

Schweißen von Trägern mit dicken Blechen

Teil 1: Trägerfertigung unter Werksbedingungen – Planung, Herstellung und Simulation

H. Pasternak, T. Krausche, B. Launert

Zusammenfassung Im Zuge des AiF-Forschungsprojekts „Schweißen dicker Bleche unter Baustellenbedingungen – Beurteilung des Einflusses auf das Tragverhalten von Montagestößen“ erfolgte eine umfassende Untersuchung zum Tragverhalten bautypischer Montagestöße. Dieser Aufsatz beschreibt – als erster von zwei Teilen – die Ergebnisse der Werksfertigung geschweißter, dickwandiger Vollwandträger. Schwerpunkte bilden die Vorhersage der Fertigungseinflüsse durch das Schweißen mithilfe der Simulation sowie durch bestehende Näherungsansätze und die Bewertung ihrer Auswirkung auf die Tragfähigkeit.

Welding of Girders with Thick Plates Part 1: Fabrication of Girders under Workshop Conditions – Design, Manufacturing and Simulation

Abstract In the course of the AiF research project „Welding of Thick Plates under Site Conditions – Evaluation of the Influence on the Structural Behaviour of Assembly Joints“ a comprehensive study on the behavior of typical assembly joints was performed. This article describes – as the first of two parts – the results of the fabrication of welded, thick plated girders under workshop conditions. Main topics are the prediction of imperfections due to welding by the use of simulation tools as well as simplified models and the evaluation of their impact on the load capacity.

1 Einleitung

Im Stahlbau setzt sich die Fertigung häufig aus zwei Teilabschnitten zusammen: der Herstellung der Einzelteile unter Werksbedingungen und der Montage zur Gesamtstruktur auf der Baustelle. Im Gegensatz zur Werkstattfertigung erfolgt die Endmontage vielfach unter erschwerten Witterungseinfluss. Wind und Niederschlag können durch Einhausung der Schweißstelle ferngehalten werden. Häufig muss jedoch auch bei tiefen Temperaturen im Taubereich oder unterhalb des Gefrierpunkts geschweißt werden.

Im Zuge des gemeinsam vom Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau der BTU und vom Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs) der TU

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak

Dipl.-Ing. Thomas Krausche

M. Sc. Benjamin Launert

Brandenburgische Technische Universität (BTU)

Lehrstuhl Stahl- und Holzbau

K.-Wachsmann-Allee 2

03046 Cottbus

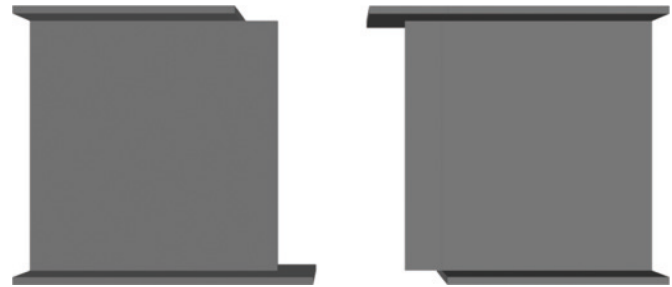


Bild 1. Z-Stoß
Fig. 1. Z-joint

Braunschweig durchgeführten AiF-Forschungsprojekts „Schweißen dicker Bleche unter Baustellenbedingungen – Beurteilung des Einflusses auf das Tragverhalten von Montagestößen“ [1] wurde der Z-Stoß (Bild 1) für die Untersuchung zum Tragverhalten bautypischer Montagestöße gewählt.

Der erste Teil des Beitrags behandelt zunächst die Herstellung der geschweißten Träger als Teil des Montagestoßes und geht auf die Herstellung im Werk, die Schweißsimulation sowie hierauf aufbauend die Bewertung einiger Ingenieurmodelle und die Durchführung der Traglastberechnung ein.

2 Herstellung des Teildemonstrators

Die Herstellung der Einzelteile, im Folgenden als Teildemonstrator (TD) bezeichnet, erfolgte unter Werksbedingungen. Diese Vorgehensweise steht im Einklang mit der Praxis. Die Geometrie der Versuchskörper dokumentiert

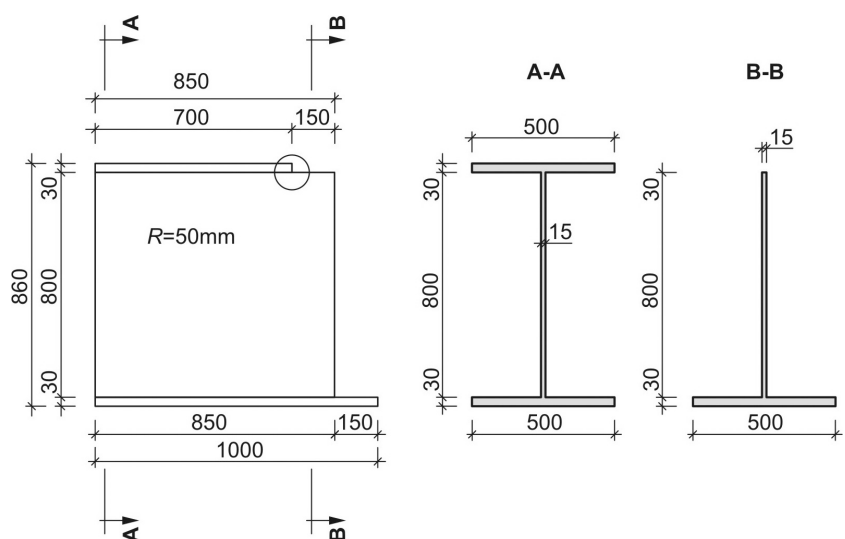


Bild 2. Geometrie des Teildemonstrators
Fig. 2. Geometry of the part demonstrator

Tabelle 1. Übersicht der Fertigungsparameter (1: P355NL2, 2: P460NL2)
 Table 1. Overview of manufacturing parameter (1: P355NL2, 2: P460NL2)

I [A]	U [V]	v_s [cm/min]	v_D [m/min]	Schweißprozess	Schweißposition	Zusatzwerkstoff
1: 280-290	33	1: 28,57	10	135	PB	G4Si1
2: 260-270		2: 23,68				

Bild 2. Das Ausgangsmaterial bilden Bleche aus P355NL2 und P460NL. Es handelt es sich um normalisierend gewalzte Feinkornbaustähle mit erhöhter Kerbschlagzähigkeit (Gütegruppe NL). Die Lieferung der Bleche erfolgte bereits zugesägt und mit Schweißnahtvorbereitung. Ober- und Untergurt haben jeweils eine Dicke von 30mm und eine Breite von 500mm. Der Steg hat eine Dicke von 15mm und eine Höhe von 800mm. Stoßart und Schweißfolge für den Montagestoß in Teil 2 der Veröffentlichung erfordern eine spezielle Vorbereitung im Stoßbereich. Für die Halskehlnähte war die Einhaltung einer Mindestdehnlänge zu beachten. Das Verbinden der Einzelteile zum Teildemonstrator erfolgte durch einlagige Halskehlnähte $a = 5\text{mm}$ gemäß Schweißanweisung. Als Schweißverfahren wurde das Verfahren 135, Metallaktivgasschweißen mit Massivdrahtelektrode, eingesetzt. Eine Übersicht der Prozessparameter zeigt **Tabelle 1**. Insgesamt wurden 12 Teildemonstratoren, jeweils 6 aus P355NL2 und P460NL gefertigt. Die Herstellung erfolgte etappenweise unterteilt nach Materialgüte durch die im projektbegleitenden Ausschuss (PA) vertretene Stahlbau Desau GmbH & Co. KG sowie im Schweißlabor des ifs. **Bild 3**

veranschaulicht exemplarisch die Fertigung eines Trägers aus P355NL2. Aufgrund der Werkstoffgüte war für die Träger aus P460NL die Einhaltung einer Vorwärmtemperatur ($T = 120^\circ\text{C}$) gefordert.

Bild 4 zeigt den Makroschliff einer Laborprobe mit gleichen Schweiß-

parametern. Gemäß DIN EN 25817 erfolgt die Zuordnung zu einer Bewertungsgruppe.

Die Herstellung wurde in beiden Fertigungsstätten messtechnisch begleitet. Für die Temperaturmessung wurden Thermoelemente des Typs K verwendet. Die Verformung wurde durch induktive Wegaufnehmer dokumentiert. Die Messung erfolgte über den gesamten Herstellungsprozess. Stellvertretend sind in **Bild 5** und **Bild 6** die Ergebnisse der Temperatur- und Verformungsmessung eines Trägers aus P355NL2 dargestellt.

Die Bestimmung der Makroelastizität erfolgte röntgenographisch durch ein mobiles Diffraktometer am ifs. Bestimmt wurden Quer- und Längselastizitäten bezogen auf die jeweilige Schweißnaht. Die Daten bilden wichtige Eingangsgrößen für die numerische Schweißsimulation.

3 Schweißsimulation – Teildemonstrator

3.1 Theoretische Grundlagen

Die Schweißsimulation hat sich in den letzten Jahren stark entwickelt. Sie ermöglicht das Verständnis komplizierter

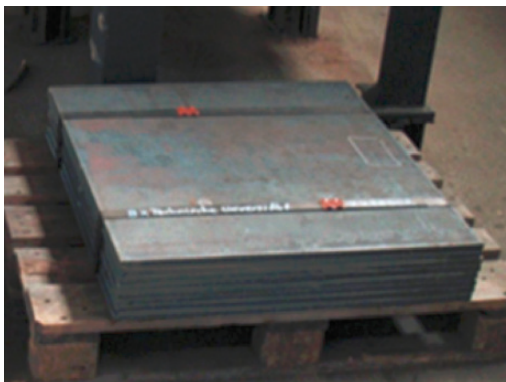
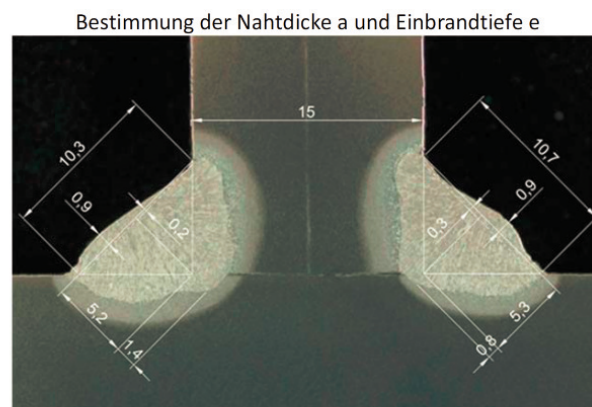
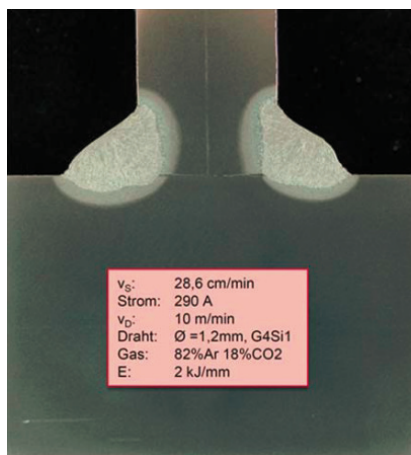
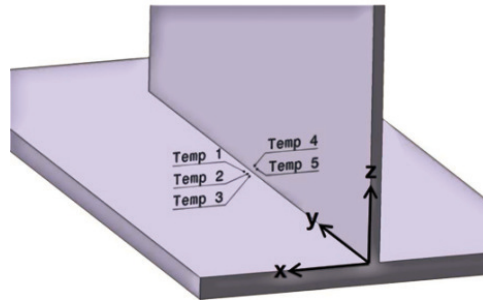
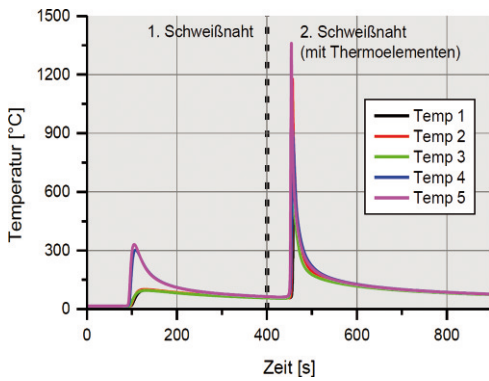


Bild 3. Fertigung unter Werksbedingungen
 Fig. 3. Manufacturing under workshop conditions



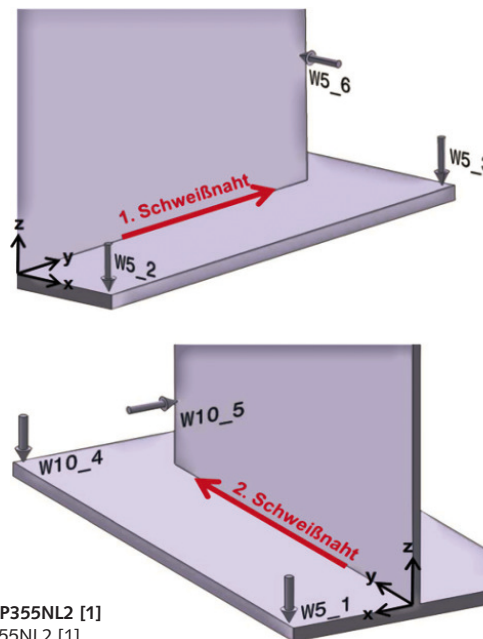
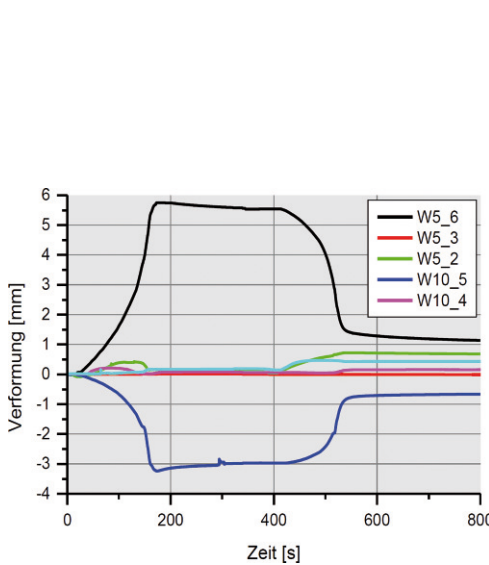
Grenzwerte der Unregelmäßigkeiten der Bewertungsgruppen von Schweißverbindungen nach DIN EN 25817

Bild 4. Querschliff (Makroschliff) an einer Laborprobe (T-Stoß) und Überprüfung der Bewertungsgruppe [1]
 Fig. 4. Transverse section (macrosection) for laboratory sample (T-joint) and accordance with quality level [1]



	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Temp 1	10	456	0
Temp 2	9	445	0
Temp 3	10,5	433	0
Temp 4	0	442	11,5
Temp 5	0	433	9

Bild 5. Ergebnisse der Temperaturfeldmessung, exemplarisch für P355NL2 [1]
 Fig. 5. Results of temperature measurements, exemplary for P355NL2 [1]



	x [mm]	y [mm]	z [mm]
W5_2	231	14	0
W5_3	232	976	0
W5_6	0	830	261

	x [mm]	y [mm]	z [mm]
W5_1	237	27	0
W10_4	229	976	0
W10_5	0	832	141

Bild 6. Ergebnisse der Verformungsmessung, exemplarisch für P355NL2 [1]
 Fig. 6. Results of deformation measurements, exemplary for P355NL2 [1]

Vorgänge während des Schweißens und hierdurch eine zielgerichtete Optimierung der Konstruktion. Im folgenden Abschnitt wird nur der Bereich der Struktursimulation betrachtet. Dabei wird das Verhalten des gesamten Bauteils unter lokaler Wärmeeinbringung simuliert. Zur Durchführung stehen unterschiedliche Softwaretools zur Verfügung. Bild 7 veranschaulicht den Berechnungsablauf.

Eine wesentliche Annahme ist die schwache Kopplung zwischen thermo-physikalischem und thermo-mechanischem Teilmodell. Die thermische Analyse erfolgt durch Lösung der Wärmeleitungsgleichung. Die reale Schweißwärmequelle wird durch die Verwendung einer verteilten Wärmequelle und das erzeugte Temperaturfeld abgebildet. Es wird somit nur die Wärmewirkung des Schweißens betrachtet. Der Wärmetransport erfolgt durch Leitung im Bauteil sowie Strahlung und Konvektion über die Oberfläche. Thermo-physikalische Eingangswerte sind in Abhängigkeit der Temperatur definiert. Bei transienter Berechnung wird das Temperaturfeld für jeden Zeitschritt an ein Modell mit gleichem Netz (mechanische Elemente) übergeben. Insbesondere die mechanische Lösung ist sehr zeitintensiv. Eingangswerte sind die thermische Dehnung sowie ggf. die Umwandlungsdehnung und die plastische Dehnung durch Umwandlungsplastizität, welche aus dem Temperaturfeld bzw. dem Gefügestand hervorgehen. Für die Berechnung der Strukturmechanik gilt die Annahme, dass der Werkstoff iso-

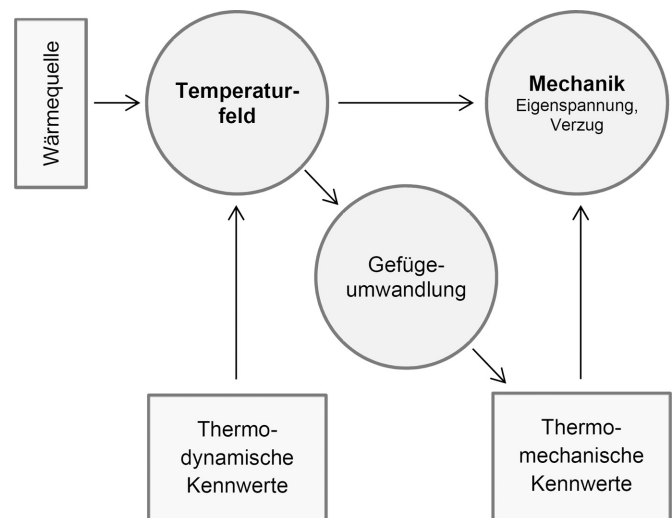


Bild 7. Schweißstruktursimulation (schwach gekoppelte thermomechanische Berechnung) [2]
 Fig. 7. welding simulation (thermo-mechanical calculation with weak coupling) [2]

trop verfestigt. Das Umwandlungsverhalten wird häufig durch das Modell von Leblond und die Gleichung von Koistinen-Marburger abgebildet. Die räumliche und zeitliche Diskretisierung des Modells sind an die jeweilige Aufgabe anzupassen. Eine schweißgerechte Vernetzung beinhaltet die Berücksichtigung hoher Gradienten, die in Temperatur, Spannung, Dehnung und Gefügezusammensetzung auftreten können. Durch die feine Vernetzung der Schweißnaht und der Wärmeinflusszone (WEZ) wird dies realisiert. Das restliche Bauteil kann durch größere Elemente abgebildet werden. Die Rechenzeit hängt weiterhin vom Analysezeitraum sowie der Schrittweite ab. Um Verzug und Eigenspannung, die durch den Schweißprozess verursacht wurden, korrekt berechnen zu können, ist die Simulation der Erwärmungs- und Abkühlphase nötig. Durch die prozessbedingt vorgegebene Schweißbadlänge sind kleine Zeitschritte erforderlich. Mit Zunahme der Modellgröße und der Schweißnahtlänge steigt die Rechenzeit stark an. Die beschriebenen Zusammenhänge sind in [2] ausführlich dargestellt.

Die Validierung der thermischen Analyse erfolgt durch Abgleich der durch Thermoelemente gemessenen Temperaturzyklen mit dem simulierten Temperaturfeld. Neben den experimentellen Temperaturverläufen dient die Schmelzbadfläche im Querschnitt zur Validierung der Simulation.

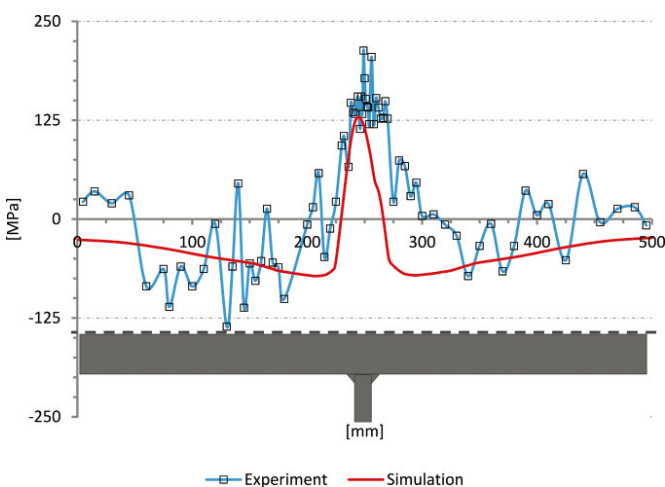


Bild 10. Validierung des Simulationsmodells durch Eigenspannungsmessung (Messung am Obergurt) [1]
 Fig. 10. Validation of numerical model by residual stress measurement (measurement at upper flange) [1]

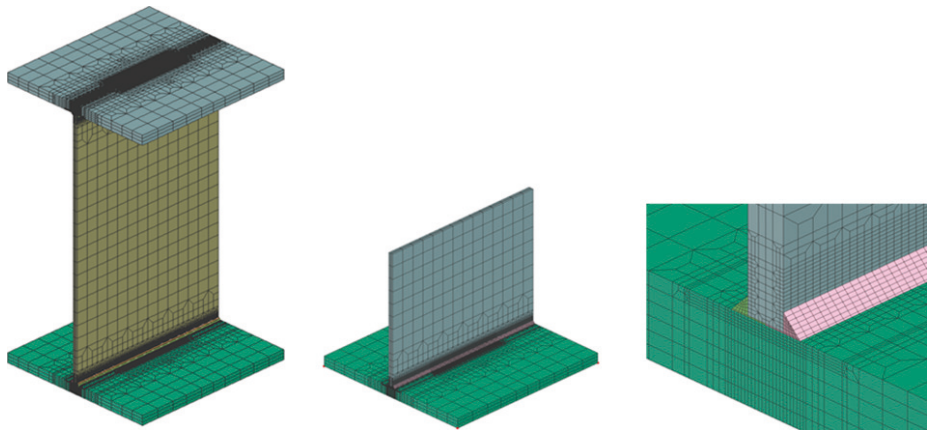


Bild 8. Numerisches Modell des halben Teildemonstrators (P355NL2) [1], Sysweld
 Fig. 8. Numerical model of half part demonstrator (P355NL2) [1], Sysweld

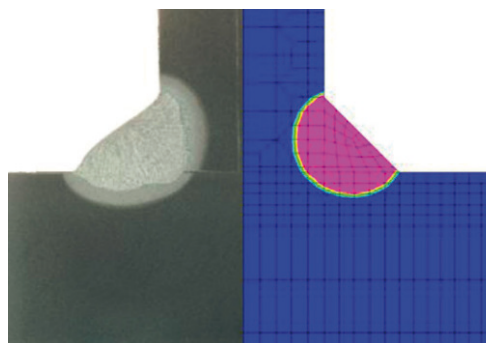
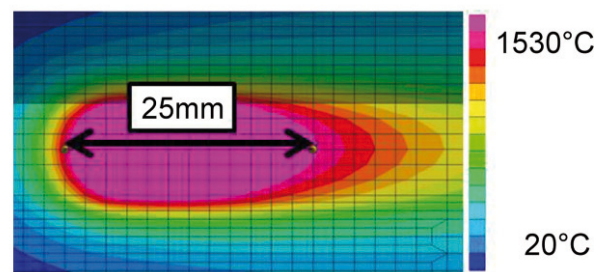


Bild 9. Schmelzbadabmessungen im numerischen Modell (links: quer, rechts: längs) und Kalibrierung am Makroschliff (links) [1]
 Fig. 9. Weld pool dimensions of the numerical model (left side: transverse, right side: longitudinal) and calibration by macrosection (left side) [1]



Die mechanische Berechnung wird durch die transiente Verformungsmessung während der Herstellung sowie durch die Eigenspannungsmessung nach Herstellung des Schweißbauteils validiert.

3.2 Schweißsimulationsmodell

Das numerische Schweißsimulationsmodell des Teildemonstrators in Sysweld zeigt **Bild 8**. Die Modellerstellung erfolgte am ifs. Aufgrund der Symmetrie und der Höhe des Stegs findet keine gegenseitige Beeinflussung der Halskehlnähte statt, weshalb die Berechnung am halben Teildemonstrator durchgeführt wurde. Die Vernetzung erfolgte überwiegend durch Hexaeder-Elemente mit linearer Ansatzfunktion. Insgesamt ergaben sich 135896 Elemente.

Eingangswerte:

- Schweißparameter: s. Abschnitt 2
- Wärmequelle: doppelt-ellipsoide, normalverteilte Wärmequelle, nach Goldak
- Material: S355J2G3
- Luftspalt: 0,5 mm

Die Gegenüberstellung der Wärmequelle und des Schliffbilds in Querrichtung zeigt **Bild 9**. Zusätzlich ist unter **Bild 10** der Vergleich zwischen gemessener und simulierter Eigenspannungsverteilung am Obergurt dargestellt. Durch die beschränkte Zugänglichkeit des Diffraktometers erfolgte die Messung des Eigenspannungsverlaufs nur für die Außenseite des Ober- bzw. Untergurts. Die messbedingte Schwankung resultiert aus der Walzhaut und der teilweisen Korrosion der Oberfläche der Versuchsträger. Im Mittel wird eine gute Übereinstimmung erzielt.

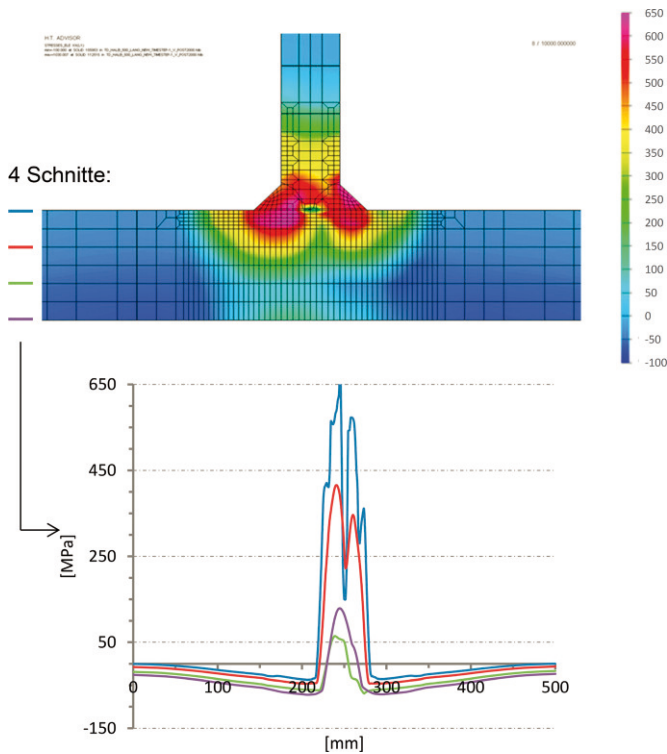


Bild 11. Berechneter Längseigenspannungsverlauf and Auswertung für 4 Schnitte über die Flanschdicke

Fig. 11. Calculated longitudinal residual stress state and evaluation for 4 sections over the flange thickness

In **Bild 11** sind der simulierte Längseigenspannungszustand des Teildemonstrators sowie die Auswertung für 4 Schnitte über die Blechdicke dargestellt. Für das Schweißen dicker Bleche, hier $t_f = 50$ mm, resultiert, abhängig vom Wärmeeintrag, ein starker Temperaturgradient über die Dicke. Im nahtnahen Bereich bedingt dies eine deutliche Veränderlichkeit des Spannungsverlaufs. Eine gleichmäßige Durchwärmung, hier näherungsweise für den Steg ($t_w = 15$ mm),

führt zu einem nur gering veränderlichem Spannungsverlauf über die Dicke.

Das Stabilitätsverhalten des Bauteils (Abschnitt 5) wird vorrangig durch das Druckspannungsfeld beeinflusst. Die Auswertung verdeutlicht, dass der Dickeneinfluss hier nur gering ausgeprägt ist.

Bild 12 zeigt die Approximation des Spannungsfelds für ein Schalenmodell. Bei der Approximation ist darauf zu achten, dass sich das Spannungsfeld im Gleichgewicht befindet. Das Abgreifen eines Schnitts, der bspw. in Blechmitte liegt, führt zu einem Verlauf, der nicht zwangsläufig im Gleichgewicht steht, da dieses im allgemeinen Fall im Volumen erfüllt wird. Der gesuchte Verlauf spiegelt daher die Resultierende des Zug- und Druckspannungsfelds jeweils im Mittel wieder. Der Vergleich mit vereinfachten Ansätzen für die anschließende Tragfähigkeitsberechnung ist in Abschnitt 4 dargestellt.

Ein weiterer wichtiger Einfluss auf die Tragfähigkeit ist die Entstehung des Schweißverzugs. **Bild 13** veranschaulicht den Gesamtverzug am halben Teildemonstrator mit 50facher Vergrößerung. Eine Gegenüberstellung ist ebenfalls in Abschnitt 4 dargestellt.

Als Ergänzung wurden parallel mehrere vereinfachte Modelle in Simufact erstellt. Hierbei wurde die Elementkantenlänge im Nahtbereich zwischen 1 mm und 5 mm variiert. Für nahtferne Bereiche wurde die Elementkantenlänge mit 10 mm gewählt. **Bild 14** dokumentiert stellvertretend das Netz 2,5 – 10 mm. Hierfür wurde eine ausreichende Annäherung an den experimentell ermittelten Verlauf erzielt. Eine zu grobe Vernetzung führte insbesondere im Nahtbereich zu einer Fehleinschätzung des Spannungsbilds. Die Berücksichtigung der Einflüsse der Phasenumwandlung führte zu keiner signifikanten Änderung des Spannungsfelds. Die Spannungsbeträge im Zugbereich sind für die Berechnung mit Umwandlung jeweils geringfügig abgesenkt. Abhängig vom Umwandlungsverhalten des Stahls und der Abkühlrate kann der Einfluss für andere Fälle größer ausfallen.

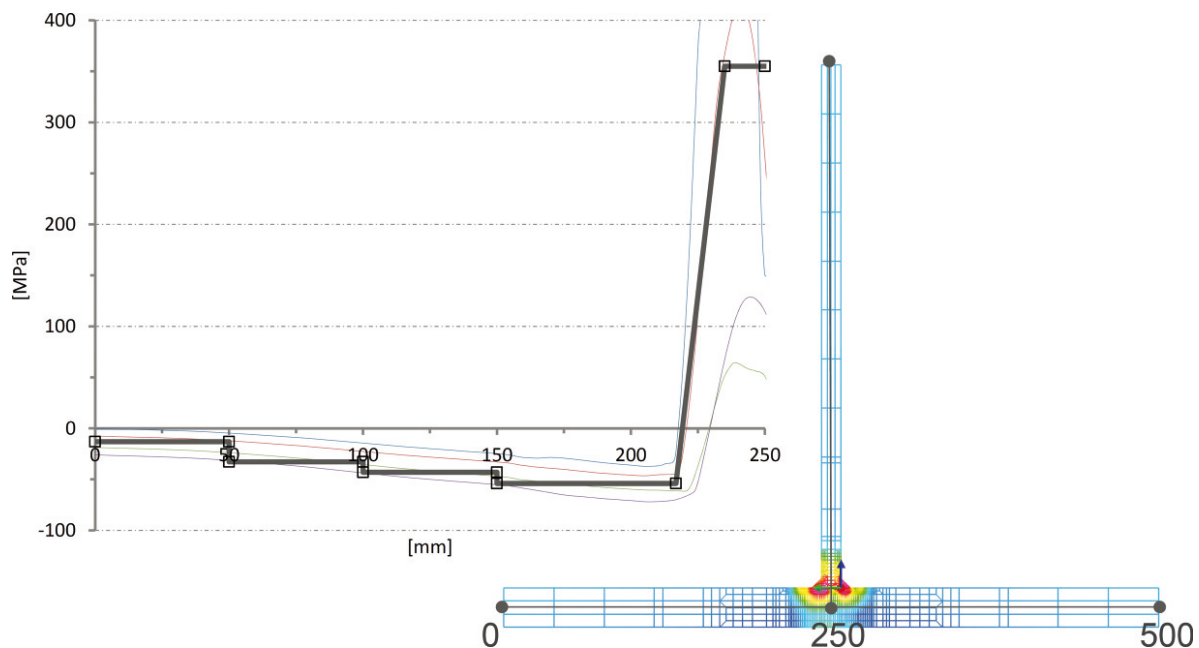


Bild 12. Approximierter Eigenspannungsverlaufs über die Flanschbreite, Darstellung bis $L = 250$ mm (halbe Breite)

Fig. 12. Approximated residual stress course over the flange width, displayed till $L = 250$ mm (half width)

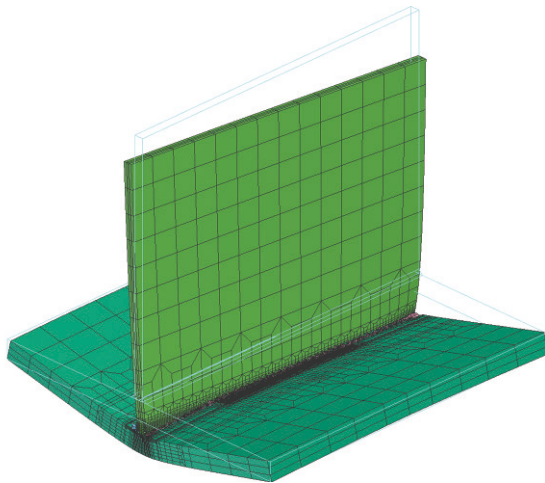


Bild 13. Gesamtverzug nach dem Schweißen mit 50facher Überhöhung
Fig. 13. Total distortion after welding (with 50x magnification)

3.3 Fazit – Schweißsimulation

Eine realitätsnahe Vorhersage von Verzug und Eigenspannung ist heute möglich. Für die Trägerfertigung, die bevorzugt mechanisiert erfolgt und daher eine relativ geringe statistische Schwankung ausweist, erscheint es sinnvoll das durch die Simulation gegebene Potenzial auszuschöpfen. Aufgrund des hohen Zeitaufwands und der Beschränkung

auf kleine Bauteile, steht eine Anwendung im Stahlbau nach wie vor aus. Die Anwendung auf große Strukturen mit mehreren Metern Schweißnahtlänge ist auch heute kaum möglich. Es bedarf daher praxisnaher Ingenieurmodelle. Einige vereinfachte Ansätze werden im folgenden Kapitel dargestellt.

4 Ingenieurmodelle – Teildemonstrator

Das Ergebnis der Traglastberechnung wird wesentlich durch den Imperfektionsansatz beeinflusst. Der Begriff Imperfektion beschreibt allgemein jede fertigungsbedingte Abweichung vom Idealzustand. Wesentliche Einflüsse des Schweißens sind die Ausbildung des Verzugs sowie des Eigenspannungsfelds. Im Kontext des Eurocode sind diese Phänomene als geometrische und strukturelle Imperfektion zu betrachten. Der Verzug darf nach EN 1993-1-5, Anhang C mithilfe der Beulfigur erfasst werden. Die Amplitude wird zu 80 % der Fertigungstoleranz nach EN 1090-2 empfohlen. Interpretationsraum besteht insbesondere für den Eigenspannungszustand. Der Ansatz sollte einer Verteilung entsprechen, deren Verlauf und Amplitude im Mittel aus dem Fertigungsablauf zu erwarten sind.

4.1 Eigenspannungsmodelle

Im Stahlbau werden stark vereinfachte Ansätze verwendet, zwei besonders geläufige Ingenieurmodelle zeigt Bild 15. Hierbei wird der reale Verlauf durch geometriebasierte, trapez- oder blockartige Ansätze angenähert. Es wird vorausgesetzt, dass im Zugbereich die Fließgrenze des Grundwerkstoffs erreicht wird. Die Amplitude des Druckspannungsblocks ergibt sich aus der Gleichgewichtsformulierung und wird als konstant vorausgesetzt. Konstruktive, fertigungs- sowie werkstoffspezifische Kennwerte sind nicht erfasst.

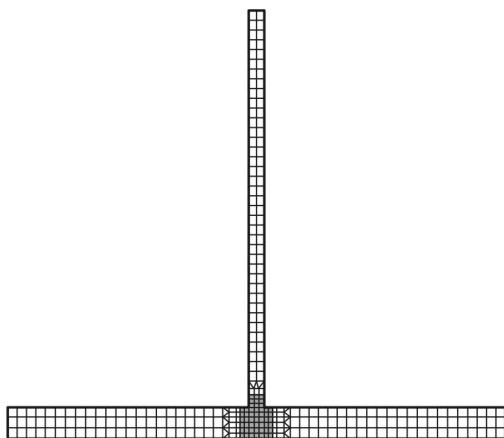


Bild 14. Numerisches Modell des Teildemonstrators (Vernetzung: 2,5–10 mm), Vergleichsrechnung (Simufact)
Fig. 14. Numerical model for the part demonstrator (mesh: 2,5–10 mm), comparative analysis (Simufact)

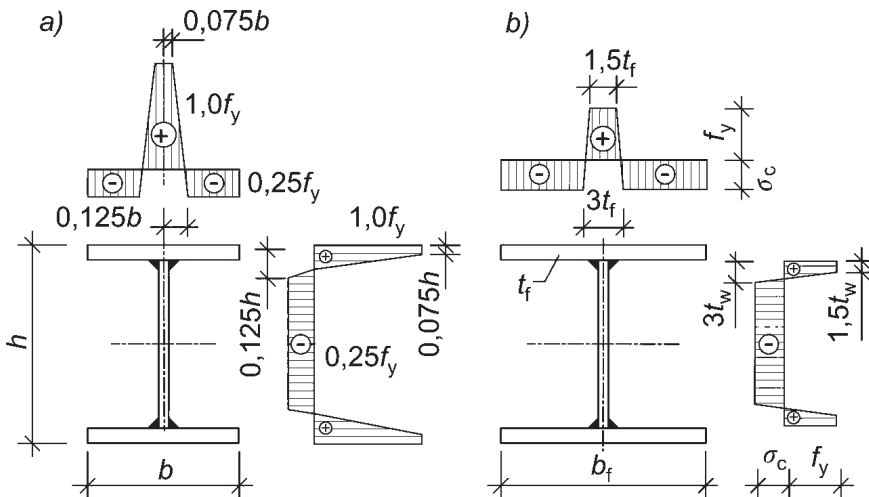
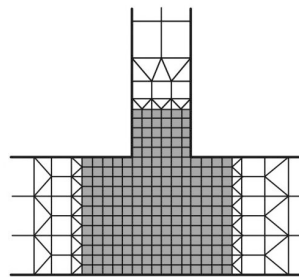


Bild 15. Vereinfachte Eigenspannungsansätze nach a) [3] und b) [4]
Fig. 15. Simplified residual stress models due to a) [3] and b) [4]

In Bild 16 sind beide Ansätze mit der Approximation des realen Spannungsverlaufs (Abschnitt 5) überlagert.

Die Näherungsansätze nach [3] und [4] spiegeln den realen Verlauf nur unzureichend wider. Im direkten Vergleich wird letzterer Ansatz empfohlen, da er die Höhe des Druckspannungsblocks variabel festlegt und hierdurch für viele Fälle günstigere Werte zulässt. Inwieweit der Ansatz für abweichende Eingangswerte der Realität entspricht, kann nicht abschließend beantwortet werden, da für das Vorhaben nur der Teildemonstrator überprüft wurde. Angaben zur Eingrenzung des Anwendungsbereichs vereinfachter Modelle existieren bisher nicht. Die Anwendung derartiger, vereinfachter Ansätze ist daher grundsätzlich zu überdenken.

Das reale Spannungsbild entsteht als Folge komplexe Schrumpf- und Umwandlungsprozesse sowie deren Interaktion. Insbesondere für höherfeste Stähle, die zuletzt an Bedeutung gewinnen, wird der Spannungszustand maßgeblich durch die

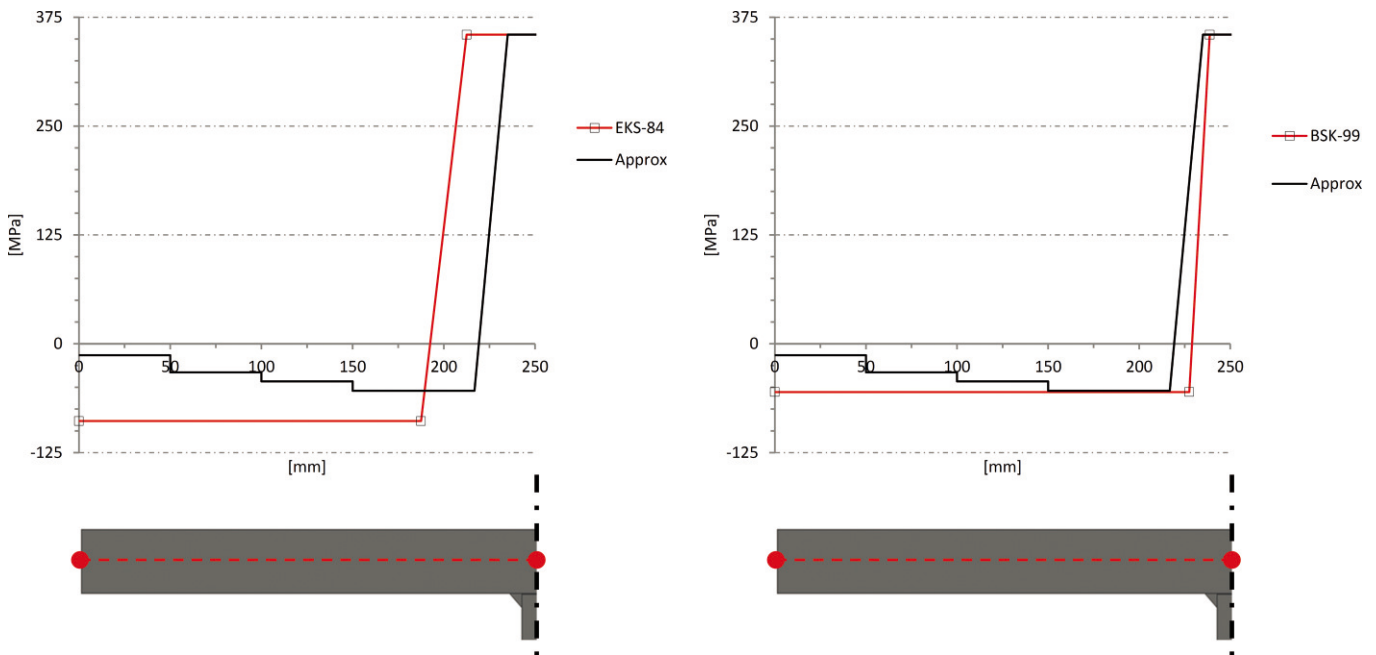


Bild 16. Gegenüberstellung zwischen approximiertem Eigenspannungsverlauf (basierend auf der Simulation) und Näherungsansatz, s. Bild 12 und Bild 15
 Fig. 16. Comparison between approximated residual stress course (based on the simulation results) and simplified models, see Fig.12 and Fig.15

Gefügeumwandlung beeinflusst. In der Folge werden Form und Amplitude des Zugspannungsbereichs durch vereinfachte Modelle falsch approximiert. Eine Übersicht relevanter Einflüsse gibt **Tabelle 2**.

4.2 Verzug und zulässige Toleranzwerte nach DIN EN 1090-2

Ausgangspunkt des Verzugs ist die Schrumpfung des Nahtbereichs in Längs-, Querrichtung. Abhängig von der Wirkungslinie resultieren gleichzeitig Biege- und Winkerverzug. Für besonders dünne Bleche besteht bei unzureichender Aussteifung zusätzlich die Gefahr des Beulens. Die Größe der Verzugsmaße wird neben Geometrie und Nahtanordnung besonders vom Werkstoff, der Wärmeleitung sowie der Steifigkeit der Konstruktion und Lagerung beeinflusst. Im Stahlbau wird der Schweißverzug durch Einhaltung zulässiger Toleranzwerte nach DIN EN 1090-2 kontrolliert.

Exemplarisch werden die Simulationswerte des Winkelverzugs im Flansch (**Bild 17**) und der Krümmung des Stegs (**Bild 18**) Anhaltswerten aus der Literatur bzw. der Toleranzvorgabe nach Norm gegenübergestellt. Die Werte des Simulationsmodells liegen jeweils deutlich unterhalb der Vergleichswerte. Für die Traglastberechnung ist nur der lokale Verzug des Stegs zu erfassen, da dieser der Querschnittsklasse 4 zugeordnet ist.

Die Übertragung des simulierten Verzugs auf ein Traglastmodell gelingt durch direkte Eingabe der Koordinaten als Ausgangszustand. Diese Variante ist sehr aufwändig und bedingt gleiche Netze. Alternativ kann die Im-

plementierung vereinfacht durch Skalierung der maßgebenden Eigenform (**Bild 19**) erfolgen.

Für die vorliegende, dickwandige Querschnittsform hat der lokale Schweißverzug nur eine geringe Auswirkung. Die Traglast wird, neben dem Eigenspannungsansatz, besonders durch die Größe der Vorkrümmung des Trägers beeinflusst. **Bild 20** zeigt den ermittelten Längsverzug am Träger. Die maximale Amplitude beträgt 0,1 mm. Bezogen auf die Trägerlänge ergibt sich das Stichmaß zu $L/5250$. Die zulässige Fertigungstoleranz nach DIN EN 1090-2 entspricht mit $L/750$ dem 7fachen Wert. Für die Traglastberechnung emp-

Tabelle 2. Übersicht relevanter Fertigungseinflüsse für die Ausbildung des Eigenspannungsfelds beim Schweißen
 Table 2. Overview of relevant manufacturing factors for the formation of the residual stress state due to welding

Plastische Zone ohne Berücksichtigung konstruktiver, fertigungstechnischer und werkstoffspezifischer Einflüsse	
Vereinfachtes Modell:	Realität:
Festlegung in Abhängigkeit der Geometrieparameter Breite/Höhe [3] bzw. Dicke [4] kein Temperatur- bzw. Spannungsgradient über die Dicke	Abhängigkeit von Prozessparametern und Fixierung Einfluss der Wärmeleitung (bspw. Streckenergie), Lagerung (Reaktionsspannungen) Einfluss der Materialgüte auf Ausdehnung der Zone Form der Plastizitätszone (dicke Bleche) und Spannungsgradient
Umwandlungsverhalten Phasenumwandlung (Austenit in Ferrit-Perlit, Martensit und Bainit)	
Vereinfachtes Modell:	Realität:
Zugspannungen in Höhe der Fließgrenze des Materials	Zusammenwirken von Schrumpfungshinderung und behinderter Volumenausdehnung typische Eigenspannungsverläufe für Stähle unterschiedlicher Festigkeit Einflüsse aus Umwandlungstemperatur und Umwandlungsplastizität Umwandlung von Austenit in Ferrit-Perlit, Bainit oder Martensit

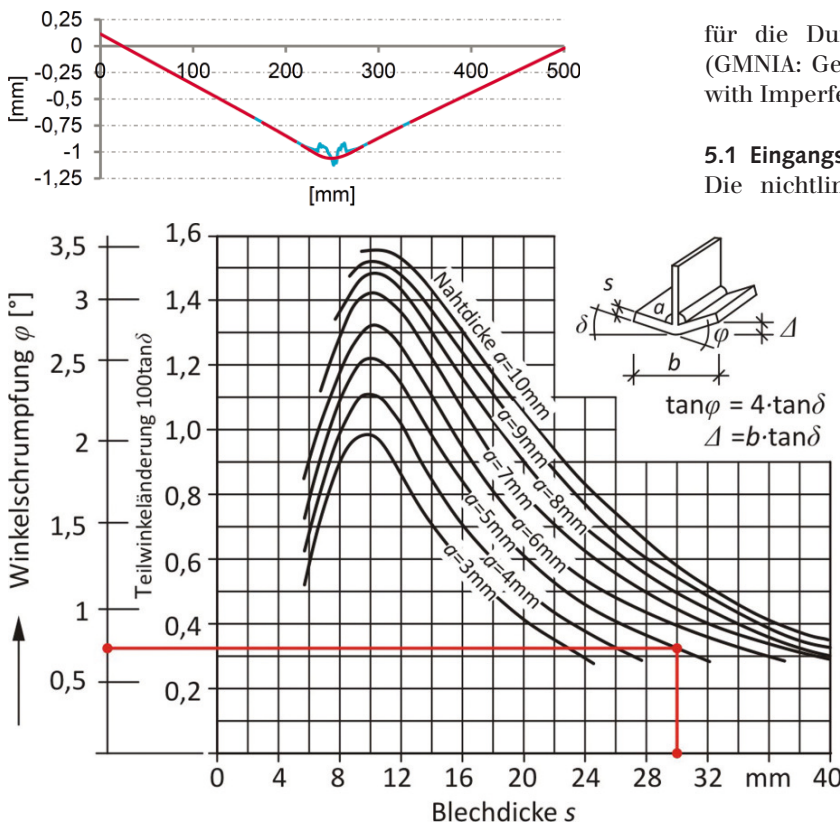


Bild 17. Winkelverzug am Flansch (dargestellt über die Flanschbreite) bei $L = 0,5xL$ und Vergleich mit [5] (Anhaltswerte für T-Stöße)
 Fig. 17. Angular distortion of the flange (displayed over the flange width) at $L = 0,5xL$ and comparison with [5] (approximate values for T-joints)

fehlt DIN EN 1993-1-5, Anhang C eine Reduzierung auf 80% der Toleranzvorgabe. Im Beispiel folgt der Bemessungswert zu 0,56mm und liegt somit etwa bei $L/1000$. Hierzu sei angemerkt, dass der Teildemonstrator versuchsbedingt eine, im Verhältnis zu realen Trägern, kurze Länge aufweist. Für andere Konstellationen treten möglicherweise größere Werte des Biegeverzugs auf. Des Weiteren sind zusätzliche, baubedingte Einflüsse zu erfassen. Für die Traglastberechnung sollte daher der Wert nach Norm verwendet werden.

5 Nichtlineare Traglastberechnung – Teildemonstrator

Eine geometrisch und physikalisch nichtlineare Berechnung ermöglicht eine wirklichkeitsnahe Abbildung des Tragverhaltens und hierdurch effizientere und wirtschaftlichere Konstruktionen. Bild 21 veranschaulicht die Schritte

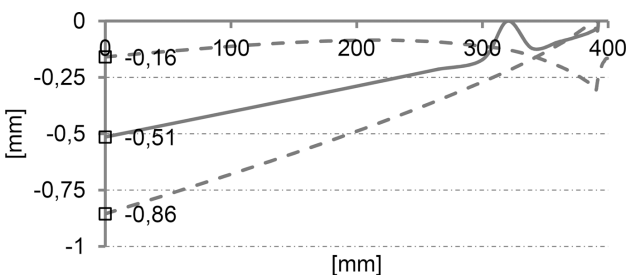


Bild 18. Verzug des Stegs (dargestellt über die halbe Steghöhe) für 3 Schnitte (Nahtanfang, Nahtmitte, Nahtende) und Vergleich mit Toleranzmaß (DIN EN 1090-2)
 Fig. 18. Distortion of the web (displayed over the half web height) for 3 sections (at the beginning, in the middle, at the end of the seam) and comparison with tolerance value (DIN EN 1090-2)

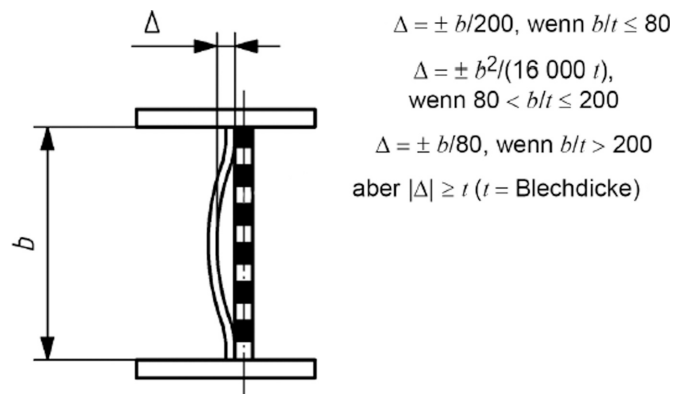
für die Durchführung einer nichtlinearen Berechnung (GMNIA: Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections) in Form eines Flussdiagramms.

5.1 Eingangswerte der Berechnung

Die nichtlineare Tragfähigkeitsberechnung erfolgte mit dem Programm Abaqus, Version 6.11-3. Als System wird ein beidseitig gelenkig gelagerter Stab betrachtet, die Länge L wird variiert. Es werden drei bezogene Schlankheitsgrade untersucht: unterer, mittlerer und oberer Schlankheitsbereich ($\bar{\lambda} = 0,6; 1,0; 1,4$). Als Belastung wird eine planmäßig mittige Druckbeanspruchung vorausgesetzt. Der folgende Abschnitt enthält die Ergebnisse der Tragfähigkeitsberechnung für den Teildemonstrator aus P355. Exemplarisch erfolgt die Auswertung für das Biegeknicken um die schwache Achse ($z-z$). Der Einfluss eines zusätzlichen Störbereichs (Montagestoß) wird in Teil 2 der Veröffentlichung behandelt. Für die Vernetzung wurde der Schalenelementtyp S4R, ein 4-Knoten Element mit reduzierter Integration, gewählt. Die mittlere Elementkantenlänge beträgt 25mm. Die folgende Übersicht fasst die Eingangswerte für die Berechnung am TD zusammen:

- Geometrie: $b_f = 500\text{ mm}, t_f = 30\text{ mm}, h_w = 800\text{ mm}, t_w = 15\text{ mm}$
- Geometrische Nichtlinearität: NLGEOM = ON
- Nichtlineares Materialverhalten: Elastisch-Plastisch, mit Pseudoverfestigung
- Geometrische Imperfektionen:
 - a) g_l (Vorkrümmung), $0,8xL/750$, b) lokal (zul. Toleranz)
- Kombination: 1) G_l , 2) $G_l + 0,7L$, 3) $0,7G_l + L$
- Strukturelle Imperfektionen: ES1: EKS-84, ES2: BSK-99, ES3: Real (Approx)

Im Fokus der Untersuchung steht die Bewertung unterschiedlicher Eigenspannungsmodelle sowie deren Auswirkung auf die Tragfähigkeit. Um die Vergleichbarkeit zur Normung (Knicklinie) herzustellen, erfolgt die Darstellung normiert. Auf die Einbeziehung von Teilsicherheitsbeiwerten wird verzichtet. Die Ergebnisse sind daher als charakteristi-



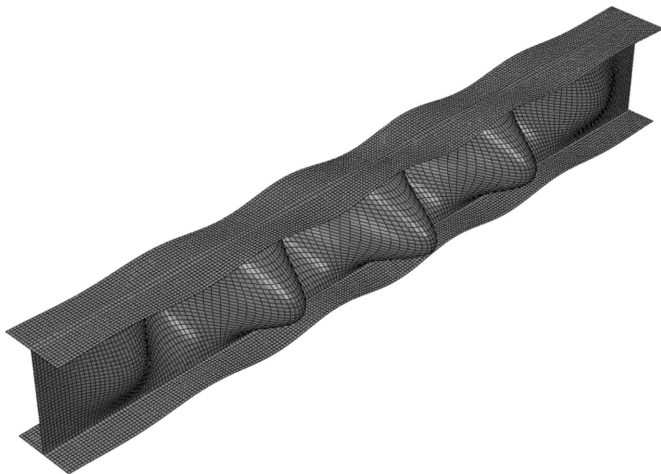


Bild 19. Näherungsweise Erfassung des Schweißverzugs durch Skalierung unterschiedlicher Beulfiguren
 Fig. 19. Approximate implementation of welding distortions by scaling of different buckling modes

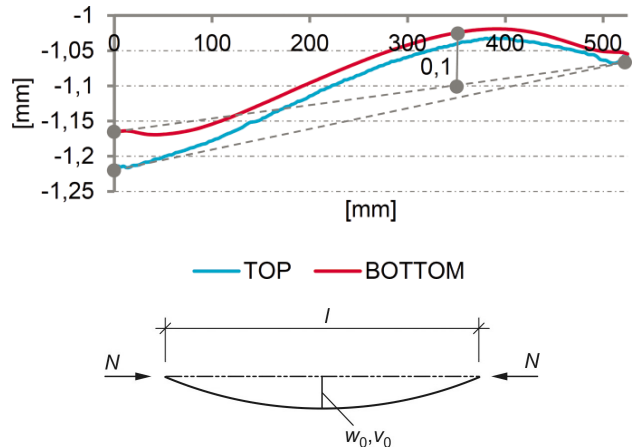


Bild 20. Biegeverzug des Trägers (dargestellt über die Länge des Trägers) und Vergleich mit Toleranzmaß (DIN EN 1090-2)
 Fig. 20. Deflection of the girder (displayed over the girder length) and comparison with tolerance value (DIN EN 1090-2)

sche Tragfähigkeit zu interpretieren. Die Normierung auf jeweils eine Knicklinie setzt voraus, dass die Eigenspannungshöhe, resp. die Amplitude des Druckspannungsblocks, proportional zur Fließgrenze steigt. Nach heutigem Kenntnisstand ist klar, dass diese Annahme nicht oder nur sehr eingeschränkt gilt. Eine material-unabhängige Zuordnung ist daher, insbesondere für höherfeste Stähle, nicht zutreffend.

5.2 Auswertung

Das Potenzial, das mit einem realitätsnahen Imperfektionsansatz verbunden ist, wird anhand des Vergleichs der Ansätze ES1-ES3 am Teildemonstrator erläutert. In **Bild 22** ist

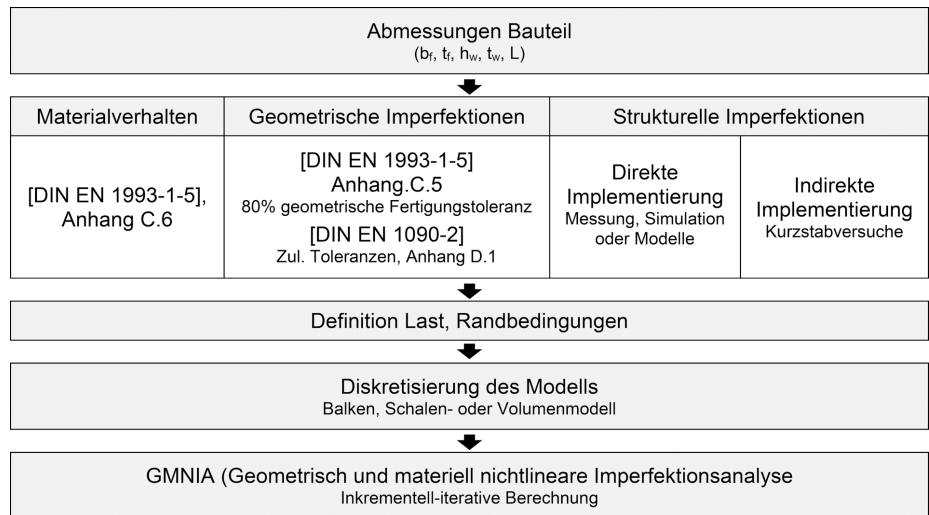
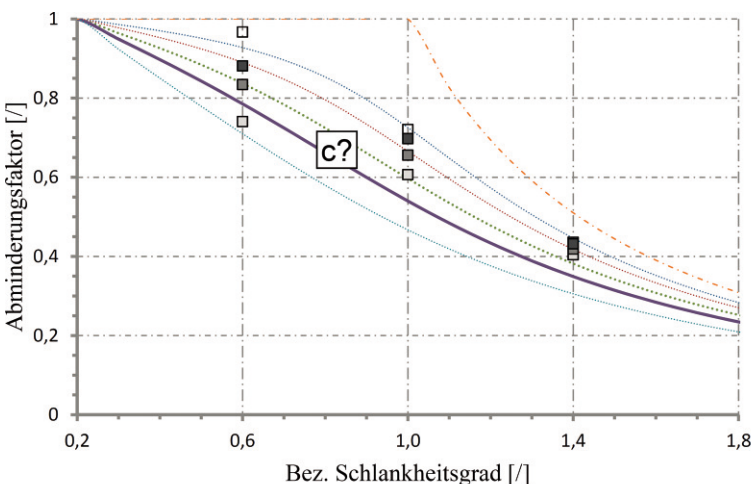


Bild 21. Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA: Geometrisch und materiell nichtlineare Imperfektionsanalyse)
 Fig. 21. Nonlinear calculation of load capacity (GMNIA: Geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections)



- Legende:**
- spannungsfrei
 - real
 - EKS-84
 - BSK-99

exemplarisch:
für: EKS-84, $\bar{\lambda} = 0,6$

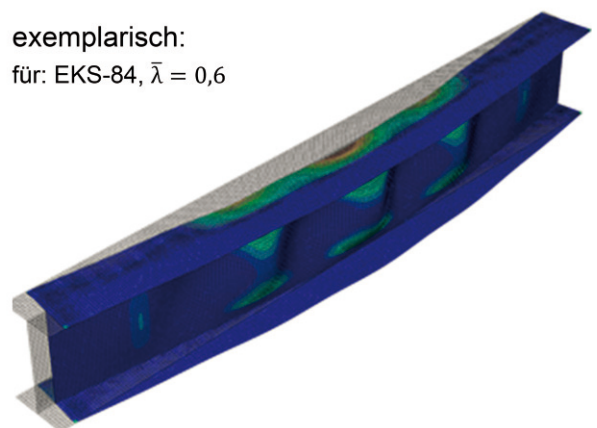


Bild 22. Auswertung der Traglastberechnung für unterschiedliche Eigenspannungsmodelle, exemplarisch für Biegeknicke um die schwache Achse (z-z)
 Fig. 22. Evaluation of load capacity calculations for different residual stress models, exemplary for flexural buckling about weak axis (z-z)

Tabelle 3. Abminderungsfaktor der Tragfähigkeit für unterschiedliche Eigenspannungsansätze
 Table 3. Reduction factor of load capacity for different residual stress models

	$\bar{\lambda} = 0,6$	$\bar{\lambda} = 1,0$	$\bar{\lambda} = 1,4$
EC3	0,785	0,540	0,349
ohne ES	0,967	0,720	0,435
ES1	0,741	0,606	0,404
ES2	0,834	0,656	0,418
ES3	0,881	0,697	0,431

die maßgebende Kombination dargestellt. **Tabelle 5** zeigt die zugehörigen Werte.

Zu erkennen ist, dass sich der Eigenspannungseinfluss mit zunehmender Schlankheit reduziert. Der Eigenspannungsansatz wirkt sich daher insbesondere im baupraktisch relevanten, unteren bis mittleren Schlankheitsbereich aus. Im oberen Schlankheitsbereich dominiert der Geometrieinfluss.

Die Werte der FE-Berechnung liegen im Bereich der Knicklinie a und somit deutlich oberhalb der Bemessungsknicklinie c. Es konnte gezeigt werden, dass die Größe der Traglast stark vom gewählten Ansatz abhängt. Die maximale Abminderung der Traglast beträgt 24 % für ES1, 14 % für ES2 und nur 9 % für ES3. Innerhalb der Ansätze beträgt die Abweichung, abhängig vom Schlankheitsgrad, zwischen 6 – 15 %. Maßgebend für die Traglast sind insbesondere Größe und Verlauf des Druckspannungsblocks. Aus [6] geht hervor, dass sich die Abweichung zum vereinfachten Modellansatz mit zunehmender Materialgüte erhöht. Die Anwendung vereinfachter Modelle ist daher gerade für hochfeste Stähle konservativ.

Um das Potenzial für die Bemessung brauchbar zu machen, bedarf es anwendungsorientierter und dabei realitätsnaher Ansätze, die materielle und fertigungstechnische Aspekte näherungsweise erfassen. Voraussetzung für die Entwicklung neuer Ansätze für die Trägerfertigung normal- und hochfester Stähle ist eine breite experimentelle und numerische Analyse. Hierbei ist der Einfluss unterschiedlicher Parameter zu quantifizieren und in vereinfachte Ansätze zu überführen.

6 Ausblick

Die Simulation der Traglast unter Berücksichtigung der Schweißsimulation birgt großes Potenzial, scheidet jedoch aktuell an der Umsetzung für große Bauteile. Für den Ingenieurgebrauch sowie für im Stahlbau typische Anwendungsfälle bedarf es daher weiterhin vereinfachter Ansätze. Der Vergleich zwischen Simulation und Modell zeigt teils große Defizite auf, wie die Untersuchung am Teildemonstrator verdeutlicht.

Ziel ist, realitätsnahe Ansätze bereitzustellen, die relevante Einflussgrößen praxistauglich erfassen. Hierzu zählen insbesondere Fertigungsparameter sowie materielle Abhängigkeiten. Bestehende Ansätze sind insbesondere für hochfeste Stähle unbrauchbar [6]. Aufgrund der Einschnürung der Plastizitätszone und der Bedeutung des Umwandlungsverhaltens, ist die Amplitude der Ausgleichsdruckeigen-spannung für höherfeste Stähle im Vergleich deutlich redu-

ziert. Die Überprüfung und Entwicklung unterschiedlicher Ansätze für den Stahlbau erfolgt aktuell in einem Folgeprojekt [6].

Mittelfristig bilden die Ergebnisse einer hierauf aufbauenden Traglaststudie den Ausgangspunkt zur Überprüfung und ggf. Anpassung der Knicklinie. Die Einstufung in jeweils eine Knicklinie für Stähle S235 bis S460 bzw. S700 bedingt für hochfeste Stähle eine unwirtschaftliche Bemessung.

Durch die näherungsweise Erfassung relevanter Fertigungs- und Materialeinflüsse für das Schweißen ermöglicht die nichtlineare Tragfähigkeitsberechnung eine bessere Erfassung des Tragverhaltens und hierdurch wirtschaftliches Konstruieren.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 16937 BG der FOSTA-Forschungsvereinigung Stahl-anwendung 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 Bundestags gefördert. Besonderer Dank gilt der IMO Leipzig GmbH und der Stahlbau Dessau GmbH & Co.KG für die Durchführung der Schweißarbeiten sowie die Erstellung der Schweißpläne.

Literatur

- [1] Dilger K.; Pasternak H. et al.: Schweißen dicker Bleche unter Baustellenbedingungen – Beurteilung des Einflusses auf das Tragverhalten von Montagestößen. Abschlussbericht, Forschungsvorhaben P 858/08/2011 / IGF-Nr. 16937 BG, 2014
- [2] Radaj, D.: Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen: Rechen- und Messverfahren, Fachbuchreihe Schweißtechnik: Band 143, DVV-Verlag, 2002
- [3] ECCS-CECM-EKS. (1984). Publication No. 33: Ultimate Limit State, Calculation of Sway Frames with Rigid Joints. Brussels
- [4] BSK 99: Swedish Design Rules for Steel Structures, Boverket (Swedish National Board of Housing, Building and Planning), 1999
- [5] Hänsch, H.: Schweißspannungen und Formänderungen an stabartigen Bauteilen – Berechnung und Bewertung, Fachbuchreihe Schweißtechnik (Band 81), DVV Media GmbH, 1984
- [6] Pasternak, H.; Kannengießer, T. et al.: Erhöhung der Tragfähigkeit geschweißter I-Profile aus hochfestem Baustahl durch verbesserte Ansätze zur Berücksichtigung von Eigenspannungen, Forschungsvorhaben P1035 / IGF-Nr. 18194 BG, Laufzeit: 04/2014–04/2016 – laufendes Vorhaben