

Schweißen von Trägern mit dicken Blechen

Teil 2: Schweißen unter Baustellenbedingungen – Montagestoß und Variation der Umgebungstemperatur

H. Pasternak, T. Krausche, B. Lauenert

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 baupraktischer Montagestöße. Dieser Aufsatz beschreibt – als zweiter von zwei Teilen – die Ergebnisse der Planung, Fertigung und Simulation des Montagestoßes geschweißter Träger. Als Stoßgeometrie wurde der Z-Stoß gewählt. Einen besonderen Schwerpunkt bildet das Schweißen auf der Baustelle bei tiefen Temperaturen und damit verbunden die Umsetzung großmaßstäblicher Versuche im Großklimaraum.

Welding of Girders with Thick Plates Part 2: Welding under Site Conditions – Assembly Joint and Variation of Ambient Temperature

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 second of two parts – the results of the design, production and simulation of welded site joints. As joint geometry the Z-joint was chosen. Important aspects are the welding under site conditions at low temperatures and hereby the performance of large-scale tests in a climate chamber.

1 Montagestöße

Ein großer Vorteil des Stahlbaus ist die Möglichkeit der Segmentfertigung unter Werksbedingungen. Diese wurde in Teil 1 der Veröffentlichung [1] bereits beschrieben. Die Komponentenfertigung findet in Schweißwerkstätten unter geregelten Randbedingungen statt, wie sie bei der Montage auf der Baustelle nur selten vorliegen. So können Einflüsse der Witterung wie Wind, Niederschlag oder Temperatur die Montage verzögern. Um diesen zu begegnen, werden Einhausungen zum Schutz vor äußeren Einwirkungen verwendet (Bild 1). Die Wirkung der Umgebungstemperatur bleibt jedoch bestehen. Dies kann bedeuten, dass die Montage bei niedrigen Temperaturen im Taubereich oder unterhalb des Gefrierpunkts durchgeführt werden muss. Gerade Schweißungen dicker Bleche stellen hohe Anforderungen an den ausführenden Betrieb, die Bauleitung und Bauüberwachung sowie bereits im Vorfeld an den Konstrukteur. Niedrige Umgebungstemperaturen können die Abkühlzeiten und damit die Eigenschaften einer Schweißnaht negativ beeinflussen. Für den Konstrukteur ist ferner die Kenntnis des Bauteilverzugs sowie des Eigenspannungsfelds nach dem Schweißen relevant. Die Fertigungsvorbereitung (bspw. Schweißfolgepläne) erfolgt durch den ausführenden Betrieb mit dem Ziel die strengen Maßanforderungen an den Endquerschnitt ein-



Bild 1. Montage auf der Baustelle und Einhausung der Schweißstelle, AKC in der Autostadt Wolfsburg

Fig. 1. Assembly on site and enclosure of the working area, AKC in the Autostadt Wolfsburg

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak
Dipl.-Ing. Thomas Krausche
M. Sc. Benjamin Lauenert
Brandenburgische Technische Universität (BTU)
Lehrstuhl Stahl- und Holzbau
K.-Wachsmann-Allee 2
03046 Cottbus

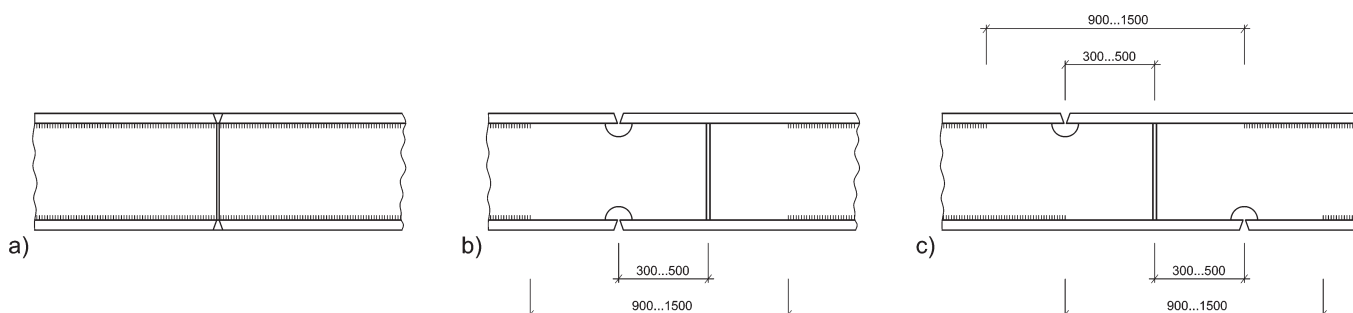


Bild 2. Typische Stoßarten: a) Stumpfstoß, b) U-Stoß, c) Z-Stoß
Fig. 2. Typical joint types: a) butt joint, b) U-joint, c) Z-joint

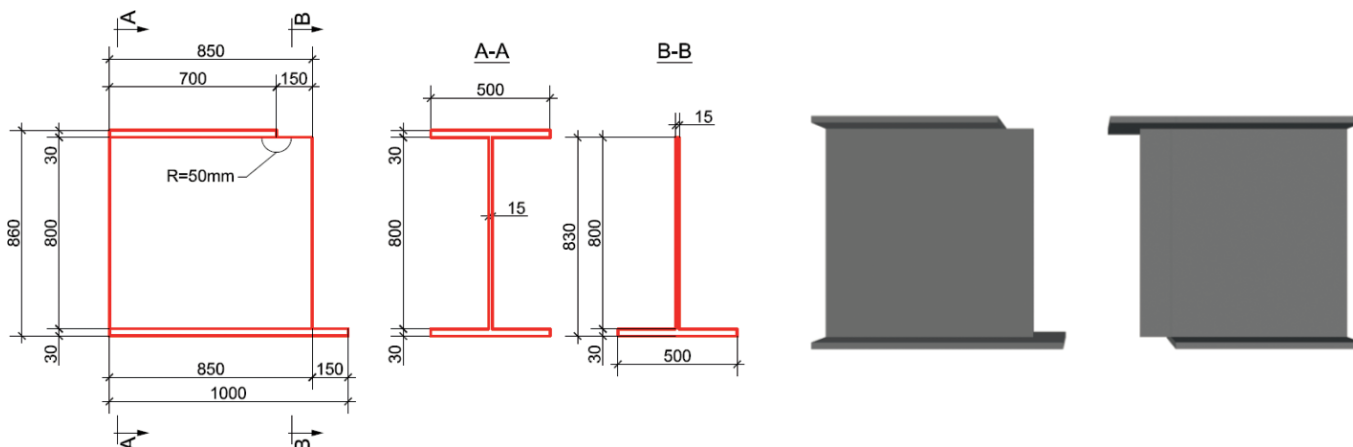


Bild 3. links: Geometrie, s. auch [1], rechts: Z-Stoß (Demonstrator)
 Fig. 3. left side: Geometry, see also [1], right side: Z-joint (Demonstrator)



Bild 4. Versuchsrahmen, Versubvorrichtung und Einbausituation in der Klimakammer
 Fig. 4. Testing frame, modified rail vehicle and initial situation in the climate chamber

zuhalten. Der daraus resultierende Eigenspannungszustand nach der Montage bleibt bei der Planung unberücksichtigt. Nicht nur die Lage im Tragwerk ist für das Zusammenfügen der Bauteile von Relevanz, sondern auch die Stoßart, die Ausbildung der Schweißnähte sowie die Reihenfolge des Zusammenfügens. Bild 2 dokumentiert drei Arten der Stoßausbildung. Trägerstöße werden häufig als U- oder Z-Stoß ausgeführt. Hierbei wird der Stegstoß gegenüber den Gurtstößen um 300 mm bis 500 mm versetzt. Durch eine geeignete Schweißfolge und gleichmäßiges Füllen des Stoßes wird versucht, den Stoßbereich möglichst frei schrumpfen zu lassen. Halsnähte und andere Längsnähte werden offen gehalten, bis alle Stumpfnähte geschlossen sind. Je nach Blechdicke ergeben sich Mindestdehnlängen zwischen 900 mm bis 1.500 mm. Aufgrund seiner bevorzugten Anwendung in der Praxis wurde als Stoßgeometrie der Z-Stoß gewählt [2]. In den folgenden Abschnitten werden die Herstellung unter variabler Umgebungstemperatur sowie die Ergebnisse der Eigenspannungsmessung und Schweißsimulation thematisiert. Die Daten bilden den Ausgangspunkt zur Bewertung der Wirkung des Stoßbereichs auf die Tragfähigkeit. Abschließend sind hieraus abgeleitete Empfehlungen für das Schweißen dicker Bleche unter Baustellenbedingungen angegeben.

2 Herstellung des Demonstrators

Die unter Werksbedingungen hergestellten Träger wurden im Großklimaraum zu einem Demonstrator gefügt. Hierbei wurde der Temperaturbereich in drei Schritten zwischen 20°C und -10°C variiert. Aufgrund geltender Arbeitsschutz-

vorschriften werden in Deutschland unterhalb dieser Temperatur keine Baustelschweißungen durchgeführt. Ziel war es, großmaßstäbliche Bauteile zu verwenden, um mögliche Maßstabeffekte zu reduzieren. Bild 5 zeigt die gewählte Geometrie (Z-Stoß). Die Lagerung der Bauteile erfolgte durch eine speziell entwickelte Versuchsanlage. Deren Bemessung wurde auf

Grundlage der zu erwartenden Querschrumpfung durchgeführt. Diese wurde durch mehrere, analytische Ansätze vereinfacht abgeschätzt. Da der Montagestoß einem Bauteil auszug gleichkommt, sind die Träger beidseitig eingespannt gelagert (E-E). Versuchsrahmen, Schienenfahrzeug für den Versub und die Einbausituation im Großklimaraum sind in Bild 4 dargestellt. Die Positionierung der Bauteile im Rahmen simuliert zeitgleich den Montagefall auf einer Baustelle hinsichtlich Zugänglichkeit und damit verbundener Schweißpositionen.

Tabelle 1 zeigt die Versuchsmatrix für insgesamt sechs Montagestöße, jeweils drei einer Materialgüte. Bis auf marginale Unterschiede in ihrer Zusammensetzung sind die Druckbehälterstähle (P) äquivalent hinsichtlich ihrer Schweißbeugung sowie der mechanischen und thermophysikalischen Eigenschaften. Die Herstellung des Demonstrators erfolgte mit dem Schweißverfahren 136, Metallaktivgasschweißen mit Fülldrahtelektrode. Auf der Baustelle sind das E-Handschweißen und das MAG-Schweißen die am häufigsten eingesetzten Schweißverfahren. Aufgrund der Vorteile bei der Abschmelzleistung gilt das MAG-Schweißen heute als Standard, gerade für dickwandige Bauteile. Hierbei werden sowohl Massiv- als auch Fülldrahtelektroden eingesetzt. Bei richtiger Auswahl besitzen letztere Vorteile bei der Spaltüberbrückung, beim Einbrand sowie in Zwangslagen. Durch die im Vergleich zum Massivdraht höhere Stromdichte wird die Abschmelzleistung bei gleicher Stromstärke gesteigert. Hierdurch kann die Schweißzeit für dicke Bauteile und mehrere Lagen gesenkt werden. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist das Schweißen bei tiefen Temperaturen. Durch die Anpassung der Zusammensetzung werden hohe

Werte der Kerbschlagarbeit erzielt [3].

Die Bereitstellung der Schweißtechnik, die Erstellung der Schweißpläne sowie die Durchführung der Schweißarbeiten erfolgte durch die im Projektbegleitenden Ausschuss (PbA) vertretene IMO Leipzig GmbH. Die IMO Leipzig GmbH verfügt über langjährige Erfahrungen bei der Montage dickwandiger Bauteile der untersuchten Stahlgüten. **Bild 5** zeigt exemplarisch die Nahtvorbereitung sowie die Schweißreihenfolge. Die 30mm dicken Gurte sind als 2/3-DV-Naht in den Positionen PA (Wanne) und PE (Überkopf) ausgeführt. Der 15mm dicke Steg wird durch eine vertikale, symmetrische DV-Naht in der Position PF (steigend) verschweißt. Der Öffnungswinkel beträgt jeweils 50°. Das Verschweißen des Stegs erfolgt über drei Abschnitte im Pilgerschrittverfahren. Prozessbedingt sind Steignähte mit einer größeren Pendelbewegung des Brenners verbunden. Es gilt zu beachten, dass alle Nähte gleichmäßig aufgefüllt werden. Im letzten Schritt erfolgt das Schließen der Halskehlnähte. Weitere Details sind dem Schweißfolgeplan zu entnehmen [4]. Das Einhalten der festgelegten Vorwärm- und Zwischenlagentemperaturen wurde durch Glühmatten realisiert. Die Bereitstellung der Vorwärmtechnik erfolgte durch die Firma Sokol-THERM. **Bild 6** veranschaulicht Auszüge der Schweißarbeiten im Großklimarraum.

Der Fügeprozess wurde durch Temperaturmessungen mithilfe von Thermoelementen des Typs K dokumentiert. Die Anordnung am Demonstrator kann **Bild 7** entnommen werden. Die Auswertung der Messergebnisse ergab für beide Materialien, unabhängig von der Umgebungstemperatur, qualitativ und quantitativ übereinstimmende Temperaturfelder. Zu begründen ist dies durch die jeweils gleichen Anforderungen an die Einhaltung

Tabelle 1. Versuchsmatrix: Herstellung des Demonstrators
Table 1. Experimental program: Manufacturing of the demonstrator

Material	P355NL2			P460NL		
Temperatur	20 °C	0 °C	-10 °C	20 °C	0 °C	-10 °C
Versuch	MS II	MS III	MS IV	MS V	MS VI	MS VII

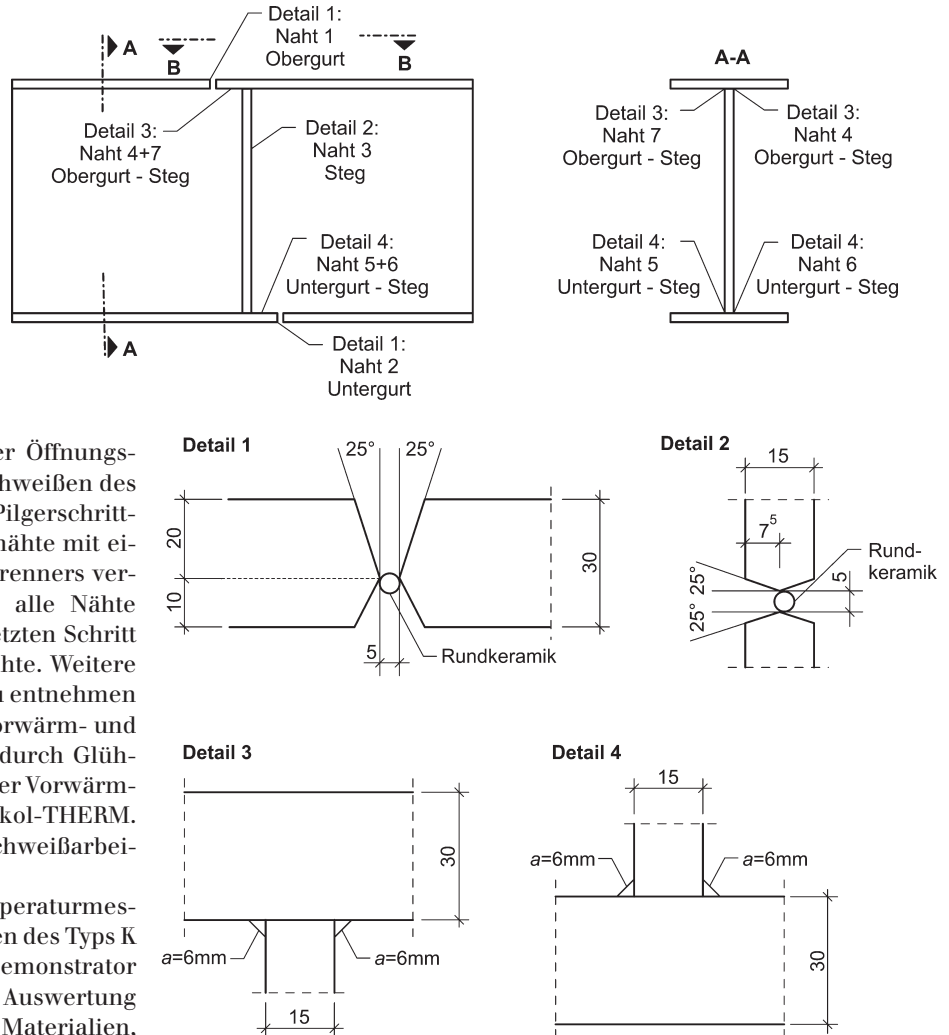


Bild 5. Schweißplan des Demonstrators (Übersicht), mit Detail 1: 2/3-DV-Naht im Ober- und Untergurt, Detail 2: DV-Naht im Steg und Detail 3: Schließen der Halskehlnähte [4]
Fig. 5. Welding plan of the demonstrator (overview), with detail 1: 2/3-DV-weld for the lower and upper chord, detail 2: DV-weld for the web and detail 3: closing the fillet welds [4]

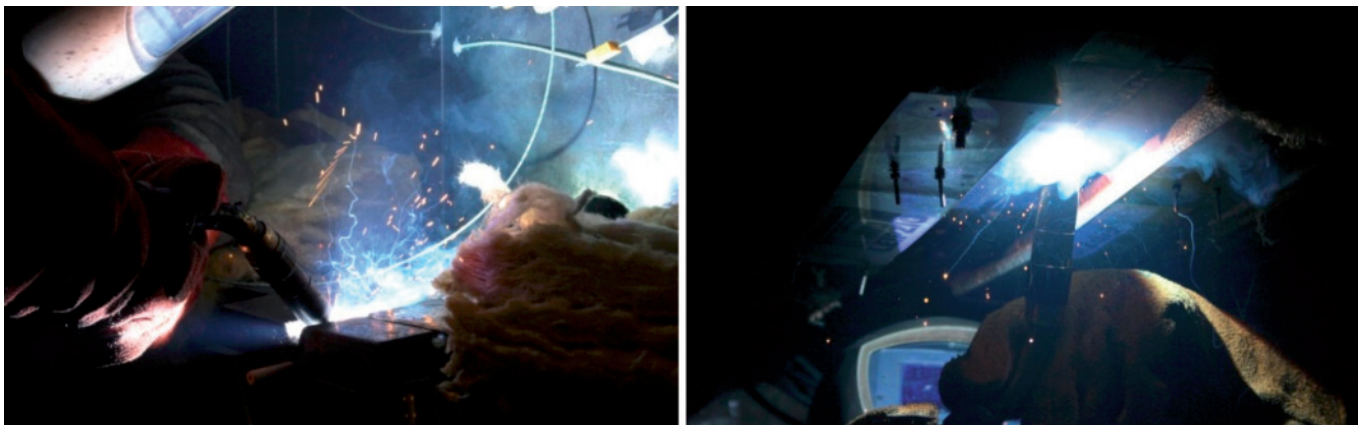


Bild 6. Schweißarbeiten in der Klimakammer bei tiefen Temperaturen, Wannen- (PA) und Überkopfposition (PE)
Fig. 6. Welding in the climate chamber at low temperatures, flat (PA) and overhead position (PE)

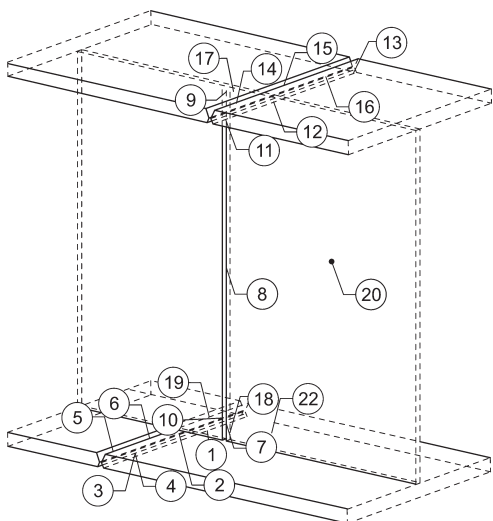


Bild 7. Anordnung und Nummerierung der Thermoelemente [4]
 Fig. 7. Positioning and numbering of the thermocouples [4]

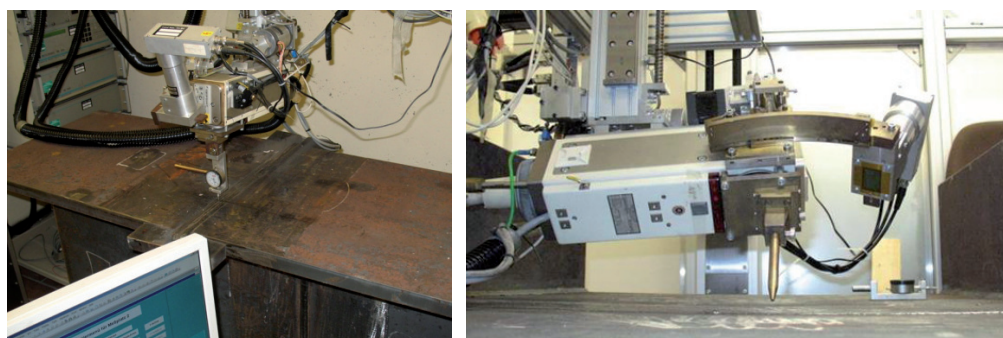


Bild 8. Eigenspannungsmessung durch Röntgendiffraktometrie, ifs
 Fig. 8. Residual stress measurement by X-ray diffraction, ifs

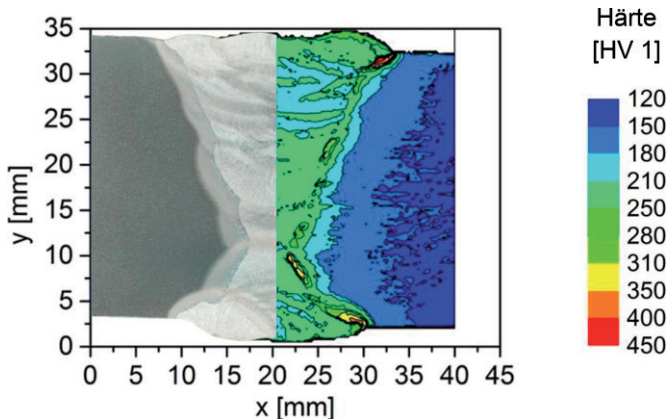


Bild 9. Makroschliff und Härtemessung am Obergurt des MS II [4]
 Fig. 9. Macro section and hardness measurement for the upper chord of MS II [4]

von Vorwärm- und Zwischenlagentemperaturen, Abschnitt 3. Die Makrospannungsbestimmung erfolgte röntgenografisch durch ein mobiles Diffraktometer am Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs) in Braunschweig. Bestimmt wurden Quer- und Längseigenstress bezogen auf die jeweilige Schweißnaht (Bild 8). Zusätzlich wurden metallografische Untersuchungen durchgeführt. Bild 9 zeigt stellvertretend den Makroschliff und die Härteverteilung der Flanschnaht des Montagestoßes (MS) II.

3 Einfluss der Umgebungstemperatur

Bereits frühe Auswertungen des gemessenen Temperaturverlaufs zeigten, dass das Abkühlverhalten weitestgehend unabhängig von der Umgebungstemperatur ist. Exemplarisch dokumentiert Bild 10 zwei Temperaturverläufe des MS II und MS IV. Sowohl die Spitzentemperatur als auch die Abkühlrate sind für einen Temperaturunterschied von 30°C nahezu identisch. Für dickwandige Bauteile dominiert die Wärmeleitung innerhalb des Bauteils gegenüber dem Wärmeverlust durch Konvektion. Bei Einstellung gleicher Vor- bzw. Zwischenlagentemperaturen, müssen die Abkühlverläufe demnach weitgehend deckungsgleich verlaufen. Aufgrund der Ergebnisse während des Projekts wurde die Anzahl der Probekörper aus P460NL reduziert.

In der Folge sollte auch der Eigenspannungsverlauf für unterschiedliche Temperaturprofile keine signifikante Abweichung aufzeigen. Bild 11 zeigt den Vergleich der Längs- und Quereigenstressverläufe am Obergurt des MS II und MS IV. Bild 12 stellt zusätzlich die Ergebnisse für P355 und P460 gegenüber. Die dargestellten Eigenstressverteilungen lassen weder einen ausgeprägten Werkstoffeinfluss, noch einen Einfluss der Umgebungstemperatur erkennen. Beide Stähle sind normalisierend gewalzte Feinkornbaustähle. Der geringe Einfluss der Materialgüte auf die gemessene Eigenstresshöhe ist daher vermutlich auf eine tatsächlich nur geringe Differenz der Streckgrenze rückführbar. In

Querrichtung treten für alle Fälle Spitzenwerte der lokalen Zugeigenstressungen in Höhe von circa 250 MPa auf, in Längsrichtung liegen die höchsten Werte bei 300 MPa bis 450 MPa. Schwankungen sind auf die manuelle Schweißung rückführbar und stehen nicht unmittelbar in Verbindung zum Material oder zur Umgebungstemperatur. Bild 13 zeigt exemplarisch Ergebnisse der Härtemessung. Im Makroschliff, jeweils linksseitig dargestellt, zeigt sich der mehrlagige, kaskadenförmige Nahtaufbau. Ein negativer Einfluss der Umgebungstemperatur, beispielsweise im Hinblick auf eine mögliche Aufhärtung, ist auch hier erwartungsgemäß nicht feststellbar. Abweichungen sind hier vielmehr durch die Handschweißung und die Unterschiede im Lagenaufbau bedingt und daher grundsätzlich nicht zu vermeiden.

Bei einer Schweißung mittels Mehrlagentechnik wird, je nach Abstand der zuletzt geschweißten Raupe, eine Umkristallisation und Umkörnung benachbarter Lagen erzielt [5]. Kritische Härtewerte werden hierdurch abgebaut. Hierbei ist die Einhaltung einer geeigneten Zwischenlagentemperatur zu beachten. Eine zu hohe Temperatur unterstützt die Grobkornbildung, eine zu geringe Temperatur führt zu einer unzureichenden Kornverfeinerung. Wichtig ist daher sowohl die Festlegung des Lagenaufbaus als auch die Temperaturführung über die gesamte Schweißdauer. Alle durchgeführten Schweißungen besitzen eine gute Qualität und entsprechen normativen Vorgaben [4]. Einzig der Schliff am MS IV zeigte einen Wurzelfehler, der jedoch nicht auf die

Umgebungstemperatur, sondern auf ein unsachgemäßes Ausschleifen der Wurzellage zurückzuführen ist.

Fazit: Wird eine fachgerechte Schweißung durchgeführt, ist das Schweißen bei tiefen Temperaturen bis zu einer Umgebungstemperatur von -10°C aus der Sicht der Eigenspannungen sowie im Hinblick auf eine mögliche Aufhärtung unkritisch. Dies wird sowohl durch Temperatur- und Eigenspannungsmessungen als auch durch Härtemessungen belegt. Kleinmaßstäbliche Versuche des ifs an einem Stumpfstoß mit vierlagiger DV-Naht ohne Vorwärmung zeigten ebenfalls keine signifikante Auswirkung des Ausgangstemperaturunterschieds auf das Eigenspannungsbild [4]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich nach dem Schweißen der ersten Lage eine konstante Zwischenlagentemperatur einstellt. Da das Schweißen bei derartiger Witterung hohe Anforderungen an den Schweißer stellt, ist es baupraktisch empfehlenswert, keine Schweißungen unter -5°C durchzuführen. Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit bei niedrigen Umgebungstemperaturen auf die Schweißverbindung wurde nicht untersucht. Aussagen zur Kaltrissgefährdung sind folglich nicht möglich.

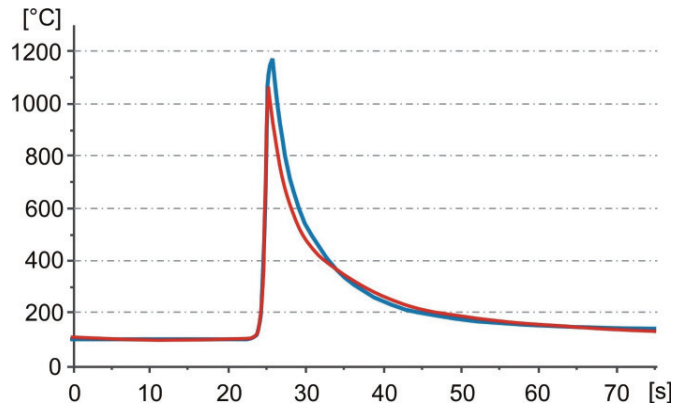


Bild 10. Vergleich der gemessenen Temperaturverläufe an vergleichbaren Messstellen zwischen MS V (blau, 20°C) und MS VII (rot, -10°C) [4]
 Fig. 10. Comparison of the temperature profiles at comparable measuring points between MS V (blue, 20°C) and MS VII (red, -10°C) [4]

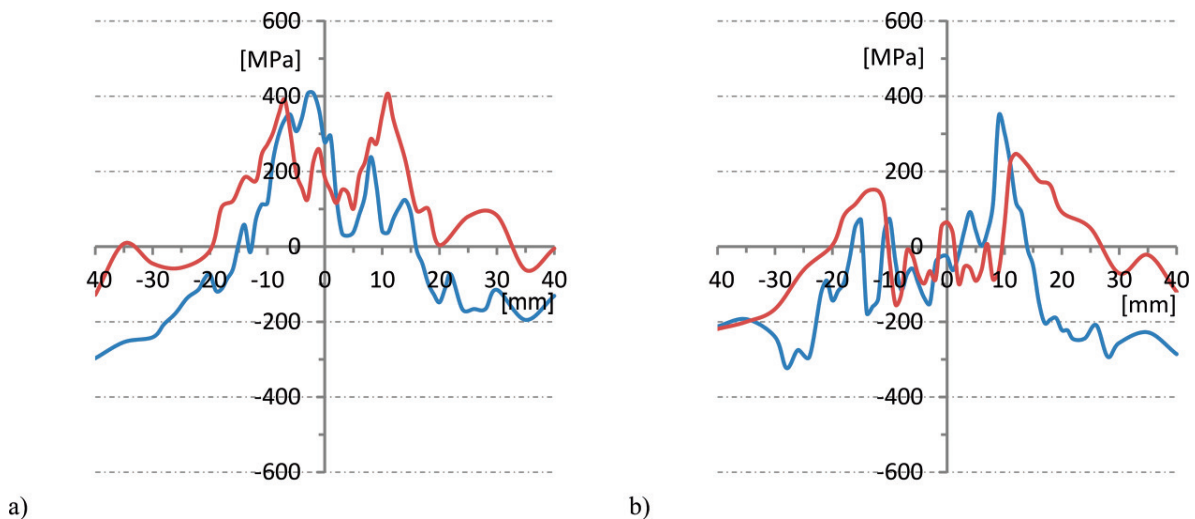


Bild 11. Eigenspannungsverläufe im Nahtbereich des MS II (blau, 20°C) und MS IV (rot, -10°C): a) Längseigenspannung, b) Quereigenspannung [4]
 Fig. 11. Residual stress profile around the weld of MS II (blue, 20°C) and MS IV (red, -10°C): a) longitudinal residual stress, b) transverse residual stress [4]

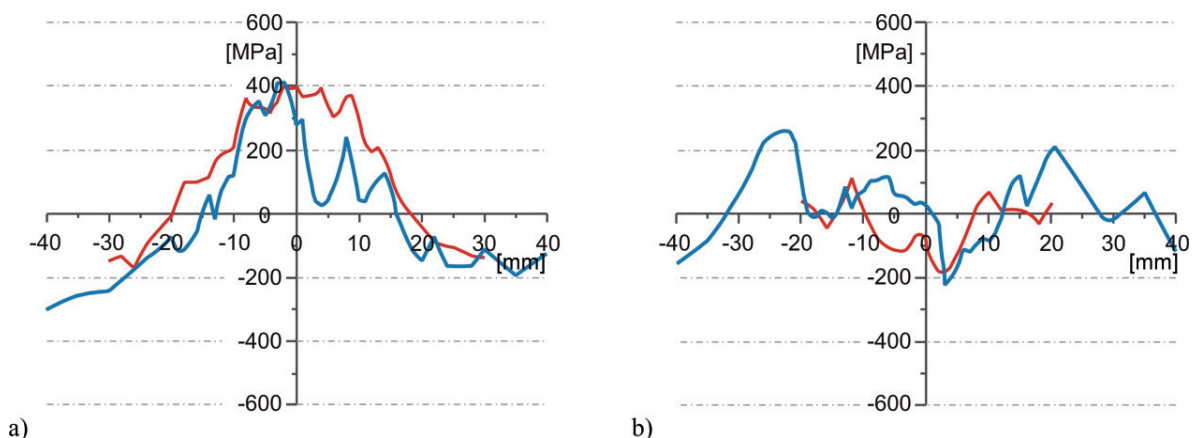


Bild 12. Vergleich der Eigenspannungsverläufe für P355 (blau, MS II) und P460 (rot, MS IV), jeweils bei 20°C : a) Längseigenspannung, b) Quereigenspannung [4]
 Fig. 12. Comparison of the residual stress profiles for P355 (blue, MS II) and P460 (red, MS IV), each at 20°C : a) longitudinal residual stress, b) transverse residual stress [4]

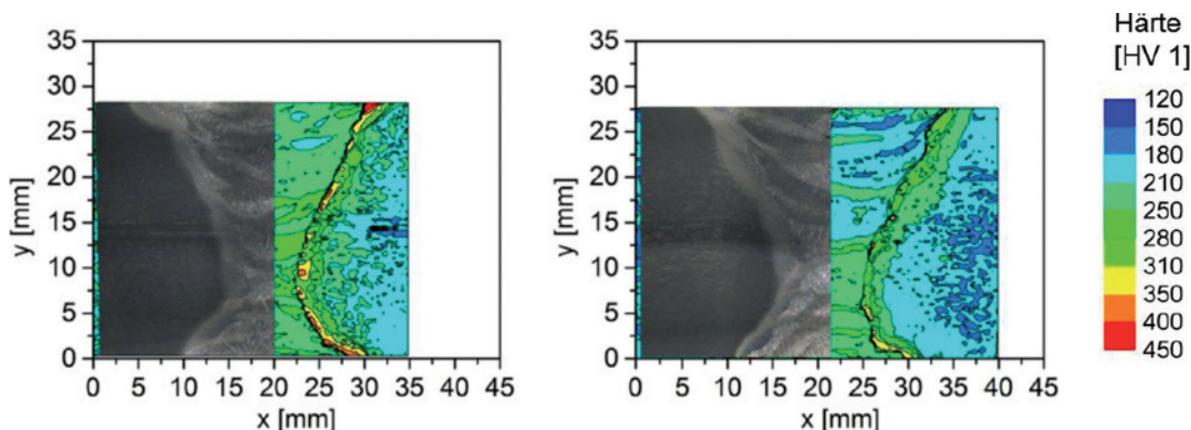


Bild 13. Vergleich der Härtemessung zwischen 20°C (links) und -10°C (rechts) für P460 (MS V und MS VII) [4]
 Fig. 13. Comparison of hardness measurements for 20°C (left) and -10°C (right) for P460 (MS V and MS VII) [4]

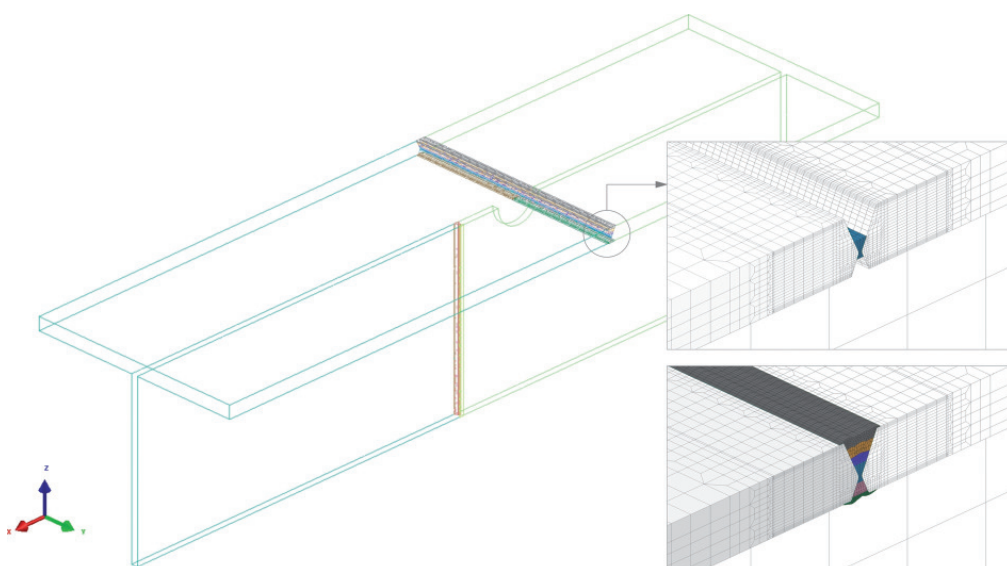


Bild 14. Schweißsimulationsmodell des Demonstrators, Sysweld: Isometrie und Vernetzung; dargestellt für den Obergurt: a) nach dem Schweißen der Wurzel, b) vollständig verfüllter Stoß [4]
 Fig. 14. Welding simulation model of the Demonstrator, Sysweld: Isometry and mesh; displayed for the upper chord: a) after welding the root, b) completely filled joint [4]

4 Schweißsimulation des Montagestoßes

Die Grundlagen der Schweißsimulation sowie die Anwendung am Teildemonstrator sind bereits in Teil 1 beschrieben [1]. Bild 14 zeigt das numerische Modell des Demonstrators in Sysweld, das am ifs erstellt wurde. Zur Verringerung des Rechenaufwands wird analog zum Teildemonstrator das halbe Modell mit Symmetrieebene betrachtet. Im Experi-

ment wurden die Gurtverbindungen mit mehr als 20 Schweißraupen verschweißt. Die Berechnungszeit dieses Modells läge im Bereich mehrerer Monate und erfordert daher die Einführung zusätzlicher Vereinfachungen. Der aus dem Versuch abgeleitete Nahtaufbau sowie der vereinfachte Nahtaufbau sind in Bild 15 dargestellt. Der Lagenaufbau wurde mit sechs Lagen im Flansch und drei Lagen im Steg vereinfacht. Wegen des selbst bei Vereinfachung großen Aufwands, ist die Methodik für die praktische Anwendung ungeeignet. Aufgrund der Ergebnisse aus Abschnitt 3 wird die Umgebungstemperatur mit 20°C angenommen. Die Eigenstressverteilung aus der Teildemonstratorfertigung sowie das Schließen der Halskehlnähte wurden nicht berücksichtigt, was einer weiteren Vereinfachung entspricht. Stellvertretend werden die Ergebnisse des MS II dargestellt. Die durch die Simulation berechneten Verläufe zeigten dennoch eine ausreichende Übereinstimmung mit den Messergebnissen (Bild 16). Es zeigte sich, dass der Fehler für die Querspannungskomponente durchweg etwas größer ausfällt. Ursache ist unter anderem die Vereinfachung des Lagenaufbaus. Das Zusammenfassen einzelner Raupen beeinflusst die Ausdehnungsbehinderung quer zur Naht mehr als es in Längsrichtung der Fall ist [6].

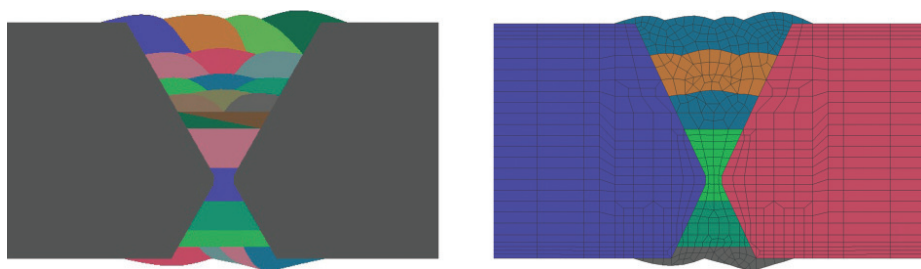


Bild 15. Vollständiger Lagenaufbau im Gurt (23 Raupen) und vereinfachter Lagenaufbau mit 6 Raupen für die Simulation [4]
 Fig. 15. Full bead sequence for the chord (23 layers) and simplified bead sequence with 6 layers for the simulation [4]

Bild 17 dokumentiert die Verteilung der Längseigenstressungen im Flansch und Steg, jeweils für die Mittelebene bei 0,5t. Die zugehörige Schnittdarstellung in Bild 18 belegt, dass für die Längseigenstressung, anders als beim Teildemonstrator, im Zugbereich kein wesentlicher Di-

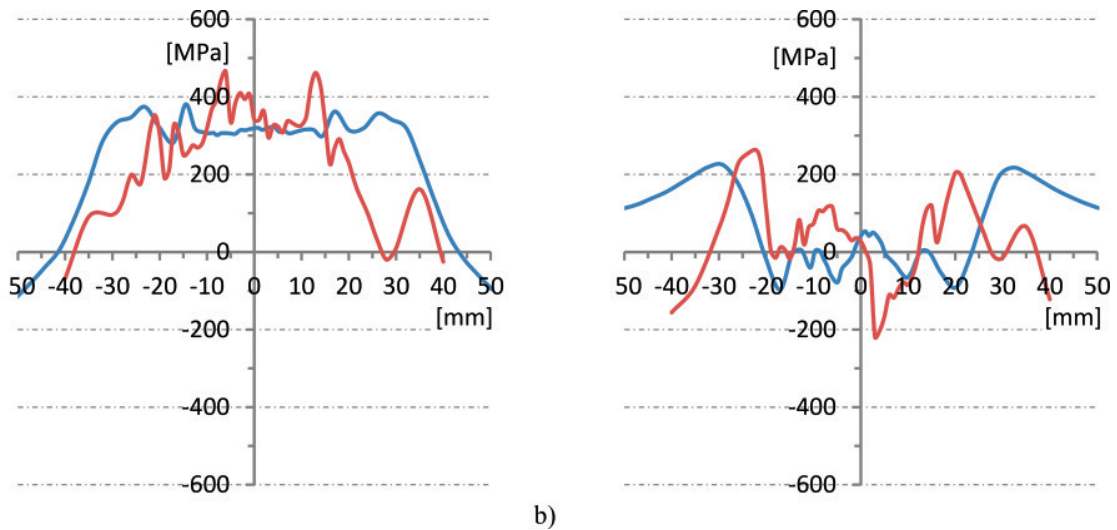


Bild 16. Vergleich zwischen simulierter (blau) und gemessener (rot) Eigenspannungsverteilung im Obergurt des MS II, jeweils 140 mm vom Rand [4]
 Fig. 16. Comparison between the simulated (blue) and measured (red) residual stress distribution for the top flange of MS II, 140 mm from the edge [4]

ckeneinfluss besteht. Die Eigenspannungsmaxima erreichen im Nahtbereich die Fließgrenze des Grundwerkstoffs. Im Flansch werden lokal Werte bis 450 MPa, im Steg teils Werte über 500 MPa erreicht. Der Übergang zwischen Zug- und Druckbereich liegt etwa 60 mm zur Schweißnahtmitte entfernt. Die Maxima der Druckeigenspannung sind bei -180 MPa im Flansch und -210 MPa im Steg. Mit zunehmender Entfernung von der Schweißnaht klingen diese schnell ab, der Wirkungsbereich entspricht beidseitig etwa 300 mm. Zu den Randbereichen fällt die Längsspannung aus Gleichgewichtsgründen auf null ab. Für die Traglastberechnung wird diese als konstant angesetzt.

Die Quereigenspannungsverteilung im Flansch und Steg, ebenfalls für die Mittelebene bei 0,5 t, ist Bild 19 zu entnehmen. Quereigenspannungen in Plattenebene entstehen infolge der Querkontraktion der abkühlenden Naht besonders bei fest eingespannten Plattenrändern, wie sie beispielsweise im Montagestoß vorliegen. Dort wirken sie, anders als beim Teildemonstrator, längs zur Belastungsrichtung und sind aufgrund des hohen Einspanngrads der Naht zu berücksichtigen. Die dabei auftretenden Zugeigenspannungen klingen über einen Bereich von etwa 300 mm zur Schweißnahtmitte ab. Wegen des Gleichgewichts sind der Anfangs- und Endbereich der Naht gedrückt. Die Schnittdarstellung in Nahtmitte zeigt Bild 20. Die Maxima der Zugeigenspannung betragen circa 200 MPa. Diese treten im Bereich der Wurzel auf. Im Mittel liegt die Zugeigenspannung etwa bei 1/3 der Fließgrenze. Im Bereich der Decklagen treten lokal

Druckspannungen auf. Diese resultieren aus der inhomogenen Abkühlung zwischen Kern und Außenseite und sind besonders im Flansch erkennbar. Die Druckspannung im Randbereich, hier nicht dargestellt, erreicht etwa 250 MPa bis 300 MPa.

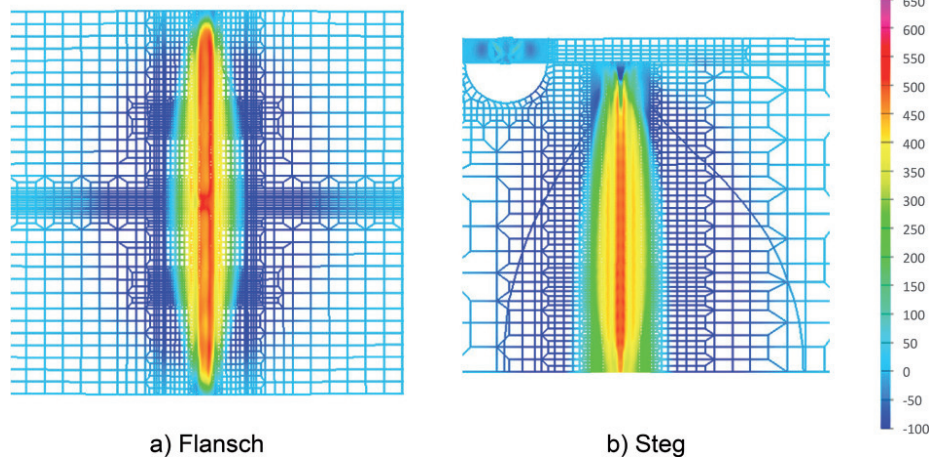


Bild 17. Längseigenspannungen [MPa] am Montagestoß, Schnitt jeweils bei 0,5 t (Mittelebene)
 Fig. 17. Longitudinal residual stresses [MPa] at the assembly joint, each section at 0,5 t (midplane)

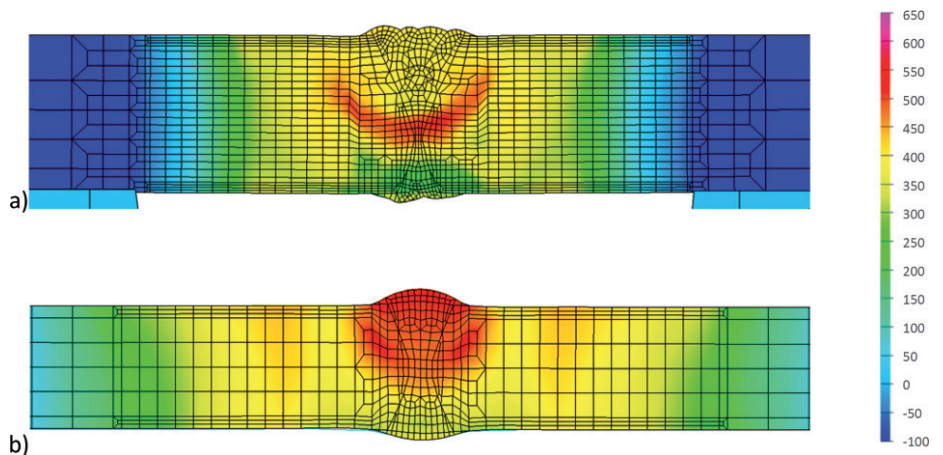


Bild 18. Längseigenspannungen [MPa]: Querschnitt, Schnitt bei 0,5 L (halbe Nahtlänge); a) Flansch, b) Steg
 Fig. 18. Longitudinal residual stresses [MPa]: Cross section, sectioning at 0,5 L (half weld length); a) flange, b) web

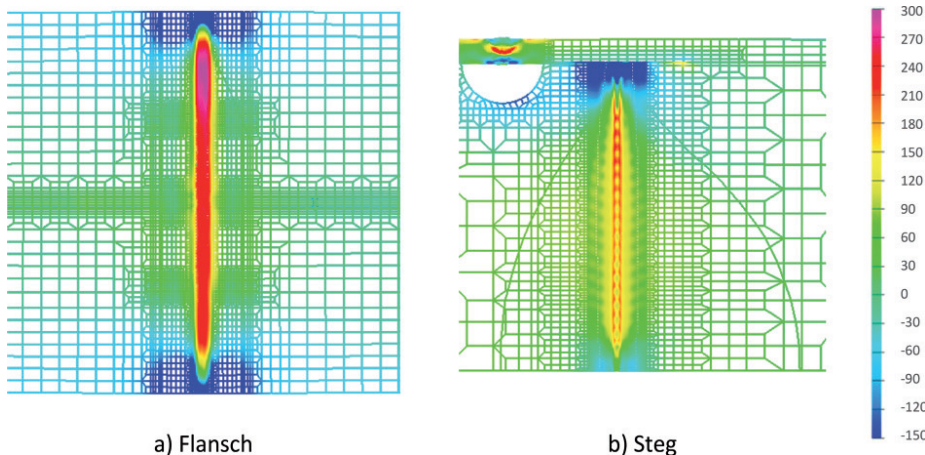


Bild 19. Quereigenspannungen [MPa] am Montagestoß, Schnitt jeweils bei 0,5 t (Mittelebene)
 Fig. 19. Transverse residual stresses [MPa] at the assembly joint, each section at 0,5 t (midplane)

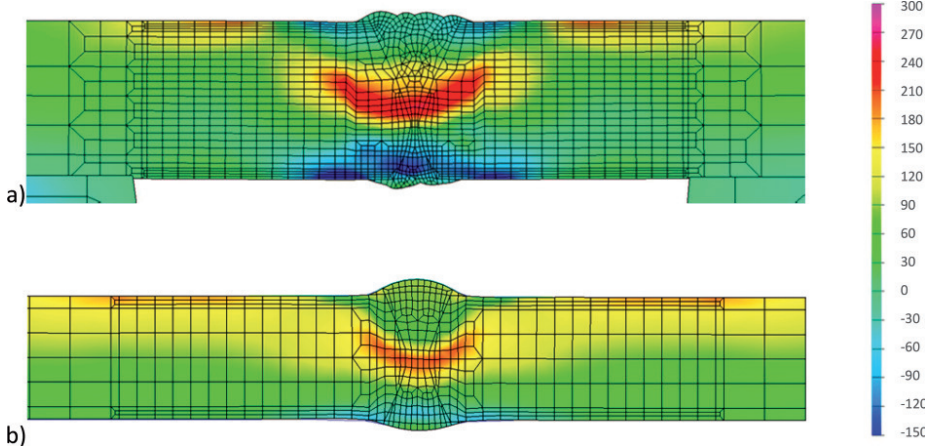


Bild 20. Quereigenspannungen [MPa]: Querschnitt, Schnitt bei 0,5 L (halbe Nahtlänge); a) Flansch, b) Steg
 Fig. 20. Transverse residual stresses [MPa]: Cross section, sectioning at 0,5 L (half weld length); a) flange, b) web

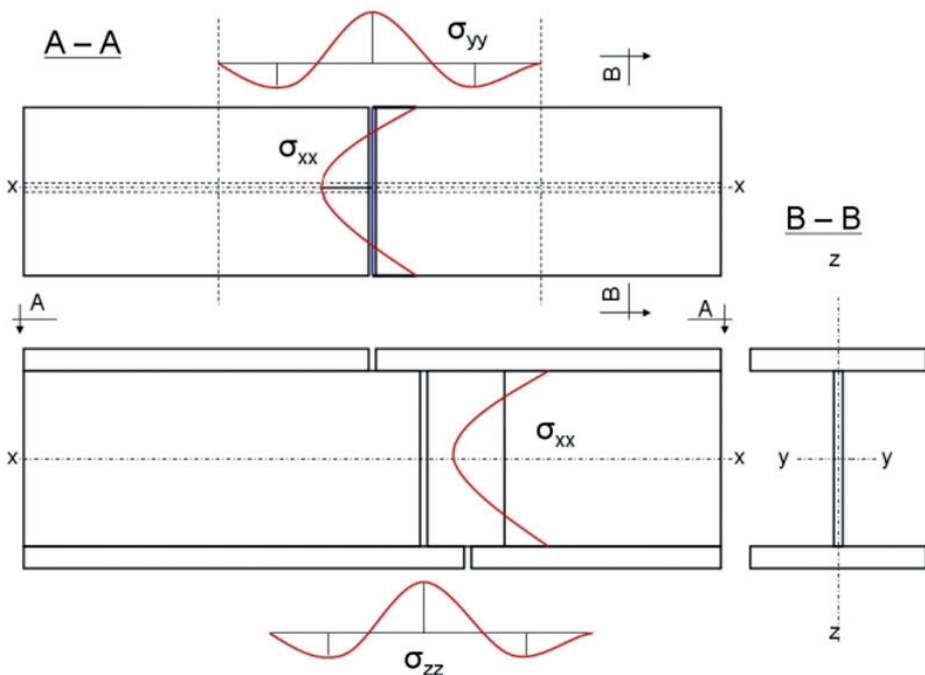


Bild 21. Idealisierter Eigenspannungsverlauf im Montagestoß (Z-Stoß), Modell für die Traglastberechnung
 Fig. 21. Idealized residual stress profile at the assembly joint (Z-joint), proposed model for the calculation of load capacity

5 Implementierung und vereinfachte Modelle

Der Eigenspannungsverlauf am Montagestoß kann in Anlehnung an den für Stumpfstöße typischen Verlauf in Längs- und Querrichtung angenähert werden. Dies wird durch die in Abschnitt 4 dargestellten Ergebnisse bestätigt. Ein entsprechendes Modell für die Traglastberechnung zeigt **Bild 21**. Als erste Näherung wurde der kontinuierliche Verlauf durch Spannungsblöcke ersetzt. In **Bild 22** ist stellvertretend die Approximation der Längseigenspannung im Flansch dargestellt. In Längsrichtung wird der Verlauf als konstant angenommen. Die Zuweisung innerhalb des numerischen Modells erfolgt durch Partitionierung des Stoßbereichs. Nach der Vernetzung erfolgt die Zuweisung jeweils über Element-Sets. Für die Querspannungskomponente sind Zug- und Druckbereiche analog zu approximieren. Lokale Druckspannungswerte, wie sie für die Decklagen vorliegen, können am Schalenmodell nicht berücksichtigt werden. Der Übergang zwischen Zug- und Druckzone in Nahtlängsrichtung ist unter Einhaltung des Gleichgewichts festzulegen. **Bild 23** zeigt schließlich die implementierten Verläufe, jeweils für die Längs- und Quereigenspannung sowie als Vergleichsspannung. Die Spannungswerte klingen innerhalb eines Bereichs von 300 mm zur Schweißnahtmitte ab. Wie die Ergebnisse in Abschnitt 3 belegen, hat ein Umgebungstemperaturunterschied von 30 °C keine Auswirkung auf die Eigenspannungsverteilung. Eine direkte Implementierung der Berechnungsergebnisse ist sehr aufwendig und mit Problemen verbunden. Diese betreffen insbesondere die Vernetzung, die nach Möglichkeit konform sein sollte (Dimensionalität, Netzdicke) und die Materialeigenschaften. Bei verschiedenen Netzen können sich erhebliche Abweichungen ergeben. Da für die Traglastberechnung ferner ein elasto-plastisches Materialmodell verwendet wird, können Eigenspannungswerte oberhalb der Fließgrenze, die beispielsweise aus der Verfestigung oder der Gefügeumwandlung resultieren, nicht unmittelbar überführt werden. Die Schnittstelle Schweißsimulation-Traglastanalyse konnte daher nicht

nahtlos realisiert werden und bedarf weiterer Forschung. Die Kopplung beider Simulationen bildet einen Inhalt innerhalb eines Folgeprojekts [7]. Wünschenswert ist der Einbau solcher Schnittstellen in vorhandene Softwarepakete. Um den Rechenaufwand für derartige Aufgaben weiter zu reduzieren und eine Kopplung zu erleichtern, bildet die Schweißsimulation am Schalenmodell eine Alternative. Der Einfluss des Lagenaufbaus geht hierbei verloren, muss jedoch aufgrund bestehender Rechenrestriktionen und begrenzter Zeitvorgaben ohnehin stark vereinfacht werden, Abschnitt 4. Bei der Zusammenfassung mehrerer Lagen ist die Streckenergie entsprechend anzupassen. Die Summe der eingebrachten Energien bleibt gleich. Die Anpassung erfolgt über die Schweißgeschwindigkeit, die, abhängig von der Anzahl der zusammengefassten Lagen, anteilig aufsummiert wird.

6 Nichtlineare Traglastberechnung

Mithilfe der durchgeführten Traglaststudie sollte der Einfluss zusätzlicher Stoßbereiche am Beispiel des hier betrachteten Z-Stoßes bewertet werden. Hierbei wurden zwei Fälle für die Stoßanordnung unterschieden, jeweils für drei unterschiedliche Schlankheitsgrade ($\bar{\lambda} = 0,6; 1,0; 1,4$). Für die erste Variante wurde der Stoß ungünstigst in Feldmitte gelegt. Die zweite Variante beinhaltet die Anordnung im Viertelpunkt. **Bild 24** zeigt stellvertretend das Traglastmodell für

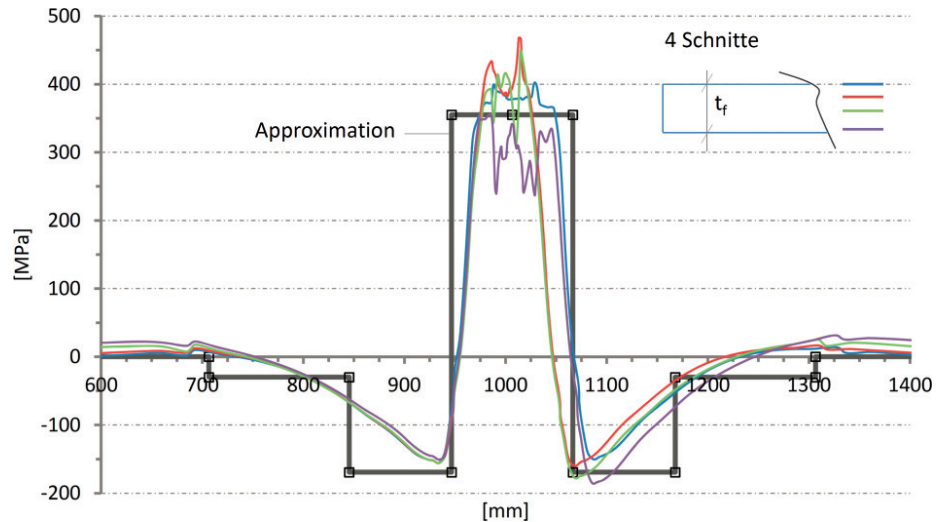


Bild 22. Approximation des Eigenspannungsverlaufs [MPa] in Längsrichtung, dargestellt für den Flansch
 Fig. 22. Approximation of the residual stress profile [MPa] in longitudinal direction, displayed for the flange

$\bar{\lambda} = 0,6$ und mittige Stoßanordnung. Als Elementtyp wurden Schalenelemente des Typs S4R verwendet. Die durchschnittliche Elementkantenlänge beträgt 25 mm und entspricht der Vernetzung des Teildemonstrators [1]. Im Bereich des Montagestoßes war die Vernetzung, abhängig von der Partitionierung, anzupassen. Die Implementierung der Ergebnisse der Schweißsimulation beschreibt Abschnitt 5. Analog zum Teildemonstrator wird ein beidseitig gelenkig gelagerter Träger unter planmäßiger Druckbeanspruchung betrachtet. Als Referenzwert für die Tragfähigkeitsanalyse soll die Traglast ohne Eigenspannungsansatz und bei Annahme einer globalen Vorkrümmung dienen. Letztere beträgt nach Fertigungsnorm (DIN EN 1090-2) maximal $L/750$. Für die Berechnung kann der Wert um 20% abgemindert werden

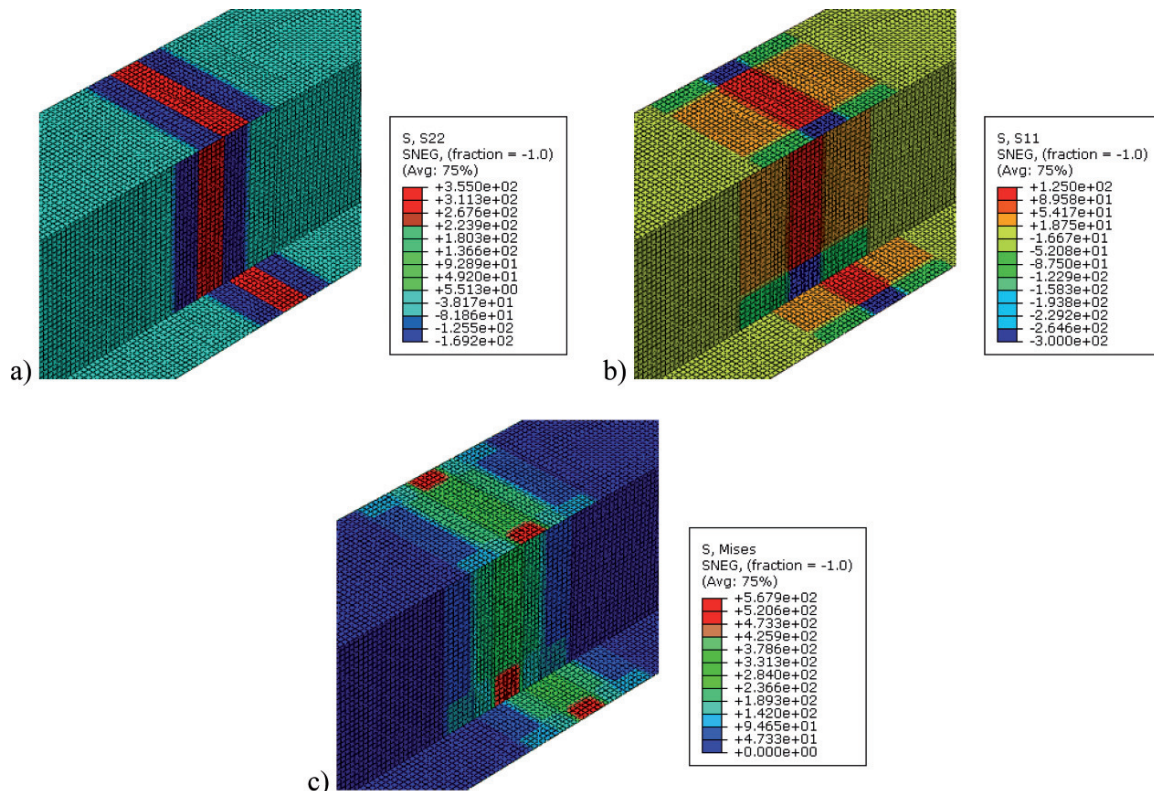


Bild 23. Implementierte a) Längs- und b) Quereigenspannungen und c) v. Mises Vergleichsspannung am Montagestoß, Abaqus 6.11-3
 Fig. 23. Implemented a) longitudinal and b) transverse residual stresses and c) v. Mises equivalent stress at the assembly joint, Abaqus 6.11-3

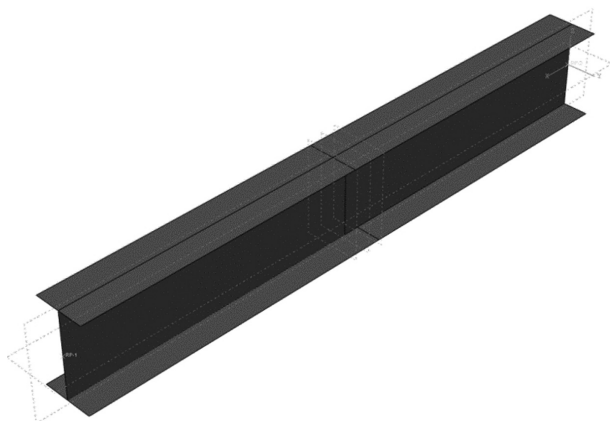


Bild 24. Modell für die Traglastberechnung, exemplarisch für $\bar{\lambda} = 0,6$ und mittige Stoßanordnung, Abaqus 6.11-3

Fig. 24. Model for calculation of load capacity, exemplary for $\bar{\lambda} = 0,6$ and centric positioning of the joint, Abaqus 6.11-3

(DIN EN 1993-1-5, Anhang C). Aufgrund der Ergebnisse am Teildemonstrator, wird der lokale Schweißverzug nicht erfasst. Die für den Montagestoß ermittelten Verzüge sind lokal begrenzt und in ihrer Größenordnung als vernachlässig-

Tabelle 2. Ergebnisse der nichtlinearen Traglastberechnung: Abminderungsfaktoren der Tragfähigkeit
Table 2. Results of the nonlinear numerical calculations: Reduction factors for the load capacity

bez. Schlankheitsgrad	0,6	1,0	1,4
ohne Montagestoß, Referenzwert	0,997	0,723	0,436
mit Montagestoß, Trägermitte	0,961 -3,6 %	0,690 -4,6 %	0,426 -2,2 %
mit Montagestoß, Viertelpunkt	0,977 -2,1 %	0,706 -2,3 %	0,433 -0,5 %

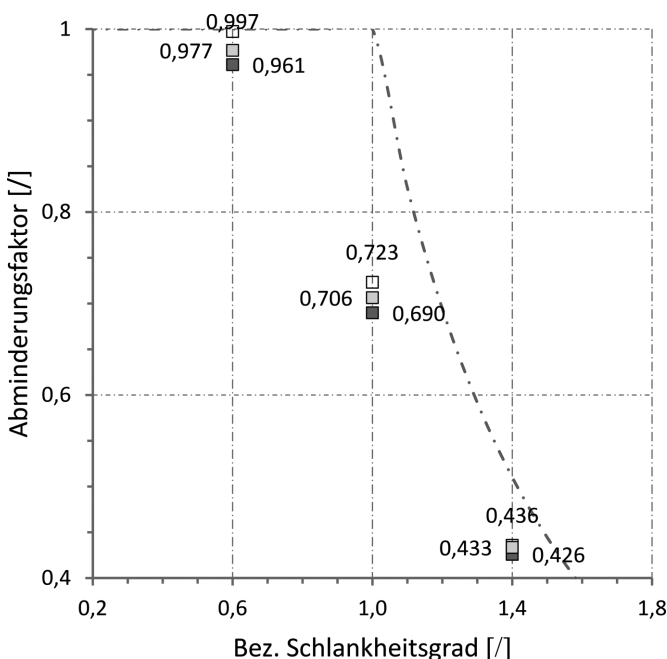


Bild 25. Auswertung der Traglastberechnung (weiß: ohne Montagestoß, dunkel: mit Montagestoß in Trägermitte, hell: Montagestoß im Viertelpunkt), Darstellung mittels Abminderungsfaktoren

Fig. 25. Evaluation of numerical results (white: without assembly joint, dark: with assembly joint, centric positioning, light: with assembly joint, positioning at quarter point), illustration as reduction factors

bar einzustufen. Für die gewählte Trägergeometrie ist der Einfluss nicht relevant. Zur Implementierung der Ergebnisse des Teildemonstrators wird die Verwendung einer äquivalenten Vorkrümmung empfohlen. Hierdurch kann die Höhe der Traglast, im ersten Schritt ohne Montagestoß, zunächst auf das Niveau der Berechnung am Träger, respektive Teildemonstrator, reduziert werden. Im zweiten Schritt werden die Ergebnisse des Demonstrators, hier nur der Eigenspannungszustand, lokal übertragen. Um die Betrachtung auf die Bewertung des Stößeinflusses zu beschränken, wurde der erste Schritt vereinfacht durchgeführt. Als Vergleichswert gegenüber dem Fall mit Montagestoß dient daher die Traglast des ungestoßenen Trägers mit sinus- oder parabelförmiger Vorkrümmung ($0,8L/750$). Da der Eigenspannungsansatz des Teildemonstrators nicht übertragen wurde, liegen die Abminderungsfaktoren höher, die Vergleichbarkeit mit normativ vorgegebenen Werten ist nicht gegeben.

Bild 25 zeigt die Auswertung der Berechnungsergebnisse, jeweils für die Stoßanordnung in Feldmitte und im Viertelpunkt. Anhand der Differenz der betrachteten Grenzfälle kann der Einfluss des Stoßbereichs bewertet werden (Tabelle 2). Die maximale Reduzierung der Tragfähigkeit lag für alle untersuchten Fälle unter 5 %. Im Hinblick auf die bei der Bemessung vorhandene Sicherheit und das gültige Sicherheitskonzept, erscheint eine Vernachlässigung durchaus gerechtfertigt. Bild 26 beinhaltet die Gegenüberstellung der Fließzonenmuster im Versagenszustand. Der Montagestoß führt dazu, dass der Querschnitt im Stoßbereich vorzeitig durchplastiziert, was sich in einer Reduzierung der Tragfähigkeit äußert. Bei Anord-

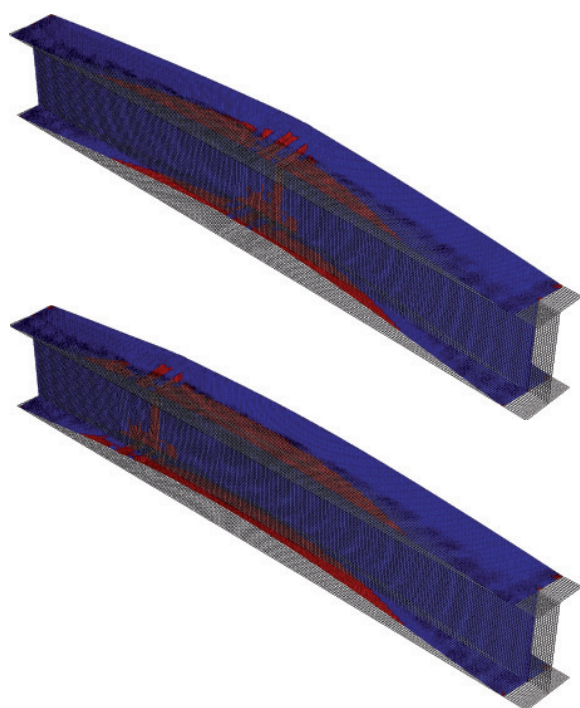


Bild 26. Fließzonen ausbreitung im Versagenszustand, exemplarisch für $\bar{\lambda} = 0,6$: a) Montagestoß in Trägermitte, b) Montagestoß im Viertelpunkt

Fig. 26. Yield zone pattern at mode of failure, exemplary for $\bar{\lambda} = 0,6$: a) centric positioning of the assembly joint, b) positioning at quarter point

nung im Viertelpunkt verschiebt sich der Störbereich, die Auswirkung wird hierdurch reduziert. Sofern möglich, ist der Montagestoß daher außerhalb hoch beanspruchter Bereiche anzuordnen. Im Beispiel halbiert sich der Einfluss. Fazit: Der Einfluss des Montagestoßes im betrachteten Fall ist für die Gesamtbetrachtung, selbst im ungünstigsten Fall in Trägermitte, vernachlässigbar, kann aber bei andersartigen Problemfällen einen größeren Teil zum Versagensbild beitragen. Im Einzelfall ist der Einfluss vorab abzuwägen. Es zeigte sich, dass die Anwendung bekannter Modelle am Montagestoß auch für komplexe und mehrlagige Stöße näherungsweise zutrifft. Ist eine erste Abschätzung während der Planung zu treffen, empfiehlt es sich, die Eigenspannungswerte konservativ abzuschätzen. Hieraus kann eine Entscheidung über den Einfluss des Störbereichs getroffen werden. Ein Vorgehen hierfür wurde aufgezeigt. Die Anordnung der Montagestöße ist zu beachten. Nach Möglichkeit sollte der Stoßbereich in gering beanspruchte Konstruktionsbereiche gelegt werden. Ein wesentliches Kriterium für die Herstellung der Schweißstöße ist das Fachwissen der Betriebe und die Qualifikation der Schweißer.

7 Empfehlungen

Der erste Teil der Veröffentlichung [1] beschrieb die Fertigung des Teildemonstrators unter Werksbedingungen und zeigte deutlich das Potenzial bei Einsatz der Schweißsimulation sowie durch Erarbeitung verbesserter Modell- und Nachweiskonzepte. Der zweite Teil behandelte die Verbindung zweier Träger im Montagestoß. Hierbei wurde der Z-Stoß als typische Stoßgeometrie gewählt. Wesentliche Inhalte bildeten die Bewertung des Schweißens bei niedriger Umgebungstemperatur, die Schweißsimulation des Montagestoßes sowie die Darstellung eines möglichen Konzepts zur Überführung in eine nichtlineare Traglastberechnung. Ziel war es die grundlegende Wirkung eines Störbereichs darzustellen. Die folgende Aufzählung fasst die Ergebnisse am Montagestoß zusammen. Voraussetzung für die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist grundsätzlich die Ausführung fach- und normgerechter Schweißungen durch erfahrende Schweißer.

- Niedrige Umgebungstemperaturen bis -10 °C haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Schweißspannungen und die Härteverteilung.
- Aus Gründen des Arbeitsschutzes empfiehlt es sich, Schweißungen unterhalb -5 °C nicht durchzuführen.

- Nicht normgerecht hergestellte, kleinmaßstäbliche Proben zeigten ebenfalls keinen Einfluss der Umgebungstemperatur. Ursache ist die Einstellung einer konstanten Zwischenschichttemperatur nach dem Schweißen der ersten Lage.
- Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit bei niedrigen Umgebungstemperaturen wurde nicht untersucht.
- Die Schweißstruktursimulation der Montagestöße dickwandiger Träger mit mehreren Lagen ist prinzipiell möglich.
- Aufgrund der Rechenzeit für dickwandige Träger mit vielen Lagen ist der Lagenaufbau zwingend zu vereinfachen.
- Mit Blick auf die Durchführung von Traglastanalysen sind vereinfachte Simulationsmodelle oft ausreichend.
- Die Implementierung von Modellen der Schweißsimulation ist aktuell mit vielen Problemen verbunden, ein direkter Ergebnisübertrag erfordert konforme FE-Netze und Materialmodelle.
- Für eine Abschätzung des Einflusses derartiger Störbereiche empfiehlt sich die Verwendung vereinfachter Modelle, im Vorhaben wurde hierfür eine Methodik aufgezeigt.
- Die nichtlineare Traglastberechnung am Montagestoß zeigte für alle untersuchten Fälle einen Einfluss $\leq 5\%$, für andersartige Problemfälle ist eine Erfassung im Einzelfall abzuwägen.
- Die Anordnung des Stoßbereichs sollte, wenn möglich, außerhalb hoch beanspruchter Konstruktionsbereiche erfolgen.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 16937 BG der FOSTA-Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen 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] Pasternak, H., Krausche, T.; Launert, B.: Schweißen von Trägern mit dicken Blechen, Teil 1: Trägerfertigung unter Werksbedingungen – Planung, Herstellung und Simulation. In: Bauingenieur 89 (2014), Heft 10, S. 395–404
- [2] Hänsch, H.; Krebs, J.: Eigenspannungen und Formänderungen in Schweißkonstruktionen – Grundlagen der praktischen Anwendungen. Fachbuchreihe Schweißtechnik (Band 138), DVS-Verlag, 2006
- [3] Roset, R.; Karasev, M.: Rohrleitungsbau unter russischen Klimabedingungen – Einsatz und Entwicklung von Fülldrähten zum Schweißen. Tagungsband, Internationales Symposium Schweißtechnik, Cottbus, 2013
- [4] 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

- [5] Rethmeier, M.; Schwenk, C.; Heinze, C.: Optimierung von Verzug und Eigenspannungen beim Schweißen dickwandiger Bauteile. Abschlussbericht, Forschungsvorhaben P 784/08/2008 / IGF-Nr. 15746 N, 2011
- [6] Klassen, J.; Nitschke-Pagel, T.; Dilger, K.: Einfluss negativer Umgebungstemperaturen auf die resultierenden Schweißspannungen großmaßstäblicher Schweißstrukturen, Tagungsband, Schweißen und Wärmebehandlung, Weimar, 2013
- [7] Pasternak, H.; Kannengießer, T. et al.: Erhöhung der Tragfähigkeit geschweißter I-Profile aus hochfestem Baustahl durch verbesserte Ansätze zur Berücksichtigung von Eigenspannungen, Forschungsvorhaben P1035/04/2014 / IGF-Nr. 18104 BG. Laufzeit: bis 04/2016