

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18339 N

## Thema

Tragfähigkeit von Mischverbindungen normalfester und höherfester Stähle im Stahlbau

## Berichtszeitraum

01.09.2014 bis 31.12.2017

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. FOSTA

## Forschungseinrichtung(en)

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf

Stuttgart, 11.04.2018

---

Ort, Datum

  
Prof. Dr.-Ing Ulrike Kuhlmann

---

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

---

## Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben „Tragfähigkeit von Mischverbindungen normalfester und höherfester Stähle im Stahlbau“, IGF-Projekt Nr. 18339 N, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

---

## Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Bearbeitung des Projekts wurden insgesamt 24 Monate wissenschaftlich-technisches Personal eingesetzt. Für die Durchführung der Zugversuche an den Stirnkehlnähten und an den Flankenkehlnähten wurde für 7 Monate Fachpersonal eingesetzt. Da diese an der MPA durchgeführt wurden, wurde zusätzlich Leistungen Dritter in der Höhe von 14.280 Euro angesetzt. Die Schweißarbeiten der Versuchskörper der Stirnkehlnähte und der Flankenkehlnähte sowie der Versuchskörperserie SN, zur Entnahme der Rundzugproben des reinen Schweißguts, wurde als Leistung Dritter von der SLV Halle GmbH in Höhe von 23.205 Euro durchgeführt. Zusätzlich wurde zur Ermittlung der tatsächlichen Bruchfläche der Kehlnähte ein 3D-Scan an ausgewählten Versuchskörpern durchgeführt. Dies wurde als Leistung Dritter von ibs quality GmbH in Höhe von 6.723,03 Euro durchgeführt.

Außerdem wurden wissenschaftliche Hilfskräfte eingesetzt. Es wurden keine Geräte beschafft.

---

## Angaben über gewerbliche Schutzrechte

Es wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes keine gewerblichen Schutzrechte erworben. Eine Anmeldung eines gewerblichen Schutzrechtes ist nicht beabsichtigt.

---

## Kurzzusammenfassung

Die Anforderung immer schlanker und filigraner Konstruktionen mit hohen Beanspruchungen führen konsequenterweise zum Einsatz von höherfesten Stählen. Maßgebend für den Einsatz höherfester Stähle sind neben Fragen der Stabilität und für Brücken u. ä. Ermüdung in erster Linie die Anschluss- und Verbindungsmöglichkeiten. Offen ist dabei das Vorgehen für Mischverbindungen, wenn also höherfeste Stähle S690 z.B. an normalfeste Stähle S355 angeschlossen werden. Eine Situation, die in der Praxis standardmäßig auftritt, weil die Wahl des Stahls in der Regel an die Ausnutzung angepasst wird und es immer auch Anbauteile mit geringeren Beanspruchungen gibt. Derzeitige Bemessungskonzepte in EN 1993-1-8 [58] für Kehlnahtverbindungen berücksichtigen die Festigkeit des Schweißgutes bislang nicht. Auch sind Mischverbindungen zurzeit bezüglich des Schweißnahtwerkstoffs nach dem höherfesten Stahl auszurichten, dürfen rechnerisch aber nur mit den Werten des normalfesten Grundwerkstoffs bemessen werden. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Überprüfung der Anwendbarkeit des bereits angepassten Bemessungsmodells für Kehlnähte gleicher Grundwerkstoffe nach Rasche [7], beziehungsweise die Entwicklung eines realitätsnahen und verständlichen Bemessungsmodells zur Bestimmung der Tragfähigkeit von hybriden Schweißverbindungen mit Kehlnähten aus normal- und höherfesten Baustählen für die Anwendung im Stahlbau und verwandten Bereichen (Anlagen- und Kranbau) und somit die Verbesserung der normativen Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen bei Mischverbindungen in den derzeit gängigen Stahlbaunormen. Durch eine zukünftige Berücksichtigung des Schweißzusatzwerkstoffs in Kombination mit den unterschiedlichen zu verbindenden Grundwerkstoffen soll eine geeignete Auswahl der optimalen Kombination aus Tragfähigkeit, Zähigkeit und Verformungsfähigkeit ermöglicht werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden zum einen Bauteilversuche zur Charakterisierung der Tragfähigkeit und Verformung von Mischverbindungen, zum anderen umfassende Werkstoffuntersuchungen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften durchgeführt. Basierend auf der Korrelation zwischen Bauteilversuchen und mechanischen Eigenschaften wurde eine detaillierte statistische Auswertung der Ergebnisse erarbeitet.

Anhand der Auswertung der experimentellen Versuchsergebnissen sowie der Ergebnisse der statistischen Auswertung konnte die Anwendbarkeit des angepassten Bemessungsmodells nach Rasche [7] bestätigt werden. Die Ergebnisse wurden zu Empfehlungen verdichtet, die zum einen die konstruktive und schweißtechnische Herstellung von Mischverbindungen für die Praxis umfassen und zum anderen Bemessungsregeln wiedergeben, die als Normenvorschlag über den deutschen Spiegelausschuss an die CEN Gremien weitergeleitet werden können.

Das Forschungsziel konnte somit erreicht werden.

---

## Abstract

The requirement towards slender and more filigree constructions with high loadings consistently leads to the application of high-strength steels. Decisive for the application of high-strength steels is, beside of the question of stability and for bridges and similar fatigue, mainly the type of joints and connections. How to effectively realize the procedure of welding high-strength steels S690 to normal-strength steels S355 by fillet welds is still an open question. However, this is a standard situation existing in practice due to the fact that the choice of steel grade usually is adapted to the utilization and also because secondary components with small loadings are often added to the structure. Design concepts in EN 1993-1-8 [58] do not consider the strength of the weld material. In hybrid connections the weld material has to be overmatching to the high strength steel, but as strength only the mild steel strength may be taken into account. The objective of the project is the review of the modified design resistance function according to Rasche [7] or the development of a realistic and comprehensive design model for determining the carrying capacity of hybrid connections with fillet welds of normal- and high-strength steels for the utilization in steel structures and related areas (plant and crane construction) in order to improve the normative carrying capacity of fillet welds for hybrid fillet weld connections in the currently used steel standards. Considering in future the filler metal in combination with the different base materials an appropriate choice of optimal combination of carrying capacity, toughness and deformation capacity may be achieved. In the frame of the research project component tests are performed on one hand for the characterization of the carrying capacity and the deformation capacity of the connections, while on the other hand extensive material tests are realized for the determination of the mechanical properties. Based on the correlation between component tests and mechanical properties a detailed statistical evaluation of the results is planned to be developed.

On the basis of the evaluation of the experimental test results and the results of the statistical evaluation, the applicability of the adapted design model according to Rasche [7] was confirmed. The results will be summarized to recommendations which on one side cover the construction and welding procedure of hybrid connections for use in practice and on the other side give design rules which will be derived as a proposal for future code development for the German mirror group to be introduced into the European CEN Working Group.

Thus, the objective of this research project was accomplished.

---

## Inhaltsverzeichnis Content

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Einleitung Introduction .....   | 1  |
| 1.1   | Einleitung Introduction .....   | 1  |
| 1.2   | Ziel des Forschungsvorhabens Objectives of the Research Project .....   | 2  |
| 1.3   | Arbeitsschwerpunkte Work Priorities .....   | 3  |
| 2     | Stand der Technik State of the Art .....  | 5  |
| 2.1   | Werkstoffeigenschaften und Verwendung normal- und höherfester Stähle<br>Material Properties and the Application of Mild Carbon and High Strength<br>Steel .....           | 5  |
| 2.1.1 | Baustahl Structural Steel .....   | 5  |
| 2.2   | Schweißanweisungen Welding Specifications .....   | 10 |
| 2.3   | Nachweisformat nach Europäischer Norm EN 1993 Design Model according<br>to Eurocode EN 1993 .....   | 14 |
| 2.4   | Bisherige Forschungsergebnisse Present Research Results .....   | 18 |
| 2.4.1 | Untersuchungen an Kehlnähten gleicher Grundwerkstoffe<br>Investigations on Fillet Welds with same Base Metal .....  | 18 |
| 2.4.2 | Bewilligter Bemessungsvorschlag entsprechend Dokument<br>TC250/SC3/N2168 [39] Accepted Design Resistance Function<br>according to the Document TC250/SC3/N2168 [39] ..... | 20 |
| 2.4.3 | Europäisches RFCS Forschungsvorhaben SAFEBRICTILE [45]<br>RFCS European Research Project SAFEBRICTILE [45] .....  | 21 |
| 2.5   | Zusammenfassung und Problemstellung Summary and Problems .....  | 24 |
| 3     | Versuchsprogramm Experimental Program .....   | 25 |
| 3.1   | Allgemeines General .....   | 25 |
| 3.2   | Versuchskörperformen Test specimens .....   | 28 |
| 3.2.1 | Überblick Overview .....  | 28 |
| 3.2.2 | Stirnkehlnähte Cruciform Joints with Fillet Welds .....   | 29 |
| 3.2.3 | Flankenkehlnähte Longitudinal Fillet Welds .....  | 30 |
| 3.3   | Versuchsreihen Test Series .....  | 31 |
| 3.3.1 | Überblick Overview .....  | 31 |
| 3.3.2 | Stirnkehlnähte Cruciform Joints with Fillet Welds .....   | 32 |
| 3.3.3 | Flankenkehlnähte Longitudinal Fillet Welds .....  | 33 |
| 3.3.4 | Versuchsreihe SN Test Series SN .....   | 35 |
| 4     | Werkstoffuntersuchungen Material Tests .....  | 37 |
| 4.1   | Allgemeines General .....   | 37 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.2   | Zugversuche an normal- und höherfesten Stählen Tensile Tests on Mild Carbon and High Strength Steel ..... | 38 |
| 4.3   | Zugversuche am reinen Schweißgut (Versuchsreihe SN) Tensile Tests on Filler Metal .....                   | 39 |
| 4.4   | Makroschliffe und Härtemessungen Macrosection and Hardness Measurement.....                               | 40 |
| 4.4.1 | Härtemessung Stirnkehlnähte Hardness Measurement on Cruciform Joints with Fillet Welds .....              | 40 |
| 4.4.2 | Härtemessung Flankenkehlnähte Hardness measurement on Longitudinal Fillet Welds .....                     | 42 |
| 5     | Versuchskörperfertigung Fabrication of test specimens.....  | 45 |
| 5.1   | Verwendete Materialien Used Materials .....   | 45 |
| 5.1.1 | Grundmaterial aus normal- und höherfestem Stahl Base Metal of Mild Carbon and High Strength Steel .....   | 45 |
| 5.1.2 | Schweißzusatzwerkstoffe Filler Metals.....  | 46 |
| 5.2   | Zuschnitt der Bleche Cutting of Steel Plates.....   | 47 |
| 5.3   | Durchführung des Schweißens Welding of the Test Specimens .....   | 47 |
| 5.3.1 | Schweißen der Versuchskörperserie STI Welding of the Test Series STI.....                                 | 50 |
| 5.3.2 | Schweißen der Versuchskörperserie FLA Welding of the Test Series FLA.....                                 | 53 |
| 5.3.3 | Schweißen der Versuchskörperserie SN Welding of Test Series SN .....                                      | 54 |
| 5.4   | Mechanische Bearbeitung Mechanical Processing.....  | 55 |
| 5.4.1 | Vorgehen Procedure .....  | 55 |
| 5.4.2 | Versuchskörperserie STI Test Series STI .....   | 55 |
| 5.4.3 | Versuchskörperserie FLA Test Series FLA .....   | 59 |
| 6     | Versuchsdurchführung Experimental Procedure.....  | 61 |
| 6.1   | Versuchseinrichtung Experimental Setup .....  | 61 |
| 6.1.1 | Messtechnik Measurement Setup .....   | 62 |
| 6.2   | Versuchsdurchführung STI Experimental Procedure STI .....   | 64 |
| 6.3   | Versuchsdurchführung FLA Experimental Procedure FLA .....   | 66 |
| 6.4   | Begleituntersuchungen Accompanying Investigations.....  | 67 |
| 6.4.1 | Allgemeines General.....  | 67 |
| 6.4.2 | Bruchflächenermittlung Determination of Fracture Area.....  | 68 |
| 6.4.3 | Bruchwinkelermittlung Determination of Fracture Angle.....  | 69 |
| 7     | Versuchsergebnisse Experimental Results .....   | 71 |
| 7.1   | Ergebnisse der Werkstoffuntersuchungen Results of the Material Tests....                                  | 71 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7.1.1 | Ergebnisse der Zugversuche am Grundmaterial Results of the Tensile Tests on Base Metal.....   | 71  |
| 7.1.2 | Ergebnisse der Zugversuche am Schweißzusatzwerkstoff Results of the Tensile Tests on Filler Metal .....                               | 72  |
| 7.1.3 | Ergebnisse der Härteuntersuchungen Results of the Hardness Measurements .....   | 74  |
| 7.1.4 | Zusammenfassung der Härteauswertung an Kehlnähten Summery of Hardness Measurement on Fillet Welds .....                               | 78  |
| 7.2   | Ergebnisse der a-Maß Auswertung Results of the Evaluation of Throat Thickness .....   | 78  |
| 7.2.1 | Nahtdicke <i>a</i> nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.5.2 [57] Throat Thickness a according to DIN EN 1993-1-8 Section 4.5.2 [57] ..... | 78  |
| 7.2.2 | Tatsächliche Nahtdicke $a_{3D-Scan}$ Actual Throat Thickness $a_{3D-Scan}$ .....  | 79  |
| 7.2.3 | Besonderheit der Stirnkehlnähte Nahtdicke <i>amax</i> Throat Thickness for <i>amax</i> Cruciform Joints with Fillet Welds .....       | 80  |
| 7.2.4 | Nahtdicken der Stirnkehlnähte Throat Thickness of Cruciform Joints with Fillet Welds .....  | 82  |
| 7.2.5 | Nahtdicken der Flankenkehlnähte Throat Thickness of Longitudinal Fillet Welds .....   | 87  |
| 7.2.6 | Zusammenfassung der a-Maß Auswertung für Kehlnähte Summery of the Evaluation of Throat Thickness of Fillet Welds .....                | 89  |
| 7.3   | Ergebnisse der Bruchwinkel Auswertung Results of the Evaluation of Fracture Angle .....   | 89  |
| 7.3.1 | Bruchwinkel der Stirnkehlnähte Fracture Angle of Cruciform Joints with Fillet Welds .....   | 90  |
| 7.3.2 | Bruchwinkel der Flankenkehlnähte Fracture Angle of Longitudinal Fillet Welds .....  | 95  |
| 7.3.3 | Zusammenfassung der Einflüsse auf die Bruchwinkel der Kehlnähte Summary of Influences on the Fracture Angle .....                     | 98  |
| 7.4   | Ergebnisse der Tragfähigkeitsuntersuchung Results of the Load Carrying Capacity .....   | 99  |
| 7.4.1 | Übersicht Versuchsergebnisse der Serie STI Overview of Experimental Results of Test Series STI .....                                  | 99  |
| 7.4.2 | Übersicht Versuchsergebnisse der Serie FLA Overview of Experimental Results of Test Series FLA .....                                  | 103 |
| 7.4.3 | Einfluss der Krafrichtung auf die Tragfähigkeit Influence of the Direction of Force on the Load Carrying Capacity .....               | 106 |
| 7.4.4 | Einfluss des Grundwerkstoffs auf die Tragfähigkeit Influence of Base Metal on the Load Carrying Capacity .....                        | 108 |
| 7.4.5 | Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit Influence of Filler Metal on the Load Carrying Capacity .....              | 111 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7.4.6 | Einfluss der Anzahl der Lagen auf die Tragfähigkeit Influence of Number of Layer on the Load Carrying Capacity .....  | 114 |
| 7.4.7 | Einfluss einer duktilen Wurzellage auf die Tragfähigkeit Influence of a Ductile Root Run on the Load Carrying Capacity .....  | 115 |
| 7.4.8 | Zusammenfassung Summary .....   | 121 |
| 8     | Numerischer Untersuchungen Numerical Investigation .....  | 123 |
| 8.1   | Schweißsimulation Welding Simulation .....  | 123 |
| 8.2   | Traglastuntersuchungen mittels FE Modell Investigations of Load Carrying Behaviour with FE Model .....  | 124 |
| 8.2.1 | Allgemeines General .....   | 124 |
| 8.2.2 | Beschreibung der numerischen Berechnungen Description of the numerical Investigation.....   | 124 |
| 8.2.3 | Versuchsnachrechnung Numerical Recalculation of Tests .....   | 129 |
| 8.3   | Zusammenfassung und Fazit Summary and Conclusion.....   | 135 |
| 9     | Empfehlungen für Bemessung und Ausführung Recommendations for Design and Execution .....  | 137 |
| 9.1   | Statistische Auswertung Statistical Evaluation.....   | 137 |
| 9.1.1 | Überblick Overview .....  | 137 |
| 9.1.2 | Methode nach DIN EN 1990 Anhang D [65] (Methode 1) Method according to DIN EN 1990 Annex D [65] (Method 1).....   | 138 |
| 9.1.3 | Angepasste Methode nach DIN EN 1990 Anhang D nach Kleiner [44] (Methode 2) Modified Method of DIN EN 1990 Annex D according to Kleiner [44] (Method 2).....   | 139 |
| 9.2   | Ermittlung der Basisvariablen Determination of Basis Variables .....  | 139 |
| 9.2.1 | Einführung Introduction .....   | 139 |
| 9.2.2 | Statistische Verteilung der Festigkeit des Grundwerkstoffs Statistical Distribution of Strength of Base Metal .....   | 140 |
| 9.2.3 | Statistische Verteilung der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs Statistical Distribution of Strength of Filler Metal .....   | 141 |
| 9.2.4 | Statistische Verteilung der Nahtdicke Statistical Distribution of the Throat Thickness.....   | 142 |
| 9.3   | Statistische Auswertung der Stirnkehlnähte Statistical Evaluation of Cruciform Joints with Fillet Welds .....   | 145 |
| 9.3.1 | Überblick Overview .....  | 145 |
| 9.3.2 | Auswertung der Verbindungen mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeit 460N/mm <sup>2</sup> Evaluation of Cruciform Joints with Fillet Welds with Filler Metal Strength 460N/mm <sup>2</sup> ..... | 146 |
| 9.3.3 | Auswertung der Verbindungen mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeit 690N/mm <sup>2</sup> Evaluation of Cruciform Joints with Fillet Welds with Filler Metal Strength 690N/mm <sup>2</sup> ..... | 148 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 9.3.4 | Auswertung der Verbindungen mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeit 890N/mm <sup>2</sup> Evaluation of Cruciform Joints with Fillet Welds with Filler Metal Strength 890N/mm <sup>2</sup> .....   | 150 |
| 9.4   | Statistische Auswertung der Flankenkehlnähte Statistical Evaluation of longitudinal Fillet Welds.....   | 151 |
| 9.4.1 | Überblick Overview .....  | 151 |
| 9.4.2 | Auswertung der Verbindungen mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeit 460N/mm <sup>2</sup> Evaluation of Longitudinal Fillet Welds with Filler Metal Strength 460N/mm <sup>2</sup> .....  | 152 |
| 9.4.3 | Auswertung der Verbindungen mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeit 690N/mm <sup>2</sup> Evaluation of Longitudinal Fillet Welds with Filler Metal Strength 690N/mm <sup>2</sup> .....  | 154 |
| 9.4.4 | Auswertung der Verbindungen mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeit 890N/mm <sup>2</sup> Evaluation of Longitudinal Fillet Welds with Filler Metal Strength 890N/mm <sup>2</sup> .....  | 156 |
| 9.5   | Beurteilung der Anwendbarkeit des Bemessungsvorschlages nach Rasche [7] für Mischverbindungen Assessment of the Applicability of the Modified Design Resistance acc. to Rasche [7] for Mixed Connections .....  | 157 |
| 9.6   | Ausführung und Fertigung Execution and Fabrication.....   | 158 |
| 10    | Zusammenfassung und Ausblick Summary and Perspective .....  | 161 |
| 10.1  | Allgemeines General .....   | 161 |
| 10.2  | Tragfähigkeit Load Carrying Capacity .....  | 162 |
| 10.3  | Anwendbarkeit des bewilligten Bemessungsvorschlages Applicability of the Modified Design Resistance Function .....  | 164 |
| 10.4  | Umsetzung der Forschungsergebnisse Transfer of Researchresults .....  | 165 |
| 10.5  | Weiterer Forschungsbedarf Additional Need for Research .....  | 166 |
| 11    | Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlich wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen List of publications related to the project.....  | 167 |
| 12    | Ergebnistransfer in die Wirtschaft Transfer to practice .....   | 169 |
| 13    | Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept .....   | 173 |
| 14    | Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten Presentation of the scientific-technological and economical benefits of the results achieved especially for SME, innovative contribution, and possibilities for application in industry ..... | 175 |
| 15    | Literaturverzeichnis Bibliography .....   | 177 |
| 16    | Danksagung Acknowledgement .....  | 183 |
|       | Inhalt Anhang Contents Annex .....  | 1   |