

Einsatz der Fertigungssimulation zur Lösung fügetechnischer Herausforderungen im Behälterbau

T. Loose, Walzbachtal, Deutschland
J. Goldak, Ottawa, Kanada

Die Vermeidung von Formabweichungen und Materialveränderungen durch das Schweißen ist eine interessante und herausfordernde Fragestellung, die in der Praxis zu lösen oft zu Schwierigkeiten führt. Diese kann mit minimalem Kosteneinsatz und maximalem Nutzen mit der Fertigungssimulation beantwortet werden.

Mit der Fertigungssimulation wird der Herstellvorgang von Bauteilen numerisch abgebildet und vorausberechnet. Dabei spielen verschiedene Fertigungsprozesse eine Rolle, die in der Gesamtheit Berücksichtigung finden müssen, um den Bauteilzustand am Ende des Fertigungsprozesses zutreffend vorausszusagen. Bei der Fertigungssimulation kommt es nicht zwangsweise auf die vollständig gekoppelte Simulation aller Prozesse an, vielmehr können auch einzelne Prozesse gesondert betrachtet werden, die sich im Fertigungsalltag als kritisch erwiesen haben.

Bei geschweißten Konstruktionen treten mehrere Fragestellungen auf, die simulationstechnisch beantwortet werden können.

Beim Verzugsmanagement geht es darum, den Schweißverzug so einzustellen, dass die Geometrie der fertigen Konstruktion innerhalb geforderter Toleranzen liegt.

Bei der Wärmeführung ist der Wärmeeintrag so einzustellen, dass die Wärmebeeinflussung nicht zu ungewünschten Gefüge-, Festigkeits- oder Duktilitätsveränderungen führt. Schließlich wird mit der Schweißprozesssimulation der Fügevorgang lokal analysiert und die Schmelzbadausbildung, Einbrandtiefe sowie der Wärmeeintrag oder die $T_{8/5}$ Zeit in Relation zu den Schweißparametern vorausbestimmt.

Alle Simulationsbereiche erlauben die Analyse und Auslegung der Fertigung bereits im frühen Stadium der Entwurfsplanung von Bauteilen und Baugruppen. Damit ist es möglich die Herausforderungen an die Fertigung frühzeitig zu erkennen und notwendige Verbesserungsmaßnahmen rechtzeitig zu planen und umzusetzen.

Ziel ist es, Ressourcen insbesondere Rohstoffe, Personaleinsatz, Kosten und Zeit zu sparen. Dies gelingt durch die Simulation, da die Fertigung ohne Zeitverlust und Einfahrtschleifen fehlerfrei starten kann.

1 Schweißprozesssimulation - Schweißstruktursimulation - Fertigungssimulation

Die Schweißprozesssimulation analysiert das Geschehen lokal im Fügebereich. Dazu gehört die prädiktive Berechnung der Wärmeentstehung, der lokalen Wärmeausbreitung, der Ausbildung der Schmelzzone [Bild 1] und beim Verfahren wie dem Laserschweißen auch die Entstehung des Keyholes, Humpingeffekte oder Spritzer. Die Prozesssimulation wird dazu verwendet die gewählten Schweißparameter simulativ abzusichern, das Prozessfenster festzulegen und die Schweißparameter zu optimieren. Der mit der Schweißprozesssimulation ermittelte Wärmeeintrag kann als Eingangsgröße für die Schweißstruktursimulation zur Verzugs- und Eigenspannungsberechnung verwendet werden [1].

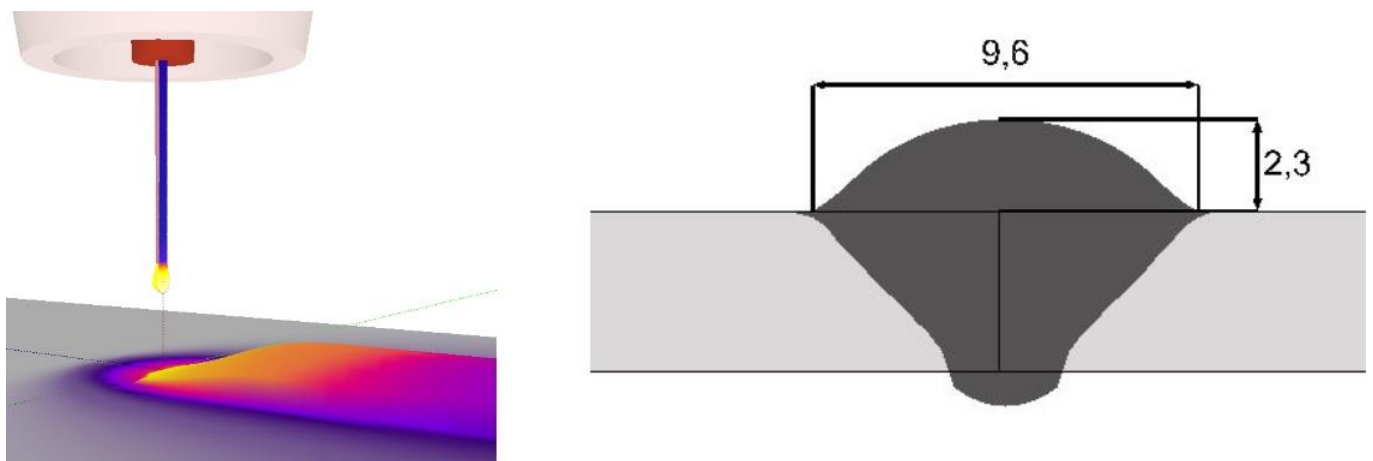


Bild 1. Schweißprozesssimulation Metallschutzgasschweißen (MSG) mit SimWeld® – Schmelzbad und Einbrandtiefe

Mit der Auswertung des lokalen Temperaturverlaufes in der WEZ oder dem Schmelzbad kann mit Hilfe von Schweiß-ZTU Diagrammen oder Werkstoffsimulationen der Gefügestand vorausbestimmt werden. Für das Metallschutzgasschweißen kann mit dem Simulationstool SimWeld® [2] die Prozesssimulation ohne vertiefende Simulationskenntnisse von Schweißern oder Schweißaufsichtspersonen durchgeführt werden. Ein genauso anwendungsfreundliches Tool jedoch konzipiert für Widerstandsschweißverfahren wie beispielsweise das Punktschweißen ist Sorpas® [3].

Die Schweißstruktursimulation als spezielle Anwendung der Finiten-Element-Methode betrachtet die Auswirkungen aus dem Schweißen am gesamten Bauteil. Eingangsgröße ist der Wärmeeintrag aus der Schweißwärmequelle. Dieser wird in Form einer sogenannten Ersatzwärmequelle angesetzt [4]. Damit ist jedes Schmelzschweißverfahren abbildbar, unabhängig davon wie die Schmelzwärme erzeugt wird (Lichtbogen, Flamme, Konduktion, Induktion oder, Reibung). Im Modell müssen selbstverständlich alle Randbedingungen berücksichtigt werden. Dazu gehört die Spannvorrichtung, Wärmeableitung durch Klemm- oder Kühlbacken und das Heften. Ergebnisse aus der Schweißstruktursimulation sind die Geometrieänderung durch das Schweißen, der Schweißverzug, die Eigenspannungen und plastischen Dehnungen sowie bei Mitnahme der Gefügeumwandlungsberechnung auch der Gefügestand nach dem Schweißen sowie die sich damit verändernde Streckgrenze.

Dünnwandige Bauteile haben überwiegend einlagige Nähte. Bei dickwandigen Bauteilen werden Nähte mit vielen Schweißraupen ausgeführt. Bei Auftragsschweißungen müssen ebenfalls vielen Schweißraupen geschweißt werden. VrSuite von Goldak Technologies ist speziell ausgelegt Schweißaufgaben mit vielen Schweißraupen sowie Auftrags- und Reparaturschweißungen zu analysieren.

Die Fertigungssimulation [Bild 2] geht über die reine Schweißsimulation hinaus. Bei der Fertigungssimulation muss der Zusammenbauvorgang abgebildet werden. Dazu gehört die Berücksichtigung der Spannerkinematik, die Berücksichtigung imperfekter Einzelbauteile und die Berücksichtigung von imperfekten Unterbaugruppen. Die Spannerkinematik bildet den Einspannvorgang ab. Weiterhin muss für den Zusammenbau eine Mehrstufensimulation durchgeführt werden, bei der von Stufe zu Stufe weitere Bauteile zum zuvor berechneten Unterzusammenbau ergänzt werden. Darüber hinaus können für die Fertigungssimulation auch vor- oder nachgelagerte Umformvorgänge, Trennvorgänge oder Wärmebehandlungsabschnitte relevant werden, die in der Simulation ebenfalls abgebildet werden müssen. FabWeld® (Advanced **F**abrication engineering for **W**elded structures) ist speziell auf die Anwendung der Fertigungssimulation ausgelegt und unterstützt neben der Schweißstruktursimulation und der Wärmebehandlungssimulation auch alle anderen dazu notwendigen Funktionalitäten. Mit FabWeld® können die Simulationsmodelle effizient erstellt werden.

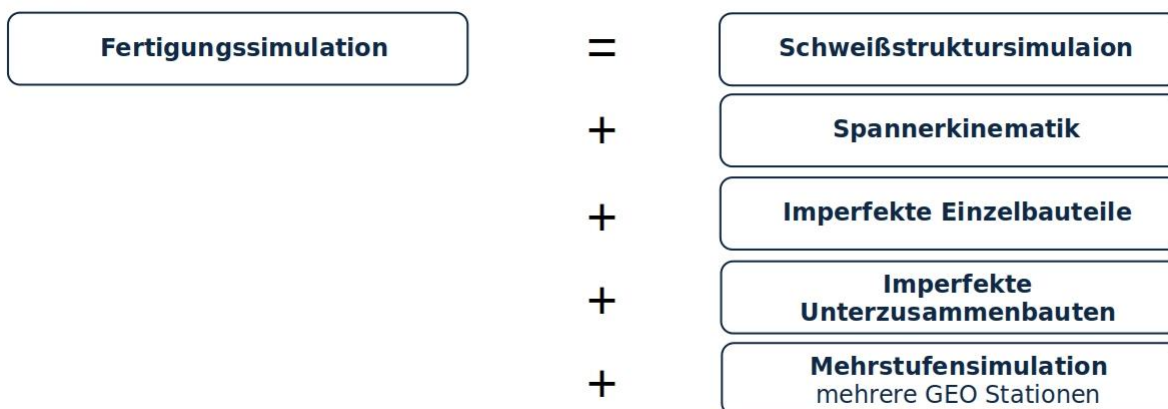


Bild 2. Fertigungssimulation geschweißter Baugruppen

2 Validierung Schweißstruktursimulation

Goldak Technologies Inc., Dr. Loose und TIME – Technologieinstitut für Metall & Engineering haben in einem gemeinsamen Forschungsprojekt die Vorhersagegenauigkeit der Schweißstruktursimulation aufgezeigt. Dazu wurde eine orthotrope Platte 1200 mm x 600 mm gewählt, auf die zwei Längssteifen und 3 Quersteifen aufgeschweißt wurden [Bild 3]. Die Steifen werden mit insgesamt 17 Heftnähten fixiert. Die Platte wird statisch bestimmt gelagert und an drei Ecken aufgestützt. Die vierte Ecke bleibt frei. Dies ist die Ecke, an der während des Schweißens der größte Verzug entsteht. Die der freien Ecke an der Längsseite gegenüberliegende Ecke wird gefast, damit die Ecken der Platte eindeutig zuzuordnen sind. Während die Heftnähte geschweißt werden, wird die Platte an der mittleren Quersteife an jeder Außenseite mit jeweils einem Stempel unterstützt. Ohne Unterstützung biegt sich die Platte durch Eigengewicht soweit durch, dass ein zu großer Spalt zwischen Platte und Steife entsteht. Nach dem Heften wird die

Unterstützung entfernt. Dies führt zu einem Absenken der Platte an der nicht unterstützten Ecke. In der Simulation wird das Entfernen der Unterstützung realitätsgetreu mit abgebildet.



Bild 3. Versuchsaufbau TIME-Platte

Anschließend werden zunächst die Längsnähte außen, ausgeführt als zweilagige Naht mit 3 Schweißraupen, geschweißt. Alle weiteren 17 Nähte werden als einlagige Kehlnähte ausgeführt. Während des Schweißens werden an fünf Stellen die Bewegungen normal zur Platte mit Seilzugaufnehmern gemessen. An den gleichen Stellen wird der Vertikalverzug aus der Simulation ausgewertet. Bild 4 zeigt das Ergebnis des Validierungsversuches. In den fünf Graphen sind jeweils die mit Seilzugaufnehmer (Cable Wire) gemessenen Vertikalverformungen den berechneten Vertikalverformungen gegenübergestellt. Auf allen Graphen ist erkennbar, dass der Verformungssprung, der durch das Entnehmen der Mittelaufleger nach dem Heften entsteht, an allen Punkten durch die Simulation zutreffend abgebildet wird. An allen Stellen wird der Vertikalverzug während des gesamten Schweißvorganges zutreffend berechnet. Die Graphen für gemessenen und berechneten Verzug zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Damit wird belegt, dass die angewendete Berechnungsmethode der Schweißstruktursimulation exakt in der Lage ist das Verformungsverhalten auch während des Schweißens genau nachzubilden. Diese Erkenntnis ist neu, da bislang nur Endergebnisse, also der Zustand nach Schweißen und Abkühlen, zur Validierung verwendet wurden. Um die Schweißstruktursimulation zur Analyse des Schweißens vollumfänglich einsetzen zu können müssen auch die Simulationsergebnisse während des gesamten Prozesses zutreffend sein. Beispielsweise kommt dies zum Tragen, wenn die Spaltbildungen während des Schweißens untersucht werden soll um das Spann- oder Heftkonzept zu überprüfen.

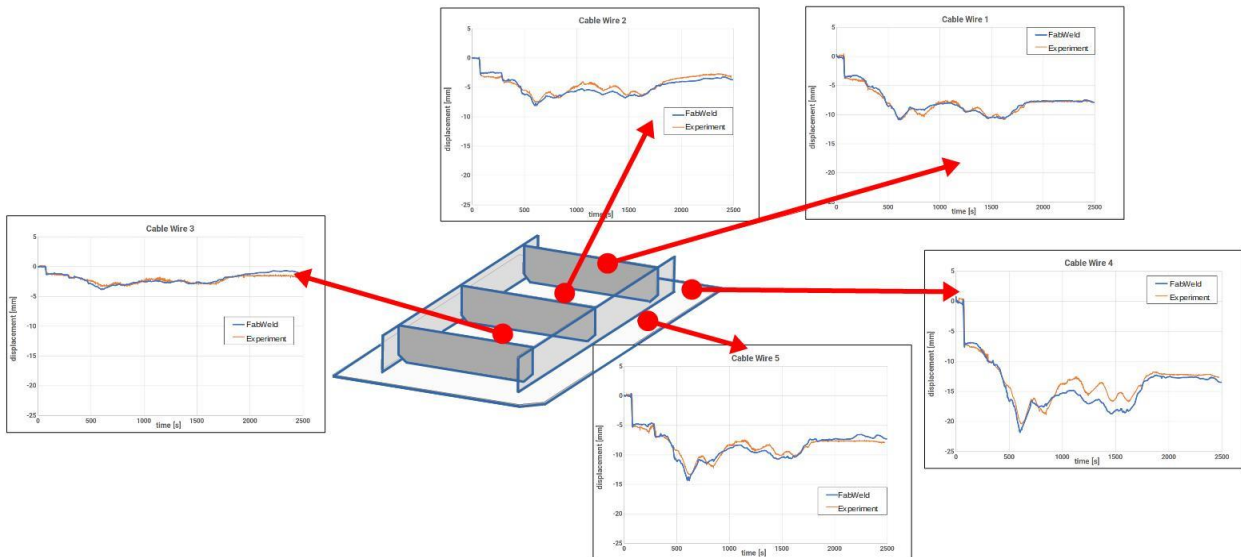


Bild 4. Validierungsergebnis TIME-Platte

3 Verzugsmanagement

Der Schweißverzug ist der mit dem Schweißen einhergehende jedoch unerwünschte Nebeneffekt. Ziel einer gut ausgelegten Schweißfertigung ist es, final ein Bauteil zu erhalten, bei dem sich die Geometrieabweichungen in den zulässigen Toleranzen bewegen. Da verzugsfreies Schweißen bei vielen Schweißaufgaben nicht möglich ist, besteht

die Aufgabe beim Verzugsmanagement darin, durch geeignete Maßnahmen zu erzielen, dass nach dem Schweißen die Geometrie den geforderten Toleranzen entspricht. Geeignete Maßnahmen sind neben der Auslegung der Spannvorrichtung oder des Heftkonzeptes Kompensationsmaßnahmen:

- Zugabe zum Schweißschrumpf
- Winkelzugabe
- Vorovalieren von Kreisquerschnitten
- Vorprägen des inversen Schweißverzuges
- Geometrieanpassung am Bauteil, die dem Schweißverzug entgegenwirkt
- Steifigkeitsveränderung am Einzelbauteil die dem Schweißverzug entgegenwirkt

Die Kompensationsmaßnahmen müssen ausgelegt werden. Diese Auslegung kann aufwändig und kostenintensiv durch viele Schweißversuche erfolgen oder wirtschaftlicher mit simulativer Auslegung durch die Fertigungssimulation.

Für das Verzugsmanagement können zwei Arten von Schweißbaugruppen grundsätzlich unterschieden werden:

- Dünnwandige Baugruppen mit einlagigen Nähten oder Nähte mit wenigen Schweißraupen. Dies können beispielsweise Behälter mit angeschweißten Stutzen oder Flanschen sein.
- Dickwandige Bauteile mit Schweißnähten, die sich aus sehr vielen Schweißraupen zusammensetzen. Dies können beispielsweise Schweißnähte im Blechdickenbereich 50 mm und dicker sein.

Dünnwandige Baugruppen

Typische Schweißverformungen im Anlagen- und Behälterbau sind Ovalisierungen von Rohr- oder Flanschanschlüssen, Einbeulungen von Behältern oder der Verzug innenliegender Verrohrungen. Beim Zusammenbau kann es durch den Schweißverzug vorheriger Unterzusammenbauten dazu kommen, dass Passungen nicht mehr übereinander liegen. Mit der Fertigungssimulation ist es möglich diese Schweißverzüge im Vorfeld zu berechnen und zu analysieren. Oftmals sind Geometrieanpassungen der Bauteile die zielführendere Maßnahme um Schweißverzüge zu kompensieren. Daher ist es wichtig, die Fertigungssimulation in einem frühen Entwurfsstadium bereits einzubinden.

Bei dünnwandigen Baugruppen werden die Bauteile häufig in einer Spannvorrichtung eingespannt. Die Einzelbauteile sind im Anlagen- und Behälterbau oftmals geformte oder gebogene Bauteile. Diese haben bereits zur CAD-Sollgeometrie Abweichungen. Mit der Fertigungssimulation können diese Imperfektionen berücksichtigt werden. Aus den Geometrieabweichungen der Einzelbauteile ergibt sich der sogenannte „Einspannverzug“. Dies ist die Verzugskomponente, die entsteht, wenn die Bauteile an den Spannstellen nicht satt aufeinander liegen, sondern durch Imperfektion einen Spalt aufweisen. Wird dieser Spalt durch die Spanner geschlossen, weicht das Bauteil an anderer Stelle aus – diese Verformung ist der Einspannverzug. In Bild 5 sind die Verzugskomponenten, die beim Zusammenbau geschweißter dünnwandiger Baugruppen entstehen aufgezeigt. Mit FabWeld® können alle Komponenten abgebildet werden, so dass eine realitätsnahe Fertigungssimulation möglich ist.

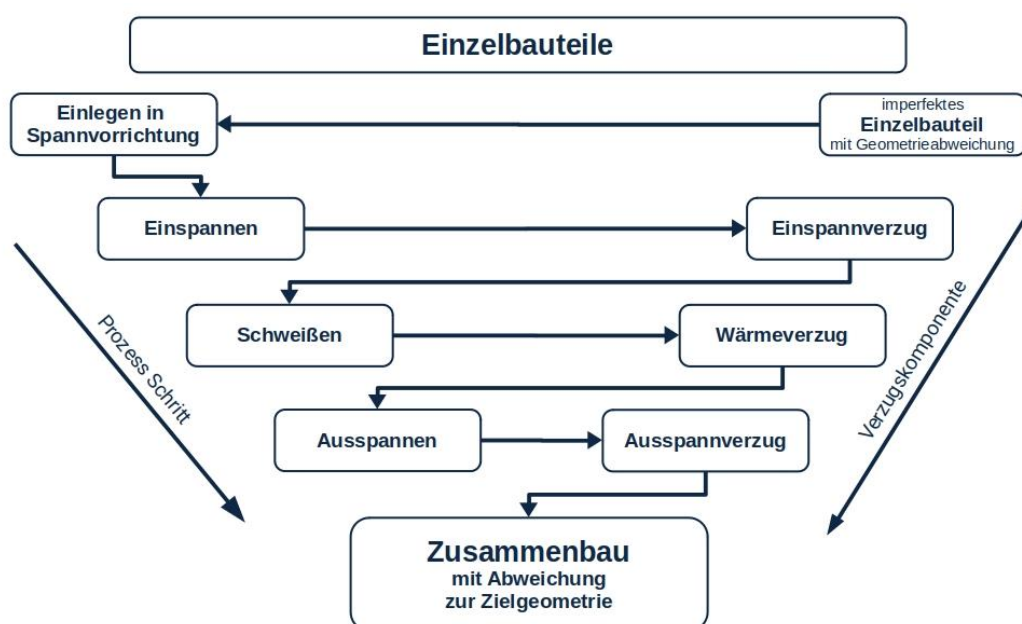


Bild 5. Verzugsentstehung nach Verzugskomponenten beim Schweißzusammenbau dünnwandiger Baugruppen

Dickwandige Bauteile

Bei dickwandigen Bauteilen spielt der Einspannverzug eine vernachlässigbare Rolle. Hier wird der Verzug durch die mehrlagigen Nähte und deren Aufbau bestimmt. Es gibt zwei zu berücksichtigende Verzugskomponenten. Das Anschumpfen in Blechebenenrichtung und den Winkelverzug. Beide können vorausberechnet werden. Damit ist es möglich Kompensationsmaßnahmen auszulegen. Für den Schrumpf in Blechebenenrichtung kann aus der Berechnung eine entsprechende Schrumpfung bestimmt werden. Beim Winkelverzug gibt es zwei Möglichkeiten der Fertigungsauslegung um den Verzug in den geforderten Toleranzen zu halten:

- Winkelzugabe des Bauteils, so dass nach Fertigschweißung die Winkelzugabe durch den Schweißverzug aufgezehrt wird.
- Auslegung des Raupenaufbaus, so dass durch den Raupenaufbau der Winkelverzug kompensiert wird. Dies ist insbesondere bei Schweißnähten mit Gegenlage möglich: DV, DHV, DU, DHU, DY oder DHY- Nähte.

Bild 6 zeigt ein Beispiel für eine mehrlagige Längsrohrnaht. Für die Berechnung wird das 3D Bauteils auf einen 2D Querschnitt reduziert. Die Vereinfachung erfolgt nach der metatransienten Methode [d] bei äquivalentem Energieeintrag. Die Vereinfachung ist notwendig um den Berechnungsaufwand auf ein handhabbares Maß zu beschränken.

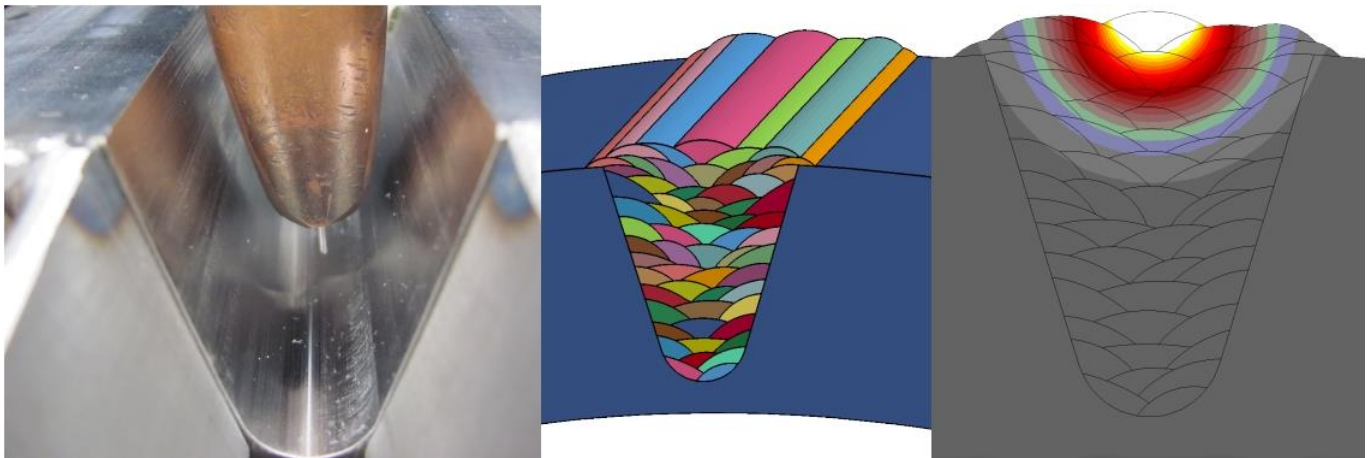


Bild 6. Mehrlagenschweißnaht Längsnaht Rohr. Links Bauteil, Mitte Modell und Lagenaufbau, Rechts Temperaturfeld letzte Raupe

4 Wärmeführung und Werkstoffbeeinflussung, Gefüge und Eigenspannungen

Die Berechnung und Analyse von Eigenspannungen, plastischen Dehnungen und Gefügeständen ist eine weitere Aufgabe für die Fertigungssimulation. Durch das Schweißen wird der Werkstoffzustand in der Wärmeeinflusszone und in der Naht verändert. Bei umwandelnden Stählen treten Gefügeumwandlungen auf. Diese hängen vom Werkstoff und dem Temperaturzyklus ab. Der Temperaturzyklus, der Zeit-Temperatur-Verlauf an einer Bewertungsstelle, wird für komplexere Bauteile aus der Schweißstruktursimulation berechnet. In die Temperaturfeldberechnung gehen die Blechdickenverhältnisse oder Masseverhältnisse der angrenzenden Bauteile ebenso ein wie die Materialspezifische Wärmeleitfähigkeit. Bild 7 links zeigt ein Rohr mit Umfangsnaht, bei dem zwei Rohrstücke mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit verschweißt werden. Dies ist beispielsweise bei Schwarz/Weiß-Verbindungen der Fall.

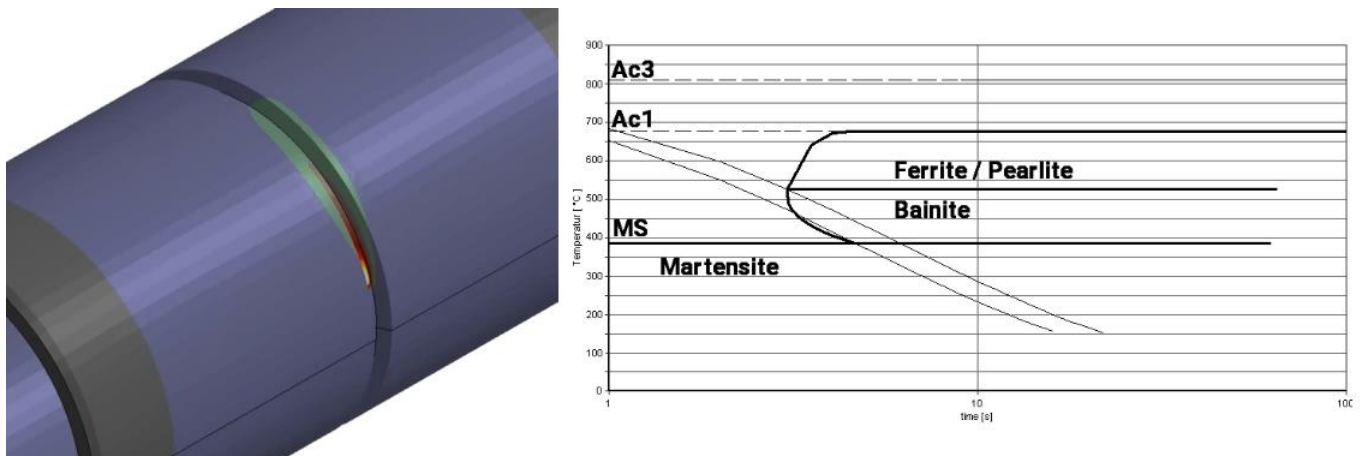


Bild 7. Links Temperaturfeld an einem Rohr mit unterschiedlichen Werkstoffen, Rechts Schweiß-ZTU-Diagramm aus WeldWare®

Bei umwandelnden Stählen wird für jede Stahlsorte respektive der chemischen Analyse der verwendeten Charge die Umwandlung über das Schweiß-ZTU Diagramm beschrieben. Bild 7 zeigt rechts ein Schweiß-ZTU Diagramm aus dem schweißtechnischen Beratungstool WeldWare®. Eine große Anzahl versuchstechnisch bestimmter Schweiß-ZTU Diagramme liegt WeldWare® zugrunde. Die Daten werden über Regressionsgleichungen verknüpft, so dass sie für beliebige Chargen der jeweiligen Stahlsorte ausgewertet werden können. Ausgehend von der $T_{8,5/5}$ -Zeit, der Abkühlzeit, liefert WeldWare® die Information über Gefügezusammensetzung, mechanische Festigkeiten, Bruchdehnung und Härte. Die $T_{8,5/5}$ -Zeit wird aus dem Temperaturzyklus, der mit der Fertigungssimulation berechnet wird, abgeleitet. Damit ein Gefüge mit den gewünschten mechanischen Eigenschaften eingestellt werden kann, darf eine gewisse $T_{8,5/5}$ -Zeit nicht unterschritten werden. Um dies sicherzustellen, ist eine bestimmte Streckenenergie oder Vorwärmtemperatur einzuhalten. Die Auslegung dieser Parameter zur Einhaltung der Abkühlzeit wird Wärmeführung genannt. Je dickwandiger die Bauteile sind, um so kritischer wird die Wärmeableitung und um so wichtiger ist die Auslegung der Wärmeführung.

Simulationsbasiert kann auch evaluiert werden, ob die Vorwärmtemperatur über die Nahtfolgegeschwindigkeit gehalten wird, ansteigt oder mit zunehmendem Lagenaufbau abnimmt. Bild 8 zeigt am Beispiel eines sehr dickwandigen Pressenträgers für die Halskehlnaht den Temperaturverlauf im nahtangrenzenden Bereich. Die Temperaturzyklen sind für drei Vorwärmtemperaturen für eine langsame Raupenfolge dargestellt. Die Temperatur nimmt von Raupe zu Raupe beständig ab. Dem gegenübergestellt ist eine schnelle Raupenfolge, bei der die Temperatur beständig zunimmt. Ein gewünschter Temperaturverlauf, die Zwischenlagentemperatur und ob diese über den Füllverlauf konstant bleibt kann über die Simulation vorausberechnet und eingestellt werden.

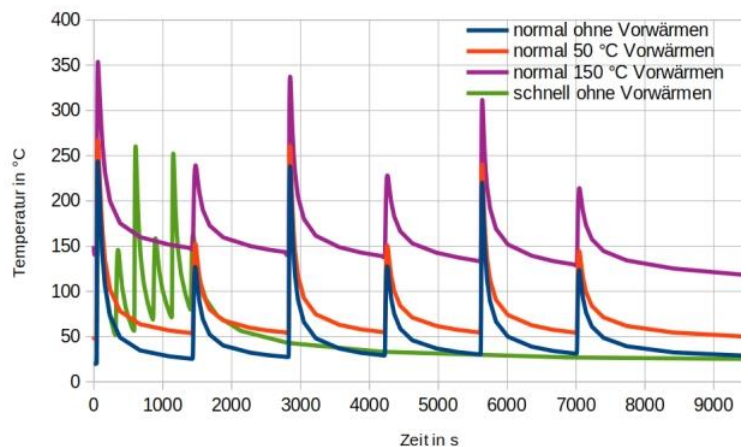


Bild 8. Wärmeführung an einem Dickwandigen Träger – Temperaturzyklen für verschiedene Vorwärmtemperaturen und Raupenfolgezeiten.

In der Schweißstruktursimulation kann bei Verwendung entsprechender Materialmodellierung auch die Gefügeumwandlung berechnet werden. Damit ist es möglich für ein Bauteil oder eine Nahtverbindung die in den Bildern 9 und 10 dargestellten Zustandsgrößen zu berechnen. Für die Darstellung wird das Berechnungsbeispiel einer mehrlagigen Kehlnaht an dickwandigen Blechen gewählt. Sowohl die Gefügeanteile Martensit, Bainit, Perlit, Ferrit wie auch die Anteile angelassener Phasen, wie angelassener Bainit, können berechnet werden. Die Anlaßeffekte führen trotz niedriger Abkühlzeit bei Mehrlagennähten zu günstigen Gefügeständen. Oftmals werden als Decklagen so genannte Anlass-Raupen geschweißt. Die Auslegung dieser Maßnahme kann durch die Simulation abgesichert werden.

Die Streckgrenze ändert sich im Nahbereich bedingt durch Verfestigung (plastische Dehnung) und Gefügeumwandlung. Die Verteilung der lokalen Streckgrenze über den Nahtquerschnitt wird ebenfalls durch die Simulation ausgegeben. Mit der Gegenüberstellung der Streckgrenze zur Vergleichsspannung kann die Ausnutzung der elastischen Reserve dargestellt werden und somit Bereiche hoher Auslastung durch Eigenspannungen lokalisiert werden.

Mit der Fertigungssimulation erfolgt die prozesstechnische Auslegung mehrlagiger Nähte so, dass die mechanischen Eigenschaften günstig eingestellt werden. Die Fertigungssimulation ermöglicht auch eine überschlägige Rissrisikobewertung. Eine detailliert vorhersagbare Rissrisikobewertung ist Gegenstand derzeitiger Forschungstätigkeiten der Autoren.

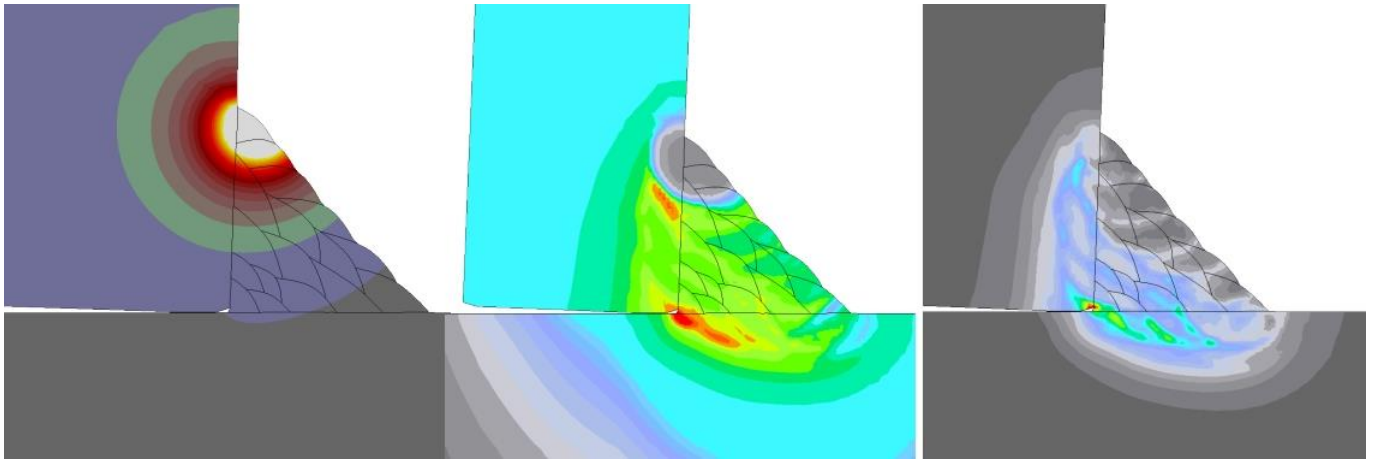


Bild 9. Temperaturfeld, Eigenspannung (v. Mises), plastische Dehnung

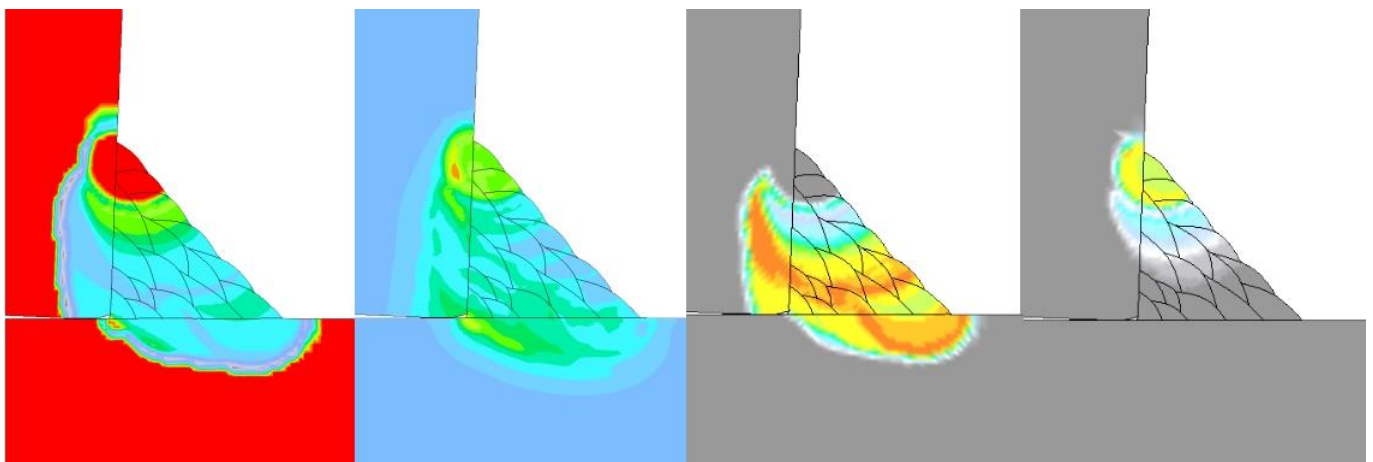


Bild 10. Härte, Streckgrenze, Angelassener Bainit, Bainit

5 Optimierung für verzugs- und eigenspannungsarmes Schweißen

Ist es grundsätzlich möglich ohne Schweißverzug zu schweißen und kann man auch die Entstehung von Eigenspannungen unterbinden? Ein paar Forscher haben untersucht wie durch zusätzliche Wärmequellen, zusätzliche Kühlquellen oder metallurgisch speziell arbeitender Zusatzwerkstoffe der Verzug einer einzelnen Naht vollständig kompensiert werden kann. Durch Zusatzwärme- oder Kühlquellen werden Dehnungen eingebracht, die den Verzug oder die Eigenspannungen kompensieren können. Allerdings ist es für den Erfolg der Methode notwendig, die Lage und Leistung der Zusatzquelle zu wissen. Nur eine bestimmte Position der Zusatzquelle zur Schweißwärmequelle und eine definierte Leistung führen zum Erfolg. Es gibt eine Vielzahl möglicher Parametereinstellungen. Die Methode über physikalische Schweißversuche oder "Try and Error" Methode hilft dabei wenig.

Es handelt sich um ein Optimierungsproblem. Um dieses Optimierungsproblem effizient zu lösen haben John Goldak und sein Team in VrSuite einen Optimierer entwickelt. VrOptimizer liegt ein Optimierungsalgorithmus nach Kriging zugrunde mit dem es gelingt bereits aus einer geringen Anzahl berechneter Varianten zum Ziel zu kommen [1].

Bild 11 zeigt zwei Beispiele Links wurde durch eine Zusatzwärmequelle der Verzug minimiert. Es gibt eine Lösung für eine führende (leading) und nachlaufende (trailing) Wärmequelle. Bei dem im rechten Teil des Bildes dargestellten Beispiel ist die Zusatzwärmequellen so eingestellt, dass die Eigenspannungen minimal werden.

Mit zusätzlichen Wärmequellen und der erforderlichen Lösung der numerischen Optimierungsaufgabe ist es grundsätzlich möglich fast eigenspannungs- und verzugsfrei zu schweißen. Der Anlagenaufwand ist bei dieser Methode etwas höher, ist aber dann gerechtfertigt, wenn es fertigungstechnisch notwendig ist und andere Kompensationsmaßnahmen keine Abhilfe schaffen können.

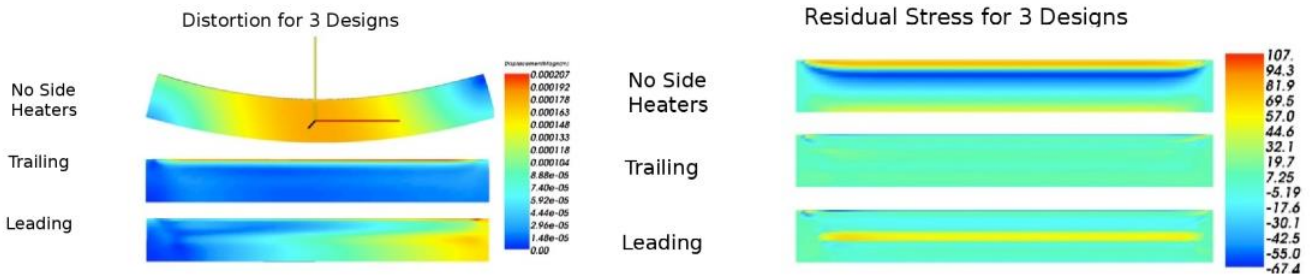


Bild 11. Mit VrSuite optimierte Schweißaufgaben links verzugsarm rechts eigenspannungsarm

6 Reparaturschweißungen und Sonderaufgaben

Bei Reparaturschweißungen, die beispielsweise für Kessel wie in Bild 12 dargestellt mit mehrreihiger Auftragschweißung hergestellt werden stellen sowohl Schweißverzug als auch Schweiß eigenspannungen ein besonderes Risiko dar. In diesem Fall ist die simulative Absicherung unerlässlich um möglichem Versagen nach der Reparatur vorzubeugen. Durch die Fertigungssimulation können verschiedene Reparatur-Strategien untersucht werden und die mit der geringsten negativen Auswirkung für die Reparatur ausgewählt werden.

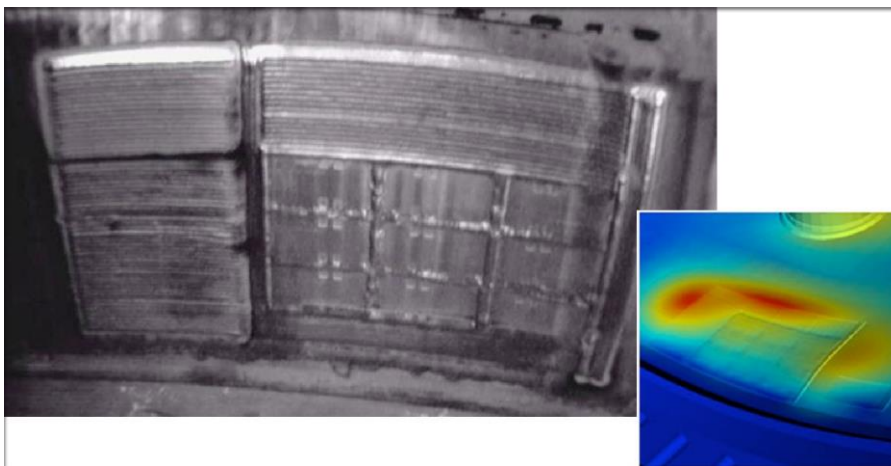


Bild 12. Reparaturschweißung an einem Kessel, optimal ausgelegt mit VrSuite

Eine besondere Herausforderung stellt das Schweißen an Gasrohrleitungen dar, wenn diese während des Schweißvorganges im Betrieb bleiben soll. Kritisch ist die Temperaturerwärmung auf der Rohrinneenseite. Diese darf einen für das brennbare Medium kritischen Wert nicht überschreiten. Die Schweißparameter insbesondere die Streckenergie müssen so eingestellt werden, dass die Erwärmung nicht zu groß wird.



Bild 13. Anschweißen eines Pipelineabzweiges an einer Gasrohrleitung unter Betrieb

Die numerische Simulation ist das geeignete Mittel, vor Ausführungsbeginn das Temperaturfeld während des Schweißens zu analysieren und die Schweißparameter entsprechend auszuwählen. Außerdem muss sichergestellt werden, dass sich durch Reparaturschweißung weder ein ungünstiger Eigenspannungszustand, noch eine zu hohe Härte oder eine ungünstige Gefügezusammensetzung einstellt, bei der ausreichende Duktilität im Nahtbereich nicht gewährleistet ist. Die Streckgrenze nimmt mit zunehmender Temperatur ab. Es ist folglich weiterhin sicherzustellen,

dass die Streckgrenze noch ausreichend hoch bleibt und es unter Rohrinneindruck nicht zu einem Versagen der Rohrwand kommt.

Für einen Rohrabzweig, der an eine bestehende Leitung angebracht werden soll ist in Bild 13 die Ausführung der Schweißraupen für die Pufferlage dargestellt. Die numerische Berechnung der geschweißten Fertigung erfolgt mit VrWeld aus der Programmumgebung VrSuite und wurde von Goldak Technologies Inc. erbracht. Die Fertigung sieht das Schweißen von Pufferlagen vor, die eben geschliffen werden. Dieser Fertigungsvorgang wird in der Simulation mit VrWeld abgebildet. In Bild 14 ist links das Simulationsmodell für diesen Rohrabzweig dargestellt. In der Mitte ist zu sehen, wie die erste Lage der Pufferschicht erstellt, anschließend abgeschliffen und für die zweite Lage vorbereitet wird. Vorwärmung, sofern erforderlich, wird in der Berechnung berücksichtigt.

Die rechte Seite von Bild 14 zeigt das Modell einer Muffenverbindung, mit der ein defekter Rohrabzweig ertüchtigt werden soll. Auch hier ist es wichtig im Vorfeld die Temperaturentwicklung und die mechanisch- technologischen Eigenschaften, die sich im Nahtbereich einstellen, simulativ abzusichern.

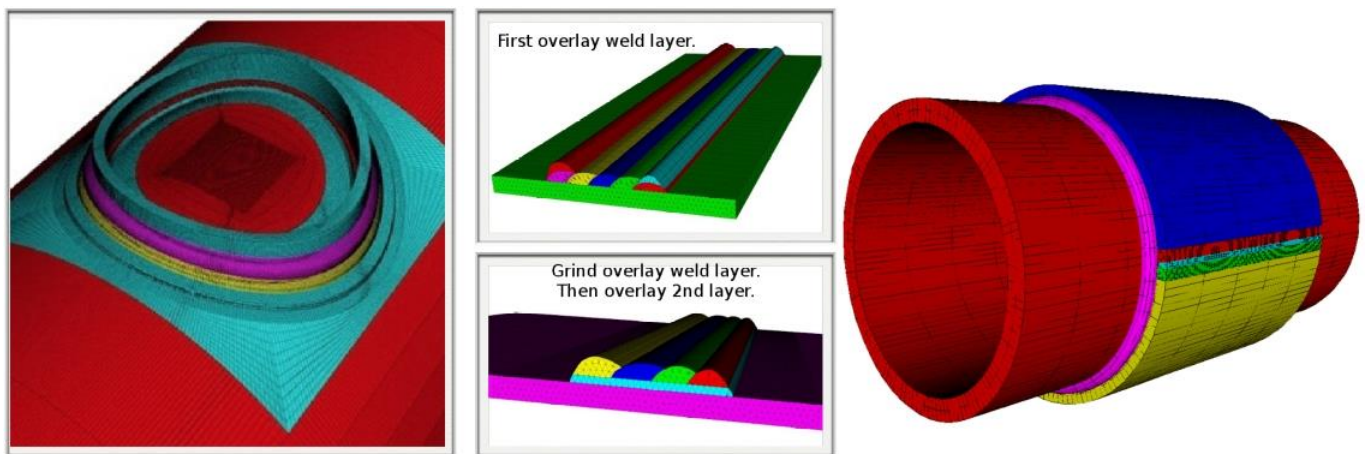


Bild 14. Numerische Simulation Schweißen an Gasrohrleitungen unter Betrieb
Links: Rohrabzweig mit Puffernähten Rechts: Muffenverbindung

Bild 15 links zeigt für die Muffenverbindung das Temperaturfeld im Nahbereich. Die Auswertung der Temperatur an der Innenseite erfolgt an diskreten Punkten unterhalb der Schweißnaht. Die Temperatur-Zeit-Verläufe dafür sind in Bild 15 rechts dargestellt und zeigen auf, dass eine kritische Temperatur nicht überschritten wird.

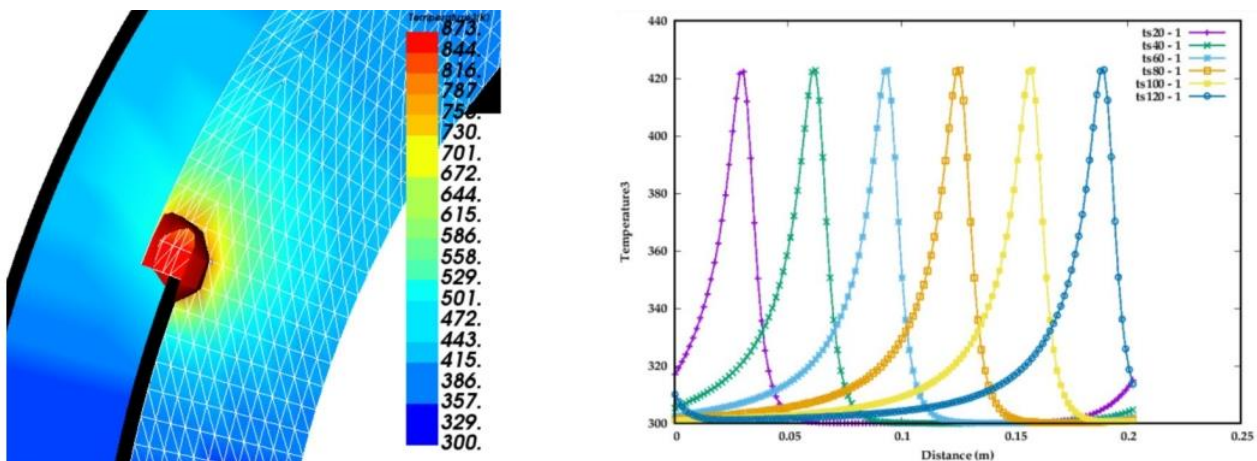


Bild 15. Temperatur beim Schweißen. Links Temperaturfeld (Kelvin) an der Schweißnaht außen, Rechts Temperatur-Zeit-Verläufe an der Rohrinneinnenseite

Wanddicke der Rohrleitung und Streckenenergie der Schweißraupen bestimmen die Maximaltemperatur an der Rohrinneinnenseite. Hierfür lässt sich ein Parameterraum aufstellen. VrHotTap ist ein spezielles Tool innerhalb von VrSuite mit dem der Parameterraum analysiert werden kann. In VrHotTap können die Grundparameter der Schweißaufgabe eingegeben werden. Die Modellerstellung aller Berechnungsvarianten für den Parameterraum erfolgt automatisch.

Bild 16 links zeigt das Ergebnis dieser Analyse für eine Muffenverbindung. Für verschiedene Spitzentemperaturen an der Rohrinneiseite sind Kurven eingetragen, die zur Rohrwanddicke die Streckenenergie anzeigen, bei der genau diese maximale Rohrinneisewandtemperatur erreicht wird. Dies Diagramm kann zur Schweißparameterauslegung für verschiedene Anschlussabmessungen verwendet werden.

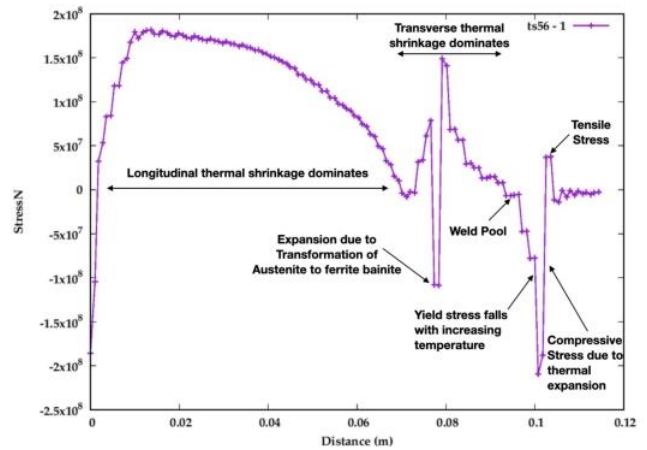
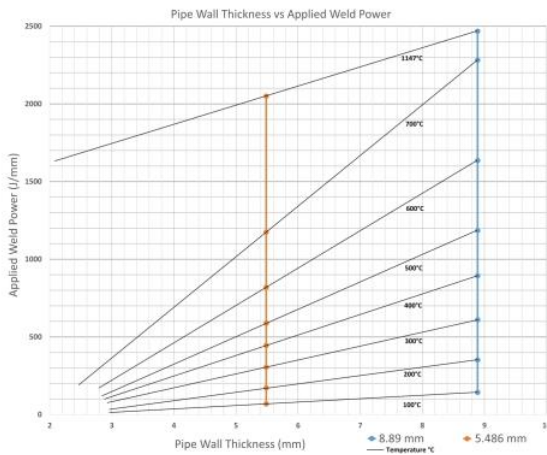


Bild 16. Links: Auswertung des Prozessfenster – Maximale Innentemperatur nach Streckenenergie und Wanddicke
Rechts: Auswertung Längseigenspannung am Schweißpfad - Schmelzbadmitte.

In Bild 16 rechts ist die Längseigenspannung am Auswertepfad Schmelzbadmitte über ein Rohrsegment aufgetragen. Die Schweißrichtung ist von links nach rechts, der Schweißbrenner befindet sich bei 0,095 m (Weld Pool). An der rechten Seite des Graphen, vor dem Schmelzbad bauen sich aufgrund der thermischen Dehnungen Druckspannungen auf. Die Druckspannungen erzeugen aus Gleichgewichtsbedingungen einen Bereich mit Zugspannung, der vor den Druckspannungen hervorkommt. Mit zunehmender Erwärmung nimmt die Streckgrenze ab. Gleichsam verringern sich die Druckspannungen bis sie beim Schmelzbad auf null abfallen. Hinter dem Schmelzbad erstarrt das Material in die austenitische Phase und es bauen sich Zugspannungen auf. Wird der Umwandlungsbereich erreicht, in der Austenit in die ferritischen Phasen zerfällt, bewirken die damit einhergehenden Umwandlungsdehnungen eine Lastumkehr in Druckspannungen (Expansion due to Transformation). Anschließend beherrscht die thermische Längsschrumpfung und es bauen sich Zugspannungen auf.

Mit der Spannungsanalyse während des Schweißvorganges ist es möglich kritische Zustände zu analysieren. Mit der Bewertung der Analyse kann eine mögliche Schädigung im Vorfeld erkannt werden und durch Verbesserung der Schweißparameterauslegung verhindert werden.

7 Zusammenfassung

Mit numerischer Simulation ist es heutzutage möglich den Schweißprozeß und seine Begleiteffekte zutreffend abzubilden und vorauszusagen. Als Fertigungssimulation wird die Simulation des Herstellvorganges mit allen begleitenden Effekten bezeichnet. Für geschweißte Baugruppen ist die Schweißsimulation ein Teil der Fertigungssimulation, erweitert beispielsweise um die Simulation von Einspannvorgängen oder vor oder nachgelagerter weiterer Fertigungsarten wie Wärmebehandlung, Umformen oder Schneiden.

Die Fertigungssimulation bietet den Vorteil Fertigungsvorgänge und deren Auswirkung auf die Bauteile im Vorfeld berechnen zu können. Somit kann die Fertigung geplant, numerisch geprüft, verbessert und final abgesichert werden. Die Fertigung kann anschließend mit einem geprüften Konzept begonnen werden. Ausschußproduktion beim Einfahrvorgang sowie einige Einfahrschleifen werden damit gespart und somit Zeit, Kosten und wertvolle Ressourcen.

Es gibt eine Vielzahl von Herausforderungen in der Auslegung der Schweißfertigung, für die die Fertigungssimulation Lösungen bietet. In dieser Veröffentlichung diskutiert wurden:

- Verzugsmanagement für dünnwandige Bauteile.
- Verzugsmanagement für dickwandige Bauteile mit mehrlagigen Nähten.
- Entwurf und Absicherung von geeigneten Maßnahmen um den Schweißverzug auf zulässige Toleranzen zu begrenzen.
- Prozessauslegung, Vorausberechnung von Schmelzbadausbildung, Einbrandtiefe und Wärmeeintrag

- Einstellung der Schweißparameter, so dass gewünschte Zielgrößen für Schmelzbad, Einbrandtiefe der Wärmeeintrag erzielt werden.
- Wärmeführung, Einstellung und numerische Absicherung des Temperaturverlaufes (thermische Zyklen), so dass sich gewünschte Werkstoffeigenschaften im Nahtbereich einstellen.
- Numerische Absicherung der entstehenden Eigenspannungen und plastischen Dehnungen zur Vermeidung schädigender Zustände.
- Numerische Absicherung von Reparaturmaßnahmen

Es wurde aufgezeigt wie im speziellen Fall Eigenspannungen oder Schweißverzüge quasi auf null reduziert werden können, wenn zusätzliche Wärmequellen eingesetzt werden und deren Position und Leistung durch eine Optimierungsberechnung ausgelegt wird.

Reparaturschweißungen stellen besondere Risiken dar, da die durch das Schweißen Eigenspannungen und Verformungen eingebracht werden. Die Fertigungssimulation ermöglicht sowohl diese im Vorfeld zu bestimmen als auch den Schweißplan und die Schweißparameter so auszulegen, dass das Bauteil durch die Reparatur nicht geschädigt wird.

Mit der Fertigungssimulation lassen sich auch Sonderfragen klären, wie beispielsweise die Machbarkeit an Gasrohrleitungen unter Betrieb zu Schweißen.

Abschließend ist festzustellen, dass sich mit der Fertigungssimulation viele schweißtechnische Herausforderungen im Anlagen- und Behälterbau effizient und kostensparend lösen lassen.

Schrifttum

- [1] Loose, T. ; Mokrov, O.: SimWeld and DynaWeld – Software tools to set up simulation models for the analysis of welded structures with LS-DYNA. In: Welding and Cutting 15, Heft 3, 2016, S. 168-172
- [2] Loose, T. ; Mokrov, O.: Schweißnahtberechnungen mit SimWeld. In: Schweiß- und Prüftechnik, 2013, Heft 01-02, S. 10
- [3] Nielsen, C. V. ; Zhang, W.: 3D Simulation of resistance welding processes and weld strength testing. In: Simulationsforum Schweißen und Wärmebehandlung 2013, Tagungsband S. 111 - 120
- [4] Loose, T. ; Rohbrecht, J.: Equivalent energy method for welding structure analysis. In: Welding and Cutting 17, No. 3, 2018, S. 210 – 216
- [5] Tschernov, S. ; Goldak, J.: Can a weld in welded structure be made with zero residual stress? In: Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels & Piping Division Conference, 19.-23.7.2015, Boston, Massachusetts, USA