

Erhöhung der Tragfähigkeit geschweißter I-Träger aus hochfestem Baustahl durch verbesserte Ansätze zur Berücksichtigung von Eigenspannungen

Benjamin Launert, Hartmut Pasternak (BTU Cottbus)
Michael Rhode, Arne Kromm, Thomas Kannengießer (BAM, Berlin)

In vielen Bereichen des modernen Stahlbaus kommen geschweißte Vollwandträger, wie I-Träger zum Einsatz. Im Gegensatz zu Walzprofilen können bspw. Bauhöhe, Querschnittsform und Blechdicke an die Beanspruchung angepasst werden, wodurch sich wirtschaftliche Vorteile erzielen lassen. Dabei werden heutzutage auch hochfeste Feinkornbaustähle (bis S700) eingesetzt. Zur verbesserten Ausnutzung des Tragfähigkeitspotenzials geschweißter Profile aus diesen Stählen existieren bisher keine Modelle zur Erfassung der schweißfertigkeitsbedingten Eigenspannungen. Diese Daten werden durch z. T. konservative Annahmen angenähert (siehe Abbildung 1-a und -b). Die potentielle Tragfähigkeit wird daher in der Regel unterschätzt. Vereinfachte baupraktische Verfahren, zum Beispiel sog. „Ersatzstabnachweise in DIN EN 1993 [1], erfassen die Eigenspannungen über geeignete Knicklinienzuteilungen. Für geschweißte Profile erfolgte hier bisher keine materialabhängige Einteilung. Dies heißt, dass Fließgrenze und Eigenspannungen in einem festen Verhältnis stehen müssen. Dies ist real jedoch nicht gegeben, wie bspw. Abbildung 1-c zeigt. Die Festlegungen hinsichtlich der anzuwendenden Knicklinie beeinflussen jedoch die zu nutzende Blechdicke und somit in erheblichem Maße auch die Fertigungskosten. Als Optimierungsstrategie wurden in diesem Forschungsprojekt daher unterschiedliche anwendungsorientierte Modellansätze entwickelt, welche mithilfe nichtlinearer Traglastberechnungen, langfristig die höhere Ausnutzung von Tragfähigkeitsreserven ermöglichen sollen.

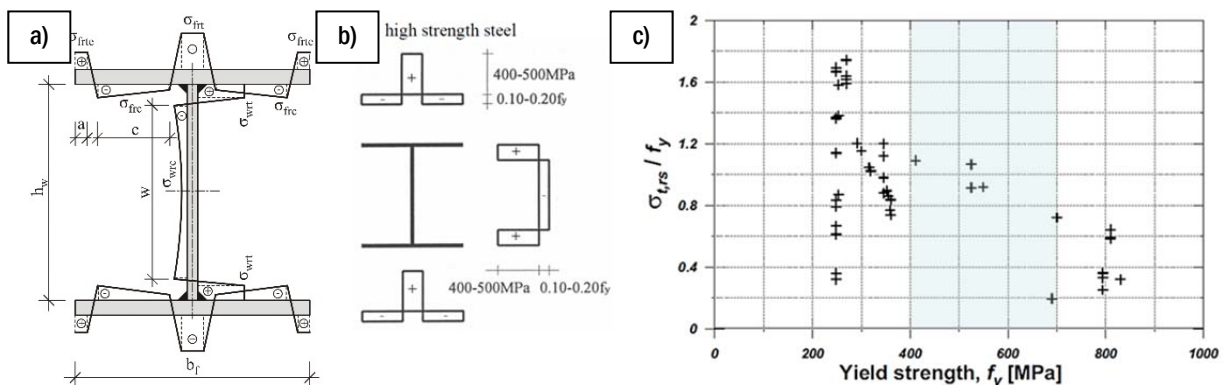


Abbildung 1: (a) Typische Eigenspannungsverteilung in geschweißtem I-Träger [2], (b) Approximation für hochfeste Stähle [3], (c) Zusammenhang zwischen Fließgrenze und maximaler Zugeigenspannung [4]

Experimentell wurde hierzu der Eigenspannungszustand von geschweißten Strukturen (am Beispiel der im Stahlbau häufig verwendeten I-Träger) aus zwei gängigen Baustählen (S355J2+N und hochfester Feinkornbaustahl S690QL) erfasst und durch numerische Schweißstruktursimulationen ergänzt. Anschließend erfolgte die Ableitung eines vereinfachten Berechnungsmodells zur weiteren Berücksichtigung in nichtlinearen Tragfähigkeitsberechnungen. Die Erkenntnisse sollen zukünftig in einen entsprechenden Anwenderleitfaden (herausgegeben durch das TC 8 der ECCS [5]) einfließen und als Orientierung einer Anpassung der Knicklinien nach [1] dienen.

Die genannten Stähle wurden dazu in zwei typischen Dickenkombinationen von 25/15 mm und 20/10 mm (Gurt- und Stegbleche) zu I-Trägern unter industrienahen Fertigungsbedingungen mittels Metall-Aktivgasschweißen (MAG) gefügt. Die dabei entstehenden Wärmefelder wurden experimentell über Thermoelemente während des Schweißens erfasst. Die Eigenspannungen wurden nach dem Schweißen durch eine Kombination aus

mechanischem Zerlegen (Abbildung 2-b) und anschließender Röntgendiffraktometrie (XRD, siehe Abbildung 2-c) an der Forschungsstelle 2 (Fachbereich 9.4, BAM Berlin) gemessen. Dabei wurde beim mechanischen Zerlegen die elastische Rückfederung durch Dehnungsmessstreifen (DMS) aufgenommen. Der Einfluss der industriell üblichen Brennschnittkantenvorbereitung der Bleche auf die finalen Eigenspannungszustände wurde zusätzlich experimentell an kleinmaßstäblichen Proben untersucht. Die experimentellen Daten dienen dann als Eingangswerte für die Modellentwicklung (Abbildung 2-d und -e) und die numerischen Simulationen an I-Trägern durch die Forschungsstelle 1 (LSH, BTU Cottbus).

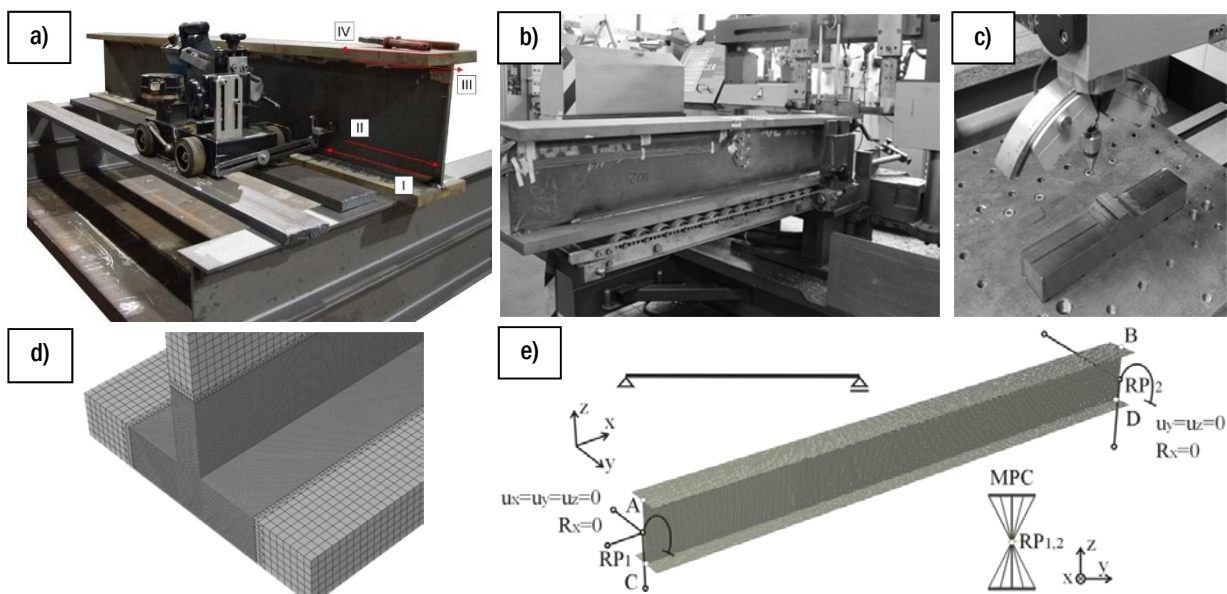


Abbildung 2: I-Träger: (a) Fertigung [6], (b) Mechanisches Zerlegen, (c) XRD-Messung am zerlegten Bauteil, (d) FE-Modell I-Träger - Detail [6], (e) exemplarisches Modell und Lagerungsbedingungen für Tragfähigkeitsberechnung [9]

Die experimentellen Ergebnisse (Abbildung 3-a) zeigten, dass beim mechanischen Zerlegen Eigenspannungen herausgelöst wurden, die durch die Messung der nahtnahen Zugeigenspannungen mittels XRD ergänzt wurde [7]. Dabei zeigte der S690QL überwiegend besseres Verhalten als der S355J2+N. Dieses äußerte sich u.a. in abgesenkten Zugeigenspannungen im Verhältnis zur jeweiligen Fließgrenze (Abbildung 3-a). Die maximalen Eigenspannungen wurden zumeist in der Wärmeeinflusszone (WEZ) der Schweißnaht gemessen, unabhängig von den Schweißparametern oder dem Werkstoff. Die baupraktische Annahme maximaler Eigenspannungen in Höhe der Fließgrenze wurde nur in Einzelfällen (und nur beim S355J2+N) bestätigt. Die experimentellen Ergebnisse zeigten auch reduzierte relative Druckeigenspannungswerte beim S690QL. Dies zeigt die notwendige weitere Optimierung bei der Wahl der Bewertungsansätze für Eigenspannungen auf die Tragfähigkeit.

Die numerischen Schweißsimulationen erfolgten in Simufact.Welding für die Simulationsmodelle mit „klassischem“ Schweißsimulationsansatz. Diese Modelle wiesen überwiegend gute experimentelle Übereinstimmungen auf, teilweise aber auch größere Abweichungen. Die Tendenzen aus den Experimenten wurden dabei jedoch in allen Fällen in den numerischen Rechnungen richtig vorhergesagt. Allerdings sind die Berechnungszeiten für praktische Zwecke unbrauchbar. Insbesondere sind die Bauteilgrößen der für die Tragfähigkeitsberechnungen relevanten Trägerlängen erheblich größer. Für die untersuchten Trägerschweißungen boten stattdessen elastische Berechnungen mittels sog. „Eigenspannungsquellen“ in Form von Anfangsdehnungen eine sinnvolle Alternative. Die Anfangsdehnungsverteilung wurde dabei an Querschnittsmodellen mit Annahme eines verallgemeinerten ebenen Verzerrungszustands berechnet (exemplarisch Abbildung 3-b und -c) [8,9].

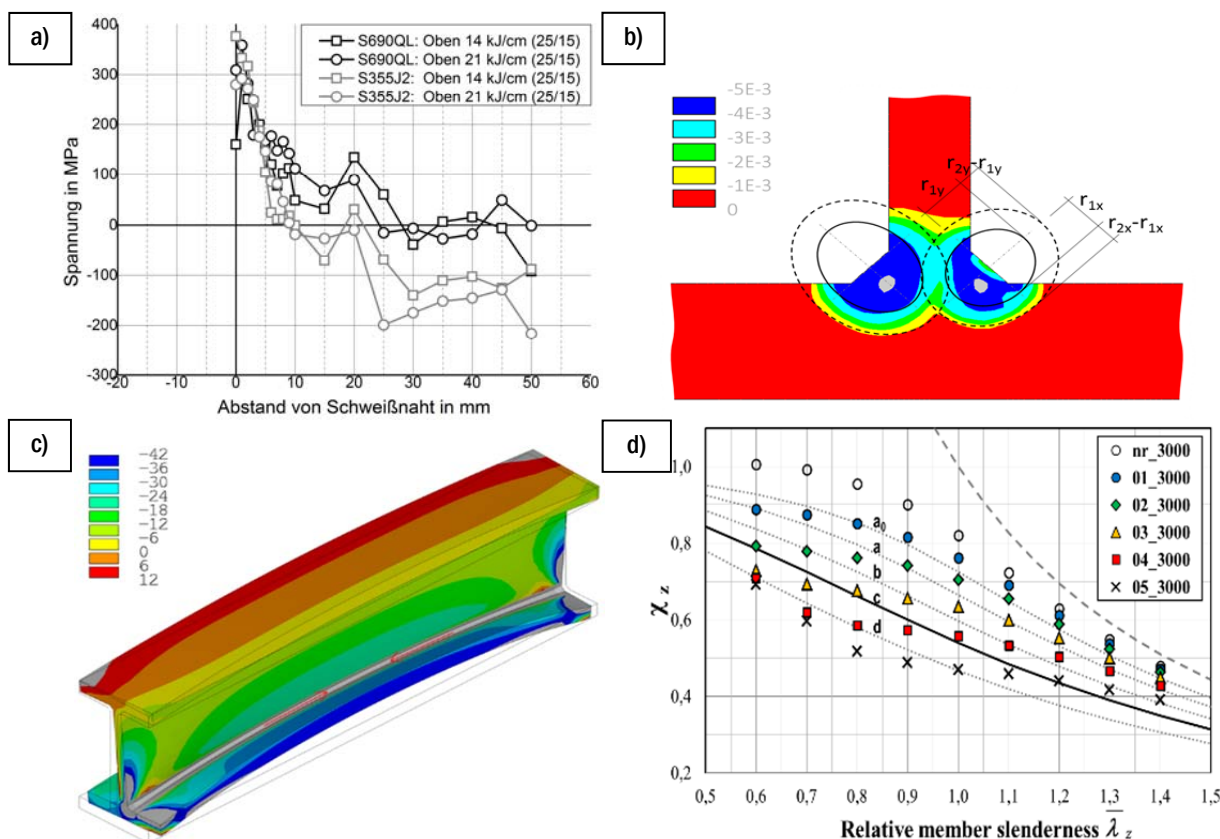


Abbildung 3: Geschweißte I-Träger: (a) Experimentell bestimmte Längseigenstressen – Summe aus DMS- und XRD-Messung (exemplarisch nur Gurt), (b) Angenommene (vereinfachte) Verteilungsfunktion der plastischen Dehnungen, (c) Numerisch berechnete Eigenstressen mittels Anfangsdehnungen, hier nach dem Schweißen der Naht 1, (d) Ergebnisse einer Parameterstudie mit parametrisierten Eigenstressen [9]

Eine abschließende Bewertung der erzielbaren Genauigkeiten war bisher nur begrenzt möglich. Die Datendichte der durch die Zerlegung gewonnenen Ergebnisse war dafür zu begrenzt. Zusätzlich lieferte die überlagerte Messung mit XRD teilweise Ergebnisse, die numerisch nur zum Teil reproduziert werden konnten. Neben experimentellen Einflüssen, entstanden etwaige Abweichungen in den Simulationen auch durch die verfügbaren Materialdaten selbst. Insbesondere für den S690QL existieren bisher zu wenige belastbare Materialkennwerte. Dazu unterstützende Versuche, konnten leider im Rahmen dieses Vorhabens nicht mit durchgeführt werden.

Hinsichtlich einer vereinfachten Berechnungsvorgehen zur Berücksichtigung der Schweißspannungen in entsprechenden Tragfähigkeitsberechnungen (exemplarisch Abbildung 3-d) konnten jedoch wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Die Methode mit Anfangsdehnungen ist geeignet zukünftig auch im Stahlbau eingesetzt zu werden. Die hier verwendeten Modelle arbeiten waren dabei vorrangig der Berechnung der Längsspannungen gewidmet. Sie eignen sich daher bevorzugt zur Anwendung an ausreichend langen Schweißträgern mit Längsnähten. Weitere Modellmodifikationen zur Vereinfachung bzw. Modellimplementierung in die strukturmechanische Berechnung an großen Komponenten wurden vorgestellt. Abschließend erfolgte die Einstufung in eine (mögliche) Knicklinie auf Basis der mittels GMNIA (geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Imperfektionen) Berechnungen ermittelnden Tragfähigkeiten unter Berücksichtigung dieser Eigenstressen. Die anfängliche Hypothese einer günstigeren Knicklinie eines S690QL (im Vergleich zum S355J2+N) wurde dabei rechnerisch bestätigt. Die experimentelle Validierung der Tragfähigkeitsberechnungen durch entsprechende Trägerfähigkeitsversuche steht zurzeit noch aus und ist aufgrund der festgestellten numerischen Reserven dringend weiter zu verfolgen.

Das IGF-Vorhaben IGF-Nr. 18104 BG (P 1035) Erhöhung der Tragfähigkeit geschweißter I-Träger aus hochfestem Baustahl durch verbesserte Ansätze zur Berücksichtigung von Eigenspannungen der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. 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.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- [1] DIN EN 1993-1-11 (2010) Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl
- [2] D. E. Chernenko und D. J. L. Kennedy, „An analysis of the performance of welded wide flange columns,“ Canadian Journal of Civil Engineering, Bd. 18, Nr. 4, pp. 537-555, 1991.
- [3] D. Beg und P. Kozlevčar, „Residual stresses in welded elements made of high strength steel, Doc. No. TC8-2007-006,“ in ECCS TC8 Meeting, Ghent, 2007.
- [4] M. Clarin, High Strength Steel: Local Buckling and Residual Stresses, Licentiate Thesis, Sweden: Luleå University of Technology, 2004.
- [5] Technical Committee 8 – Stability. European Convention for Constructional Steelwork (dt.: Technisches Komitee 8 – Stabilität. Europäische Konvention für Stahlbau)
- [6] B. Launert, M. Rhode, H. Pasternak, Th. Kannengießer (2016) Welding residual stresses in high-strength steels. Experimental results. International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Timisoara, Rumänien. Conference Proceedings, S. 517-524, ISBN: 978-92-9147-133-1
- [7] A. Kromm, M. Rhode, B. Launert, J. Dixneit, Th. Kannengießer, H. Pasternak (2017) Combining Sectioning Method and X Ray Diffraction for Evaluation of Residual Stresses in Welded High Strength Steel Components. Materials Research Proceedings 2: 163-168 (International Conference on Residual Stresses 2016: ICRS-10, Sydney, Australien), DOI: <http://dx.doi.org/10.21741/9781945291173-28>
- [8] B. Launert, M. Rhode, A. Kromm, H. Pasternak, Th. Kannengießer (2017) Residual Stress Influence on the Flexural Buckling of Welded I-Girders. Materials Research Proceedings 2: 109-114 (International Conference on Residual Stresses 2016: ICRS-10, Sydney, Australien), DOI: <http://dx.doi.org/10.21741/9781945291173-19>
- [9] B. Launert, R. Szczerba, M. Gajewski, M. Rhode, H. Pasternak, M. Gizejowski (2017) The buckling resistance of welded plate girders taking into account the influence of post-welding imperfections - Part 1: Parameter study. Materials Testing 59 (1): 47-56. DOI: 10.3139/120.110964

