

Festigkeitsbewertung hochfester MSG-Verbindungsschweißungen anhand von Querzugversuchen

U. Reisgen, R. Sharma, M. Christ, K. Mäde, S. Münstermann, M. Dölz und B. Tekkaya, Aachen

Die Bauteilauslegung erfolgt in vielen Industriebereichen durch einen streckgrenzenbasierten Ansatz, bei dem eine homogene Festigkeitsverteilung innerhalb des gesamten Bauteils angenommen wird. Für den Festigkeitsnachweis von Schweißverbindungen wird in der zerstörenden Prüfung mittels Querzugversuch ein Bruch im unbeeinflussten Grundwerkstoff angestrebt. Dies stellt in der Praxis speziell für hochfeste Baustähle mit Streckgrenzen ≥ 1100 MPa eine den Einsatz limitierende Hürde dar, weil hier unter Nutzung kommerzieller Schweißzusätze oftmals keine festigkeitsbezogene „Overmatching“-Situation im Schweißgut gewährleistet ist.

Die durchgeführten Arbeiten verfolgen das Ziel, die individuellen Eigenschaftsprofile metallurgisch inhomogener Querzugproben aus Verbindungsschweißungen ortsaufgelöst zu charakterisieren und unter Berücksichtigung der schweißtechnischen Verarbeitungsbedingungen zu bewerten. Die Durchführung von Querzugversuchen mit begleitendem Einsatz eines digitalen Bildkorrelationssystems ermöglicht eine spezifische Zuordnung und Quantifizierung der lokalen Dehnungsbeiträge der jeweiligen Zonen. Schädigungsmechanische Modellierungsansätze erweitern den Lösungsansatz sowohl mikrostrukturell durch Abbildung repräsentativer Volumenelemente als auch makroskopisch durch Darstellung der Werkstoffeigenschaften im Gesamtverbund. Aus der Zusammenführung experimenteller und numerischer Untersuchungsergebnisse werden relevante Zusammenhänge bei der Festigkeitsbewertung metallurgisch inhomogener Querzugproben herausgestellt.

1 Einleitung

Das Fertigungsverfahren „Schweißen“ wird nach DIN EN ISO 9001 [1] als „spezieller Prozess“ definiert, dessen Qualität am gefertigten Produkt nicht in vollem Umfang überprüft werden kann. Aus diesem Grund hat sich die Definition von Qualitätsanforderungen etabliert, die u.a. eine Vorgabe von Ausführungsparametern der Schweißung fordert. Diese Parameter werden in einer Schweißanweisung festgehalten, die über eine Verfahrensprüfung (z.B. nach DIN EN ISO 15614-1 [2]) qualifiziert wird. Die Prüfung erfolgt hier u.a. über Querzugversuche, also quer zur Schweißnaht orientierte Zugversuche, deren Durchführung in DIN EN ISO 4136 [3] beschrieben ist. Der Querzugversuch liefert nach dieser Norm jedoch lediglich Aussagen über die Bruchkraft und die Bruchlage. Dies stellt die klassische Form der Festigkeitsbewertung von Schweißverbindungen dar, bei der lediglich die Einhaltung von Mindesteigenschaften ermittelt wird, nicht aber deren ortsaufgelöste Verteilung. Für die Auslegung einer Konstruktion wird in der Praxis jeweils die Streckgrenze herangezogen, deren Erfüllung aufgrund der Gefahr einer plastischen Formänderung in jeder Zone gegeben sein muss.

Die aus der Prüfung im Querzugversuch resultierende Spannungs-Dehnungs-Kurve setzt sich aus den kombinierten Materialeigenschaften des Schweißzusatzes und des Grundwerkstoffes zusammen und wird bislang lediglich zur Ermittlung der Zugfestigkeit herangezogen. Dabei wird letztlich eine integrale Spannungs-Dehnungs-Kurve ermittelt. Allerdings erfolgt bei der Prüfung von Schweißverbindungen keine Werkstoffprüfung eines „homogenen“ Werkstoffes, sondern die Prüfung eines inhomogenen Werkstoffverbundes mit individuellen lokalen Eigenschaftsprofilen.

Moderne Baustähle hoher Festigkeitsklassen, die sich gleichzeitig durch gute Zähigkeitseigenschaften auszeichnen, sind kommerziell verfügbar, finden aber dennoch nur selten Einsatz in geschweißten Konstruktionen. Die grundlegende Problematik für den Einsatz höchstfester Baustähle sind neben der Kerbempfindlichkeit im Fall zyklischer Lasten und dem Sprödbuchrisiko beim Tieftemperatureinsatz insbesondere die schweißtechnische Verarbeitbarkeit und die Gewährleistung ausreichender Festigkeitseigenschaften in der Schweißzone. Da das Schweißen hochfester Stähle derzeit überwiegend durch Lichtbogenschweißprozesse (bspw. MSG-Schweißen) unter Verwendung von Zusatzwerkstoff erfolgt, steigen mit zunehmender Grundwerkstofffestigkeit ebenfalls die Anforderungen an den verwendeten Schweißzusatz. Sofern die Festigkeit des erzeugten Schweißgutes geringer als diejenige des Grundwerkstoffes im Ausgangszustand ist, so liegt ein sog. „Undermatching“ vor.

Zur Berücksichtigung des festigkeitsbezogenen „Undermatching“ in der Schweißzone müssen die werkstoffspezifischen Eigenschaftsveränderungen, die durch die Wärmewirkung des Schweißprozesses induziert werden, sowie deren Auswirkungen auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Bauteils auf lokaler Ebene verstanden werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für einen sicheren und breiteren Einsatz von hoch- und höchstfesten Baustählen bei der Auslegung von Schweißkonstruktionen.

Nachfolgend werden die numerisch-experimentell gekoppelten Ansätze vorgestellt, auf deren Basis präzisierte Anwendungsrichtlinien für die Einordnung und Bewertung hochfester Schweißverbindungen anhand von Querzugversuchen formuliert werden können.

2 Material und Methoden

Mittels **Metall-Schutzgasschweißen** (MSG-Schweißen) werden Mehrlagen-Verbindungsschweißungen hergestellt, aus denen nachfolgend Querzugproben entnommen werden. Als Grundwerkstoff dienen die hochfesten Feinkornbaustähle S1100QL und S1100MC, die jeweils in einer Blechdicke von $t = 8$ mm vorliegen und unter Nutzung eines

Schweißzusatzes vom Typ G Mn4Ni2CrMo (DIN EN ISO 16834-A [4]) verschweißt werden. Der Durchmesser des verwendeten Schweißzusatzes beträgt $\varnothing = 1,0$ mm. Als Schutzgas findet ein Mischgas des Typs ISO 14175 – M21-ArC-18 [5] Anwendung. Die Schweißungen erfolgen in Wannenlage als Mehrlagenschweißung mit einer V-Nahtvorbereitung unter Einsatz einer keramischen Schweißbadsicherung. Es werden ein Öffnungswinkel von 60° sowie ein Wurzelspalt von 1 mm gewählt.

Die Schweißparameter werden dahingehend angepasst, dass zuvor festgelegte Abkühlzeiten von $t_{8/5} \approx 5$ s bzw. 10 s realisiert werden. Durch Variation der Abkühlzeiten werden die Gefügeausbildung und damit die (Festigkeits-) Eigenschaften in WEZ und Schweißgut unmittelbar beeinflusst. Unter den gewählten Randbedingungen liegen den Abkühlzeiten von $t_{8/5} \approx 5$ s bzw. 10 s Streckenenergien von $0,47$ kJ/mm („E_{low}“) bzw. $0,75$ kJ/mm („E_{high}“) zugrunde. Bei einer festgelegten Drahtvorschubgeschwindigkeit von $v_D = 10$ m/min wird zur Erreichung der geringeren $t_{8/5}$ -Zeit eine Schweißgeschwindigkeit von $0,45$ m/min gewählt, während zur Erreichung der höheren $t_{8/5}$ -Zeit eine geringere Schweißgeschwindigkeit von $0,30$ m/min gewählt wird. Die Wurzel wird stets mit einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von $v_D = 10$ m/min und einer Schweißgeschwindigkeit von $0,50$ m/min geschweißt.

In Bild 1 ist der Lagenaufbau exemplarischer Verbindungsschweißungen, die mit unterschiedlicher Streckenenergie hergestellt wurden, anhand von Makroschliffen visualisiert.

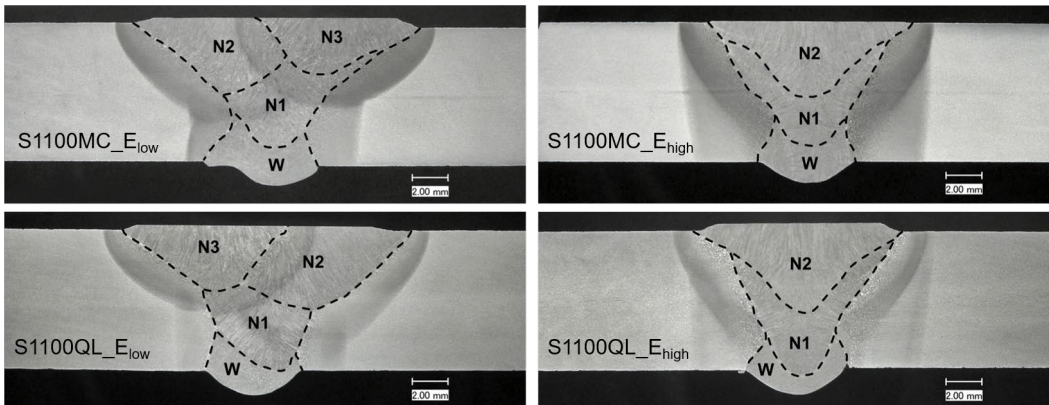


Bild 1. Makroschliffe der Schweißungen (Grundwerkstoffe S1100MC und S1100QL) unter Verwendung unterschiedlicher Streckenenergien (W: Wurzel, N: Nähte der Füll-/ Decklagen).

Zur Vermeidung von Verzug wird auf die Unterseite des vorbereiteten Blechpaares ($L = 500$ mm; $B = 350$ mm) vor dem eigentlichen Verschweißen eine Rahmenkonstruktion angeschweißt. In die Querrippen der Rahmenkonstruktion werden Aussparungen eingebracht, damit die Schweißbadsicherung durchgängig über die gesamte Länge unterhalb des Fügespaltes angebracht werden kann. Die Entnahme der Querkzugproben aus den geschweißten Werkstücken erfolgt mittels Wasserstrahlschneiden, um eine nachträgliche thermische Beeinflussung der Proben zu vermeiden.

Während der Durchführung der Querkzugversuche ermöglicht der Einsatz eines **digitalen Bildkorrelationssystems** (Digital Image Correlation, DIC) eine genauere Aufschlüsselung lokaler Dehnungsbeiträge. Dabei wird vor der Prüfung ein stochastisches Muster auf die Probe aufgebracht, welches während der Versuchsdurchführung durchgehend mit einem Kamerasystem aufgenommen wird. Aus der Verschiebung des stochastischen Musters lassen sich in einem Post-Processing die jeweiligen Dehnungen ortsaufgelöst bestimmen. So lassen sich über die Versuchsdauer die lokalen Einzelbeiträge zur Gesamtdehnung quantitativ erfassen. Basierend hierauf ist die (theoretische) Bestimmung der lokalen Streck- bzw. Dehngrenze möglich. Die unterschiedlichen Dehnungsbeiträge während der Prüfung können den mikrostrukturellen Inhomogenitäten der Zugprobe zugeordnet werden, sodass Rückschlüsse auf die Verformbarkeit der unterschiedlichen Gefügezonen gezogen werden können.

Zur mikrostrukturellen Untersuchung und Gefügedarstellung werden die **optische Lichtmikroskopie** sowie die **Elektronenrückstreubeugung** (Electron Backscatter Diffraction, EBSD) genutzt.

Um das inhomogene Dehnungsverhalten innerhalb einer Querkzugprobe sowohl auf der Mikro- als auch auf der Makroskala simulativ abbilden zu können, müssen die unterschiedlichen Subzonen im Querschnitt einer Schweißverbindung identifiziert und lokale Eigenschaftsunterschiede charakterisiert werden. Anhand von **Härteprüfungen** nach der Methode des sog. **Ultrasonic Contact Impedance** (UCI) können Rückschlüsse auf die Änderung der mechanischen Eigenschaften in den einzelnen Bereichen der WEZ geschlossen werden. Eine alternative Methode zur Bestimmung der lokalen Werkstoffeigenschaften stellt die **Mikroindentation** dar. Im vorliegenden Projekt wird das Eindruckverfahren als weiterentwickeltes Härteprüfverfahren genutzt, um lokale Festigkeitseigenschaften als Vergleichskenngrößen zu ermitteln. Durch die Eindrucktiefe, den gemessenen mechanischen Widerstand und den sog. Pile-Up (Wulstbildung neben dem Eindruck) lassen sich die mechanischen Eigenschaften lokal bestimmen. Die Skala der Untersuchung erstreckt sich dabei über einige Körner, sodass sich das Verfahren insbesondere zur Bestimmung der lokalen Werkstoffeigenschaften im Bereich der WEZ eignet.

3 Ergebnisse

In Bild 2 ist eine Quersugsprobe, auf deren Seitenfläche die im DIC-Postprocessing gewählten Messpunkte markiert sind, schematisch dargestellt. An jedem definierten Messpunkt werden im Rahmen der Datenauswertung die lokalen Informationen bezüglich des jeweiligen Dehnungsverhaltens ermittelt.

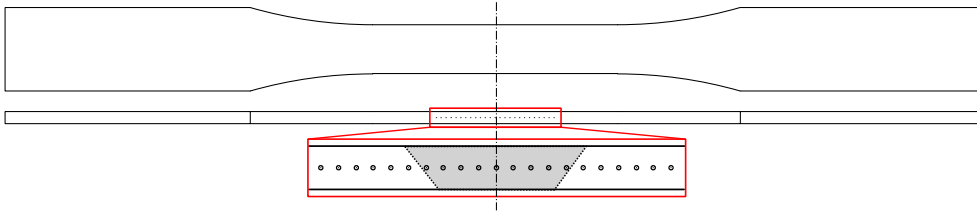


Bild 2. Schematische Quersugsprobe und DIC-Messbereich mit Messpunkten.

Das Diagramm in Bild 3 zeigt die zeitbezogene Auftragung der lokalen Dehnungen, die an den einzelnen Messpunkten ausgelesen werden (hier: Schweißung S1100QL - G Mn4Ni2CrMo, E_{low}). Die einzelnen Kurven repräsentieren folglich spezifische Ortspositionen und damit die lokalen Dehnungsbeiträge innerhalb der Quersugsprobe.

Anhand der Seitenansicht der Probe lässt sich nachvollziehen, dass die einzelnen Messpunkte in verschiedenen (Gefüge-) Zonen der Probe positioniert sind. Die breite Streuung der lokalen Dehnungsbeiträge verdeutlicht die grundsätzliche Eigenschaftsinhomogenität innerhalb der Quersugsprobe. Im angeführten Beispiel treten im Bereich der Anlasszone (türkisfarben; Abstand zur Schweißnahtmitte ca. 6 mm) lokale Dehnungsmaxima $> 10\%$ auf, während andere Bereiche nur sehr geringfügig zur Gesamtdehnung beitragen. Aus dem Anstieg und dem Verlauf der Einzelkurven kann außerdem abgelesen werden, zu welchem Zeitpunkt die Dehnung jeweils auftritt und wie sich diese während des weiteren Versuchsfortschritts jeweils entwickelt (bspw. gleichmäßige Dehnung oder Stagnation durch Kaltverfestigung). Die Gesamtdehnung (hier ca. 3%) wird im Diagramm in Bild 3 durch die integrale Dehnung beschrieben und entspricht etwa der in einem konventionellen Zugversuch bestimmten Bruchdehnung.

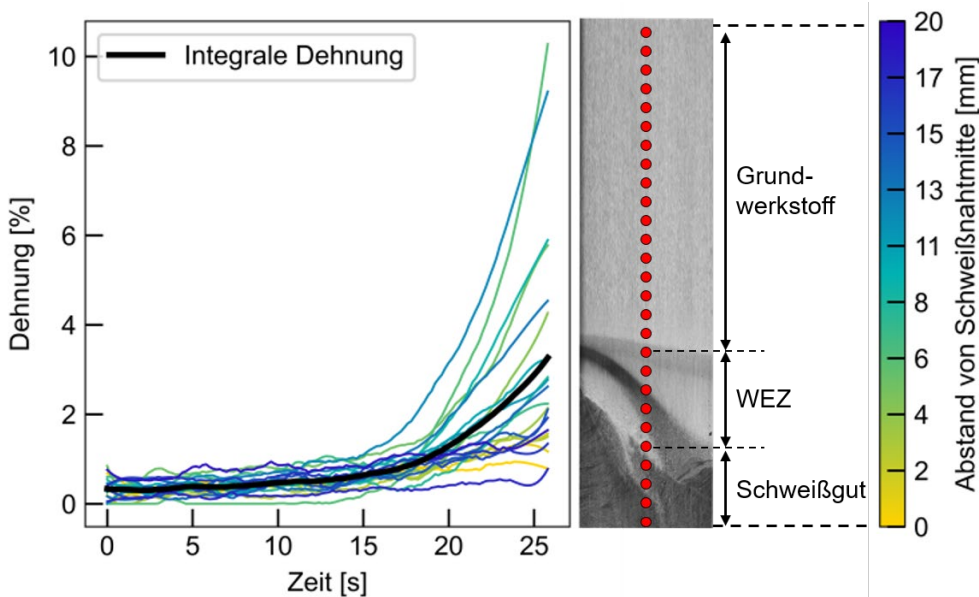


Bild 3. Zeitabhängige Verläufe der lokalen Dehnungen innerhalb der Quersugsprobe einer Verbindungsschweißung.

In kombinierten 3D-Diagrammen lassen sich die lokalen Dehnungen sowohl orts- als auch zeitaufgelöst darstellen. Der Schnitt beim letzten Zeitschritt entspricht dabei einer Projektion des ortsbezogenen Dehnungsprofils unmittelbar vor dem Bruch der jeweiligen Quersugsprobe. Im nachfolgend dargestellten Diagramm (Bild 4) sind die lokalen Dehnungsbeiträge der Schweißungen S1100QL – G Mn4Ni2CrMo unter Nutzung der hohen und geringen Streckenenergie vergleichend gegenübergestellt. Während sich die Dehnungen bei hoher Streckenenergie vornehmlich auf das Schweißgut beschränken, ergeben sich bei geringer Streckenenergie tendenziell höhere Dehnungen in der WEZ.

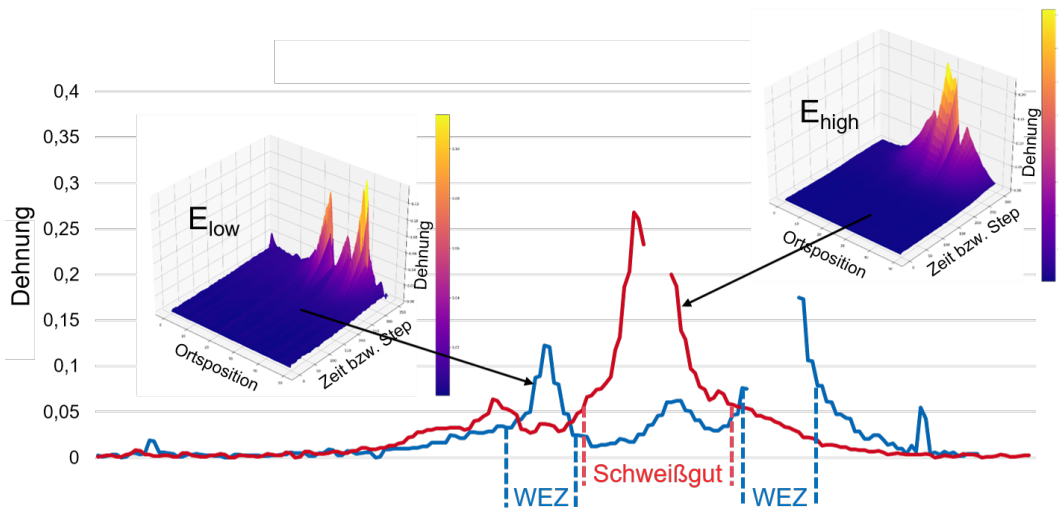


Bild 4. Exemplarischer Vergleich der lokalen Dehnungsbeiträge (Querschnittsprofile kurz vor dem Bruch und 3D-Diagramme).

Aus dem Abgleich zwischen einem lichtmikroskopischen Makroschliff und einem UCI-Härtemapping lassen sich die Subzonen einer Querzugprobe identifizieren und voneinander abgrenzen. Mittels weiterführender EBSD-Analyse lassen sich bspw. die in Bild 5 dargestellten Bereiche unterscheiden (Übergang Grobkornzone/Feinkornzone (1), Schweißgut (2), Anlass-/Feinkornzone (3), unbeeinflusster Grundwerkstoff (4), Grobkornzone (5), Feinkornzone (6)). Die aus der EBSD-Analyse gewonnenen Mikrostrukturinformationen wie bspw. die Korngröße, die Korngeometrie und die Kornorientierung werden als Inputparameter zur Erstellung sog. Repräsentativer Volumen Elemente (RVE) genutzt. Die statische Verteilung der genannten Parameter wird unter Nutzung des MATLAB-Tools MTEX extrahiert und als Input für den am IEHK entwickelten RVE-Generator DRAGEN verwendet [6]. Die RVE beispielhafter Gefügezonen sind in Bild 5 ergänzt.

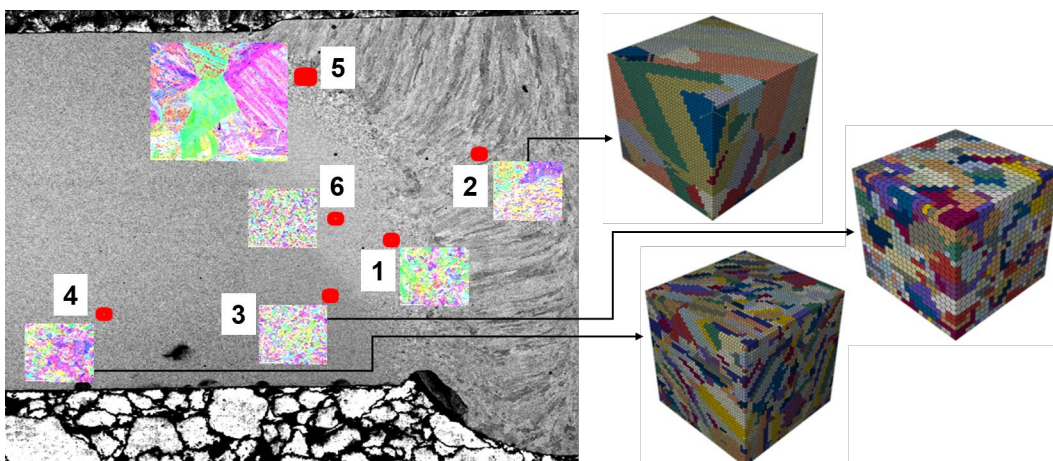


Bild 5. EBSD-Analyse unterschiedlicher Gefügezonen und beispielhafte RVE (Kantenlänge jeweils 20 µm).

Für die Berechnungen der Mikrostruktursimulation werden den RVE phasenspezifische Kristallplastizitätsmodelle mit entsprechenden Parametersätzen zugeordnet. Detaillierte Informationen zum verwendeten Modell sind u.a. in [7] zu finden. Die Materialparameter der unterschiedlichen Gefügezonen des Kristallplastizitätsmodells werden wiederum auf Basis experimentell ermittelter Werkstoffeigenschaften kalibriert. Die Methode der Mikroindentation erweist sich als geeignet, um für jede Gefügezone lokale Spannungs-Dehnungs-Kurven abzuleiten. Die Positionen der Härteeindrücke und die zugehörigen (gemittelten) Spannungs-Dehnungs-Kurven sind Bild 6 zu entnehmen. Während die Streckgrenze und die Zugfestigkeit im Bereich der Anlass-/Feinkornzone (3) am niedrigsten sind, weist die Grobkornzone (5) im Vergleich die höchsten Festigkeiten auf.

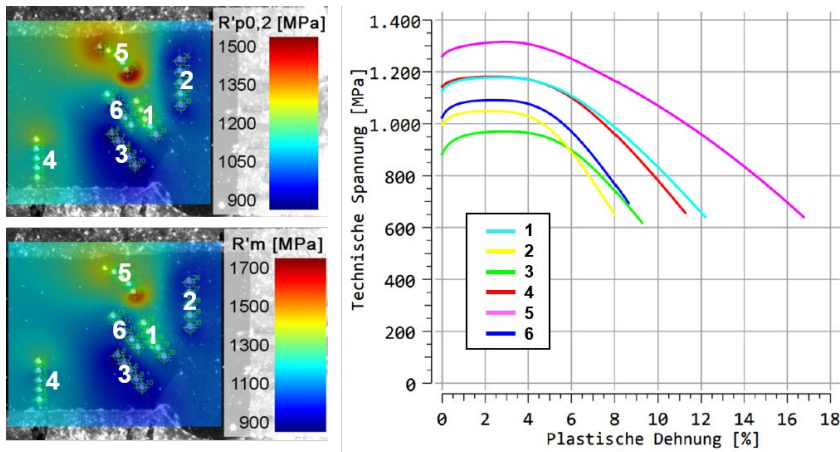


Bild 6. Prüfpositionen der Mikroindenteration und daraus ermittelte lokale Festigkeitswerte und Fließkurven.

Für die makroskalige Simulation des Querzugversuchs wurde zunächst die Querzugprobengeometrie mit Hilfe der Software Autodesk Inventor modelliert. Die Übertragung der Gefügezonen und deren lokal spezifischer Materialeigenschaften (Fließkurven) kann bspw. auf Basis der UCI-Härtemappings und/oder der Ergebnisse der Mikroindenteration erfolgen. Der Import und die Vernetzung der CAD-Datei wurden im vorliegenden Projekt in Abaqus/Implicit umgesetzt.

Der Abgleich der simulierten Fließkurven mit denjenigen Fließkurven, denen die experimentellen Daten zugrunde liegen, ergibt insgesamt eine hohe Übereinstimmung.

Bild 7 veranschaulicht die inhomogene Verteilung der von-Mises-Vergleichsspannung innerhalb der simulierten Querzugprobe einer Verbindungserschweißung bei einer aufgetragenen Verschiebung von 1,8 mm. Im unteren Teilbild ist anhand der roten Färbung zu erkennen, dass sich in der Grobkornzone die höchsten lokalen Spannungen konzentrieren und diese potenziell als kritischer Bereich anzusehen ist.

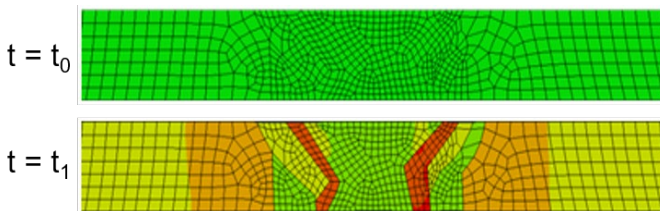


Bild 7. Simulation einer Querzugprobe vor (oben) und nach der simulierten Belastung (unten).

4 Zusammenfassung und Fazit

Das Fehlen eines einheitlichen Bewertungsstandards bezüglich der in Querzugversuchen ermittelten Festigkeiten bedeutet, dass die Risiken bei der schweißtechnischen Verarbeitung hoch- und höchstfester Stähle von den Herstellern selbst abgeschätzt und getragen werden müssen. Teilweise werden deshalb Forderungen an Hersteller von Schweißzusätzen gestellt, eine gewisse Mindeststreckgrenze im Querzugversuch an geschweißten Proben als Abnahmekriterium zu gewährleisten, sodass hierbei oftmals das Risiko von den Komponentenherstellern an die Lieferanten von Schweißzusätzen weitergegeben wird. Die exemplarisch vorgestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass eine bloße Betrachtung der verwendeten (Zusatz-) Werkstoffe nicht hinreichend ist, zumal die lokalen Eigenschaften der Schweißverbindung entscheidend von den jeweiligen Verarbeitungsparametern abhängen.

Durch den Einsatz der DIC lässt sich insofern ein inhaltlicher Mehrwert gegenüber konventionell durchgeführten Zugversuchen erzielen, als die vom Versuchsfortschritt abhängige Entwicklung der lokalen Dehnungsbeiträge anhand der Zeitachse (vgl. 3D-Diagramme) erfasst werden kann. Diese erweiterten Informationen sind insbesondere dann aufschlussreich, wenn eine ausgeprägte Dehnungsinitialisierung vorliegt oder sich bspw. infolge von Kaltverfestigungseffekten die Dehnungsmaxima innerhalb der Probe verschieben und der Bruch letztlich ggf. außerhalb zuvor plastifizierter oder gar eingeschnürter Bereiche einsetzt.

Im Unterschied zur lokalen Dehnung konnten die lokalen Festigkeitseigenschaften anhand von experimentellen Querzugversuchen nur „künstlich“ und näherungsweise über eine aufwendige Auswertung der DIC-Daten ermittelt werden. In der praktischen Festigkeitsbewertung von Querzugversuchen kann diese Betrachtung keine Rolle spielen, weil die Zuordnung einer singulären mikroskopischen Dehn- bzw. Streckgrenze für eine metallurgisch (und ggf. geometrisch) inhomogene Querzugprobe auf der Makroskala nicht möglich ist. Die Bestimmung einer Dehn- bzw. Streckgrenze von Querzugproben ist mit gängigen Prüfeinrichtungen und/ oder vertretbarem Aufwand daher nicht zu realisieren. Wegen der beschriebenen (Gefüge-) Inhomogenität wäre die Angabe einer einzelnen Dehn- bzw. Streckgrenze nicht repräsentativ und daher in der Anwendung keine zweckmäßige Charakterisierung. Als Bestand-

teil des Ergebnistransfers sind Anwender, die mit der Festigkeitsbewertung von Schweißverbindungen anhand von Querzugversuchen befasst sind, hierfür zu sensibilisieren.

Mithilfe des experimentell-numerisch gekoppelten Ansatzes konnte gezeigt werden, dass sich die lokalen Eigenschaftsprofile mit gefügezonenspezifischer Simulation von Fließkurven in guter Näherung abbilden lassen. Ergänzend oder alternativ zur experimentellen Durchführung von Querzugversuchen können numerische Simulationen also künftig dazu beitragen, individuelle Eigenschaftsprofile inhomogen strukturierter Proben zu bestimmen. So können die vorgestellten RVE beispielsweise unter eindimensionaler Zugbeanspruchung virtuell belastet werden, um einzelne Gefügezonen hinsichtlich ihrer (mikro-) mechanischen Eigenschaften zu untersuchen.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 20.439 N / DVS-Nr. 01.3062 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Das Vorhaben wurde am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) sowie am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) durchgeführt. Die Forschungseinrichtungen bedanken sich für die Förderung sowie bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die zuverlässige Unterstützung.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schrifttum

- [1] DIN EN ISO 9001:2015-11, Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:200105); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9001:2015
- [2] DIN EN ISO 15614-1:2017-12, Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung – Teil 1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen (ISO 15614-1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 15614-1:2017
- [3] DIN EN ISO 4136:2013-02, Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Querzugversuch (ISO 4136:2012); Deutsche Fassung EN ISO 4136:2012
- [4] DIN EN ISO 16834:2012-08, Schweißzusätze – Drahtelektroden, Drähte, Stäbe und Schweißgut zum Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen – Einleitung (ISO 16834:2012); Deutsche Fassung EN ISO 16834:2012
- [5] DIN EN ISO 14175:2008-06, Schweißzusätze – Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse (ISO 14175:2008); Deutsche Fassung EN ISO 14175:2008
- [6] Henrich, M.; Pütz, F.; Münstermann, S.: A Novel Approach to Discrete Representative Volume Element Automation and Generation-DRAGen. *Materials* 2020, 13, 1887.
- [7] Roters, F.; Eisenlohr, P.; Hantcherli, L.; Tjahjanto, D.D.; Bieler, T.R.; Raabe, D.: Overview of constitutive laws, kinematics, homogenization and multiscale methods in crystal plasticity finite-element modeling: Theory, experiments, applications. *Acta Materialia* 2010, 58, 1152–1211.