

Schweißsimulation - Potentiale und Anwendungen

Dr.-Ing. Tobias Loose

Ingenieurbüro Tobias Loose, Wössigen (Lkr. Karlsruhe)

1. Einleitung

Mit Simulationen werden reale Vorgänge am Rechner numerisch berechnet. Die reale Welt wird durch eine virtuelle Welt ersetzt. Die Motivationen dazu sind:

- aufwendige oder kostenintensive reale Versuche durch günstige virtuelle Versuche zu ersetzen,
- gefährliche reale Versuche durch ungefährliche virtuelle Versuche zu ersetzen,
- Zustände sichtbar machen, die meßtechnisch schwer oder nicht evaluierbar sind,
- Auswertungen und Bewertungen zu automatisieren, die mit realen Versuchen nicht realisierbar sind.
- Erklärung von Entstehungsvorgängen als Basis für Optimierungsmaßnahmen
- Schulungs- und Ausbildungszwecke

Ein Anwendungsbereich der Schweißsimulation ist die Schweißprozesssimulation mit der Vorhersage der Schmelzbadentstehung und die Schweißstruktursimulation mit der Vorhersage von Schweißverzügen und Schweißeigenspannungen.

In diesem Aufsatz wird die Methode der Schweißsimulation vorgestellt und deren Anwendungsmöglichkeiten erläutert.

2. Definitionen

Zu den bauteilbeschreibenden Schweißsimulationen gehört die:

Werkstoffsimulation:

Die Werkstoffsimulation befaßt sich mit der Vorausberechnung von Werkstoffzuständen. Dazu gehört die Berechnung der Mikrostruktur, Gefügeumwandlung oder Erstarrung sowie die Vorausberechnung von Materialkennwerten.

Schweißprozesssimulation:

Die Schweißprozesssimulation befaßt sich mit der Vorausberechnung der Fügezone aus vorgegebenen Prozessparametern. Dazu gehört die Berechnung von Schmelzbad und Einbrand, die Bestimmung des Temperaturfeldes im Nahbereich um die Fügezone und die Berechnung des Wärmeeintrages.

Schweißstruktursimulation:

Die Schweißstruktursimulation befaßt sich mit der Vorausberechnung des globalen Zustandes der Schweißbaugruppe: Verformungen und Spannungen. Die Struktursimulation setzt sich aus einer Kopplung aus Temperaturfeldberechnung und strukturmechanischer Berechnung zusammen. Die Entstehung des Wärmeeintrages wird im Gegensatz zu Schweißprozesssimulation nicht berechnet, der Wärmeeintrag wird über eine Ersatzfunktion, der äquivalenten Wärmequelle, beschrieben

Die drei bauteilbeschreibenden Simulationen können oder müssen je nach Simulationsaufgabe in einer Schweißsimulation gekoppelt angewendet werden.

Zu den maschinenbeschreibenden Schweißsimulationen gehört die:

Schweißtrainingssimulation:

Bei der Schweißtrainingssimulation wird mit einem Schweißtrainer eine Schweißmaschine und das Werkstück virtuell abgebildet. Der Schweißtrainer zeigt das Schweißergebnis in Abhängigkeit der Brennerführung. Die Schweißtrainingssimulation dient der Verbesserung der handwerklichen Fertigkeit des Schweißpersonals

Robotersimulation:

Bei der Robotersimulation wird die Verföhrung der Schweißbrenner durch die Roboter nachgebildet um die Verföhrwege zu optimieren und Konflikte in der Zugänglichkeit zu dedektieren.

Softwareprogramme für die bauteilbeschreibende Schweißsimulation sind beispielsweise:

WeldWare®:

WeldWare® wertet eine umfangreiche Datenbank an ZTU-Daten und Daten mechanischer Kennwerte aus und berechnet daraus Daten für beliebige chemische Analysen im Geltungsbereich. Die Daten wurden aus umfangreichen Meßreihen gewonnen. Darüberhinaus liefert WeldWare® schweißtechnische Unterstützung zur Wärmeführung. WeldWare® wird von der SLV Mecklenburg-Vorpommern entwickelt.

SimWeld®:

SimWeld® ist eine Software zur Schweißprozeßsimulation für das MSG Schweißen. SimWeld® enthält eigene Lösunalgorithmen sowie eine graphische Oberfläche zur Dateneingabe und Ergebnisauswertung. SimWeld® wird vom ISF der RWTH Aachen entwickelt.

DynaWeld:

DynaWeld ist eine Arbeitsumgebung und ein PreProzessor für die Schweißstruktursimulation. DynaWeld unterstützt den Finite Element Code LS-DYNA. DynaWeld wird vom Ingenieurbüro Tobias Loose entwickelt.

3. Berechnungsbeispiele

Die Schweißprozeßsimulation und die Schweißstruktursimulation lassen sich auf alle gängigen Schweißverfahren anwenden: Lichtbogenschweißverfahren, Strahlschweißverfahren, Widerstandschweißverfahren, Induktionsschweißverfahren bis hin zu Reib- und Rührreibschweißverfahren.

Blechdickenbereiche von 5 µm bis 500 mm können ebenso abgebildet werden wie beliebige Nahtformen oder besondere schweißtechnische Maßnahmen wie Vorwärmen, Spannungsarmglühen oder das Ausschleifen und Überschweißen von Wurzellagen.

Selbstverständlich müssen bei der Schweißsimulation auch alle schweißtechnischen Randbedingungen berücksichtigt werden. Dazu zählt bei vielen Bauteilen das Heften und Einspannen der Baugruppe ebenso wie das Vordrücken an Bauteilen oder das Einpressen in die Spannvorrichtung von Teilen, die von Sollgeometrien bereits abweichen.

Die Schweißsimulation kann auf alle Werkstoffe angewendet werden. Selbst die Schweißsimulation von Glasschweißverbindungen ist möglich [HIL2008]. Beim Schweißen stellen sich je nach Werkstoff Änderungen oder Umwandlungen in der Mikrostruktur ein. Diese gehen mit Änderung der Werkstoffeigenschaften (z.B. Festigkeit) oder mit zusätzlichen Dehnungseffekten (Umwandlungsdehnungen, Umwandlungsplastizität) einher. Dies muß bei der Schweißsimulation berücksichtigt werden.

Mit der Einbindung der Schweißsimulation in die Prozeßkettensimulation ist es auch möglich die gesamte Herstell- und Fertigungshistorie abzubilden und den Bauteilzustand nach Abschluß aller Fertigungsschritte zu bestimmen: Umformen - Schweißen - Wärmebehandeln. Außerdem ist es möglich die Ergebnisse aus der Schweißstruktursimulation für Festigkeitsanalysen oder Berechnungen von Gebrauchszuständen zu verwenden.

Anhand der nachfolgend aufgelisteten Bilder soll ein Einblick über mögliche Berechnungen der Schweißsimulation vermittelt werden, die nicht weniger Vielfältig ist als die Schweißtechnik selbst.

Bild 1 zeigt einen 4 m langen gekrümmten Träger, der mit Halskehlnähten zu einem Kastenquerschnitt geschlossen wird und an den Enden eine eingeschweißte Steife besitzt sowie eine eingeschweißte Welle. Heutzutage ist es möglich Schweißsimulationen an derart großen Bauteilen durchzuführen.

Besonders dünnwandige Bauteile weisen deutliche Schweißverzüge auf. Die Simulation an so genannten Schalenelementen erlaubt eine effiziente Vorausberechnung des Schweißverzuges (Bild 2). Ein bekanntes Phänomen ist das Ausweichen rechtwinklig zur Blechebene. Bild 3 veranschaulicht dies am Beispiel einer Lasergeschweißten Blechscheibe. In Bild 3 rechts ist der typische Verzug der Scheibe nach vollständigem Abkühlen zu sehen.

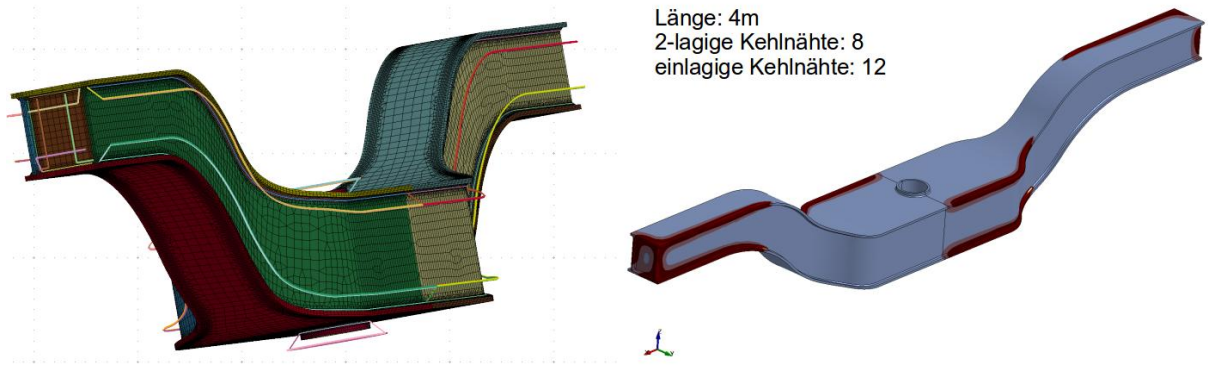


Bild 1: Gekrümmter Träger links Darstellung der Schweißpfade rechts Temperaturfeld bei gleichzeitigem Schweißen mehrerer Nähte (MSG)

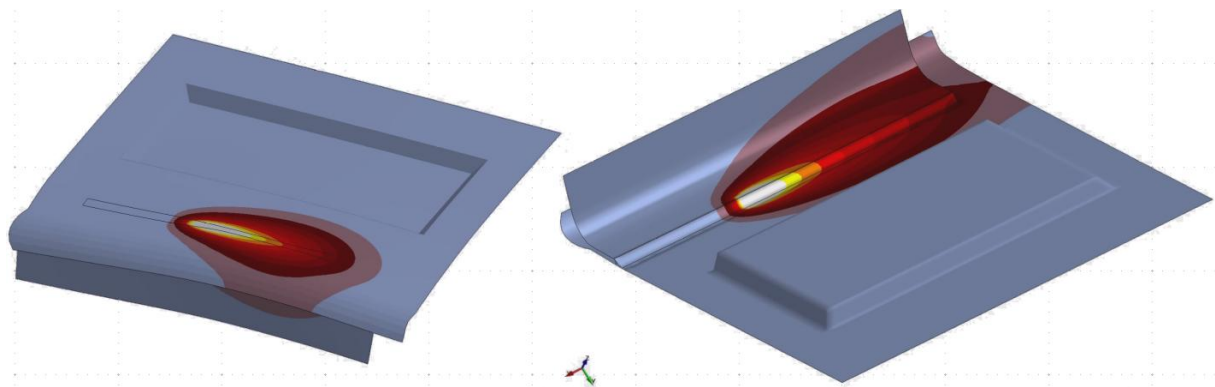


Bild 2: Temperaturfeld dünnwandiger Blechbauteile mit überhöht dargestelltem Verzug (Laser)

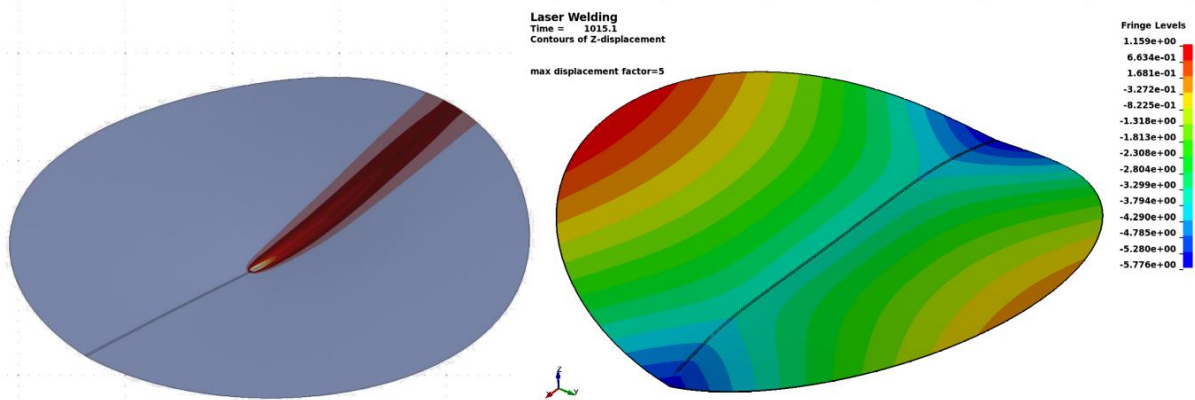


Bild 3: Ausbeulen während des Schweißens und finaler Verzug einer Blechscheibe (Laser)

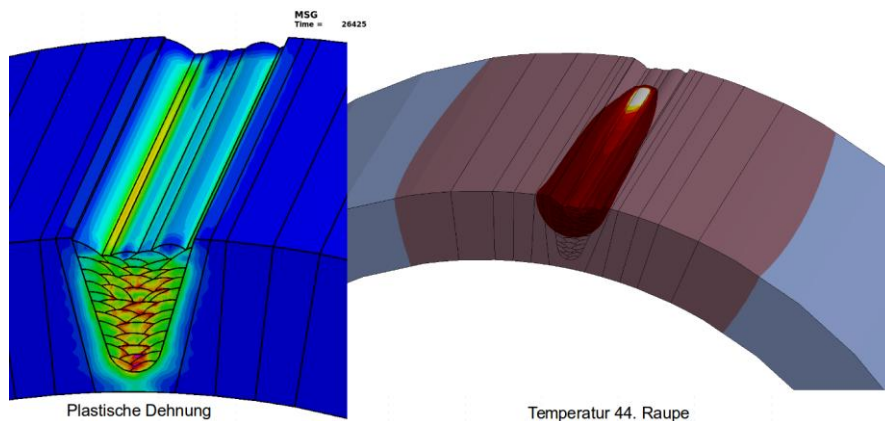


Bild 4: Längsnaht eines Rohres plastische Dehnungen und Temperaturfeld beim Schweißen

In Bild 4 wird das Beispiel eines längsnahtgeschweißten Rohrs aus Alloy 625 vorgestellt. Links dargestellt sind die plastischen Dehnungen, die sich während des Schweißens einstellen rechts das Temperaturfeld während des Schweißes einer Raupe. Neben der Werkstoffbewertung über die Verfestigung des Werkstoffs kann auch eine Aussage über Wartezeiten oder Zwischenwärmmaßnahmen getroffen werden, die insbesondere bei Werkstoffen mit Gefügewandlung relevant werden.

Bild 5 zeigt die plastischen Dehnungen und den Verzug einer mehrlagigen Kehlnaht an dicken Blechen. Die links von der Kehlnaht gesetzte Heftnaht ist gerissen. Die hohen plastischen Dehnungen deuten auf einen kritischen Zustand im Wurzelbereich hin. Mit der Berechnungsmethode 2D-Querschnitt ist es möglich dickwandige Bauteile mit mehrlagigen Nähten in kurzer Zeit zu berechnen.

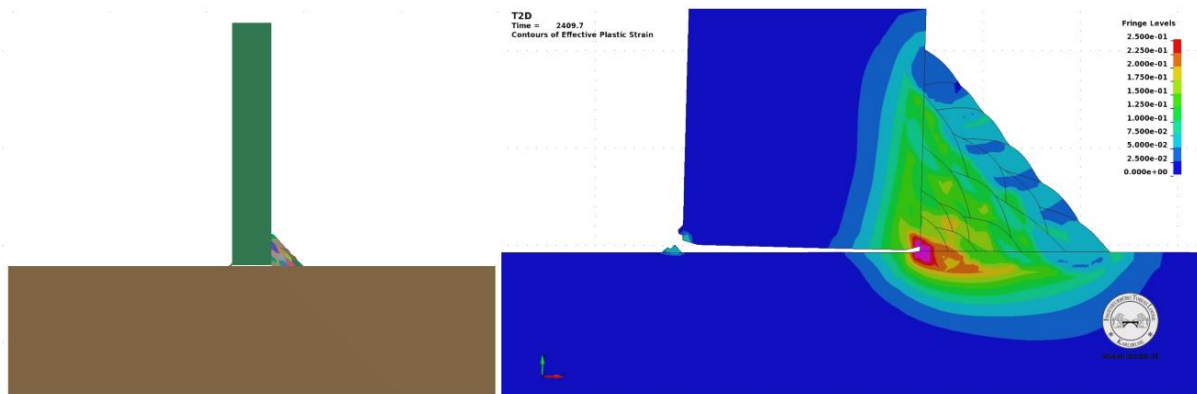


Bild 5: T-Stoß dickwandiger Bleche mit mehrlagiger Kehlnaht. Links: Modell, rechts: plastische Dehnungen nach dem Schweißen

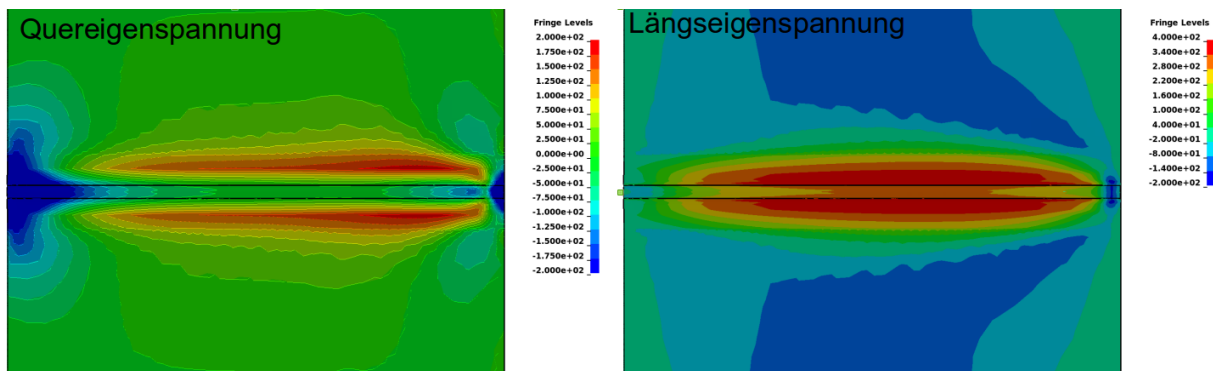


Bild 6: Eigenspannungen einer Platte aus 316L mit zugeschweißtem Nut WIG 2 Lagen

In Bild 6 sind die Eigenspannungen dargestellt, die sich an einer 30 mm dicken Platte aus dem nichtrostenden austenitischen Stahl 316L einstellen, wenn eine eingefräßte Nut mit 2 Lagen WIG wieder zugeschweißt wird. Dieses Beispiel stammt aus dem Round Robin Ringversuch des IiW [LOO2010].

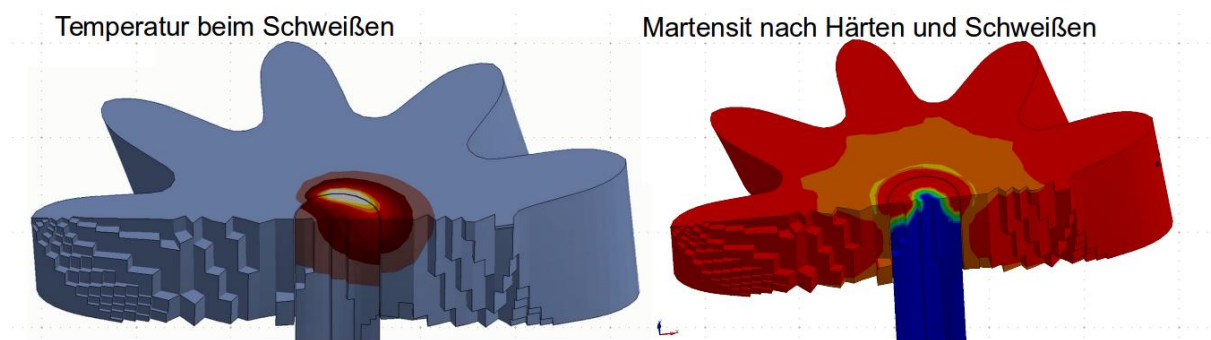


Bild 7: Kopplung der Simulation für Härten und Schweißen beim Einschweißen einer Welle in ein gehärtetes Zahnrad

Bild 7 zeigt die Möglichkeit der Kopplung zwischen der Wärmebehandlungssimulation und der Schweißsimulation. Das gehärtete Zahnrad wird anschließend an einen ungehärteten Stab angeschweißt. In Bild 7 links ist das Temperaturfeld während des Schweißens dargestellt in Bild 7 rechts die Martensitverteilung nach dem Schweißen. Der ungehärtete Stab weist keinen Martensit auf, das Zahnrad besitzt einen Martensit-Grundlevel. Im Bereich der Schweißnaht stellt sich eine eigenständige Martensitverteilung ein, die durch den Temperaturzyklus aus dem Schweißen bestimmt wird.

Bei der Schweißsimulation für Bauteile mit umwandelnden Werkstoffe wie beispielsweise die Baustähle wird die Schweißstruktursimulation mit der Werkstoffsimulation gekoppelt und die Umwandlung mit berechnet. Am Ende einer solchen Struktursimulation liegt das Gefüge als Ergebnis vor.

In ähnlicher Weise kann auch die Prozeßsimulation mit der Werkstoffsimulation gekoppelt werden. Eine Aussage über die Gefügestände nach der Prozeßsimulation wird damit ermöglicht. Dies wurde mit der WeldWare® Schnittstelle in SimWeld® umgesetzt. Bild 8 zeigt dazu ein Berechnungsbeispiel für eine Stumpfnah. Mit gleichen Schweißparametern wird ein Blech aus S355 (Bild 8 links) und ein Blech aus S690 (Bild 8 rechts) geschweißt. Aus der Berechnung läßt sich der unterschiedliche Martensitgehalt ablesen. Die Streckgrenze im WEZ-Bereich die sich durch die Gefügeänderung einstellt wird ebenfalls dargestellt.

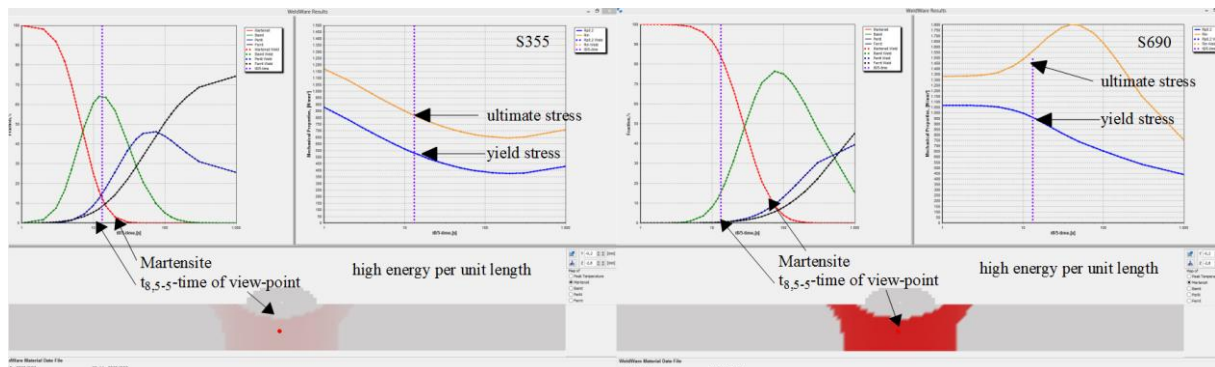


Bild 8: Martensitanteil und Streckgrenze links für S355 (1.0570) rechts für S690 (1.8928)

4. Potentiale und Anwendungsmöglichkeiten

4.1 Verfügbarkeit und Werkstattunabhängigkeit

Erhebliches Potential liegt in der frühen Verfügbarkeit der Schweißsimulation. Teile müssen für eine Untersuchung nur als CAD-Modell vorhanden sein. Außerdem ist es möglich, Varianten zu untersuchen und Unterschiede zwischen Parametervarianten herauszuarbeiten, ohne dass sachfremde Einflüsse zu Fehlern führen.

Da die Berechnungen in den Entwicklungsbüros oder bei Dienstleistern durchgeführt werden ist dieser Arbeitsschritt unabhängig von der fertigenden Werkstatt und blockiert damit keine Werkstattkapazitäten. Die Prozeßsimulation ermöglicht dem Entwicklungsingenieur unabhängig von einer ausführbaren Schweißparameter zu bestimmen und dies im Bedarfsfall auch zu optimieren.

4.2 Verzugsmanagement und Geometriefindung

Im Bereich Verzugsmanagement liegt ein großes Anwendungspotential der Schweißstruktursimulation. Mit ihr ist es zunächst grundsätzlich möglich Schweißverzüge zutreffend vorauszusagen. Weiterhin kann mit ihr aktives Verzugsmanagement betrieben werden. Auch wenn es nicht möglich ist Schweißfolgen so einzustellen, daß der Verzug verschwindet, es ist aber möglich herauszufinden welche Schweißfolgen am günstigsten sind. Eine Verzugskompensation kann auch dahingehend erfolgen, daß für die Spannvorrichtung Vorsprengungen ausgelegt werden oder Bauteilkomponenten mit inversem Schweißverzug gefertigt werden, so daß sich nach der Schweißung die Sollgeometrie einstellt.

Da die Bauteilgeometrie einen maßgebenden Einfluß auf den Schweißverzug hat kann mit Hilfe der Schweißsimulation die Geometriefindung optimiert werden.

Schließlich ist es auch möglich mit Hilfe der Schweißsimulation die Lage und Anordnung der Schweißnähte zu optimieren so daß der Schweißverzug im Toleranzbereich bleibt.

Außerdem gibt es verfahrensspezifische Besonderheiten. Beim Laserschweißen ohne Schweißzusatz kann die Schweißsimulation genutzt werden um Spaltmaße auszulegen.

4.3 Eigenspannungen und Eigendehnungen

Mit der Schweißsimulation können Eigenspannungen und Dehnungen berechnet werden. Der Spannungs- und Dehnungszustand kann auch in Kombination mit äußeren Lasten bestimmt werden. Dieser Spannungs- und Dehnungszustand kann für eine Bauteilbewertung hinzugezogen werden.

4.4 Schadensabsicherung Schadensanalyse

Zur Vorbeugung und auch im Schadensfall kann die Schweißsimulation gute Dienste leisten. Auch wenn die Ergebnisse beispielsweise einer Eigenspannungsanalyse in der Regel nicht durch Messungen verifiziert werden können, so können doch kritische Stellen und konstruktives Verbesserungspotential herausgearbeitet werden.

4.5 Wärmeführung

Die thermische Simulation kann nützlich sein, für die Abschätzung von Maximaltemperaturen in lackierten oder geklebten Bereichen. Sie dient unmittelbar der Ermittlung von Abkühlzeiten $t_{8/5}$. Damit ist es möglich die Wärmeführung mit Hilfe der Schweißsimulation auszulegen. Sowohl die Streckenenergie als auch Vorwärm- und Zwischenwärmtemperaturen können ausgelegt werden um ein optimales Gefüge in Naht und Wärmeeinflußzone zu erreichen.

4.6 Werkstoffkontrolle

Schweißen ist ein Fertigungsverfahren, daß den Werkstoffzustand unmittelbar beeinflusst. Mit der Schweißsimulation kann der Werkstoffzustand vorausberechnet werden. Der Werkstoffzustand ist damit kontrollierbar oder kann ausgelegt werden. Zum Werkstoffzustand gehört nicht nur die Eigenschaftsänderung durch Gefügeumwandlung sondern auch der Einfluß der sich aus der Verfestigung ergibt. Mithin kann bestimmt werden wie hoch die elastische oder plastische Reserve des Werkstoffes im Bauteil ist. Die elastische Reserve ist dabei die Differenz zwischen vorliegender Dehnung und Dehnung bei Streckgrenze. Die plastische Dehnung ist die Differenz zwischen vorliegender plastischer Dehnung und definierter Grenzdehnung.

4.7 Zustandsbestimmung für weitere Analysen

Die Schweißsimulation ermöglicht es grundsätzlich Bauteilzustände numerisch abzubilden und damit den Eigenspannungs- dehnungs- und Verformungszustand darzustellen. Dieser Zustand kann als Eingangsgröße für weitere Numerische Analysen verwendet werden. Dies kann die Umformsimulation, Crashsimulation, Wärmebehandlungssimulation sein oder die Berechnung von Gebrauchszuständen oder Grenztragfähigkeitszuständen.

4.8 Prozeßverständnis

Mit der Simulation und den Möglichkeiten die die Auswertung der Berechnungsergebnisse liefert ist es möglich das Verhalten der Bauteile während des Schweißens und Abkühlens darzustellen. Dazu gehört einerseits, daß die Berechnungsergebnisse, Eigenspannungen und Verzug, über das gesamte Bauteilvolumen vorhanden und darstellbar sind und andererseits, daß mit der Möglichkeit der überhöhten Darstellung Verzüge sichtbar gemacht werden können, die in Realität nicht beobachtet werden können.

4.9 Ausbildung

Noch unterschätzt wird das Potential von Schweißsimulation zur Ausbildung von Konstrukteuren, die mangels eigener Erfahrung anfangs wenig Gefühl für „gute“ und „schlechte“ Schweißkonstruktionen haben. Hierbei ist ein Vorteil der Schweißsimulation, dass Deformationen und Spannungen farblich dargestellt werden können.

5. Modellerstellung einer Schweißstruktursimulation

5.1 Allgemeines

Zur Erstellung eines Simulationsmodells zur Berechnung des Schweißverzuges oder der Schweißeigenspannungen sind folgende Arbeitsschritte notwendig:

- Aufbereitung der Materialdaten
- Bestimmung der Ersatzwärmequelle
- Vernetzung der Bauteilgeometrie
- Festlegung der Schweißpfade (Trajektorien)
- Definition des Schweißfolgeplans und der Spannsituation
- Kontrolle des Wärmeeintrages ggf. Korrektur der Wärmequellen
- Temperaturfeldberechnung
- Strukturmechanische Berechnung
- Auswertung

Die relevanten Daten für Schweißsimulation sind in der WPS und im Schweißfolgeplan dokumentiert. Die WPS enthält dabei vornehmlich die Daten für die Prozesssimulation:

- Stromstärke
- Spannung
- Schweißgeschwindigkeit
- Schweißnahtvorbereitung und Schweißposition
- Schutzgas

Aus diesen Informationen entwickelt die Prozesssimulation die für die Struktursimulation benötigte Ersatzwärmequelle.

Der Schweißfolgeplan enthält weitere Angaben, die für die Struktursimulation benötigt werden:

- Lage der Schweißnähte
- Schweißreihenfolge
- Start und Pausenzeiten.

Abschließend werden die Daten für die Spannvorrichtung mit Einspann- und Ausspannzeiten benötigt.

5.2 Materialdaten aufbereiten mit Hilfe von WeldWare®

WeldWare® ist ein modulare schweißtechnologisches Beratungssystem, mit welchem die Wärmeleitung beim Schweißen von Stahl ausgelegt werden kann. WeldWare® greift auf eine umfangreiche metallurgische Datenbank zurück aus der Umwandlungsdaten, Gefügestände und mechanische Eigenschaften von Stählen in Abhängigkeit der Stahlsorte, chemischen Analyse und Abkühlzeit berechnet werden.

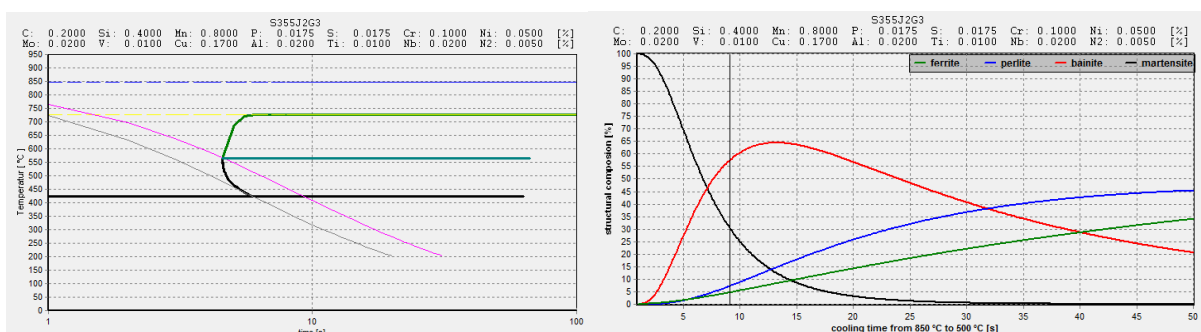


Bild 9: Schweiß-ZTU Diagramm (links) und Darstellung der Gefügezusammensetzung über der Abkühlzeit (rechts) für S355 (1.0570)

Im ersten Schritt wird die Stahlsorte gewählt und die chemische Analyse eingegeben. Es erfolgt eine Prüfung, ob die chemische Analyse im Gültigkeitsbereich der hinterlegten Regressionsgleichungen liegt. Aus der Stahlsorte und der chemischen Analyse berechnet WeldWare® das Schweiß-ZTU-Diagramm (Bild 9 links). Beim Schweiß-ZTU-Diagramm wird eine Austenitisierungstemperatur von 1350 °C zugrundegelegt. Dahingehend unterscheiden sich diese Diagramme von den

Wärmebehandlungs ZTU-Diagrammen mit Austenitisierungstemperaturen um 900 °C. Aus den ZTU-Diagrammen gehen die Temperaturbereiche für die unterschiedlichen Umwandlungen (Ferrit/Perlit, Bainit, Martensit) hervor.

WeldWare® verwendet Abkühlzeiten für den Temperaturbereich von 850 °C auf 500 °C. Die Gefügeverteilung, die sich bei einem S355 bei verschiedenen Abkühlzeiten ergibt ist in Bild 9 rechts dargestellt.

Ebenso weist WeldWare® in Abhängigkeit der Abkühlzeiten die sich einstellenden mechanischen Kennwerte Streckgrenze, Zugfestigkeit, Härte, Bruchdehnung und Brucheinschnürung bei Raumtemperatur aus (Bild 10). Mit der Information über Abkühlzeit, Gefügezusammensetzung und mechanischen Kennwerten können die Streckgrenzen und Zugfestigkeiten der Einzelgefüge bestimmt werden.

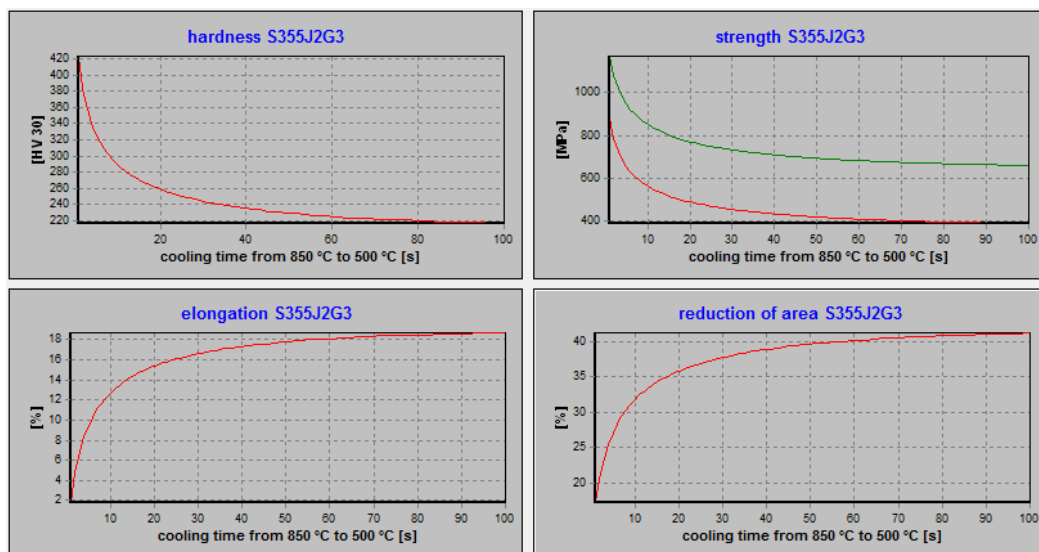


Bild 10: Mechanische Eigenschaften für S355 (1.0570) in Abhängigkeit der Abkühlzeit

Die wwd-Schnittstelle ermöglicht einen automatischen Datentransfer zu DynaWeld-Material. DynaWeld-Material bereitet die Daten anhand von vorgegebenen Basisfunktionen für E-Modul, Streckgrenze und Verfestigung auf und bestimmt automatisch die Parameter für das numerische Modell zur Gefügeumwandlungsberechnung.

Bild 11 links zeigt exemplarisch den für S355 phasenweise aufbereiteten Streckgrenzenverlauf über der Temperatur. Bild 11 rechts stellt die mit DynaWeld und LS-DYNA berechnete Gefügezusammensetzung in Abhängigkeit der Abkühlzeit den Ursprungsdaten von WeldWare® gegenüber.

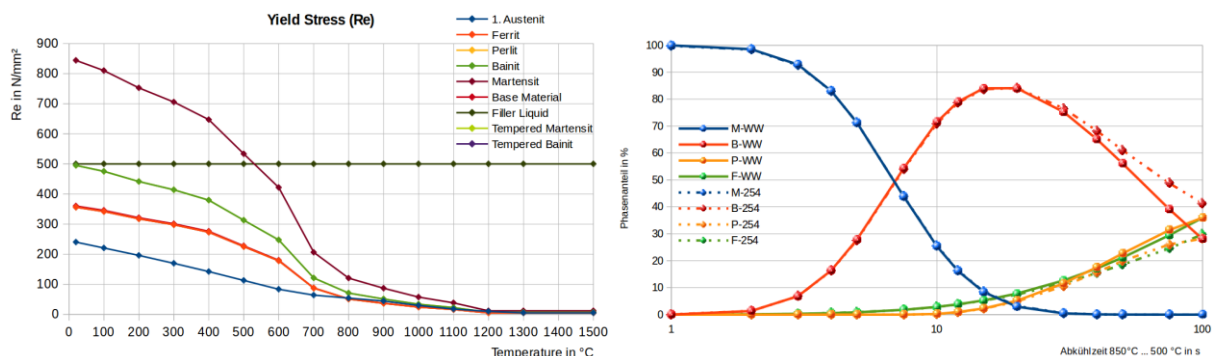


Bild 11: Gefügeabhängige Streckgrenzenverläufe über der Temperatur (links) und Gegenüberstellung der numerisch berechneten Gefügeverteilung (254) mit den Ursprungsdaten WeldWare® (WW)

5.3 Prozeßsimulation zur Berechnung des Wärmeeintrages mit SimWeld®

SimWeld®, eine Software für die Prozeßsimulation des Schutzgasschweißens am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der RWTH Aachen entwickelt. SimWeld® ist hochspezialisiert auf seine Simulationsaufgabe und dadurch in der Lage Berechnungen in weniger als einer Minute durchzuführen. Der Schweißingenieur kann Schweißnahtgeometrie und deren Qualität anhand der Prozeßparameter und Maschineneinstellungen vorhersagen. Die Ersatzwärmequelle, also der äquivalente Wärmeeintrag, wird mit jeder SimWeld® Simulation mitberechnet (Bild 12) und kann für Schweißstruktursimulation verwendet werden.

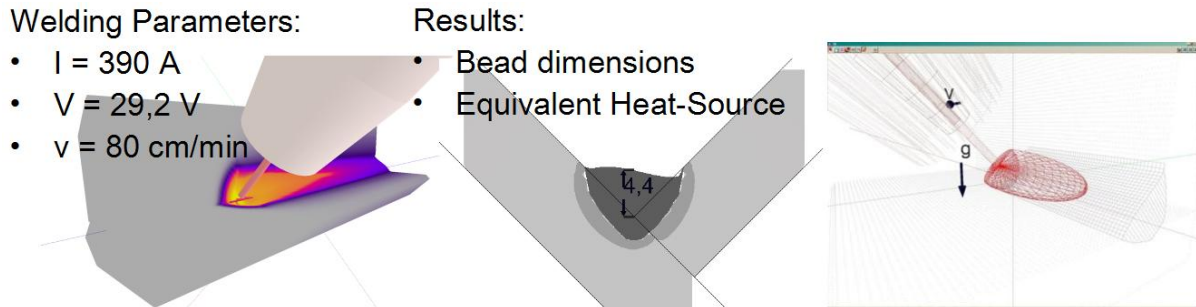


Bild 12: SimWeld® Berechnung

Die Berechnungsregion wird automatisch auf den Bereich eingegrenzt, in dem das lokale Temperaturfeld einen signifikanten Einfluß hat. SimWeld® verwendet den Ansatz der 2,5D Simulation, das bedeutet, daß die Berechnung am Querschnitt erfolgt aber die 3. Dimension, die Tiefenrichtung, über lineare Extrusion berücksichtigt wird. In SimWeld® sind alle Geometrien der Nahtvorbereitung nach ISO 9692 enthalten.

Der erste Arbeitsschritt besteht darin, die lokale Geometrie um die Schweißnaht zu definieren (Bild 13 links) und die Arbeitsposition (Bild 13 rechts) und den Werkstoff festzulegen. Unabhängig von den vordefinierten Arbeitspositionen PA bis PG kann der Anwender jede beliebige Position einstellen. Bauteile aus Stahl, nichtrostendem Stahl und Aluminium können berechnet werden. Die Daten der gängigsten Werkstoffe sind in einer Datenbank hinterlegt, die benutzerabhängig auch erweitert und geändert werden kann.

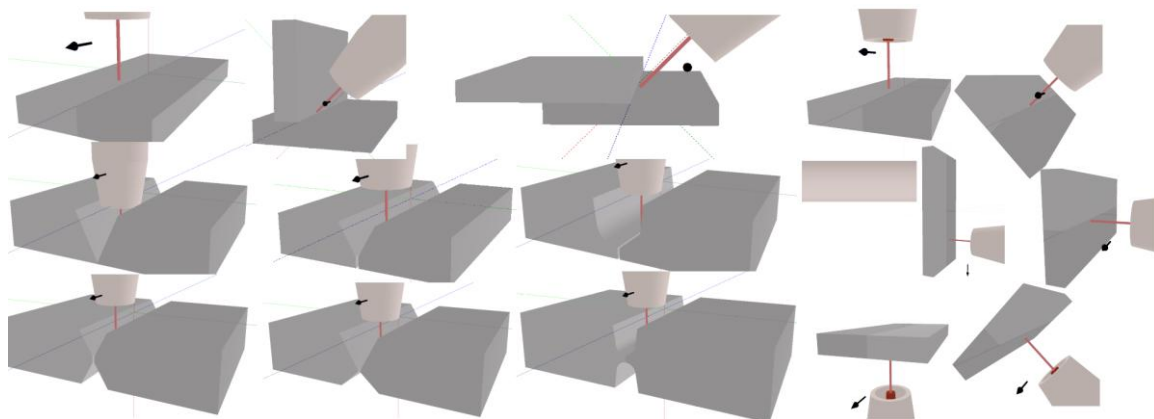


Bild 13: SimWeld® Nahtvorbereitung und Arbeitspositionen

SimWeld® 2015 ist begrenzt auf die Berechnung der Wurzellage. Falls eine äquivalente Wärmequelle für Füll- oder Decklagen bestimmt werden muß, oder für nicht vordefinierte Geometrien kann die Berechnung näherungsweise für eine Stumpfnah mit äquivalenter Blechdicke durchgeführt werden.

Im zweiten Schritt wird die Schweißgeschwindigkeit festgelegt. Die Mindestlänge des Simulationsraumes wird von SimWeld® automatisch berechnet, kann aber vom Anwender auch gesetzt werden. Außerdem bietet SimWeld® die Möglichkeit zwischen feiner, mittlerer oder grober Vernetzung zu differenzieren. Damit kann die Simulation zwischen Genauigkeit und Geschwindigkeit ausbalanciert werden.

Die Definition der Parameter von der Schweißstromquelle ist der letzte Arbeitsschritt im Modellaufbau mit SimWeld® (Bild 14 links). Mit SimWeld® kann der Normalprozeß sowie das Impulsschweißen mit U/I und I/I Modulation Berechnet werden.

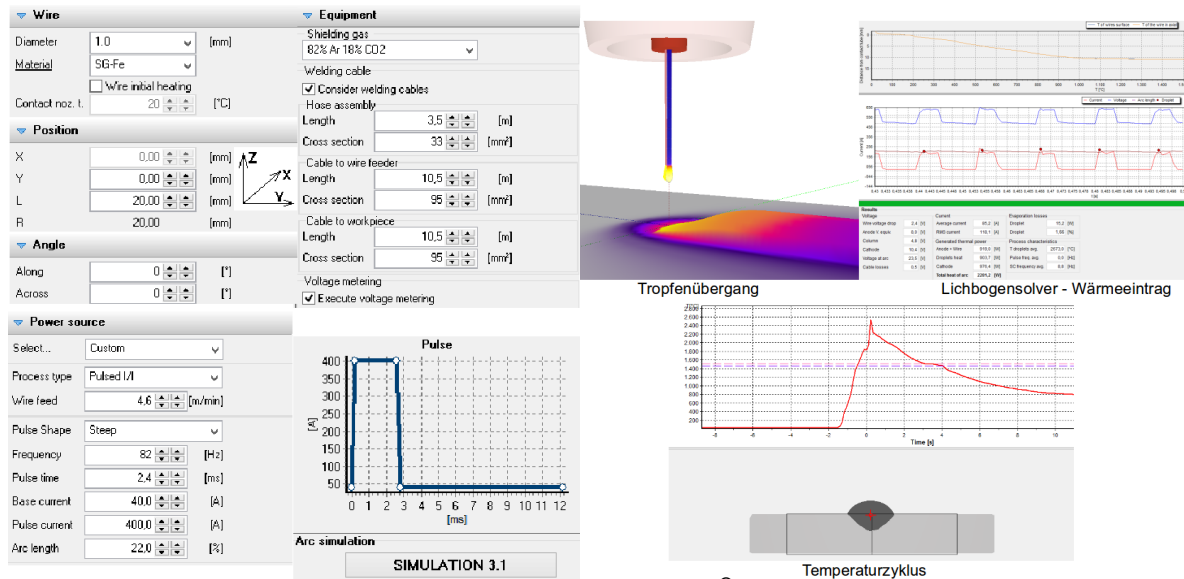


Bild 14 Schweißstromquellenparameter (links) und SimWeld® Ergebnisse (rechts)

Mit der SimWeld® Berechnung erhält der Anwender Informationen über die Tropfenablösung, Drahttemperatur, Stromstärken-, Spannungsverlauf, diskrete Spannungen zwischen Brenner und Bauteil sowie den Energieeintrag über die Schmelztropfen und den Lichtbogen. Diese Informationen sind insbesondere für Berechnungsingenieure hilfreich, die fernab von der Produktionsstätte realistische Schweißstromquelleneinstellungen abschätzen müssen.

Der Temperaturverlauf kann an jeder Querschnittsstelle ausgelesen werden und für andere Bemessungs- oder Bewertungsaufgaben in der Schweißtechnik verwendet werden (Bild 14 rechts).

Die Parameter der Äquivalenten Wärmequelle werden als lesbare ASCII-Datei in das SimWeld-output-Verzeichnis geschrieben und können von DynaWeld für die Schweißstruktursimulation übernommen werden.

5.4 Struktursimulation mit DynaWeld

Das DynaWeld Projekt wurde 2015 vom Ingenieurbüro Tobias Loose begonnen. DynaWeld ist ausgelegt für Schweißen und Wärmebehandlung und umfaßt Softwaremodule für einen hocheffizienten Aufbau von Simulationsmodellen für den LS-DYNA Solver sowie Hilfsprogramme für die Schweißstruktur- und Wärmebehandlungssimulation. DynaWeld stellt sowohl allgemeine Tools bereit wie auch Spezialversionen, die exakt auf die Bedürfnisse und Anwendungen des Kunden zugeschnitten sind.

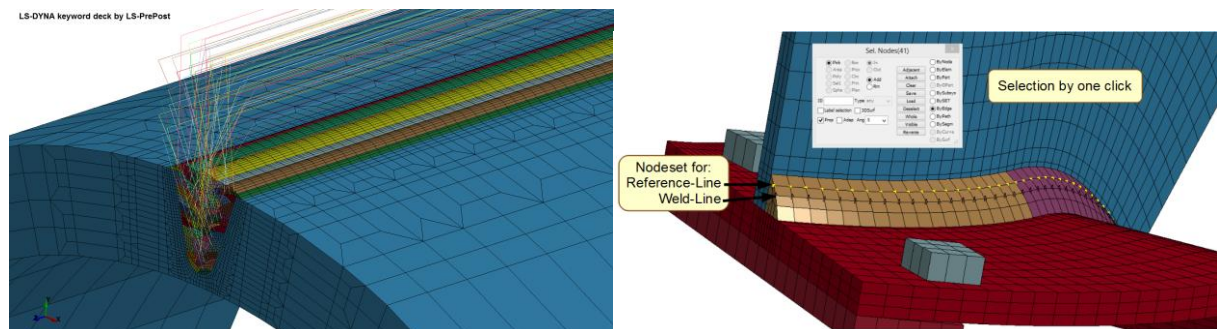


Bild 15 MSG-Mehrlagennaht mit DynaWeld (rechts) und Schweißpfaddefinition für DynaWeld (links)

Der Prozeßplan umfaßt alle simulationsrelevanten Informationen und Daten. Im Fall einer Schweißstruktursimulation sind die Wichtigsten davon die Schweißnähte mit Start- und Endzeit sowie

die zugehörigen Wärmequellenparameter. Darüber hinaus werden Bauteil-Definitionen Materialzuweisungen, Randbedingungen, Kontaktbedingung und generelle Simulationseinstellungen definiert. Dieser Prozeßplan ist das Herz von DynaWeld.

Der Focus von DynaWeld liegt in hoher Effizienz für den Berechnungsingenieur beim Aufsetzen der Simulationsdatensätze. Darum ist DynaWeld auf das notwendige Minimum an Eingabeparameter ausgelegt. Der Modellsetup für das in Bild 15 links gezeigte Beispiel einer 60-lagigen Stumpfnah an einer 40 mm dicken Rohrwandung beträt nur eine Stunde vom Ende der Vernetzung bis zum Start des LS-DYNA Solvers.

Aus dem vernetzten Modell müssen die Schweißpfade extrahiert werden. Die Schweißpfade definieren die Bahn der Schweißwärmequelle und deren Ausrichtung. Ihre Definition erfolgt über Knotensets, die mit LSPrePost, dem kostenfreien LS-DYNA Pre- und Postprozessor zügig erstellt werden können (Bild 15 rechts).

In DynaWeld erfolgen notwendige Nacharbeiten. Dazu gehört das Drehen der Referenzlinie auf die Ausrichtung zum Brenner oder Schweißquelle.

Für das MSG-Schweißen kann die Ersatzwärmequelle aus SimWeld[®] übernommen werden. Für andere Schweißprozesse müssen diese Parameter geschätzt und anhand von Temperaturfeldberechnungen iterativ justiert werden. Ein derartiger sogenannter Schliffbildabgleich ist in Bild 16 für zwei verschiedene Laserschweißnähte dargestellt.

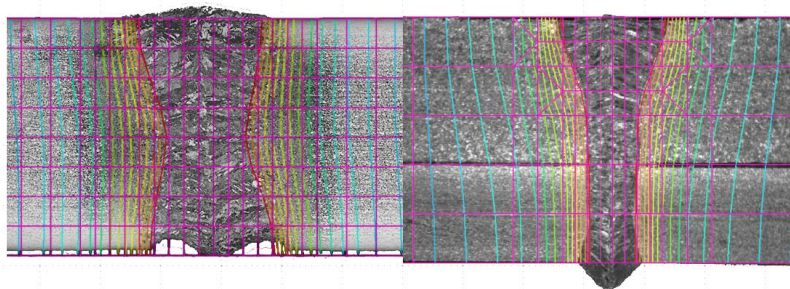


Bild 16 Wärmequellenabgleich am Beispiel von zwei Laserschweißnähten

Bild 17 zeigt links die DynaWeld Oberfläche und rechts schematisch den Arbeitsablauf des Aufbaus einer Simulation für die Schweißstruktursimulation mit LS-DYNA unter Verwendung von SimWeld[®] für die Berechnung der äquivalenten Wärmequelle und DynaWeld. Neben dem LS-DYNA-Solver und LSPrePost wird eine Vernetzungssoftware, Excel oder das kostenfreie Libre Office benötigt um die Simulation durchzuführen und auszuwerten.

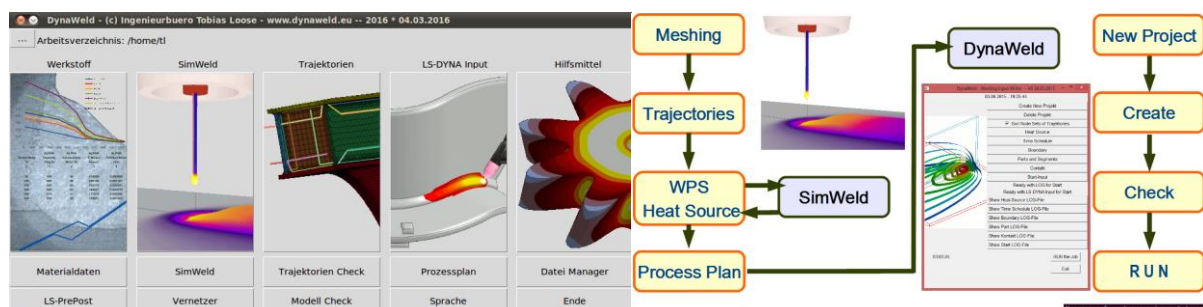


Bild 17: DynaWeld Oberfläche (links) und Arbeitsablauf Modellierung (rechts)

DynaWeld ermöglicht die Überprüfung der Schweißpfaddefinition anhand von Check-Modellen in denen die Trajektorien als Linien abgebildet und die Startpunkte markiert sind wie in Bild 18 links dargestellt.

Der tatsächliche numerische Wärmeeintrag wird von DynaWeld ausgewertet. Weicht dieser vom Sollwert ab kann eine Anpassung über einen Korrekturfaktor erfolge (Bild 18 rechts).

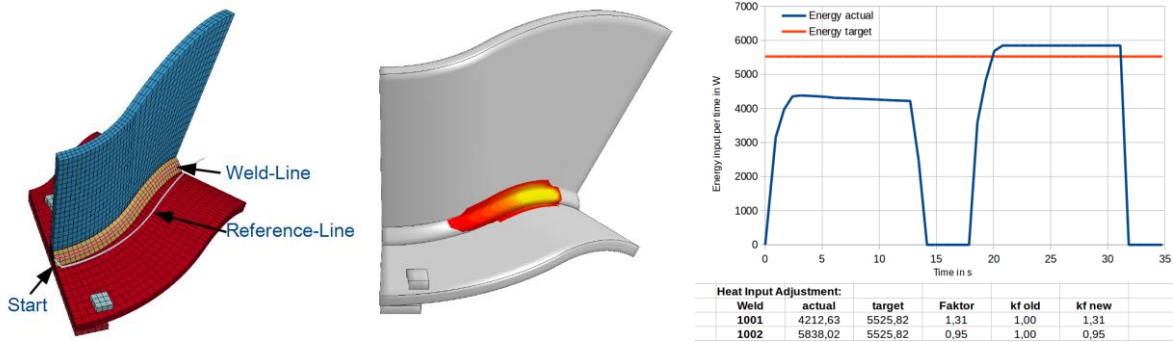


Bild 18: Modellüberprüfung und Anpassung des Wärmeeintrages

Nach Abschluß der Modellüberprüfung und der finalen Anpassung des Wärmeeintrages der Wärmequellen erfolgt die Berechnung und im Anschluß die Auswertung der Berechnungsergebnisse entsprechend den Anforderungen der Aufgabenstellung: Temperaturfeld, Verzug, Eigenspannungen, Dehnungen, Gefügezusammensetzung.

6. Schrifttum

[HIL2008]: Hildebrand, J.: Numerische Schweißsimulation - Bestimmung von Temperatur, Gefüge und Eigenspannungen an Schweißverbindungen aus Stahl- und Gußwerkstoffen. Diss. Bauhaus-Universität Weimar 2008, Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Bauhaus-Universität Weimar Band 018

[LOO2010]: Loose, T. ; Sakkietitbutra, J. ; Wohlfahrt, H. : New 3D-Calculations of residual stresses consistent with measured results of the IIW Round Robin Programme. In: Cherjak, H. (Ed.) ; Enzinger, N. (Ed.) : Mathematical Modelling of Weld Phenomena Bd. 9, Verlag der Technischen Universität Graz, 2010