

2014 SCHWEISS- UND PRÜFTECHNIK

07 08 Die Fachzeitschrift der ÖGS und der ÖGfZP

7. ÖGS-Workshop „Automation in der Schweißtechnik“

Datum: 2. Oktober 2014

Ort: FH Technikum Wien

Höchstädtplatz 6, 1200 Wien

FACHHOCHSCHULE
TECHNIKUM WIEN

Anwendungsgebiete und Chancen der Schweißsimulation



- Dr. Marcus Brand, Ingenieurbüro für angewandte Wissenschaften (ifawiss), Ilsede, Deutschland
- Dr. Tobias Loose, Ingenieurbüro, Wössingen (Lkr. Karlsruhe), Deutschland

Einleitung

In visionären Ansätzen von Unternehmen aus Industrie und Forschung wird gern von der virtuellen Fabrik oder auch virtueller Prozesskette gesprochen. Sie setzt sich aus einzelnen Prozessschritten zusammen, die mit numerischen Methoden berechnet werden können. Beispielsweise können die Prozesse des Gießens oder Spritzens, des Umformens oder Fügens bis hin zum Crashverhalten mit numerischen Methoden abgebildet und untersucht werden. In der Gesamtheit bleibt das Schließen der Prozesskette nur größeren Firmen und Forschungseinrichtungen überlassen, die über genügend Manpower und finanzielle Mittel verfügen. Vielfach sehen kleine und mittelständische Unternehmen keinen Sinn darin, eine virtuelle Prozesskette im Unternehmen neben der vorhandenen experimentellen Entwicklung parallel aufzubauen. Der Erkenntnisgewinn steht nicht im Zusammenhang zu den Kosten bzw. der Kosteneinsparung.

Es ist der Eindruck entstanden, dass nur mit der vollständigen Abbildung aller Einflussgrößen eine Simulation aussagekräftig erscheint und weiter, dass die Simulation die experimentelle Entwicklung industrieller Fertigungsschritte, also den Versuchsstand an sich, eines Tages ersetzen wird. So erklärt sich nahezu automatisch, warum sich numerische Simulationen in kleinen und mittelständischen Unternehmen nicht in dem Maß haben durchsetzen können, wie vielleicht zu erwarten gewesen wäre.

Weder das vollständige Abbilden der virtuellen Prozesskette, noch das Ersetzen des Versuchsbaus sind sinnvolle Zielsetzungen der Simulation. Es wird bei der Betrachtung der Prozesskette häufig außer Acht gelassen, dass der Einfluss vorgelagerter Prozessschritte sich in einer Vielzahl von Fällen nur untergeordnet auf das Ergebnis auswirkt.

Der Versuchbau kann durch die Simulation in idealer Weise ergänzt und erweitert, nicht jedoch ersetzt werden. Die numerische oder softwaregestützte Simulation ist als Werkzeug für

die Versuchstechnik aufzufassen. Mit der experimentellen Versuchstechnik und der Simulation können Fertigungsschritte entwickelt und optimiert werden. Beide Werkzeuge – sowohl experimentell als auch numerisch – unterliegen den Gesetzmäßigkeiten aus Versuch, Irrtum und Erfahrung. Am Beispiel der numerischen Schweißstruktursimulation, die abkürzend als Schweißsimulation nachfolgend bezeichnet wird, werden an ausgewählten Beispielen die Anwendungsgebiete und Chancen der Schweißsimulation aufgezeigt.

Aufgaben, Randbedingungen und Ziele der Simulation

In Simulationen wird versucht, das Wesentliche eines physikalischen Vorgangs abzubilden, ohne alle Einzelphänomene detailliert abbilden zu können oder zu müssen. Dieses gewisse Maß an Abstraktion ist notwendig, um mit den bestehenden numerischen Methoden und mathematischen Ansätzen, die in den kommerziellen FE-Codes vorhanden sind, zeitnahe Ergebnisse erzielen zu können. Die Erfahrung des Anwenders liegt in der Abschätzung, welche mathematischen Modelle zur möglichst detailgetreuen Beschreibung der Realität notwendig sind, und welche nicht. So kann das vermeintliche Vereinfachen genauso zu falschen Ergebnissen führen, wie der Ansatz, alle physikalischen Effekte gleichmaßen in einer Simulation abbilden zu wollen. In der Durchführung führt eine systematische Vorgehensweise immer dann zum Erfolg, wenn die Komplexität genau wie bei experimentellen Untersuchungen schrittweise erhöht wird. [Bra12]

Mit der Simulation können physikalische Effekte voneinander entkoppelt betrachtet werden, in Experimenten jedoch nur bedingt. Dieses Alleinstellungsmerkmal der Simulation, Effekte entkoppelt voneinander betrachten zu können, führt nicht nur zu neuen Erkenntnissen und Sichtweisen, sondern bestätigt auch Erfahrungen aus der Praxis des industriellen Alltags.

Die Schweißsimulation enthält wie kaum eine zweite Simulation nahezu alle physikalischen Vorgänge industrieller Fertigungsprozesse. Das Aufschmelzen des Werkstoffs bis zum Ver-

dampfen des Plasma, die Erstarrung des Schweißguts, Strömungsvorgänge im Schmelzbad, Wärmeleitung und -dehnung und Wechselplastizität, Einspannbedingungen und Schweißparameter wie beispielsweise Strom, Spannung, Vorschub, Brennerstellung, Gasgemisch, mikrostrukturelle Änderungen des Festkörpers, die Vorgeschichte des Werkstoffs, Prozessschwankungen, Spaltöffnungen u. v. m. führen zu dauerhaften Formänderungen, die allgemein als Verzug bezeichnet werden [Rad92, Buc91]. Aus diesem werden während der Berechnung die Spannungen abgeleitet, die bei Raumtemperatur als schweißbedingte Eigenspannungen vorliegen [Rad03].

In der industriellen Praxis sind Verformungen und Eigenspannungen von Interesse, da beide Größen das Bauteilverhalten und die Sicherheit beeinflussen können. Die Maßhaltigkeit einer Konstruktion ist ebenso wichtig wie die Lebensdauer von Bauteilen. [Bla06, Hoh08]

Abgesehen von Punktschweißverbindungen sind linear ausgeführte Fügeverbindungen in nahezu allen industriell gefertigten Produkten wiederzufinden. Der überwiegende Teil dieser Verbindungen sind die Schmelzschweißverbindungen mit bewegtem Lichtbogen oder Strahlquellen. Das Fügen von Bauteilen mit Schmelzschweißverfahren kann mit der Schweißsimulation nach der Methode der Finiten Elemente abgebildet werden. Mit einer bewegten Wärmequelle, die einen Geometrie-körper mit innerer Wärmequellenverteilung darstellt und der entlang des Schweißpfads geführt wird, wird der Prozess des Schweißens Schritt für Schritt nachvollziehbar abgebildet. Die bewegte Wärmequelle stellt eine Vereinfachung der Prozesse im Schmelzbad dar.

Kommerzielle Simulationstools, wie Sysweld®, Simufact.welding®, Ansys® und weitere bieten graphische Benutzeroberflächen an, mit denen Bauteile nach der Methode der Finiten Element verschweißt werden können. Die zur Berechnung notwendigen Materialeigenschaften werden Datenbanken entnommen, so dass die Durchführung einer Schweißsimulation grundsätzlich gegeben ist.

Simulationsergebnisse interpretieren

Welche Vorgänge beim Fügen einer Schweißkonstruktion ablaufen, lässt sich nur schwer erkennen, weil das Fügen selbst auf einen vergleichsweise kurzen Zeitraum begrenzt ist und Verformungen, Spannungen und Wärmedehnungen gleichzeitig in Erscheinung treten. Die Formänderungen sind zu den Bauteilabmaßen vergleichsweise klein, und die Eigenspannungen sind ohne weitergehende Untersuchungen nicht zu erkennen; das Fügen kann auch nicht unterbrochen werden, um Messungen durchzuführen. In der Simulation gibt es jedoch die Möglichkeit, zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort Verformungen und Spannungen zu analysieren. Im ersten Beispiel wird ein Dachträger an eine B-Säule mit drei Schweißnähten geschweißt. In dem abgeschlossenen Forschungsvorhaben mit

der AiF-Bezeichnung 13.716N blieb der Kontakt zwischen Dachträger und B-Säule unberücksichtigt, der zwischen den Bauteilen und den Fixierungen am Dachträger und der Festlagerung an der B-Säule besteht. Die Vernetzung wurde den Industrievertretern auf Anfrage vom Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik zur Verfügung gestellt und für die Kontaktberechnung nachträglich modifiziert. Der Dachträger ist an zwei Stellen vor Verrutschen gesichert, die B-Säule an Vorder- und Rückseite an einer Bohrung fest eingespannt. Bild 1 zeigt die Spann- und Kontaktsituation der Gesamtkonstruktion im Ausschnitt.



Bild 1: Dachträger-B-Säule in einer Einspannung vor Schweißbeginn

Mit der Simulation der Laserstrahlquelle durch Wärmequellen in der FE-Modellierung wird das Temperaturfeld berechnet. Die aufeinander zulaufenden Nähte 1 und 2 sowie die Naht 3, die von rechts nach links verläuft, sind in Bild 2 zu erkennen und ergeben eine für das Schweißen typische Temperaturfeldverteilung. Dass zu jedem Ort und zu jeder Zeit die Temperaturen am Bauteil bestimmt und mit experimentellen Daten bestimmt werden können, ist selbstredend für Simulationen. So können aus Temperaturen über der Zeit kritische Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten graphisch nicht nur an der Oberfläche, sondern auch über der Tiefe des Bauteils sichtbar gemacht werden, wo optische Methoden nicht und Thermoelemente nur fehlerbehaftet und mit erhöhtem experimentellen Aufwand messen können.

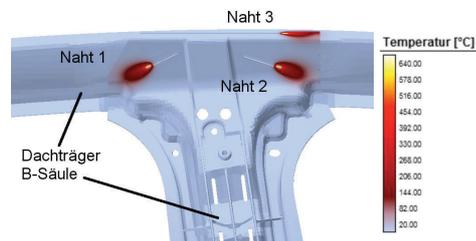


Bild 2: Momentaufnahme des Temperaturfelds der gleichzeitig bewegten drei Laserstrahlquellen

Im Zusammenspiel mit den Verformungen, die in gekoppelten Simulationen gleichzeitig berechnet werden können, wird die sog. Wärmewirkung des Schweißens sichtbar, die Bewegung des Gesamtbauteils aufgrund der Wärmedehnung des Materials. Die Verformungen, die zu dem Zeitpunkt der Wärmedehnung aus Bild 2 zuzuordnen sind und aus der Bildebene herauszuführen, sind in Bild 3 dargestellt.

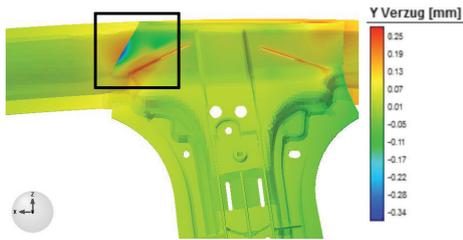


Bild 3: Verformungen während des Schweißens senkrecht zur Bildebene

Blaue dargestellt sind die Verformungen in die Bildebene hinein, rot die Verformungen aus der Bildebene. Während des Schweißens drückt sich die Bauteilkante der B-Säule links im umrandeten Bereich in den Dachträger, während der Dachträger in der Fixierung gehalten wird. Warum ist dieser Effekt nicht auf der rechten Seite, wenn doch die Anordnung der Schweißnähte symmetrisch ist? Welche zusätzlichen Kräfte wirken auf die erkaltende Naht 1, die beginnende Zugspannung des Gesamtbauteils aufgrund der Wärmedehnung des Materials. Die Verformungen, die zu dem Zeitpunkt der Wärmedehnung aus Bild 2 zuzuordnen sind und aus der Bildebene herauszuführen, sind in Bild 3 dargestellt. Blaue dargestellt sind die Verformungen in die Bildebene hinein, rot die Verformungen aus der Bildebene. Während des Schweißens drückt sich die Bauteilkante der B-Säule links im umrandeten Bereich in den Dachträger, während der Dachträger in der Fixierung gehalten wird. Warum ist dieser Effekt nicht auf der rechten Seite, wenn doch die Anordnung der Schweißnähte symmetrisch ist? Welche zusätzlichen Kräfte wirken auf die erkaltende Naht 1, die beginnende Zugspannung ausbildet, wenn die Bleche sich gegenseitig abdrücken? Ob Risse [Bra06] entstehen oder ob die Verformungen unzulässige Spaltmaße erreichen, kann im ersten Ansatz durch eine Variation der Schweißrichtungen erfolgen. Ob der Effekt im umrahmten Bildbereich aus Bild 3 sich auf der gegenüberliegenden Seite zeigt, wenn die Schweißrichtung der Naht 3 geändert wird, lässt sich mit der Simulation einfach nachweisen. Eine verformungsoptimierte Gesamtkonstruktion ergibt sich aus der Betrachtung der Schweißreihenfolge, -richtung und der Einspannsituation [Bra07].

Im folgenden Beispiel wird die Prozessstabilität einer Radialschweißung untersucht. Ein Zahnrad wird auf ein Wellenende aufgesetzt und mit zwei Laserstrahlquellen verschweißt, die um 180° versetzt angeordnet sind. Gezeigt ist das Temperatur-

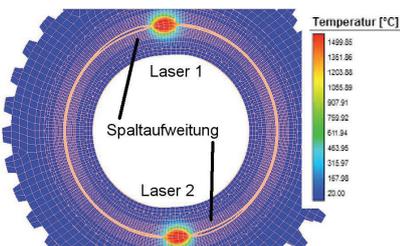


Bild 4: Darstellung des Temperaturfelds mit überlagerter Gesamtverformung, 30fach überhöht

feld mit überlagerter Verformung während des Schweißens in 30fach überhöhter Darstellung 0,5s nach Schweißbeginn in Bild 4.

Unmittelbar nach Schweißbeginn zeigt sich vor dem Verschweißen ein der Naht vorlaufender Spalt. Die Schweißrichtung beider Laser ist entgegen des Uhrzeigersinns. Im Verlauf der Schweißung schließt in Bild 5 und öffnet sich in Bild 6 mit fortschreitender Schweißnahtlänge.

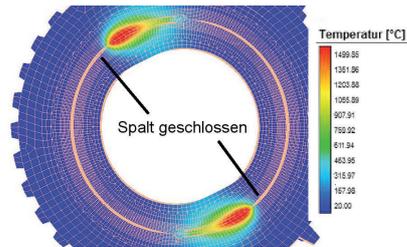


Bild 5: Darstellung des Temperaturfelds mit überlagerter Gesamtverformung, 30fach überhöht, Schweißzeit 2,5s

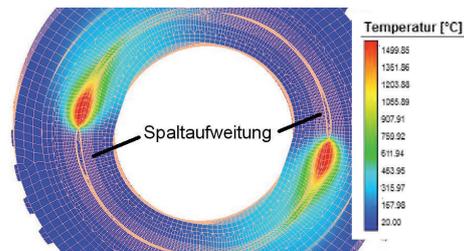


Bild 6: Darstellung des Temperaturfelds mit überlagerter Gesamtverformung, 30fach überhöht, Schweißzeit 5,5s

Über die gesamte Schweißnahtlänge öffnet und schließt sich der Spalt. Wird eine kritische Spaltgröße überschritten, so kann sich die Nahtqualität erheblich verschlechtern, eine Verschweißung ist unter Umständen nicht mehr geben. Mit der Simulation kann analysiert werden, warum sich der Spalt bei Ringschweißungen periodisch öffnet und schließt [Bra08]. Die Wirkung zusätzlicher Spanntechniken und der Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Spaltöffnung sowie Änderungen an der Konstruktion können untersucht werden, um die Nahtqualität und damit die Sicherheit und Lebensdauer des Bauteils signifikant zu erhöhen.

Im dritten Beispiel wird die Eigenspannungsverteilung einer Mehrlagenschweißung auf Basis der Mikrostrukturentwicklung unterschiedlicher Blechchargen eines Feinkornbaustahls vorgestellt. Die Schweißnaht wird mit 4 Lagen gefüllt, der Lagenaufbau in der Simulation ist symmetrisch gestaltet und der Zusatzwerkstoff zum Füllen der Naht entspricht der Chargenzusammensetzung der jeweiligen Charge. Mit der WeldWare® Schnittstelle wurden zwei Materialdatensätze erzeugt, die zusammen mit bekannten Umwandlungsschaubildern des Werkstoffs die Basis der Kalibrierung der Umwandlungskinetik darstellen. Die Unterschiede zwischen den berechneten Ergebnissen sind auf die beiden unterschiedlichen Parametersätze der

genutzten Umwandlungskinetik [Leb84] zurückzuführen, die durch Chargenunterschiede entstehen. Die Änderung der Materialeigenschaften durch den Anlassseffekt beim Mehrlagenschweißen wurde berücksichtigt.

Bild 7 zeigt den bei vollständiger Abkühlung vorliegende Bainitanteil der Schweißung zweier Chargen mit unterschiedlichem Kohlenstoffgehalt in der jeweiligen linken und rechten Bildhälfte.

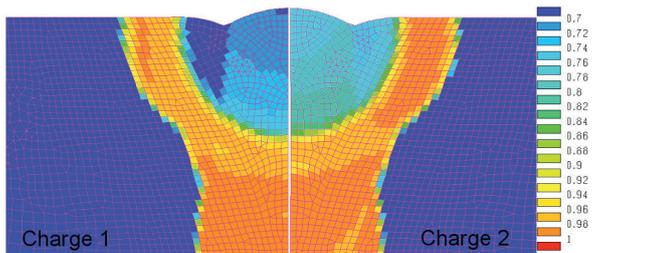


Bild 7: Gegenüberstellung des Bainitanteils nach dem Schweißen von 4 Lagen zweier Chargen eines umwandlungsfähigen Feinkornbaustahls

Wurzel- und Fülllage bilden ein nahezu vollständig bainitisches Gefüge aus, während die Decklagen um bis zu 30% weniger Bainit ausbilden. Mit zunehmender Lagenzahl erhöht sich die Gesamttemperatur im Bauteil, die Wärmeabfuhr in kalte Werkstoffbereiche verringert sich, so dass die $t_{8/5}$ -Zeiten deutlich ansteigen. Die Verschiebung der Abkühlgeschwindigkeiten zu höheren Zeiten innerhalb eines kontinuierlichen Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilds (ZTU) führt zu einer verstärkten Bildung ferritisch-perlitischer Gefüge auf Kosten des Bainits. Allein aus der Temperaturfeldberechnung lässt sich mit Hilfe der Simulation das gewünschte Gefüge abschätzen. Wie sich eine erhöhte Zwischenlagentemperatur auf das zu erwartenden Gefüge prinzipiell auswirkt, kann unkompliziert berechnet werden.

Die Längseigenstressspannungen, die sich über der Blechdicke der Schweißnaht nach 4 Lagen und isotroper Verfestigung durch die Simulation ergeben, sind in Bild 8 über einen gemeinsamen Spannungsbereich zwischen -300MPa und +700MPa chargenabhängig gegenübergestellt. Die Trennlinie zwischen den beiden Chargen verläuft in Bildmitte.

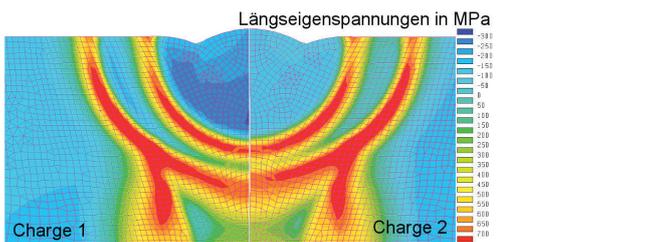


Bild 8: Gegenüberstellung von Längseigenstressspannungen in MPa nach dem Schweißen von 4 Lagen zweier Chargen eines umwandlungsfähigen Feinkornbaustahls

Auffällig sind die zwei um die Decklagen angeordneten halbkreisförmigen Gebiete erhöhter Zugeigenstressspannungen, die sich bis an die Bauteiloberfläche ausdehnen. Insbesondere der innere Halbkreis endet am Nahtübergang zum Grundwerkstoff, der durch die metallurgische Kerbe ohnehin schon eine kritische Stelle einer Schweißnaht markiert.

Die Quereigenstressspannungen zeigen sich bei Raumtemperatur den Längseigenstressspannungen naturgemäß untergeordnet, erreichen bis zu 2,5fach niedrigere Eigenstressspannungswerte und sind in Bild 9 ergänzend angeführt.

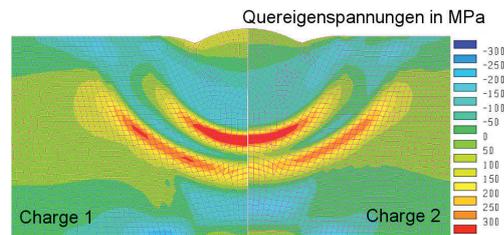


Bild 9: Gegenüberstellung von Quereigenstressspannungen in MPa zweier Chargen nach dem Schweißen von 4 Lagen eines umwandlungsfähigen Feinkornbaustahls

Der Chargeneinfluss ist untergeordnet anzusehen, der Mechanismus der Eigenstressspannungsentstehung führt zu geringfügigen Unterschieden in Längs- und Quereigenstressspannungen. Um der Frage nachzugehen, wie die komplexeren Eigenstressspannungsverläufe über der Blechdicke entstehen, werden die Vergleichsspannungen nach jeder Lage betrachtet. Nach dem Schweißen der ersten Lage bilden sich die höchsten Zugeigenstressspannungen in Bild 10 in der WEZ.

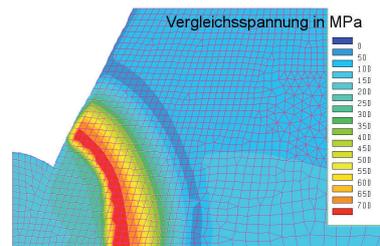


Bild 10: Vergleichsspannungen nach dem Schweißen der Lage 1 von 4

Das Schweißen der zweiten Lage führt zu einer Spannungsumlagerung durch Wiederaufschmelzen, Austenitisieren, Teilautenitisieren und Anlassen des Martensits und Bainits, die in Bild 11 gezeigt ist.

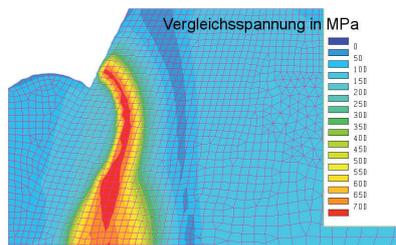


Bild 11: Vergleichsspannungen nach dem Schweißen der Lage 2 von 4

Mit der dritten Lage werden die Spannungen erneut umgelagert. Die Gebiete hoher Zugeigenspannungen aus Lage 1 verbleiben, die der zweiten Naht werden umgelagert und sind in Bild 12 dargestellt.

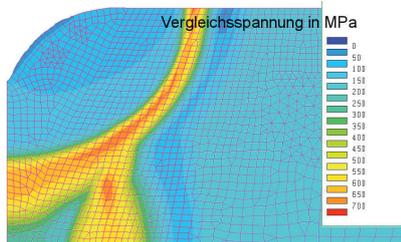


Bild 12: Vergleichsspannungen nach dem Schweißen der Lage 3 von 4

Die vierte und letzte Lage erzeugt den zweiten inneren Halbkreis hoher Zugeigenspannungen.

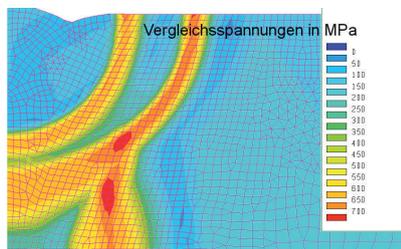


Bild 13: Vergleichsspannungen nach dem Schweißen der Lage 4 von 4

Zusammenfassung

In drei ausgewählten Beispielen wurden mögliche Anwendungsgebiete und Chancen der Schweißsimulation kurz umrissen. Im ersten Beispiel wurde gezeigt, dass die Berechnung der Verformungen und insbesondere das Aufdecken von möglichen Problemen in der Fertigung mit der Simulation möglich ist. Welche Spanntechnik und welche Schweißparameter oder gar welches Schweißverfahren eingesetzt werden soll, lässt sich auch ohne Berücksichtigung von Eigenspannungen aus vorgelagerten Prozessen sinnvoll abschätzen. Reaktionskräfte und Verformungen können graphisch sichtbar gemacht werden.

Im zweiten Beispiel wurde mit der Schweißsimulation unter Berücksichtigung des Kontakts im Fügespalt die Prozessstabilität einer Laserstrahlverbindung untersucht. Das periodische Öffnen und Schließen des Fügespalts führt zu einem instabilen Schweißprozess, der mit der Simulation sichtbar gemacht werden konnte. Ein stabilerer Prozess lässt sich durch eine optimierte Geometrie erzielen, der Nachweis gelingt mit der Simulation.

Mit dem letzten Beispiel wurde gezeigt, dass komplexere mikrostrukturelle Vorgänge mit Anlassvorgängen eines umwandelnden Feinkornbaustahls mit der Simulation abbildbar sind. Die berechneten Eigenspannungen resultieren aus den Umwandlungen und Verformungen aufgrund der eingebrachten Wärme des Schweißens. Durch die Simulation

jeder Lage wird die Entwicklung der Eigenspannungen plausibel, um das Eigenspannungsergebnis nach 4 Lagen einfacher zu verstehen und diskutieren zu können.

Durch das gezielte Einstellen von Abkühlzeiten gelänge es, die Eigenspannungen zu optimieren. Die Orte kritischer Spannungen sind berechenbar. Auf der Nahtoberfläche kann an den Orten hoher Eigenspannungen eine geeignete Nachbehandlung die Lebensdauer des Bauteils erhöhen. Die Spannungsüberhöhung im Bauteil kann durch ein nachgeschaltetes Glühverfahren verringert werden. Aus der Simulation abzulesen ist, dass bei umwandelnden Werkstoffen ein Zugeigenspannungsgebiet entsteht, welches durch nachfolgende Lagen umgelagert werden kann. Je näher die WEZ der Lagen zueinander liegen, desto größer ist der Einfluss der Spannungsumlagerung. Soll eine Spannungsüberhöhung - wie im vorangestellten Beispiel im Bauteil minimiert werden - sind folgerichtig die ersten Lagen mit weniger Material und Energie auszubringen.

Die vorangestellten Beispiele zeigen, dass mit der numerischen Schweißsimulation nicht nur Verzug und Eigenspannungen berechnet werden können. Vielmehr liegen Informationen zu Temperatur und Dehnung an jedem Ort und zu jeder Zeit während des Schweißens vor, aus denen für Schweißer und Konstrukteure wichtige Kenngrößen abgeleitet werden können. Unabhängig davon, ob alle Materialdaten und Prozessdaten vorhanden, oder ob das Experiment genau nachgerechnet werden kann, die Physik des Schweißens bleibt stets erhalten. Verzug und Eigenspannungen sind die Folge der Wärmewirkung des Schweißens.

Für jede Schweißkonstruktion kann die Physik des Schweißens mit der numerischen Simulation nachvollzogen werden. Probleme, die sich im Bauteil- oder Einsatzverhalten zeigen, können zurückverfolgt werden.

Wenn die Schweißsimulation in enger Absprache mit Schweißern und Konstrukteuren eingesetzt wird, werden sich experimentelle Ergebnisse bestätigen und vor allem verstehen lassen. Mit diesem Ansatz lässt sich die Simulation als Werkzeug in den industriellen Alltag leichter integrieren. ■

Schrifttum

- [Rad92] Radaj, D.: Heat effects of welding: temperature field, residual stress, distortion, Springer-Verlag, 1992
- [Buc91] Buchmayr, B.: Computer in der Werkstoff- und Schweißtechnik: Anwendung von mathematischen Modellen, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1991
- [Rad03] Welding residual stresses and distortion - Calculation and measurement, DVS-Verlag, 2003
- [Bla06] Blauel, J. G.; Brand, M.; Pfeiffer, W. & Varfolomeyev, Bruchmechanische Bewertung von rissbehafteten Schweißkonstruktionen mit Eigenspannungen, In: Technische Sicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer, 2006, S. 25-39
- [Bra07] Brand, M. & Siegele, D.: Welding simulation of aluminium automotive construction using SYSWELD simulation solution, PAM TALK, 2007, 33, S. 8
- [Bra12] Brand, M.: Weiterentwicklung von Methoden in der numerischen Schweißsimulation, Institut für Angewandte Materialien - Zuverlässigkeit von Bauteilen und Systemen (IAM-ZBS) und Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM), Dissertation, Fakultät für Maschinenbau (MACH), Karlsruhe, 2012
- [Bra08] Brand, M.; Junk, A. & Luke, Vollertsen, M. (Ed.): Prediction of welding distortions and residual stresses considering pre-heating, pre-stress and contact conditions in axial circular laser-beam welds In: Thermal forming and welding distortion. Proceedings of the IWOTE'08 : International Workshop on Thermal Forming and Welding Distortion, BIAS, 2008 (Strahltechnik 31), 2008, S.333-351
- [Leb84] Leblond, J. B. & Devaux, J.: A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size, Acta Metallurgica, 1984, 32, S. 137 - 146
- [Hoh08] Hohe, J.; Brand, M. & Siegele, D.: Fracture analysis of clad components considering residual stresses, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics Mechanics, 2008