seiten und enthält 224 Abbildungen und Tabellen.

Schutzgebühr: € 25,50 zzgl. MWSt. und Versandkosten, ISBN 978-3-942541-52-7

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

marked out considering the current situation and the developments in the near future in Europe. Attention was paid to pool depth and soil conditions as well as structural variations of the steel piling wall and the load impact. Experimentally, the deformation behaviour of an embedded single king pile and the behaviour and stiffness of the surrounding sluiced sand were determined. With the values, a truss model was created, leading to an investigation and the determination of attachable soil properties. Parallel, the effects of imperfections and soil bedding on the stability behaviour of king piles were examined. Single and double king piles, different bearing conditions (especially bedding over the full pile length or parts of the length) were considered as well as flexural buckling and lateral torsional buckling behaviour. Additionally, the influences of welding scheme and degree on the torsional stiffness of partially welded double bearing piles were investigated experimentally and numerically.

From the findings solutions have been derived that enable the designer to take an existing soil bedding into account when performing the stability analysis. Finally, simplified criteria were derived from the soil properties, the formulas for the inclusion of the values in the stability design and verification formulas from EN 1993-1-1, 6.3.3 (2010). These criteria enable the exclusion of buckling about the minor axis and lateral torsional buckling. In summary, one can say that by using detailed experimental and numerical investigations, the soil-structure-interaction of combined steel piling walls was investigated. Detailed approaches and simplified criteria making it possible to take the influence of the soil into consideration when performing the stability verification of king piles were developed.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

The research project (IGF-Nr. 16066 N) has been carried out at Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf and at Technischen Universität Hamburg-Harburg, Institut für Geotechnik und Baubetrieb. FOSTA has accompanied the research project work and has organized the project funding from the Federal Ministry of Economics and Technology through the AiF as part of the programme for promoting industrial cooperation research (IGF) in accordance with a resolution of the German parliament.

The final report contains 306 pages with 224 figures/tables.

Fee: € 25.50 plus VAT and mailing expenses  
ISBN 978-3-942541-52-7

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.



Europe's leading database for steel —  
all important information at a view

[www.stahldaten.de](http://www.stahldaten.de)

## Stahlleichtverbund – Bauweise Entwicklung, Optimierung und wirtschaftlicher Einsatz im Bauwesen (P 757)

Stahlverbundkonstruktionen lassen sich im Bauwesen technisch und wirtschaftlich sinnvoll einsetzen. Innovative Lösungen tragen dazu bei, weitere Marktanteile im Bereich des Geschoss- und Brückenbaus zu gewinnen. Eine Optimierung und Weiterentwicklung dieser Bauweise ist daher zielführend.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sind Stahlleichtverbundmodule für Geschossdecken aus (ultra-) hochfesten Werkstoffen entwickelt worden, die bei einer geringen Bauhöhe sehr große Spannweiten stützenfrei überbrücken können. Der Einsatz (ultra-) hochfester Werkstoffe erfordert eine extrem tragfähige Verbundfuge.

Klassische Kopfbolzendübel eignen sich nur bedingt für diese Aufgabe, so dass auf Puzzleleisten als innovatives Verbundmittel zurückgegriffen wurde. Als besonders effizient hat sich die Ausführung der Stahlträger als Waben-träger erwiesen. Schon beim Zuschnitt der Waben-träger kann die Puzzleleiste in das Stegblech geschnitten werden, wodurch sich weitere

Arbeitsschritte für die Realisierung der Verbundsicherung erübrigen. Zudem können die Stegblechöffnungen sehr effizient zur Verlegung der technischen Gebäudeausrüstung genutzt werden, was Konstruktionshöhe einspart.

Das Trag- und Verformungsverhalten der Verbundfuge wurde in umfangreichen experimentellen Untersuchungen analysiert und die Anwendbarkeit der in der Literatur vorhandenen Bemessungsmodelle überprüft. Es konnte gezeigt werden, dass das für Anwendungen bei größeren Bauteilabmessungen entwickelte Bemessungsmodell die Tragfähigkeit der Verbundfuge in guter Übereinstimmung wiedergibt. Die dynamischen Eigenschaften und das Trag- und Verformungsverhalten der Stahlleichtverbundmodule wurden in numerischen Berechnungen untersucht und ein Bemessungskonzept für die Nachweisführung erarbeitet. Die Ergebnisse der FE - Analysen sind zusätzlich in Großbauteilversuchen verifiziert worden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einsatz von Walzprofilen aus S355 und S460 zu wirtschaftlichen Konstruktionen führt.

In Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen auf Basis der Herstell- und Montagekosten sind die Stahlleichtverbund-

## Steel Light Composite (SLC) Construction Development, optimisation and economic use in civil engineering (P 757)

Steel composite structures could be used efficiently in the construction sector. Innovative solutions will increase the market share in bridge construction and multi-storey buildings. Due to this fact further development and optimization of steel composite structures are helpful.

In the course of this research project steel light composite construction modules consisting of (ultra-) high performance materials (HSS and UHPC) for floor systems have been developed. With these modules it is possible to bridge wide spans with a minimized overall



slab height. A high load-bearing capacity of the shear connector is a necessity for the use of (ultra-) high performance materials. Headed studs are only suitable for this task with limitations, so instead of them continuous shear connectors with a puzzle shaped steel dowel were used as an innovative connection. The usage of honeycomb - steel beams has been proven to be particularly efficient. Already when cutting the honeycomb beam the puzzle shaped dowel can be cut in the web plate, further steps for the realization of the shear connection are unnecessary. In addition, the web plate openings can be used very efficiently for installation of the technical building equipment, this allows to save construction height.

The load bearing and deformation behaviour of the shear connector was analysed in extensive experimental research and the applicability of the existing design models in the literature are reviewed. It could be shown that a design model, which was developed for continuous shear connectors in composite bridges, describes the load bearing behaviour sufficiently. The dynamic characteristics and the load bearing behaviour and deflections of light steel composite modules were investigated in numerical calculations and a de-

module mit konventionellen Ortbetonlösungen an einem Referenzgebäude verglichen worden. Die hohen Materialkosten für den ultrahochfesten Beton sind im Wesentlichen preisbestimmend für die Stahlleichtverbundelemente. Es wurden Einsparpotentiale aufgezeigt und konzeptionelle Vorschläge für eine weitere Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit vorgestellt.



Das Forschungsvorhaben wurde vom Lehrstuhl Stahlbau der Technischen Universität Dortmund mit fachlicher Begleitung und mit finanzieller Förderung

durch die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, aus Mitteln der Stiftung Stahlanwendungsforschung, Essen, durchgeführt.

Der Abschlussbericht umfasst 410 Seiten und enthält 316 Abbildungen und Tabellen.

Schutzgebühr: € 36,00 zzgl. MWSt. und Versandkosten, ISBN 978-3-942541-42-8

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

sign concept for the verification has been developed. The results of the FE - analyses were additionally verified in full scale tests. The investigations have shown that the use of hot rolled sections with S355 and S460 lead to economical designs.

In economic feasibility studies based on the manufacturing and assembly costs, the steel light composite modules were compared to conventional in-situ concrete solutions for a reference building. The high cost of materials for ultra-high-strength concrete is the essential price-setter for the steel light composite elements. Potential savings were identified and presented as well as conceptual proposals for a further improvement of efficiency and profitability.

The research project has been carried out at Lehrstuhl Stahlbau of Technischen Universität Dortmund. FOSTA has accompanied the research work and has organized the project funding from the Foundation for Steel Application Research.

The final report contains 410 pages with 316 figures/tables.

Fee: € 36.00 plus VAT and mailing expenses  
ISBN 978-3-942541-42-8

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

### **Effiziente Verbundflachdeckenträgersysteme im Hochbau – Ganzheitliche Optimierung für Montage und Nutzung (P 771)**

Bisher wurden Verbundträger vorwiegend als isolierte Bauelemente behandelt. Dabei wurde der Praxis überlassen, wie diese in die Gesamtkonstruktion zu integrieren sind. Dazu zählen insbesondere die Ausbildung der Verbundknoten und der Anschlüsse der Verbundträger an andere Bauelemente wie z.B. Stützen. Das Ziel dieses Vorhabens war die integrierte Betrachtung von wirtschaftlicher Bemessung der Verbundträger einerseits und geeigneter Knotenausbildung andererseits. Schwerpunkte der durchgeführten Untersuchungen waren Fragen der Gebrauchstauglichkeit, insbesondere die notwendige Erfüllung von Verformungskriterien sowie Fragen einer montagegerechten Ausbildung der Verbundknoten. Ebenso spielt bei Verbundbaulösungen der Brandschutz eine entscheidende Rolle. In diesem Zusammenhang wurden Lösungen für die brandschutztechnische Ausführung der Träger ebenso wie für die Anschlusskonstruktionen entwickelt.

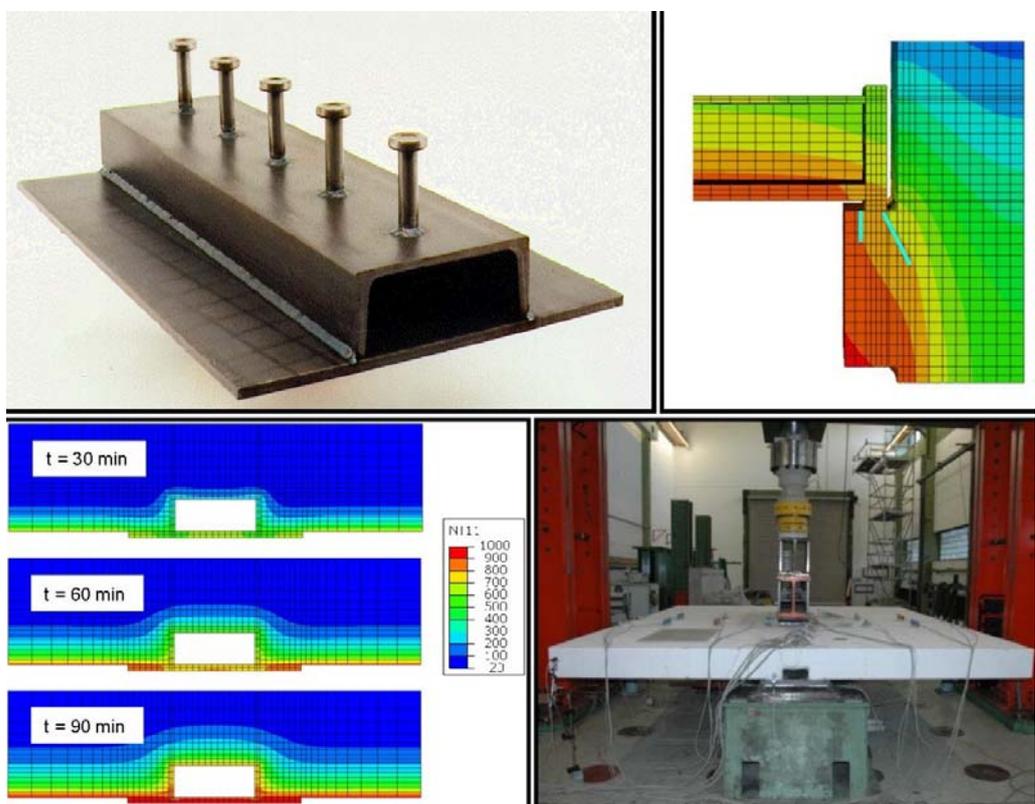
Für das Verformungsverhalten von Verbundflachdeckenträgersystemen wurde auf Basis einer umfangreichen analytischen Untersuchung ein nicht-linearer Berechnungsansatz abgeleitet und hierbei die sogenannte verformungsbezogene mittragende Breite einge-

### **Efficient slim-floor deck solutions for building construction - Holistic optimization for the erection and use (P 771)**

So far, composite girders were considered as isolated structural elements, integration into a system, especially the design of composite joints, the connection of the composite girder to other structural elements like columns for example was left to practice. The aim of this project is the integrated approach of an economic design of slim floor girder on one hand and an appropriate joint design on the other. Main focus of the research project was on questions of serviceability, especially the necessary fulfillment of deformation criteria, furthermore the design of joints suitable for mounting. Similarly, the problem of fire protection plays a decisive role in composite joint solutions. In this context, solutions for a design of girders in terms of fire protection of the girders as well as for the joints have been developed.

For the deformation behavior of composite slim floor girder systems, a non-linear calculation approach on the basis of a large scale analytic examination could be deducted and with this respect, the so called deformation based effective width has been introduced. This calculation approach was further developed to a linear approach in a second step which enables to calculate very easily the non-linear structural behavior by

führt. Dieser Berechnungsansatz wurde in einem zweiten Schritt in einen linearen Ansatz weiterentwickelt, der es nun erlaubt, das nicht-lineare Tragverhalten von Slim-Floor Trägern sehr einfach mittels linearer Verformungsansätze zu berechnen. Im Gegensatz zu den bestehenden Normen, die durch konservative Ansätze die Durchbiegung stark überschätzen, können jetzt aufgrund realistischer Verformungen die Querschnitte wirtschaftlicher dimensioniert werden. Für die Anschlüsse und die Ausbildung der Knoten wurden an typischen Querschnitten Konstruktionslösungen aufgezeigt, die einen sehr wirtschaftlichen Einsatz dieser Stahlbauverbindungen zulassen. Neben gelenkigen Anschlüssen sind auch Beispiele für einen biegesteifen (durchlaufenden) Trägerstoß aufgezeigt, die im Hinblick auf die Tragreserven im Brandfall aktiviert werden können. Die dargestellten Systemlösungen zeigen, dass die konsequent effiziente Systemlösung vom Träger auf den Anschluss fortgesetzt werden kann. Ziel eines weiteren Arbeitspaketes war es, den Brandwiderstand von typischen Slim-Floor Systemen zu untersuchen und gegebenenfalls durch konstruktive Maßnahmen zu verbessern. Die analytischen Lösungen zeigen hierbei, dass alle Träger ohne zusätzlichen Aufwand eine Feuerwiderstandszeit von F30 besitzen. Einen deutlichen Gewinn an Brandwiderstand erzielt man durch die Ausbildung von durchlaufenden Systemen. Hierbei können Tragreserven aktiviert werden, die für die Bemessung im Brandfall einen entscheidenden Vorteil bieten.



Durch die Ergebnisse sind nun Verbunddeckenlösungen möglich, die neben der Wirtschaftlichkeit noch zusätzliche Vorzüge bieten: Dazu gehören Bauzeitverkürzungen durch geeignete Vorfertigung, montagegerechte Knotenanschlüsse, Komfort in der Nutzung aufgrund der Durchbiegungsbegrenzung und Sicherheit in Hinblick auf den Brandschutz

Gefördert durch:  
 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie  
 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 15675 N der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung

means of linear deformation approaches. A comparison of existing codes shows that existing approaches are conservative and the bending is strongly overestimated. So by this new approach realistic deformation may be calculated and an efficient design of the slim floor girders is possible. For the design of joints, construction solutions which allow a very economic application of these steel connections were demonstrated on typical sections. Besides hinged connections, also examples for a rigid (continuous) girder connection are shown which may be activated with respect to the system reserve in case of fire. The demonstrated system solutions show that the consequently efficient system solution can be transferred from the girder to the connection. The aim of the third work package was to examine the fire resistance of typical slim floor sys-

tems and, if necessary, to improve by constructive measurements. The analytic solutions show that all girders possess a fire resistance period of R30 without additional efforts. A significant increase of fire resistance can be achieved by the design of continuous systems. Here carrying reserves can be activated which provide a decisive advantage for the fire design.

Through the results of the project slim floor slab solutions are feasible that allow aside of economic efficiency additional advantages such as reduction of erection time by appropriate prefabrication and joint detailing, user comfort by reduced deformations and safety also in case of fire.

The research project (IGF-Nr. 15675 N) has been carried out at Universität Stuttgart from Institut für Kon-

und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde an der Universität Stuttgart vom Institut für Konstruktion und Entwurf und an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover vom Institut für Stahlbau durchgeführt.

Der Abschlussbericht umfasst 332 Seiten und enthält 295 Abbildungen und Tabellen.

Schutzgebühr: € 25,50 zzgl. MWSt. und Versandkosten, ISBN 978-3-942541-44-2

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

struktions- und Entwurf und von Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover am Institut für Stahlbau. FOSTA hat die Forschungsarbeiten begleitet und die Projektfinanzierung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF als Teil des Programms zur Förderung der industriellen Kooperationsforschung (IGF) in Übereinstimmung mit einer Resolution des Deutschen Parlaments.

Der Abschlussbericht umfasst 332 Seiten mit 295 Abbildungen/Tafeln.

Fee: € 25,50 plus MwSt. und Porto  
ISBN 978-3-942541-44-2

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

### **Ermüdungsgerechte Fachwerke aus Rundhohlprofilen mit dickwandigen Gurten (P 815)**

Geschweißte Rundhohlprofilkonstruktionen unter Ermüdungsbeanspruchung weisen eine weite Verbreitung im Bauwesen, Maschinen- und Anlagenbau auf. Geschweißte K-Knoten aus Rundhohlprofilen, bei denen der Gurt und zwei anschließende Streben die Form eines liegenden „K“ bilden, treten besonders häufig auf und waren deshalb Gegenstand dieses Forschungsvorhabens. In jüngster Zeit werden vermehrt dickwandige Konstruktionen mit einer Gurtschlankheit  $r_0/t_0 < 12$  eingesetzt, für deren Realisierung es noch keine entsprechenden Regeln gibt.

Da Ingenieurbüros und die fertigenden Unternehmen i. d. R. nicht die wirtschaftliche Position besitzen, eigens abgestellte Versuchsreihen mit kostenintensiven Schwingversuchen zu fahren, besteht die Notwendigkeit, für geschweißte dickwandige ermüdungsbeanspruchte Hohlprofilfachwerke einfach zu handhabende Konstruktions- und Bemessungshilfen zu schaffen. Daraus ergibt sich speziell für kleine und mittlere Unternehmen ein großes Potential an Kosteneinsparung. Das Forschungsvorhaben beschäftigte sich daher eingehend mit dem Ermüdungsverhalten von ebenen und räumlichen K-Knoten in dickwandigen Hohlprofilfachwerken in einer gesamtheitlichen Betrachtungsweise. Ziel war es, Empfehlungen für eine ermüdungsgerechte und zugleich wirtschaftliche Umsetzung von solchen Konstruktionen zu entwickeln.

Im Forschungsbericht wird der Stand der Wissenschaft

### **Fatigue-resistant trusses of circular hollow sections with thick-walled chords (P 815)**

Welded structures made of circular hollow sections under fatigue loading are widely used in civil, mechanical and plant engineering. Welded tubular K-joints, whereby the chord together with two braces forms a lying K, are particularly frequent and therefore the subject of this research project. In the recent past, more and more thick-walled structures with a chord slenderness  $r_0/t_0 < 12$  are required, but no appropriate rules are available for their realization.

As consulting engineers and manufacturing companies normally do not have the economic background for financing individual test series with cost-intensive fatigue tests, there is the need for practical guidance covering the construction and the design of welded thick-walled tubular trusses with fatigue loading.

Hence, there is a great potential of saving costs and material in particular for small and medium-sized companies. Therefore, the research project was extensively dealing with the fatigue behavior of uni- and multiplanar K-joints in thick-walled tubular trusses in a holistic view. The goal of the research project was to develop recommenda-

tions for a fatigue-appropriate and at the same time economic realization of such structures.

In the research report the state of the art is summarized especially focusing on the fatigue behavior of thick-walled tubular structures from which open ques-



und Technik mit Blick auf das Ermüdungsverhalten von dickwandigen Hohlprofilkonstruktionen zusammenfassend dargestellt, aus dem sich die zu klärenden offenen Fragestellungen und das Versuchsprogramm dieses Forschungsvorhabens ableiteten.

Unter dem Aspekt der Ermüdung wurden besondere Empfehlungen für die Planung und für die Fertigung von dickwandigen Hohlprofilkonstruktionen erarbeitet. Mit Blick auf die Bedürfnisse der Praxis wurde als Gurt-Strebenanschluss eine Kombination aus Stumpf- und Kehlnaht betrachtet. Diese Ausführung hat gegenüber dem reinen Stumpfnahntanschluss zum einen schweißtechnische und zum anderen wirtschaftliche Vorteile. Zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit dickwandiger Hohlprofilkonstruktionen wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm mit Knotenschwingversuchen unter Strebenbelastung, unter Gurtbelastung und unter kombinierter Belastung von Gurt und Streben gefahren. Außerdem wurde ein großmaßstäblicher Trägerschwingversuch durchgeführt. Besonderes Augenmerk wurde in den Knotenschwingversuchen zum einen auf den Aspekt des Größeneinflusses auf das Ermüdungsverhalten gelegt. Zum anderen stand die Untersuchung zum Einfluss einer Schweißnahtnachbehandlung durch inzwischen industriell verfügbare höherfrequente Hämmerverfahren auf die Ermüdungsfestigkeit im Mittelpunkt. Diese Untersuchungen wurden durch mehrere Kleinversuchsserien ergänzt, die wichtige Hinweise für die Bewertung von nachbehandelten Hohlprofilkonstruktionen und zur Bewertung von Reparaturschweißungen liefern.

Das IGF-Vorhaben 325 ZBG der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde an der Universität Stuttgart vom Institut für Konstruktion und Entwurf, an der Universität der Bundeswehr München vom Institut für Konstruktiven Ingenieurbau – Stahlbau, an der Hochschule München vom Labor für Stahl- und Leichtmetallbau und an der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH durchgeführt.

Der Abschlussbericht umfasst 500 Seiten und enthält 455 Abbildungen und Tabellen.

Schutzgebühr: € 46,00 zzgl. MWSt. and Versandkosten, ISBN 978-3-942541-51-0

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

tions and the work packages of the research project were derived.

In terms of fatigue particular recommendations for the planning and fabricating of structures made of welded circular hollow sections were acquired. Addressing the needs of practitioners a combination of butt and fillet weld for the brace-to-chord intersection was considered. This kind of joint has on the one hand technological and on the other hand economic advantages over a butt-weld joint. For the determination of the fatigue strength of thick-walled tubular structures an extensive test program was carried through comprising component fatigue tests under brace loading, chord loading and combined loading. Furthermore, a large-scale girder test was performed. On the one hand, particular focus was laid on the size effect in the component fatigue tests. On the other hand, the investigations of the influence of post-weld treatment on the fatigue resistance using the meanwhile commercially available high-frequency hammering technology formed the main part of the work. These investigations were complemented by several small-scale test series which revealed important information concerning the evaluation of post-weld treated tubular structures and the evaluation of repair weldings.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

The research project (IGF-Nr. 15675 N) has been carried out at Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf and at Universität der Bundeswehr München, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau – Stahlbau, at Hochschule München on Labor für Stahl- und Leichtmetallbau and at Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH. FOSTA has accompanied the research project work and has organized the project funding from the Federal Ministry of Economics and Technology through the AiF as part of the programme for promoting industrial cooperation research (IGF) in accordance with a resolution of the German parliament.

The final report contains 500 pages with 455 figures/tables.

Fee: € 46.00 plus VAT and mailing expenses  
ISBN 978-3-942541-51-0

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

hosted by  
Steel Institute  
VDEh

**METEC &  
2<sup>ND</sup> ESTAD**

**2015**

EUROPEAN STEEL TECHNOLOGY  
AND APPLICATION DAYS

15 – 19 JUNE 2015 | DÜSSELDORF | GERMANY

**Düsseldorf, Germany**  
CCD Congress Center Düsseldorf

[www.metec-estad2015.com](http://www.metec-estad2015.com)

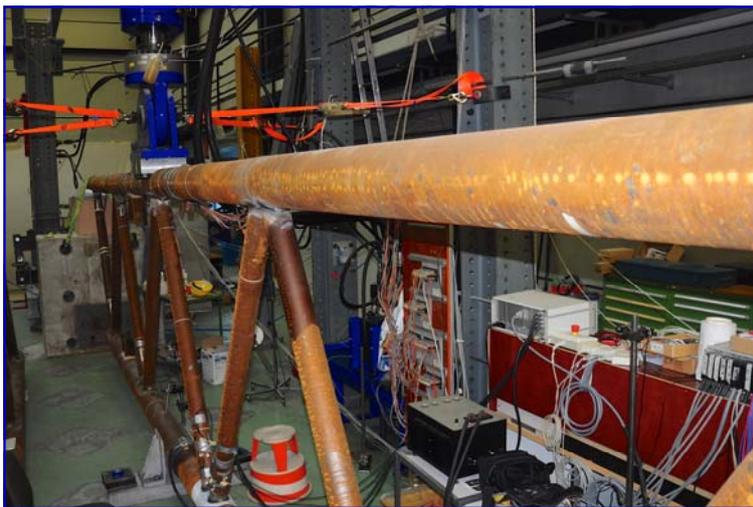
## Optimaler Einsatz von Hohlprofilen und Gussknoten im Brückenbau aus Stahl S355 bis S690 (P 816)

Räumlich aufgelöste Fachwerkstrukturen aus Stahlhohlprofilen finden aufgrund ihrer konstruktiven und gestalterischen Vorteile insbesondere im Brückenbau immer größeren Zuspruch. Der Bau von Brücken aus Hohlprofilen wird jedoch dadurch erschwert, dass die zum Einsatz kommenden Profilabmessungen außerhalb der aktuellen Bemessungsregeln liegen. Diese beruhen im Wesentlichen auf Versuchen mit kleineren Wanddicken sowie auf Forschungsergebnissen aus der Offshore-Industrie mit deutlich größeren Profilschlankheiten. Für eine verstärkte Anwendung der Bauweise und für eine effizientere Realisierung von Brückenbauwerken mit Stahlhohlprofilen, sind somit speziell auf diesen Bauwerkstyp zugeschnittene Bemessungsregeln erforderlich, die die Profile mit großer Wanddicke und geringer Schlankheit einschließen.

In einem ersten Forschungsprojekt zu dieser Problemstellung wurden bereits stumpf gestoßene, einseitig geschweißte Verbindungen sowie K-Knoten aus warm-

gewalzten nahtlosen Hohlprofilen und Bauteilen aus Stahlguss untersucht. In dem vorliegenden Forschungsprojekt wurden diese Arbeiten fortgesetzt und um weitere Werkstoffe bis zur Stahlsorte S690 und Wanddicken bis 40 mm ergänzt. Damit konnten die bereits gewonnenen bemessungsrelevanten Ergebnisse für Bauteile aus Stahlguss und deren Anschlüsse an

Stahlhohlprofile auf eine breitere statistische Basis gestellt werden. Neben den Verbindungen aus Stahl und Stahlguss an einzelnen Stumpfstoßen wurden auch Stumpfstoße in kompletten Trägern untersucht. Zusätzlich konnten Reparaturschweißungen an bereits versagten Bauteilen vorgenommen werden, die letztendlich eine Verlängerung der Lebensdauer ermöglichen. Aufgrund der vergleichbaren Werkstoffeigenschaften können die gewonnenen Ergebnisse auch auf reine Stahl-Stahl-Verbindungen übertragen werden. FE-Untersuchungen zum Wanddickeneinfluss und zum Versatz wurden ergänzend durchgeführt, ebenso wie detaillierte Eigenspannungsmessungen und Schweißsimulationen an K-Knoten. Abschließend konnte eine erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die unterschiedlichen Konstruktionsvarianten vorgenommen werden. Die Diskussion der gestalterischen Wirkung und des Einflusses ingenieur-architektonischer Aspekte rundet die Gesamtbetrachtung ab und zeigt



## Optimal application of hollow sections and cast steel nodes in bridge construction with the usage of steel S355 up to S690 (P 816)

Lattice girder structures made of steel hollow sections gain more and more popularity, especially in bridge buildings, due to their advantages under constructional and design aspects. However, the realization of bridges made of hollow sections is hindered because the usually needed profiles are out of range of the available design codes. These are based mainly on fatigue tests with sections of comparatively small wall thickness and on research work in the offshore industry using sections with considerably higher slenderness. For an increased utilization of this architecture and a more efficient realization of bridges made of steel hollow sections specific design rules are necessary, which include sections with large wall thickness and low slenderness as well.

In a preceding research project on this topic single-side welded end-to-end connections and K-joints between hot rolled seamless hollow sections and joints made of cast steel have been investigated. In the current project the work is

carried on and added with different material up to steel grade S690 and wall thickness up to 40 mm. With these investigations the relevant former results for designing joints made of cast steel and their connections to hollow sections could be brought to a wider statistical basis. Besides the tests performed on single-side butt welded connections between hot-rolled

hollow sections and sections made of cast steel also tests on complete trusses were carried out. Furthermore, repair welding has been performed on previously damaged members what lead to a remarkable extended fatigue life. Due to similar properties the results can be transferred to steel-steel connections also. Finite element investigations with regard to misalignment and different wall-thicknesses have been carried out additionally as well as detailed measurements of residual stresses and finite element welding simulations. These investigations are accompanied by a study on cost efficiency. With this the creative impact and the influence of engineering architecture is discussed. All together lead to a cost efficient approach in planning this type of structures.

For the practical use and for an easy integration in standards and rules the details investigated have been edited according the notch detail catalogue of DIN EN 1993. Detail categories for bridge relevant butt welds

dem Anwender Möglichkeiten für eine kosteneffiziente Herangehensweise in der Planung.

Für die praktische Anwendung und zur Umsetzung in Normen und Richtlinien wurden die untersuchten Details entsprechend des Kerbfallkatalogs der DIN EN 1993 aufbereitet und Kerbklassen für brückenbautypische Stumpfnahdetals verschiedener Ausführungsvarianten sowohl für Biegebeanspruchung als auch für Zugbeanspruchung erarbeitet. Dabei hat sich für zugbeanspruchte Stumpfstoße die Kerbklasse 71 als maßgebend für alle Varianten herausgestellt. Bei Stößen unter Biegebeanspruchung kann die Einteilung je nach Ausführungsvariante in die Klassen 100 bzw. 112 erfolgen. Zusammen mit den durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen kann so eine effiziente und versuchstechnisch abgesicherte Auswahl einer für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneten Anschlussvariante vorgenommen werden. Die erzielten Ergebnisse runden damit die bisherigen Forschungsarbeiten ab und stellen eine für die Praxis inhaltlich notwendige Ergänzung dieser dar.

Das Forschungsvorhaben wurde an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruher Institut für Technologie KIT, der KoRoH GmbH Kompetenzzentrum Rohre und Hohlprofile, dem Büro für Ingenieur-Architektur und dem ICOM Steel Structures, École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL mit fachlicher Begleitung und mit finanzieller Förderung durch die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, aus Mitteln der Stiftung Stahlanwendungsforschung, Essen, durchgeführt.

Der Abschlussbericht umfasst 548 Seiten und enthält 306 Abbildungen und Tabellen.

Schutzgebühr: € 46,00 zzgl. MwSt. und Versandkosten, ISBN 978-3-942541-54-1

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

in different variants for bending and tension loads are given. With this the category 71 has been found representative for butt welds under tension in all variants. For butt welds under bending two classes are given, category 100 and 112, depending on the variant of the butt weld. Together with the study of the cost efficiency of the variants experimental verified and economic solutions can be chosen for each kind of application. The results gained within this project represent a useful complement of the previous research work and represent in form and content a necessary supplement in practice.



The research project has been carried out at Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruher Institut für Technologie KIT, at KoRoH GmbH

Kompetenzzentrum Rohre und Hohlprofile, at Büro für Ingenieur-Architektur und dem ICOM Steel Structures, École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL. FOSTA has accompanied the research work and has organized the project funding from the Foundation for Steel Application Research.

The final report contains 548 pages with 306 figures/tables.

Fee: € 46.00 plus VAT and mailing expenses  
ISBN 978-3-942541-54-1

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

### **Technologie und Sicherheitsgewinnung beim Feuerverzinken zum Ausbau der Marktposition des verzinkten Stahlbaus (P 766)**

Im Stahlhochbau sind Konstruktionen besonders wirtschaftlich und nachhaltig, wenn sie feuerverzinkt werden. Um den wachsenden Anforderungen des Marktes gerecht zu werden, wurden Weiterentwicklungen und Wirtschaftlichkeitsmaßnahmen in den Industriebereichen der Stahlerzeugung, des Stahlbaus und der Verzinkung durchgeführt. Davon sind insbesondere zu nennen:

- die Entwicklung moderner hochfester Feinkornstähle im Blech und Profilbereich,
- die Realisierung komplexer Bauteilgeometrien in architektonisch herausragenden Gebäuden und Bau-

### **Examination of Hot Dip Galvanizing of welded steel products with respect to safe construction and development of market position in the steel construction market (P 766)**

Hot Dip galvanizing allows designing and building steel structures in a very economic and sustainable way. To encounter the increasing challenges in industry market the participating industries steel making, steel construction and hot dip galvanizing have improved the process technology and the economical application. These improvements in detail were:

- Development of modern high strength steels both as plate and profile,
- Realization of design for architectural exceptional buildings with large spans,

- werken mit großen Spannweiten,
- der Einsatz von größeren Kesselabmessungen und verbesserten Verfahrensabläufen in der Prozesskette des Verzinkens,
- die Anwendung neuer Zinkschmelzen mit veränderter Zusammensetzung zur besseren Kontrolle der Schichtdicke und Schichtoptik.

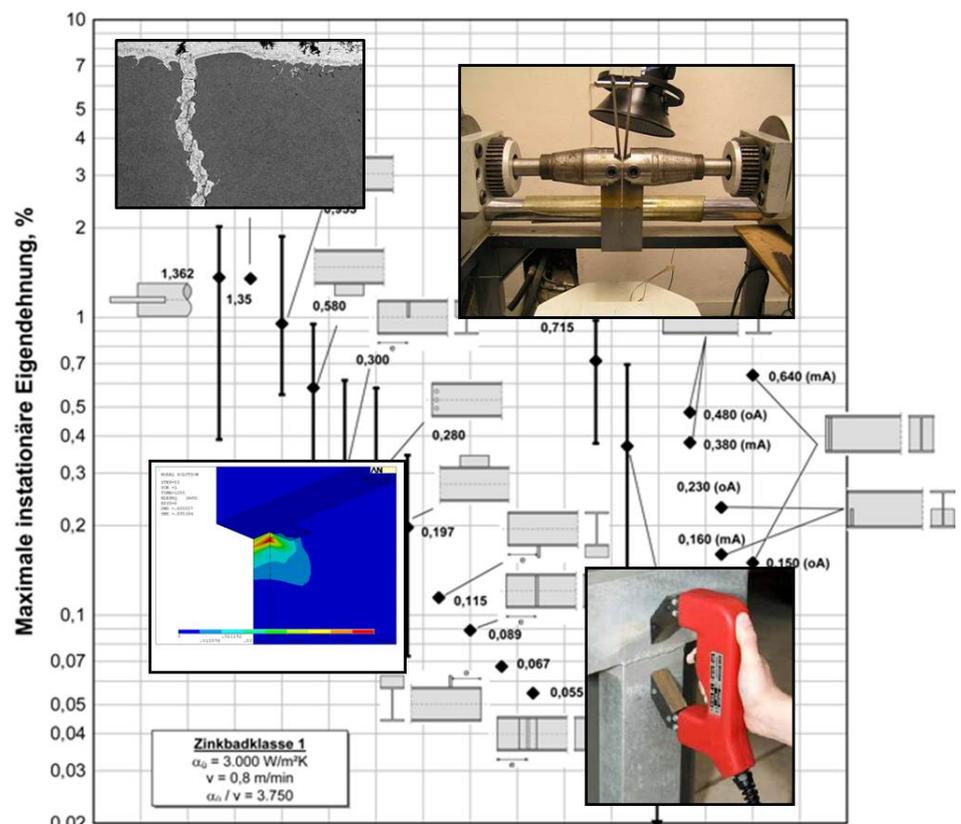
In Folge dieser Weiterentwicklungen musste die Stahlbau- und die Verzinkungsindustrie Rückschläge hinnehmen, denn insbesondere an Bauwerken, die mit o.g. neuen Zinkschmelzen verzinkt und zumeist aus Baustählen mit Festigkeiten ab 355 MPa gefertigt wurden, sind ab dem Jahr 2000 erhebliche Risschäden festgestellt worden. Untersuchungen von geschädigten Konstruktionen zeigten, dass für die Entstehung der Risse der Mechanismus der flüssigmetallinduzierten Spannungsrisskorrosion ursächlich ist. Obwohl Rissbildung durch flüssigmetallinduzierte Spannungsrisskorrosion seit vielen Jahrzehnten bekannt ist, bedurfte es weiterer Forschungsaktivitäten, um die anstehenden Probleme zu klären. Die Vielzahl und der Umfang von Schäden, die seit dem Jahr 2000 beobachtet wurden, machten daher neue interdisziplinäre Untersuchungen notwendig. Insbesondere, weil festgestellt wurde, dass fachübergreifende Richtlinien für rissfreie Verzinkungen nicht existent waren oder sich noch in der Entwicklung befanden. Vor diesem Hintergrund wurde dieses Forschungsvorhaben initiiert.

Dabei waren die zu klärenden Fragestellungen besonders der Einfluss der Vorbehandlung (Beizen), des Werkstoffs (Zähigkeit, Festigkeit), der Verarbeitung (Schweißen, Kaltverformen, Bohren, Schneiden), der Zinklegierung und der Tauchgeschwindigkeit auf die Rissbildung sowie Fragen zur konstruktiven Ausbildung der Konstruktion (z.B. Zinkdurchlauföffnungen).

Die Ergebnisse trugen zur Entstehung neuer Richtlinien des Deutschen Ausschuss für Stahlbau DASt und des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) für rissfreies Feuerverzinken bzw. zur Schadensanalyse bei. Als Ergebnis sind zudem für die praktische Umsetzung der zuvor genannten Richtlinien Weiterentwicklungen von Laborversuchen zur Ermittlung der Kritikalität von Schmelzen, die Schaffung von Eingangswerten für die numerische Simulation des Verzinkens sowie für neue metallographische Präparationsmethoden entstanden. Zudem wurde die Magnetpulverprüfung für Konstrukti-

- Application of larger galvanizing vessels and quality chain improvements of the full process of hot dip galvanizing,
- Use of newly developed zinc alloys which allowed better control of coating thickness and appearance.

Subsequently to these developments major technological draw backs had to be faced by industry since 2000 in form of an increasing amount of cracks found in welded constructions made from modern steels which were galvanised in the new type of zinc bath composition. Investigations showed that such cracks were a result of the known mechanism of Liquid Metal Embrittlement (LME). Although the crack initiation resulting from LME is known since decades in the technical world, the new problems could not alone be explained by the existing knowledge. Therefore it was found ne-



cessary to initiate a new research attempt with an interdisciplinary approach to answer open question and to provide solutions and new developments for the involved industries. Beside that it was found that no guidelines exist so far which would allow the industry partners to design and build hot dip galvanised and crack free steel constructions. Before this background this research project has been initiated.

The main focus was on the following aspects: influence from pickling, influence of the material (strength, toughness), from fabrication (welding, cutting, drilling, cold forming), from zinc bath composition and dipping speed. Furthermore optimised openings in hollow sections were investigated.

onen, bei denen Risse nicht auszuschließen sind, weiterentwickelt.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 265 ZBG der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde an der RWTH Aachen vom Lehrstuhl und Institut für Stahlbau und Leichtmetallbau und vom Institut für Eisenhüttenkunde, an der Ruhr- Universität Bochum, Institut für Werkstoffe, Lehrgebiet Werkstoffprüfung, an dem Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH, an der Technischen Universität Darmstadt, Institut für Stahlbau und Werkstofftechnik, Fachgebiet Werkstoffmechanik und an der Staatlichen Materialprüfungsanstalt Darmstadt, Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde sowie von der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg GmbH durchgeführt.

Der Abschlussbericht umfasst 290 Seiten und enthält 382 Abbildungen und Tabellen.

Schutzgebühr: € 36,00 zzgl. MWSt. und Versandkosten, ISBN 978-3-942541-46-6

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

The results achieved support parallel running initiatives of drafting a new guideline from the “Deutscher Ausschuss für Stahlbau DAST” and from the Association of German Engineers (VDI) for crack free hot dip galvanizing of steel constructions. In detail they enable the improving of laboratory tests for the derivation of criticality of zinc alloys, the creation of physical input values for numerical simulation of hot dip galvanizing and the development of new metallographic preparation methods. For constructions where cracks from hot dip galvanizing cannot be excluded the magnetic powder test technology has been extended beyond existing limitations.

The research project (IGF-Nr. 265 ZBG) has been carried out at RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Stahlbau und Leichtmetallbau and Institut für Eisenhüttenkunde, at Ruhr- Universität Bochum, Institut für Werkstoffe, Lehrgebiet Werkstoffprüfung, at Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH, at Technischen Universität Darmstadt, Institut für Stahlbau und Werkstofftechnik, Fachgebiet Werkstoffmechanik, at Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt, Fachgebiet and Institut für Werkstoffkunde and at Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg GmbH. FOSTA has accompanied the research project work and has organized the project funding from the Federal Ministry of Economics and Energy through the AiF as part of the programme for promoting industrial cooperation research (IGF) in accordance with a resolution of the German parliament.

The final report contains 290 pages with 382 figures/tables.

Fee: € 36.00 plus VAT and mailing expenses  
ISBN 978-3-942541-46-6

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

### **Untersuchungen zur Herstellbarkeit von freigeformten Hüll- und Fassadenelementen als selbsttragende Struktur ohne Unterkonstruktion aus nichtrostendem Stahl mittels inkrementeller Blechumformung (IBU) (P 846)**

Der in den letzten Jahrzehnten gestiegene Wunsch nach individualisierten Produkten zeigt sich im Bauwesen vor allem in der Erweiterung des Formenspektrums, wie beispielsweise in der Freiform-Architektur. Auf Grund fehlender ausgereifter und universell anwendbarer Baukonzepte werden freigeformte Fassaden- und Dachkonstruktionen zumeist als Einzellösungen mit materialintensiven Unterkonstruktionen realisiert, wobei die Hüllflächen teilweise weder lasttragende noch funktionelle Aufgaben übernehmen.

In diesem Kontext beschreibt der Forschungsbericht ein neues Baukonzept für selbsttragende Leichtbau-Freiformstrukturen, das die Möglichkeit bietet, den

### **Investigation on the producibility by incremental sheet forming of free form cladding and façade elements as self-bearing structure without substructure made of stainless steel (P 846)**

The wish for individualized products has continuously grown over the last decades. In the construction sector this is expressed in a higher geometrical diversity, like particularly in freeform architecture. Due to missing universal and mature construction methods for freeform buildings they are usually realized applying customized solutions. However, these often include massive, material-consuming substructures, whereas the outer visible skin has neither structural nor functional properties.

In this context the research report presents a new concept for self-supporting lightweight structures for the realization of freeform surfaces. The concept utilizes a

Lastabtrag sowie Funktion und Design der Gebäudehülle in einer zweilagigen Struktur zu vereinen. Die Kombination aus Tessellierung und Faltung einer Hüllfläche, die grundsätzlich den Aufbau selbsttragender Strukturen aus Metallblech ermöglicht, wurde dazu im beschriebenen Forschungsprojekt auf komplexe freigeformte Geometrien übertragen. Die auf Basis der inkrementellen Blechumformung (IBU) entwickelte flexible Fertigungskette eignet sich für die Produktion der erforderlichen Fassadenelemente auch im Falle von Freiform-Entwürfen, bei deren geometrischer Approximation zwangsläufig eine Vielzahl individueller Einzelteile entsteht.

Eine ganzheitliche Optimierung des Baukonzeptes wurde insbesondere dadurch ermöglicht, dass in enger Zusammenarbeit zwischen Architekten, Bauingenieuren und Fertigungstechnikern die gesamte Prozesskette vom anfänglichen Design über die Fertigung bis hin zur Endmontage mit all ihren Interaktionen analysiert und aufeinander abgestimmt wurde. Darüber hinaus konnte das gesamte Baukonzept mit allen Details



der Entwurfsausarbeitung und der Fertigungs-, Füge- und Montagetechnik in einem eigens entwickelten Softwaretool für die Planungsphase verankert werden. Dieses Softwaretool unterstützt somit eine fertigungsgerechte Planung und automatisiert alle erforderlichen Schritte in der Entwurfs- und Detaillierungsphase. Für den abschließenden Montageprozess wurde ein geeignetes Füge- und Montagekonzept entwickelt, welches sich den selbsttragenden Charakter der entwickelten Strukturen zu Nutze macht und eine problemlose Montage der Einzelteile zur Gesamtform ermöglicht.

Wie am Beispiel des realisierten Musterbauwerks gezeigt werden konnte, ermöglicht das entwickelte Baukonzept die Realisierung von selbsttragenden Freiformstrukturen, z.B. für den Dach- und Fassadenbereich. Die kalkulierten Realisierungskosten, die sowohl die Fertigung als auch die Montage beinhalten, liegen dabei unter 2700 €/m<sup>2</sup>, was in Anbetracht der hohen Geometrieflexibilität in einem durchaus konkurrenzfähigen Bereich rangiert. Das enorme Leichtbaupotential des Baukonzeptes konnte durch ein Flächengewicht von weniger als 16 kg/m<sup>2</sup> bestätigt werden.

Durch die entwickelten Ansätze wurden also neue Möglichkeiten für metallische Bauweisen in der modernen Architektur sowie im Designbereich eröffnet. Dar-

double-layered structure that integrates load-bearing, functional properties and façade design in one unit. In general a combination of tessellation and folding enables the generation of selfsupporting sheet metal structures. Within the described research project this method has been applied to complex freeform geometries. The developed flexible manufacturing chain is mainly based on incremental sheet forming (ISF) and allows for the production of the required façade elements. This process is even applicable in the case of freeform designs, whose geometrical approximation inevitably generates a large amount of individual components.

The holistic optimization of the introduced construction concept has particularly been possible due to the close cooperation of architects, construction engineers and production engineers. The entire process chain from the initial design to the final assembly as well as the corresponding interactions have been analyzed and matched. Furthermore, the whole construction concept has been implemented in a custom

software-tool including all details with regard to the design elaboration as well as production, joining and assembly concepts. Thus, the created software-tool supports a production and assembly oriented planning and automates all necessary steps within the design and detailing procedure. For the final assembly process a joining and assembly concept has been developed, which takes advantage of the self-supporting characteristic of the designed structures and permits to assemble all single components without any additional auxiliary constructions.

The prototype building impressively shows that the developed construction concept allows for the realization of self-supporting freeform structures, e.g. for roof or façade applications. The calculated realization costs including production and assembly are below 2700 €/m<sup>2</sup>. This represents a competitive range considering the high geometrical flexibility of the system. The high potential of the construction concept in terms of lightweight design is confirmed by its surface weight of less than 16 kg/m<sup>2</sup>.

The described concept is able to establish new applications of metallic constructions in modern architecture and design. In the metalworking industry new business segments can be launched offering the flexible produc-

über hinaus bieten sich für metallverarbeitende Unternehmen Potentiale, durch eine Adaption der entwickelten IBU-basierten Fertigungskette, die flexible Fertigung von Blechteilen anzubieten und somit ihre Geschäftsfelder zu erweitern. Insgesamt werden also sowohl das Anwendungsspektrum als auch die Geometrieflexibilität für Bauteile aus Stahlblech erweitert und somit ein steigender Absatz der Rohmaterialien und Halbzeuge ermöglicht.

Das IGF-Vorhaben 16603 N des Deutschen Ausschusses für Stahlbau DASt, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde vom Institut für Bildsame Formgebung und vom Lehrstuhl für Tragkonstruktionen der RWTH Aachen durchgeführt. Die fachliche Begleitung des Vorhabens erfolgte durch die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf.

Der Abschlussbericht umfasst 236 Seiten und enthält 179 Abbildungen und Tabellen.

Schutzgebühr: € 36,00 inkl. MWSt. zzgl. Versandkosten, ISBN 978-3-942541-55-8

Dipl.-Ing..Franz-Josef Heise

### **Entwicklung eines anwenderorientierten Versagensmodells für die Blechumformsimulation höchstfester Stahlwerkstoffe (P 853)**

Aufgrund steigender Anforderungen hinsichtlich der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission und der Insassensicherheit werden hoch- und höchstfeste Stähle wie beispielsweise Dual- oder Komplexphasenstähle kontinuierlich weiterentwickelt. Das Umform- und Versagenverhalten dieser Stähle weist deutliche Unterschiede zu den konventionellen Stahlsorten auf. Dies liegt an der komplexen Mikrostruktur dieser modernen Werkstoffe.

Insbesondere bei dem Aspekt der Versagensvorhersage zeigen sich die Schwächen konventioneller Methoden zur Beurteilung der Bauteilherstellbarkeit. Sowohl das Grenzformänderungsdiagramm (GFD) als auch die Schädigungskriterien, welche nur die Energie akkumulieren ohne den Spannungszustand sonst zu beeinflussen, können den Ort und den Zeitpunkt des Versagens nicht zuverlässig bestimmen. Aufgrund dieses Defizits in der Prozessauslegung wird trotz des großen Potenzials dieser Werkstoffe deren Einsatz verzögert bzw. verhindert.

Als Zielsetzung in diesem Forschungsvorhaben erfolgte daher die Weiterentwicklung des kontinuumsmechanischen Schädigungsmodells nach Lemaitre für die Blechumformung, um die beschriebenen Effekte auf Basis numerischer Analysen realitätsnah abbilden zu

tion of sheet metal components by adapting the developed ISF-based manufacturing chain. Altogether, both the application fields as well as the geometrical flexibility for sheet metal constructions have been widely extended. This will certainly have a positive impact on the market for raw materials and semifinished products.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

The research project (IGF-Nr. 16603 N) has been carried out at Institut für Bildsame Formgebung und vom Lehrstuhl für Tragkonstruktionen of RWTH Aachen. FOSTA has accompanied the research project work and has organized the project funding from the Federal Ministry of Economics and Technology through the AiF as part of the programme for promoting industrial cooperation research (IGF) in accordance with a resolution of the German parliament.

The final report contains 236 pages with 179 figures/tables.

Fee: € 36.00 incl. VAT plus mailing expenses  
ISBN 978-3-942541-55-8

Dipl.-Ing. Franz-Josef Heise

### **Development of a User-oriented Damage Model for Sheet Metal Forming of High Strength Steels (P 853)**

Due to increasing requirements in terms of reducing CO<sub>2</sub> emissions while providing occupant safety, high and advanced high strength steels such as dual and complex-phase steels are continuously (further) being developed and applied. In consequent of the complex microstructure of these advanced materials, the deformation and failure behavior of these steels has distinct differences from the conventional steel grades.

Specifically, in the aspect of the failure prediction, the weaknesses of conventional methods for assessing the formability arise. Both the forming limit diagram (FLD) and fracture criteria, which considers the accumulation of damage without influencing the material behavior (softening effect), could determine the location and the time of failure precisely. Due to this deficit in the process design, their application is adversely limited despite the great potential of these materials.

As an objective in this research project, the development of the continuum damage model by Lemaitre for sheet metal forming is carried out, in order to achieve described aspects on the basis of numerical analyzes. In addition to the determination of the material damage, hereby the sheet anisotropy and the Bauschinger effect can be taken into consideration. Furthermore, the influence of damage evolution can account for the

können. Neben der Bestimmung der Werkstoffschädigung ist hiermit die Berücksichtigung der Blechanisotropie und des Bauschinger-Effekts möglich. Ferner kann der Einfluss der Schädigungsentwicklung auf den aktuellen Spannungszustand berücksichtigt werden. Durch die Erfassung einer sogenannten Porenschließung („Crack Closure“) konnte eine Verbesserung der Versagensvorhersage bei negativen Mehrachsigkeiten erreicht werden.

Für die Bestimmung der Modellparameter wurden im Rahmen dieser Arbeit Zug- und ebene Torsionsversuche verwendet. Letztere werden zur Ermittlung der Fließkurve eingesetzt, weil dabei höhere Umformgrade erreicht werden können. Für die Anpassung der Schädigungsparameter wurde die Probengeometrie verändert.

Anhand geeigneter Testbauteilen konnte für mehrere Werkstoffgüten nicht nur das Modell validiert werden, sondern auch dessen Leistungsfähigkeit gegenüber Standardverfahren wie dem GFD für die Blechumformsimulation hochfester Stähle gezeigt werden.

Da neben der erreichbaren Genauigkeit der Aufwand zur Bestimmung der Werkstoffparameter ein wesentliches Kriterium für den Einsatz eines Modells ist, konnte in diesem Projekt eine praxistaugliche Vorgehensweise zur Identifikation der Schädigungsparameter sowie zur optimalen Implementierung des Modells unter Berücksichtigung der Rechenzeiten, Modellierungsstrategie, Genauigkeit und Robustheit der FEM-Berechnung entwickelt werden. Dies wurde anschließend einem breiten Benutzerkreis kommerzieller FE-Software zur Verfügung gestellt, so dass die praktische Anwendung der Entwicklungen sichergestellt ist.

Das Forschungsvorhaben wurde am Institut für Umformtechnik und Leichtbau der Technischen Universität Dortmund, mit fachlicher Begleitung und mit finanzieller Förderung durch die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, aus Mitteln der Stiftung Stahlanwendungsforschung, Essen, durchgeführt.

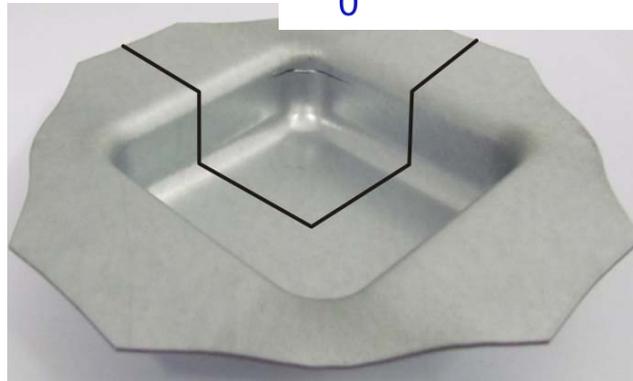
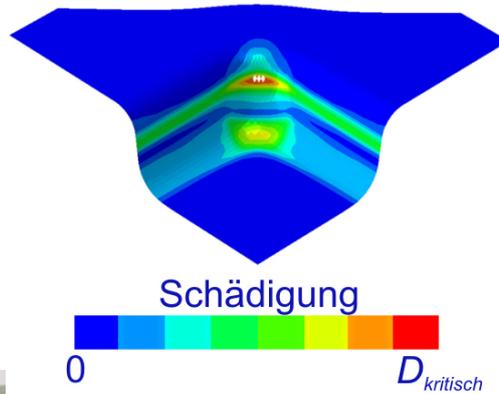
Der Abschlussbericht umfasst 122 Seiten und enthält 103 Abbildungen und Tabellen.

Schutzgebühr: € 30,00 zzgl. MwSt. und Versandkosten, ISBN 978-3-942541-56-5

Dipl.-Ing. Rainer Salomon

current state of stress. By considering the phenomena so-called void closure ("Crack Closure"), an improvement of the failure prediction can be achieved at low and negative stress triaxialities.

For the determination of the model parameters, tensile tests and in-plane torsion tests were used in this work. The latter are originally designed for the determination of the yield curve, while higher amount of deformation is achieved. For the identification of the damage parameters, the sample geometry was modified.



Using appropriate test specimens for several grades of material not only the model could be validated, but also its performance over standard methods such as the FLD are shown for sheet metal forming simulation of high-strength steels.

Because in addition to the attainable accuracy of the effort to determine the material parameters is an essential criterion for the use of a model, in this project, a practical approach for the identification of damage parameters and the optimal implementation of the model taking into account the computing times, modeling strategy, accuracy and robustness of the FEM calculation are developed. This was made available for the project partners especially commercial FE software companies so that the practical application of the developments is ensured.

The research project has been carried out at Institut für Umformtechnik und Leichtbau of Technischen Universität Dortmund. FOSTA has accompanied the research work and has organized the project funding from the Foundation for Steel Application Research.

The final report contains 122 pages with 103 figures/tables.

Fee: € 30.00 plus VAT and mailing expenses  
ISBN 978-3-942541-56-5

Dipl.-Ing. Rainer Salomon

## Veranstaltungen mit Beteiligung der FOSTA - Termine

### Events with the participation of FOSTA - Dates

#### 2015

|                       |   |
|-----------------------|---|
| 26. März              | Dresdner Stahlbaufachtagung 2015 - Stahl- und Verbundkonstruktionen im Hoch- und Brückenbau, Dresden; <a href="http://www.bauakademie-sachsen.de">http://www.bauakademie-sachsen.de</a> |
| 07. Mai               | Offenburger Stahlbausymposium; <a href="http://mv.hs-offenburg.de/forschung-projekte/stahlbautagung/">http://mv.hs-offenburg.de/forschung-projekte/stahlbautagung/</a>                  |
| 15. bis 19. Juni      | 2 <sup>nd</sup> ESTAD, European Steel Technology and Application Days, Düsseldorf<br>Stahlinstitut VDEh; <a href="http://www.metec-estad2015.com">www.metec-estad2015.com</a>           |
| 14. bis 17. September | WerkstoffWoche - Kongress und Fachmesse für innovative Werkstoffe, Verfahren und Anwendungen, Dresden; <a href="http://www.werkstoffwoche.de">www.werkstoffwoche.de</a>                 |
| Oktober               | 12. Stahl-Symposium: Hochfester Stahl im Stahl- und Maschinenbau, Liebherr Deutschland GmbH, Ehingen  |
| 12. November          | STAHL 2015: Weichenstellung für die Zukunft, Düsseldorf, Stahldialog „Stahllösungen für eine moderne Infrastruktur“   |
| 08. und 09. Dezember  | 5. Fügetechnisches Gemeinschaftskolloquium — Gemeinsame Forschung in der Mechanischen Fügetechnik, Paderborn  |



Stahlinstitut VDEh



Deutsche Gesellschaft für Materialkunde eV

[www.werkstoffwoche.de](http://www.werkstoffwoche.de)

## Kongress und Fachmesse für Innovative Werkstoffe, Verfahren und Anwendungen Branchentreff für Werkstoffe der Zukunft

- ◆ Werkstoffanwender treffen Hersteller von Werkstoffen
- ◆ Dialoge zwischen Industrie und Wissenschaft
- ◆ Generieren von Antworten auf Werkstoff- und Bauteilfragen
- ◆ Darstellen neuester Produkt- und Prozessinnovationen
- ◆ Lösungswege für individuelle Anwenderfragen

Seitens der **Stahlindustrie** wurden bisher 17 **Branchenvorträge** eingebracht; u.a. zu den Themengebieten:  
Leichtbaupotentiale moderner Stahlwerkstoffe, Umform- und Verarbeitungstechnische Herausforderungen durch Hochleistungsstähle, Bauteilanforderungen an moderne Stähle, Intelligente Stahl-Lösungen für die Bautechnik der Zukunft, Prüf- und Messtechnik zur Qualitätssicherung, ...

### Seminare der Stahlakademie:



- ◆ Kontaktstudium: Werkstofftechnik Stahl • Teil 4: Chemisch-physikalische Eigenschaften
- ◆ Bruchmechanische Bewertung von Stahl in der Praxis
- ◆ Edelbaustähle im modernen Fahrzeugbau
- ◆ Reinheitsgradnorm EN 10247

Alle Forschungsberichte können gegen Entrichtung einer Schutzgebühr bezogen werden von / All final reports could be ordered for a nominal charge at: Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Postfach 10 51 27, D-40042 Düsseldorf, Germany  
Fax +49 211 6707-129, Email: [verlagvertrieb@stahl-zentrum.de](mailto:verlagvertrieb@stahl-zentrum.de)

Forschungsberichte als PDF-Version über / Research reports as PDF-version via [www.stahl-daten.de](http://www.stahl-daten.de).

#### Impressum:

FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. / FOSTA - Research Association for Steel Application  
Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf, Germany; Tel. +49 211 6707-856; Fax +49 211 6707-840,  
Email: [foستا@stahlforschung.de](mailto:foستا@stahlforschung.de), Internet: [www.stahl-online.de](http://www.stahl-online.de)

Dr.-Ing. Peter Dahlmann (-405); Dr.-Ing. Hans-Joachim Wieland (-426)

Dipl.-Ing. Franz-Josef Heise (-837); Dr. Gregor Nüsse M.Sc. (-839); Dipl.-Ing. Rainer Salomon (-853)

