

Tragfähigkeit von Stumpfnahtverbindungen höherfester Stähle im Stahlbau

S. Hammer, S. Rasche, J. Hildebrand, J.P. Bergmann, Ilmenau J. Spiegler, U. Kuhlmann, Stuttgart, U. Mückenheim, S. Keitel, Halle,

Höherfeste Stähle erlauben hohe Beanspruchungen, insbesondere im Zugbereich, in Konstruktionen aufzunehmen und führen zur Reduzierung tragender Querschnitte, zur Verringerung des Materialverbrauchs und der Herstellungskosten. Da die Bemessungsregeln für Verbindungen ausschließlich auf Konzepten beruhen, die für normalfeste Stähle bis $f_{y,k} = 360 \text{ N/mm}^2$ entwickelt wurden, können die Vorteile höherfester Stähle nicht voll ausgenutzt werden. Hier setzt das Forschungsvorhaben an und untersucht durchgeschweißte Stumpfnähte von höherfesten Stählen. Der Nutzen für KMU im Hoch-, Anlagen- und Maschinenbau liegt darin, dass Empfehlungen entwickelt werden, die eine effiziente Schweißnahtvorbereitung von Stumpfnähten höherfester Stähle für das MSG-Schweißen ermöglichen sowie Empfehlungen für den Energieeintrag gegeben werden, die einer Gefügeausbildung entgegenwirken, dass die statische Tragfähigkeit reduziert. Den KMU wird eine Vorgehensweise zur Nahtbemessung zur Verfügung gestellt, welche den Einfluss des Schweißprozesses und -gutes auf die Tragfähigkeit der Stumpfnähte nach EN 1993-1-8 erfasst.

1 Einleitung

Zur Untersuchung der „Tragfähigkeit von Stumpfnähten höherfester Stähle im Stahlbau“ wurde im Rahmen des gleichnamigen Forschungsvorhabens, kurz „HighButtWeld“ [1] Zugversuche an Stumpfnähten der Güte S460ML, S690QL und S700MC durchgeführt. Hierbei wurde der Einfluss unterschiedlicher Nahtvorbereitungen, der Lichtbogenleistung P und verschiedener Schweißzusatzwerkstoffe an je 2 Blechdicken untersucht. Ziel war es unter Berücksichtigung aller Variationsparameter Empfehlungen zur Schweißnahtausführung zu geben und gegebenenfalls einen Abminderungsbeiwert zu ermitteln. Die experimentellen Ergebnisse der Schweiß- und Zugversuche wurden mit den numerischen Traglastuntersuchungen sowie einer Schweißsimulation verglichen.

Für eine detaillierte Erläuterung wird auf den Schlussbericht des Forschungsvorhabens [1] verwiesen.

2 Fertigung der Versuchskörper

Für die Untersuchungen an den ausgewählten drei Werkstoffen wurde eine Versuchsmatrix erstellt. Diese umfasste Variationen in der Materialdicke (10 und 15 bzw. 20 mm), in der Art der Nahtvorbereitung (V-, DV- und DHV-Naht) sowie im Nahtöffnungswinkel (45° , 50° und 60°), im Energieeintrag (Lichtbogenleistung P zwischen 6 und 9 kW) und im Typ des Zusatzwerkstoff Massiv- und Fülldrähte bei Festigkeiten im Bereich matching, undermatching und overmatching. Von insgesamt 60 Versuchskörpern erfolgten am S690QL die meisten Variationen (42 Versuchskörper). Der S460ML agierte als Referenzwerkstoff mit wenigen Variationsparametern (6 Versuchskörper). Die restlichen 12 Versuchskörper wurden für den S700MC erstellt ohne Variation im Nahtöffnungswinkel (50° gewählt) und Energieeintrag (mittlere Lichtbogenleistung P gewählt.)

Für die vollmechanische Versuchskörperfertigung wurde eine Spannvorrichtung mit Niederhaltern bzw. mit einer festen Einspannung (angeschweißte Vierkantprofile) der V-Nähte von $t = 20 \text{ mm}$ konzipiert. Dies war zwingend notwendig um für die Durchführung der Zugversuche den Winkelverzug möglichst gering zu halten. Die durch Auftragschweißungen und Vorversuche ermittelten Prozessparameter und Vorwärmtemperaturen wurden während der Versuchskörperfertigung messtechnisch dokumentiert. Parallel erfolgte für jede Schweißraupe an zwei Messstellen eine $t_{8/5}$ -Messung mittels Thermoelemente. Zum einen dienten die $t_{8/5}$ -Messungen der Kontrolle zur Einhaltung der Empfehlungen der Grundwerkstoffhersteller. Diese sollten nicht unter 5s liegen. Zum anderen sollten durch die $t_{8/5}$ -Zeiten ggf. Zusammenhänge zur Tragfähigkeit untersucht werden. Zur Gewährleistung der Wärmeführung bzw. der Abkühlgeschwindigkeit erfolgte das notwendige Vor- und Zwischenwärmens induktiv und autogen. Bild 1 zeigt die Versuchskörperfertigung inklusive induktiver Vorwärmung am Beispiel einer V-Naht bei 20 mm Materialdicke.



Bild 1. Induktive Vorwärmung und Fertigung einer Schweißprobe (Blechdicke $t = 20 \text{ mm}$; V-Naht)

Neben den Zugversuchen wurden in Anlehnung an die Verfahrensprüfung nach DIN EN ISO 15614-1 Makroschliffe und Härtemessungen in HV10 durchgeführt. Im Sinne der DIN EN ISO 5817 Bewertungsgruppe B konnten keine inneren Unregelmäßigkeiten nachgewiesen werden. Ebenso wurden die zulässigen Höchstwerte von 380 HV bzw. 450 HV eingehalten.

3 Dehnungsanalyse mittels eines optischen Messverfahrens

An ausgewählten Zugversuchsproben wurde zusätzlich eine Messung lokaler Dehnungen auf der Probenoberfläche mittels der optischen 3D Dehnungsanalyse auf Basis der Grauwert-Korrelation (DIC) durchgeführt. Dies ermöglicht eine genaue Darstellung der auftretenden Dehnung während des gesamten Zugversuches. Es kann mit Hilfe des optisch gemessenen Dehnungsverlaufs der Bereich der Dehnungskonzentration bis zum Auftreten des Versagens abgebildet werden. Für die Messungen wurde das GOM Aramis SRX System eingesetzt. Die Querschnitte der Versuchsproben wurden mit einer mattweißdeckenden Grundsicht versehen, um mit einem mattschwarzen Graphitspray ein stochastisches Grauwertmuster zu erzeugen. Die Messfrequenz wurde auf 6 Hz bei den Zugversuchen, die mit einer Prüfgeschwindigkeit nach DIN EN 6892-1 (2017-02) für Blechdicke $t = 10 \text{ mm}$ bzw. 15 mm mit $v = 2 \text{ mm/min}$ und für Blechdicke $t = 20 \text{ mm}$ mit $v = 3 \text{ mm/min}$ durchgeführt worden sind, festgelegt. Exemplarisch ist für drei ausgewählte Versuchsproben mit den Blechdicken $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$ das Dehnungsfeld zum Beginn der Risseinleitung in den nächsten Bildern dargestellt. In einen ersten Versuch wurde eine Serie von V-Nähten mit Nahtüberhöhung experimentell untersucht. Im Bild 2 ist das Dehnungsfeld in X-Richtung während des Zugversuches über den Querschnitt dargestellt. Dabei wurde die anfänglichen Dehnungskonzentrationen, die sich im Übergang zur Wärmeeinflusszone (WEZ) ausgeprägt hatten, in den Grundwerkstoff umgelagert. Die weiteren Zugversuche wurden ohne Nahtüberhöhung durchgeführt, um den Einfluss der Nahtvorbereitung und Schweißzusatzfestigkeiten insbesondere beim Bruch der Probe besser zu erkennen.

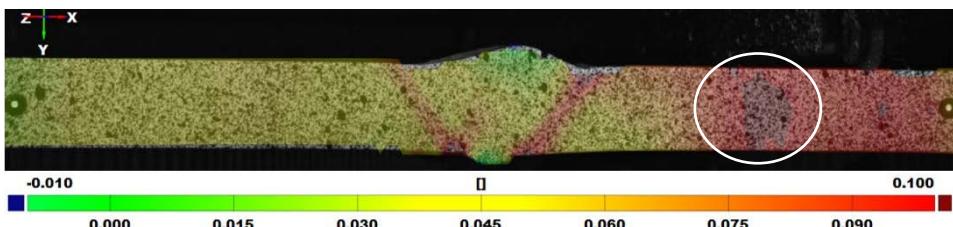


Bild 2. Dehnung in X-Richtung während des Zugversuches, Blechdicke $t = 10 \text{ mm}$, V-Naht mit Nahtöffnungswinkel 50° , Grundwerkstoff S690, Schweißzusatzwerkstoff G69.

In den zeitlichen Bildaufnahmen des Dehnungsfeldes in X-Richtung lassen sich die unterschiedlichen Nahtvorbereitungen sehr gut erkennen. Entlang der roten Bereiche im Bild 3 für die DV-Naht ist die typische Ausprägung der WEZ für die Schweißnaht zu sehen. Im Fall der DHV-Naht sind in diesem Beispiel die roten Bereiche weniger stark ausgeprägt, um die Nahtvorbereitung eindeutig zu erkennen, siehe Bild 3. Ebenfalls konnte in den Zugversuchen der Schweißnähte der Einfluss unterschiedlicher Schweißzusatzwerkstoffen im lokalen Dehnungsverhalten messtechnisch sehr erfasst werden, siehe Bild 4. Aus den experimentellen Untersuchungen konnte der Versagensort für jede analysierte Schweißnaht festgehalten werden und das Verständnis bezüglich des Verhaltens der Schweißnähte im Zugversuch verbessert werden.

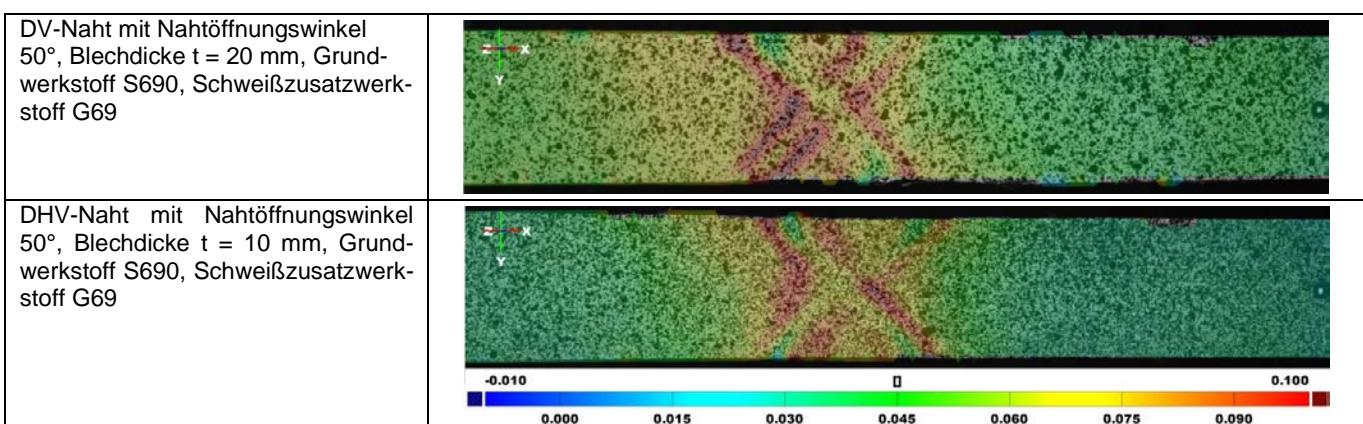
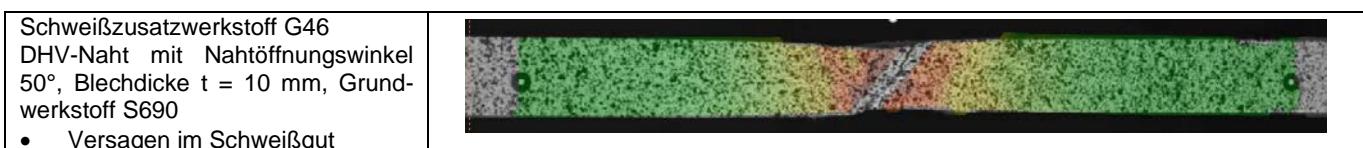


Bild 3. Einfluss der Nahtvorbereitung auf das Dehnungsfeld.



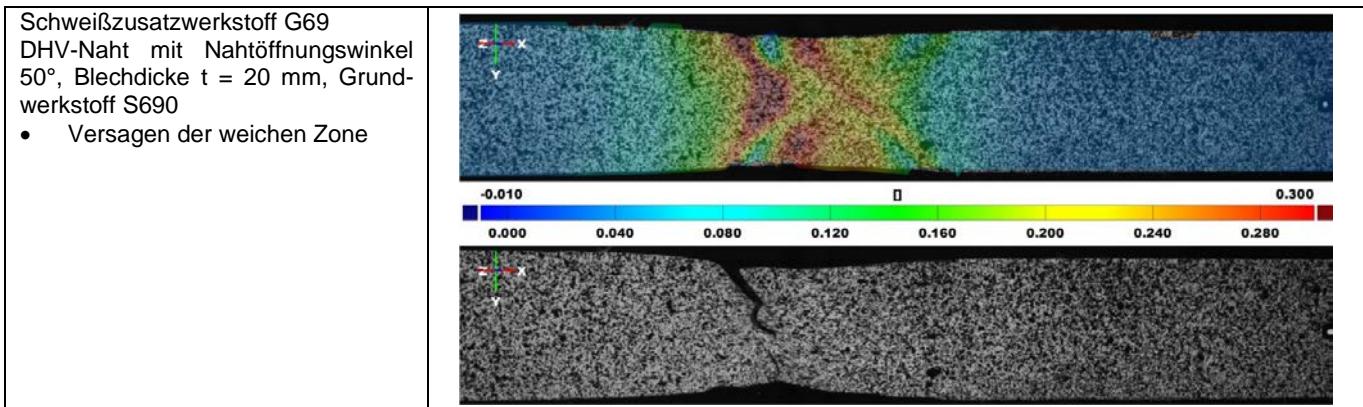


Bild 4. Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffes.

4 Ergebnisse der Experimentellen Untersuchungen an Stumpfnahtverbindungen höherfester Stählen

4.1 Einfluss des auftretenden Versagens auf die Tragfähigkeit einer Stumpfnahtverbindung

Der Literatur [3], [4], [5] kann bereits entnommen werden, dass vor allem ein Versagen in der WEZ als kritischer Versagensmodus zu behandeln ist, da hier gerade bei höherfesten Stählen eine reduzierte Tragfähigkeit hervorgeht. Auch im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [1] konnte eine reduzierte Tragfähigkeit an Matching-Verbindungen der Stahlgüte S690QL in Folge eines Versagens in der WEZ festgestellt werden.

Da ein frühzeitiges Versagen einer Stumpfnahtverbindung ein gewisses Sicherheitsrisiko darstellt, ist eine entsprechende Anpassung des derzeit gültigen Bemessungskonzeptes nach prEN 1993-1-8 [2] dringend erforderlich.

In Bild 6 sind die aus den experimentellen Untersuchungen des Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [1] ermittelten Tragfähigkeiten der Verbindungen am S690QL in Abhängigkeit des auftretenden Versagens aufgeführt. Die dargestellten Tragfähigkeiten zeigen deutlich, dass diese durch das auftretende Versagen beeinflusst werden. Tritt das Versagen im Schweißgut (SG) oder in der WEZ auf, liegt die Tragfähigkeit der Verbindung teilweise stark unter der Festigkeit des Grundwerkstoffes. Gesondert zu betrachten sind in Bild 6 die Undermatching-Verbindungen. Aufgrund der geringeren Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffes, führt ein Versagen im SG zu einer wesentlich geringeren Tragfähigkeit der Naht im Vergleich zum Grundwerkstoff.

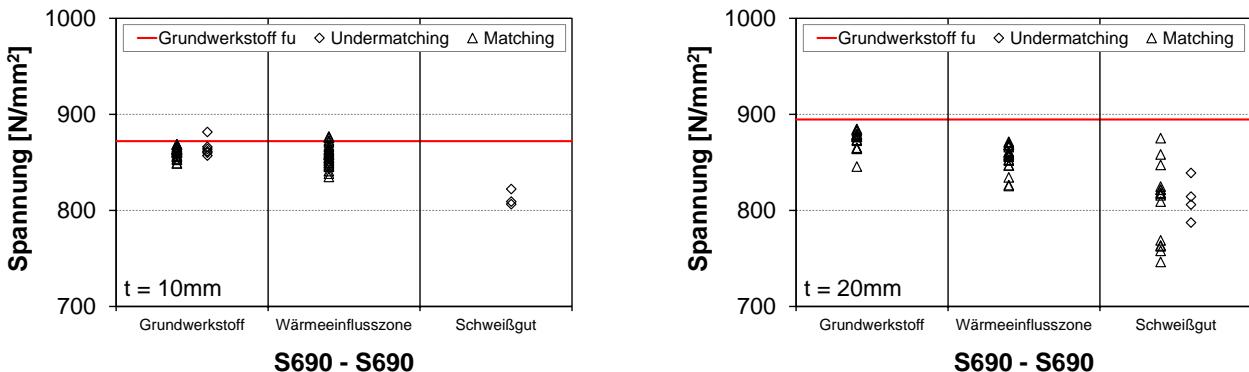


Bild 5. Tragfähigkeit von Stumpfnahtverbindungen der Stahlgüte S690QL in Abhängigkeit des auftretenden Versagens.

Im Unterschied zu den Stumpfnahtverbindungen der Güte S700MC und S460ML wurden die Verbindungen der Güte S690QL unter Verwendung variierender Festigkeiten des Schweißzusatzwerkstoffes als auch variierenden Energieeinträgen untersucht. Da die Overmatching-Verbindungen der am Stahl der Güte S700MC, noch die Matching-Verbindungen der Güte S460ML ausschließlich im Grundwerkstoff versagten, war zu prüfen, welche Faktoren das Versagen in der WEZ und dem SG begünstigen. Dazu wurden im Rahmen des Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [1] Folgende Einflüsse näher untersucht:

- Einfluss aus der Festigkeit des Grundwerkstoffs,
- Einfluss aus der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffes,
- Einfluss aus dem Energieeintrag während des Schweißprozesses,

Die Ergebnisse werden im Folgenden kurz dargestellt. Für eine detaillierte Erläuterung sei hier auf den Schlussbericht des Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [1] verwiesen.

4.2 Einfluss der Festigkeit des Grundwerkstoffs auf das Versagen einer Stumpfnahtverbindung

Die Verbindungen der Stahlgüten S700MC wurden als Overmatching-Verbindung ausgeführt und zeigten während der Versuchsdurchführung ausschließlich ein Versagen im Grundwerkstoff. Die experimentell untersuchten Stumpfnahtverbindungen der Stahlgüte S690QL wiesen hingegen ein variierendes Versagen auf. Des Weiteren versagten

die Verbindungen der Stahlgüte S460ML, ausgeführt als Matching-Verbindung, ebenfalls ausschließlich im Grundwerkstoff, siehe Bild 5.

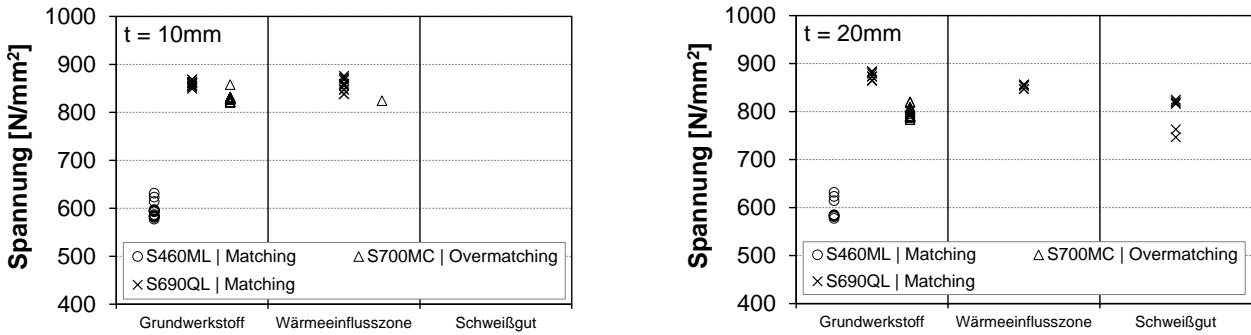


Bild 6. Einfluss des Grundwerkstoffs auf das auftretende Versagen einer Stumpfnahtverbindung.

Wie bereits in Bild 5 dargestellt, konnte in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs ein unterschiedliches Versagen festgestellt werden. Entsprechend der Literatur ist das kritische Versagen in der WEZ auf eine während des Schweißprozess erzeugte Erweichung des Grundwerkstoffs zurückzuführen. Ob und in welcher Größe eine entsprechende Erweichung eintritt, hängt jedoch stark vom Grundwerkstoff selbst ab. Daher wurde anhand der Härtemappings untersucht, ob eine solche Erweichung in der WEZ der geprüften Stumpfnahtverbindungen vorhanden war. Es konnte festgestellt werden, dass sich keine Erweichung bei Stählen der Güte S460ML einstellte und somit keine Gefahr eines Versagens in der WEZ besteht, vgl. Bild 7. In der WEZ der Verbindungen an S690QL als auch S700MC konnte eine Erweichung (vgl. Bild 7) festgestellt werden. Der erweichte Bereich der Overmatching-Verbindungen am S700MC fiel dabei wesentlich größer aus, das Versagen trat jedoch hier ausschließlich im Grundwerkstoff auf. Somit ist als weiterer möglicher Einfluss die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs zu untersuchen.

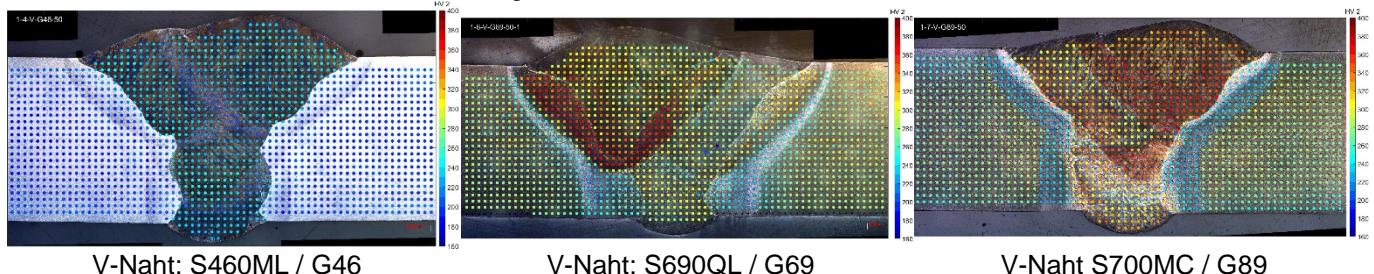


Bild 7. Härtemappings von Stumpfnahtverbindungen unterschiedlicher Grundwerkstoffe.

4.2 Einfluss aus der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf das auftretende Versagen

Aus den experimentellen Untersuchungen der Stumpfnahtverbindungen konnte ein Einfluss aus der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs festgestellt werden. Den Diagrammen aus Bild 8 kann entnommen werden, dass gerade Verbindungen, geschweißt mit einem Overmatching Schweißzusatzwerkstoff, ausschließlich im Grundwerkstoff versagen. Hingegen zeigten Verbindungen, geschweißt mit einem Undermatching Schweißzusatzwerkstoff, ein vermehrtes Versagen im SG. Die Verbindungen an Stählen der Güte S690QL mit einem passenden Schweißzusatzwerkstoff (Matching), zeigten jedoch ein variierendes Versagen. Da diese mit unterschiedlichen Energieeinträgen geschweißt wurden, konnte daraus ein weiterer Einfluss aus dem Energieeintrag auf das auftretende Versagen abgeleitet werden.

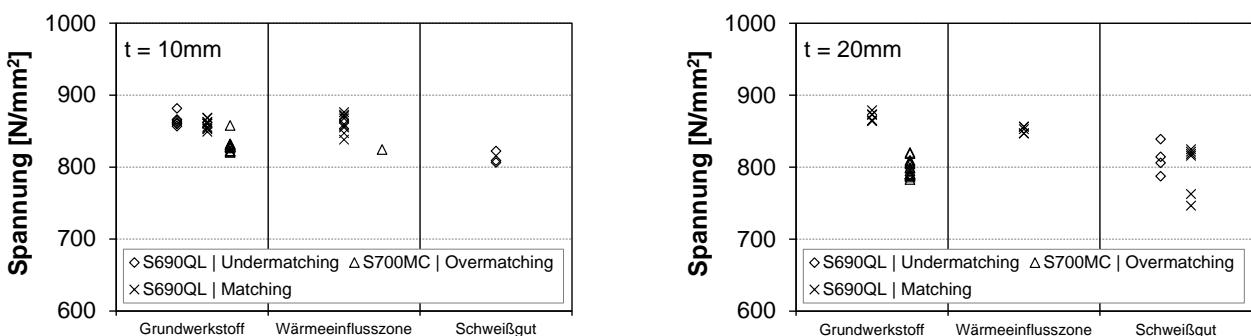
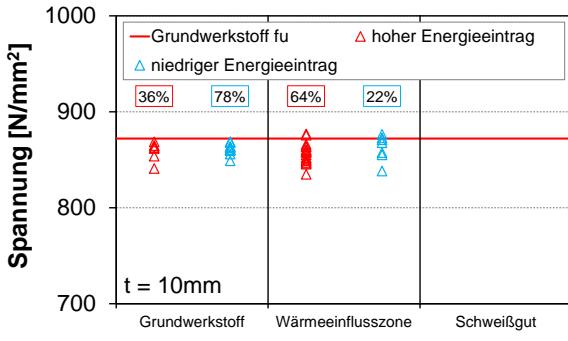


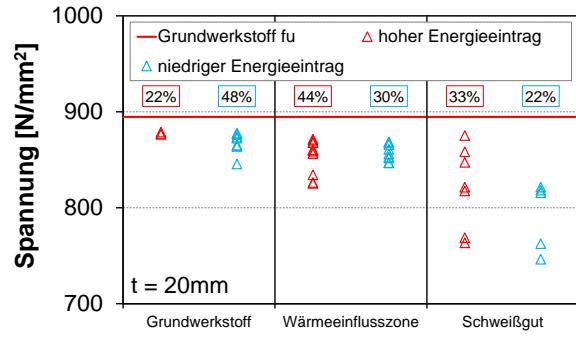
Bild 8. Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auf das auftretende Versagen einer Stumpfnahtverbindung.

4.3 Einfluss des Energieeintrags auf das auftretende Versagen

In Bild 9 sind die Tragfähigkeiten der Matching-Verbindungen der Stahlgüte S690QL in Abhängigkeit des auftretenden Versagens und der eingebrachten Streckenenergie während des Schweißprozesses dargestellt. Es zeigt sich, dass ein wesentlich größeres Risiko eines Versagens in der WEZ als auch im SG vorliegt, wenn die Stumpfnahtverbindung mit einem hohen Energieintrag gefertigt wurde. Somit kann auch hier ein Einfluss aus dem Energieintrag auf das auftretende Versagen festgestellt werden.



S690 - S690



S690 - S690

Bild 9. Einfluss des Energieeintrags auf das auftretende Versagen einer Stumpfnahtverbindung.

4.4 Vorschlag eines Bemessungsmodells für Stumpfnahtverbindungen höherfester Stähle

In den vorherigen Abschnitten wurden die im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [1] ermittelten Haupteinflussgrößen auf die Tragfähigkeit einer Stumpfnahtverbindung höherfester Stähle vorgestellt. Hierzu zählen die Festigkeit des Grundwerkstoffs und des Schweißzusatzwerkstoffs als auch der Energieintrag während des Schweißprozesses. Die genannten Haupteinflüsse haben vor allem Auswirkungen auf die Entstehung und Ausbildung einer Weichen Zone im Bereich der Wärmeeinflusszone des Grundwerkstoffs. Hier ist im ersten Schritt der Grundwerkstoff ausschlaggebend, da in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs die Eigenschaften der Weichen Zone als auch der gesamten Wärmeeinflusszone stark variieren. Die Variation hängt dabei ebenfalls von der eingebrachten Energie während des Schweißprozesses ab. Des Weiteren wird das auftretende Versagen ebenfalls durch den verwendeten Schweißzusatzwerkstoff beeinflusst. So konnte beispielsweise bei Undermatching-Verbindungen ein Versagen im SG beobachtet werden, während Overmatching-Verbindungen überwiegend im Grundwerkstoff versagten.

Durch ein ungünstiges Zusammenwirken der drei Einflussgrößen kann es zu einem kritischen Versagen in der Wärmeeinflusszone und einer dadurch ggf. reduzierten Tragfähigkeit kommen. Daher wurde ein neuer Bemessungsansatz, der neben dem bisher gewünschten Versagen im Grundwerkstoff auch ein Versagen in der Wärmeeinflusszone sicher abbilden kann, erarbeitet.

Durch eine getrennte Betrachtung der einzelnen Versagensmodi, konnte in einem ersten Schritt jedem Versagen eine gewisse Zugfestigkeit bzw. Tragfähigkeit zugeordnet und anschließend in einem Bemessungsmodell zusammengefasst werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Bemessungsmodell nicht mehr als Bauteilnachweis sondern als Verbindungs nachweis gilt und daher als Eingangswerte die Zugfestigkeiten und der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M2} = 1,25$ anzusetzen sind.

Anhand des neuen Bemessungsmodells wird zusätzlich die Möglichkeit gegeben, die in der Norm prEN 1993-1-8 [2] erlaubten Undermatching-Verbindungen ebenfalls sicher bemessen zu können. Gerade bei Undermatching-Verbindungen konnte in den Untersuchungen ein vermehrtes Versagen im SG beobachtet werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [1] konnte somit ein Bemessungsansatz erarbeitet werden, der als Nachweis einer Stumpfnahtverbindung höherfester Stählen gegen die drei unterschiedlichen Versagensmodi:

- Versagen im Grundwerkstoff,
- Versagen in der Wärmeeinflusszone,
- Versagen im Schweißgut,

angewendet werden kann.

Mit Hilfe einer statistischen Auswertung und unter Verwendung weiterer der Literatur entnommener Versuchsergebnisse sowie einer Verträglichkeitsprüfung erfolgte anschließend die Validierung des Bemessungskonzeptes entsprechend Gleichung (1). Eine detaillierte Erläuterung der statistischen Auswertung kann dem Schlussbericht des Forschungsvorhabens [1] entnommen werden.

$$\sigma_{w,Rd} = \frac{x \cdot 0,85 \cdot f_{u,GW} + 0,15 \cdot f_{u,SZW}}{\beta_{bw} \cdot \gamma_{M2}} \quad (1)$$

mit

x	Abminderungsfaktor der Erweichung in der WEZ in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs nach Tabelle 1
β_{bw}	Beiwert Tabelle 1
$f_{u,GW}$	Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs

Tabelle 1. Abminderungsfaktoren der Erweichung x und Beiwert β_{bw} in Abhängigkeit der Stahlsorte.

Evaluationsgruppe	x [-]	β_{bw} [-]
S460ML	1,00	0,85
S500MC	1,00	0,80
S690QL	0,95	0,85
S700MC	0,90	0,85
S960QL	0,90	0,95

Die in der Tabelle 1 angegebenen Werte sind noch in der Auswertung und somit noch nicht endgültig. Im Schlussbericht könnten noch etwas angepasst Werte zu finden sein.

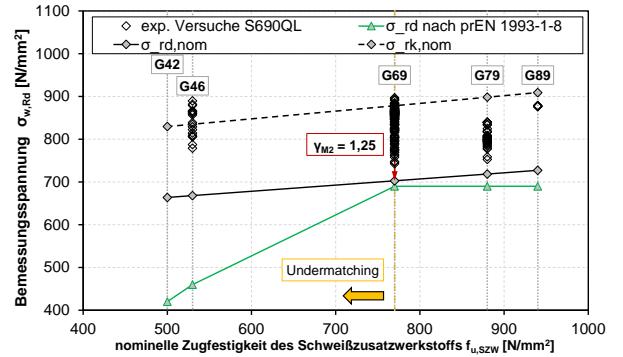
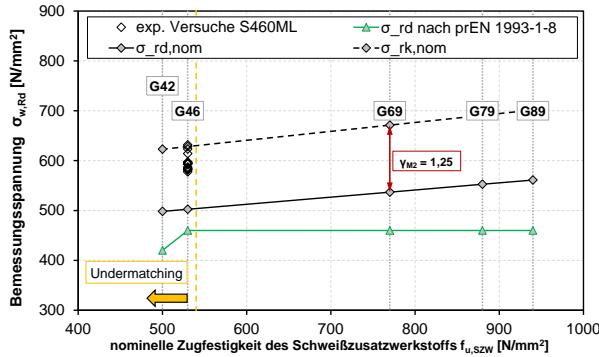


Bild 10. Gegenüberstellung des neuen Bemessungsmodells und dem derzeit gültigen Bemessungsmodells nach prEN1993-1-8 [2] für S460ML und S690QL

Im Bild 10 und Bild 11 sind noch einmal die aus dem neuen Bemessungsmodell abgeleiteten Bemessungsgrenzspannungen σ_{rd} den aus dem derzeit gültigen Bemessungskonzept nach prEN 1993-1-8 [2] ermittelten Werten gegenübergestellt. Gerade für Undermatching-Verbindungen bietet das angepasste Modell nach Gleichung (1) im Gegensatz zu dem derzeit gültigen Konzept einen klar definierten Bemessungsansatz und liefert darüber hinaus wesentlich wirtschaftlichere Lösungen für Stumpfnähte höherfester Stähle. Auch für Matching- und Overmatching, liefert das Bemessungsmodell gute Lösungen. Zu untersuchen ist jedoch noch die Gültigkeit des Bemessungsmodells für Undermatching-Verbindungen der Stahlgüte S700MC, da hier keine Versuchsergebnisse vorlagen.

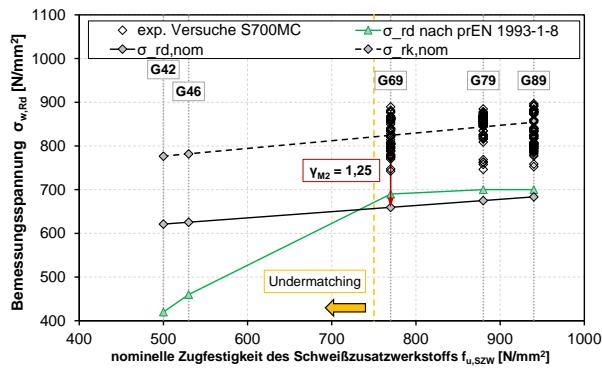


Bild 11. Gegenüberstellung des neuen Bemessungsmodells und dem derzeit gültigen Bemessungsmodells nach prEN1993-1-8 [2] für S700MC

4.5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [1] wurden Untersuchungen an durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle durchgeführt. Anhand der experimentellen und der numerischen Versuchsergebnisse konnte ein erster Vorschlag für ein angepasstes Bemessungsmodell entwickelt werden, das eine wirtschaftliche und sichere Bemessung von Stumpfnähten höherfester Stähle ermöglicht. Die hier aufgeführten Beiwerte entsprechen einer ersten Empfehlung und sind derzeit noch in der Überarbeitung auf der Grundlage einer noch größeren Versuchsdatenbasis. Das endgültige Modell kann dem Schlussbericht des Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [1]

entnommen werden. Darüber hinaus liefert das angepasste Modell im Gegensatz zum derzeit gültigen Konzept nach prEN1993-1-8 [2] klar definierte Regeln zur Bemessung von Undermatching-Verbindungen, die zu wesentlich wirtschaftlicheren Anschlüssen führen. An Stählen der Güte S700MC ist jedoch dabei noch die Gültigkeit von Undermatching-Verbindungen zu überprüfen.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nummer 19.470 BG/DVS-Nummer 09.083 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 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.

Die Autoren danken den Mittelgebern, der Forschungsvereinigung und dem projektbegleitenden Ausschuss für die Unterstützung.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schrifttum

- [1] Bergmann, J. P.; Hildebrand, J.; Kuhlmann, U.; Spiegler, J.; Keitel, S.; Mückenheim, U. (2017–2019) Tragfähigkeit von Stumpfnähten höherfester Stähle im Stahlbau. Forschungsvorhaben Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF), DVS-Nr.: 09.083, Laufzeit: 1. Apr. 2017–31. März. 2020.
- [2] CEN/TC250/SC3/WG8N189, prEN 1993-1-8: Final draft – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, 2020.
- [3] Björk, T.; Halme, T.: Statistical analysis for tension tests of welded S500 – S700 high strength steels according to Eurocode EN 1990.
- [4] Maurer, W.: Untersuchung der Auswirkung einer Weichen Zone auf die Festigkeitseigenschaften von hochfesten Schweißverbindungen. Graz, Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, Dissertation, 2014.
- [5] Collin, P.; Möller, M.; Nilsson, M.; Törnblom, S: Undermatching Butt Welds in High Strength Steel, IABSE Symposium Report, v96 n9, S. 96-106, 2009.