



10. FACHTAGUNG  
FÜGEN UND KONSTRUIEREN  
IM SCHIENENFAHRZEUGBAU

14. und 15. Mai 2013  
Halle (Saale)  
VORTRAGSBAND

# Leistungsfähigkeit und Einsatzmöglichkeiten der Schweißsimulation im Schienenfahrzeugbau

Dr.-Ing. Tobias Loose IWE, Wössingen (Lkr. Karlsruhe)  
Dr.-Ing. Ben Boese IWE, Salzgitter

## 1 Einleitung

Die Bewältigung schweißtechnischer Aufgaben in den fertigen Betrieben obliegt der Führung der Schweißfachingenieure. Eine fundierte Ausbildung in Deutschland und ein Erfahrungsschatz umfangreicher Schweißversuche bilden die Basis zum Engineering.

Parallel zu einer Vielzahl experimentell basierter Forschungsvorhaben hat man vor über 30 Jahren begonnen die das Schweißen begleitenden Phänomene auch mathematisch und numerisch beschreiben zu wollen. Die intensive Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Schweißsimulation hat mittlerweile softwaretechnische Anwendungen hervorgebracht die für die industrielle Anwendung geeignet sind oder kurz davor stehen angewendet werden zu können:

Angefangen mit WeldWare®, einem schweißtechnologischem Beratungssystem dessen Entwicklung vor über 25 Jahren an der SLV Mecklenburg-Vorpommern begonnen wurde und welches Gefügeabschätzungen für die Wärmeinflusszone erlaubt, über SimWeld einer Software für die Berechnung der Schmelzbadgeometrie, dessen Geburtsstunde 1986 war und vom ISF der RWTH Aachen entwickelt wird hin zu Simufact.welding einer Software zur Berechnung von Eigenspannung und Verzug dessen besonders anwenderfreundliche Benutzeroberfläche eine industrielle Anwendung einer sehr anspruchsvollen Simulationsmethode ermöglicht.

Dieser Aufsatz soll einen Überblick über die Schweißsimulation in der industriellen Anwendung geben. Dabei wird auf die verschiedenen Disziplinen der Schweißsimulation deren Berechnungsprogramme und die Anwendungsmöglichkeiten im Schienenfahrzeugbau eingegangen. Abschließend wird am Beispiel eines Drehgestell-Langträgers der aktuelle Stand der Leistungsfähigkeit der Schweißverzugsimulation und deren Einsatzpotential für den Fertigungsprozess verdeutlicht.

## 2 Disziplinen der Schweißsimulation

Die Schweißsimulation umfasst nach Radaj [RAD2002] drei Disziplinen, die miteinander in Wechselwirkung stehen: Die Werkstoffsimulation, die Prozesssimulation und die Struktursimulation (Abbildung 1). Zum Verständnis der Schweißsimulation ist es wichtig deren Eigenschaften und Zielrichtungen zu verstehen.

Die Schweißprozesssimulation beantwortet die Frage nach der Schmelzbadausbildung und des Wärmeeintrages. Eingangsgrößen sind die Schweißprozessparameter. Die Schweißprozesssimulation verwendet einen Fluidodynamischen Lösungsansatz. Die Prozesssimulation liefert die Wärmeeintragsfunktion für die Struktursimulation und den Temperaturzyklus für die Werkstoffsimulation. Der Ereignishorizont der Schweißprozesssimulation beschränkt sich auf das nahe Umfeld der Schweißwärmequelle.

Die Werkstoffsimulation beantwortet die Frage nach den thermodynamischen und mechanischen Materialkennwerten sowie die Frage nach dem Umwandlungsverhalten des Materials infolge eines Temperaturzyklus. Es gibt Lösungsansätze, bei denen das physikalische Verhalten auf Kristallebene simuliert wird, beispielsweise die von der Software MICRESS verwendete Phasenfeldmethode. Andere basieren auf Messdaten, die über Regressionsgleichungen verknüpft sind, wie die Software WeldWare®. Das Nancy-Modell oder das Modell von Leblond, mathematische Ansätze mit denen die Umwandlungsdiagramme beschrieben werden zählen ebenfalls zur Werkstoffsimulation.

Die Schweißstruktursimulation betrachtet das Verhalten im gesamten Bauteil. Sie beantwortet unter Verwendung der Finite-Element-Methode die Fragen nach Verzug und Eigenspannungen, sowie der bauteilglobalen Temperaturentwicklung und Materialumwandlung. Eingangsgröße ist der Wärmeeintrag in Form einer Ersatzwärmequelle, die nur den resultierenden Wärmeeintrag beschreibt und alle Vorgänge, die die Prozesssimulation abbildet außer Acht lässt. Gekoppelt ist die Struktursimulation direkt mit der Werkstoffsimulation um Gefügeumwandlung oder Rekristallisation zu beschreiben.

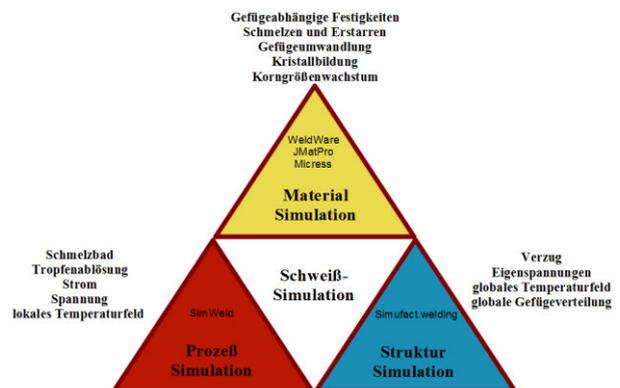


Abbildung 1: Disziplinen der Schweißsimulation in Anlehnung an Radaj

## 3 Werkstoffsimulation - WeldWare®

WeldWare® ist ein schweißtechnologisches Beratungssystem der SLV Mecklenburg-Vorpommern GmbH, das Schweißaufsichtspersonen unterstützt die Wärmeleitung beim Schweißen umwandelnder Stähle im Hinblick auf die Gefügeausbildung in der WEZ zu kontrollieren oder einzustellen. Grundlage von WeldWare® ist eine von Seyffarth, Scharff, Meyer und Groß begonnene und derzeit von Scharff fortgeführte umfangreiche Datensammlung selbst gemessener Schweiß-ZTU Diagramme [SEY1992], die über Regressionsgleichungen verknüpft sind, so dass die Daten für beliebige chemische Analysen innerhalb der Regressionsgrenzen abgegriffen werden können. Die chemische Zusammensetzung beeinflusst das Umwandlungsverhalten und damit die Werk-

stoffeigenschaften in der WEZ. Auch zwei nach Norm gleiche Stähle können aufgrund unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung zu unterschiedlichem Verhalten beim Schweißen neigen.

Mit WeldWare® lassen sich die Gefügezusammensetzung, Härte, Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Brucheinschnürung für Stähle in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung der Charge und der Abkühlzeit  $t_{8,5/5}$  bestimmen. Die Abkühlzeit  $t_{8,5/5}$  ist die Zeit, die zum Abkühlen von 850 °C auf 500 °C benötigt wird.

Mit WeldWare® läßt sich die Abkühlzeit  $t_{8,5/5}$  in Abhängigkeit von Blechdicke, Nahtart, Schweißverfahren und Schweißparameter abschätzen. Die notwendige Vorwärmtemperatur zur Einhaltung einer Mindestabkühlzeit kann berechnet werden.

Somit liefert WeldWare® der Schweißaufsichtsperson in den Schweißbetrieben ein hilfreiches Tool zur Bestimmung von Schweißparametern zur Erstellung oder Überwachung der Anwendung von Schweißanweisungen unter Berücksichtigung der aktuell verwendeten Stahlcharge und den Einfluss dessen chemischer Zusammensetzung auf das mechanisch- technologische Verhalten der Nahtbereiche, besonders der Wärmeeinflusszone.

#### 4 Anwendung der Werkstoffsimulation im Schienenfahrzeugbau

Die Stahlsorte S355 ist eine der gängigsten Stahlsorten überhaupt und wird auch bei der Herstellung vieler Schienenfahrzeuge eingesetzt. Die technischen Lieferbedingungen schreiben die Erfüllung mechanischer Kennwerte wie beispielsweise Streckgrenze und Zugfestigkeit vor, lassen aber bei der chemischen Zusammensetzung einen großen Spielraum.

Abbildung 2: WeldWare® Berechnung der Abkühlzeit  $t_{8,5/5}$

Abbildung 2 zeigt beispielsweise die Berechnung der Abkühlzeit (5,9 s) für eine Kehlnaht an einem T-Stoß mit 10 mm Blechdicke mit dem Prozeß 135 (MAG).

Betrachten wir einen S355J2+N (1.0577), mit 0,2 % Kohlenstoff und 0,8 % Mangan und einen S355MC (1.0976) mit 0,12 % Kohlenstoff und 0,8 % Mangan. Abbildung 3 zeigt für S355J2+N die Gefügezusammensetzung über die Abkühlgeschwindigkeit aufgetragen, Abbildung 4 die für S355MC.

Der Einfluss des Kohlenstoffgehaltes auf die Martensitbildung in der WEZ ist deutlich erkennbar. Der in den Grafiken eingetragene K30-Wert kennzeichnet die Mindestabkühlzeit, bei der höchstens 30 % Martensit entstehen. Während bei S355J2+N bei einer Abkühlzeit von 9,1 s 30 % Martensit entsteht ist dies bei S355MC erst bei einer Abkühlzeit von 4,4 s der Fall. Ziehen wir nun die durch unsere Schweißparameter ermittelte Abkühlzeit von 4 s in Betracht, so können wir S355MC ohne Vorwärmen schweißen, während bei S355J2+N ein Vorwärmen zwingend notwendig ist.

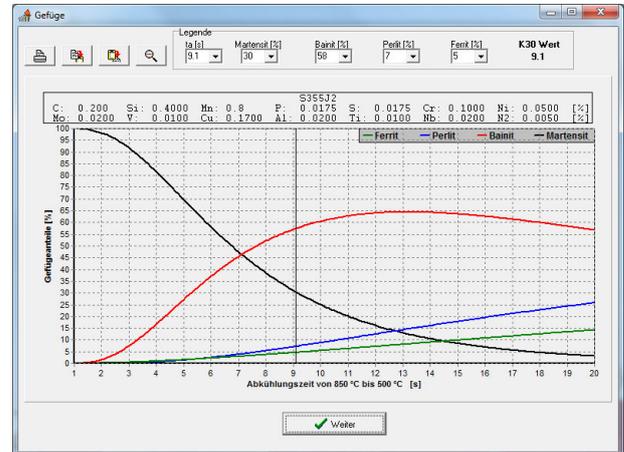


Abbildung 3: Gefügezusammensetzung über Abkühlzeit S355J2+N

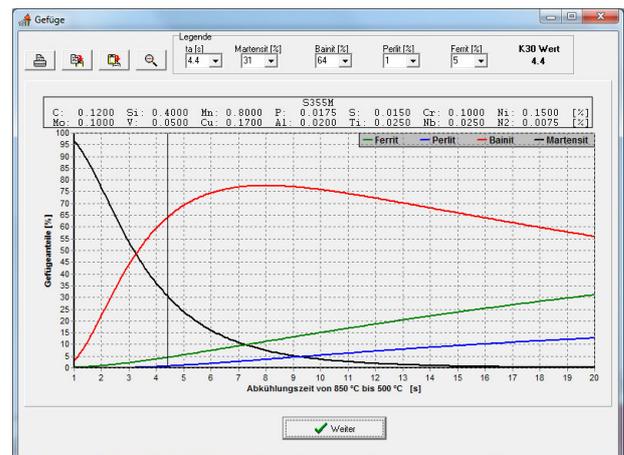


Abbildung 4: Gefügezusammensetzung über Abkühlzeit S355MC

WeldWare® gibt ebenfalls die mechanischen Kennwerte in der WEZ aus, so dass Streckgrenze, Zugfestigkeit, Härte und auch die Bruchdehnung A als Maß für die Duktilität überwacht werden können. Für die Abkühlzeit 5,9 s ergeben sich für das gewählte Beispiel folgende Werte, die beim S355MC eine deutlich höhere Duktilität in der WEZ und damit bessere Schweißbeignung als beim S355J2+N zeigen:

	HV [HV30]	Rp0.2 [N/mm <sup>2</sup> ]	A [%]
S355J2+N	318	629	10,2
S355MC	281	642	19,1

#### 5 Schweißprozesssimulation - SimWeld

SimWeld ist eine Software für die Schweißprozesssimulation, die es ermöglicht die Schmelzbadausbildung beim

Metallschutzgasschweißen vorauszuberechnen. Hinter SimWeld steht über 25 jährige kontinuierliche Forschung und Entwicklung, welche in der letzten Zeit am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen durchgeführt wurde.

SimWeld verwendet als Eingabeparameter die Einstellungen der Schweißstromquelle. Berücksichtigung findet die Schutzgasart, der Schweißzusatzwerkstoff und der Werkstoff des Bauteils, die Schweißnahtvorbereitung nach DIN EN ISO 9692 sowie die Schweißposition und die Brennerstellung.

SimWeld berechnet auf Basis der Eingangsparameter zunächst die Drahterwärmung, und Tropfenablösung. Im Rahmen der Qualitätssicherung kann SimWeld eingesetzt werden um Sollkurven für den Spannungs- und Stromverlauf zu liefern (Abbildung 5). Diese können mit den Ist-Werten während des Prozesses abgeglichen werden und somit die Absicherung für einen ordnungsgemäß verlaufenden Prozess liefern.

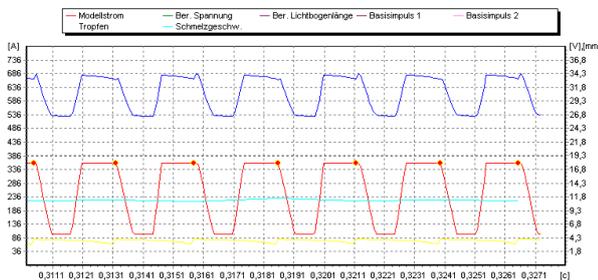


Abbildung 5: Spannungs- und Stromstärkenverlauf aus einer SimWeld-Simulation

Anschließend erfolgt die Berechnung der Schmelzbadausbildung, verbunden mit der Berechnung des lokalen Temperaturfeldes im Schmelzbad und Schmelzbadnähe. Solidus- und Liquidusfläche können genauso ausgewertet werden, wie die Schmelzbadgeometrie und damit der erzielte Einbrand, die erzielte Durchschweißung oder auch die mögliche Entstehung von Einbrandkerben.

Mit SimWeld können diese Berechnungen im Vorfeld durchgeführt werden, ohne dass Kosten für Probenschweißungen und die Anfertigungen von Makroschliffen entstehen.

## 6 Anwendung der Schweißprozesssimulation im Schienenfahrzeugbau

SimWeld kann im Schienenfahrzeugbau, wie in jedem anderen Schweißbetrieb, der das Metallschutzgasschweißen einsetzt, zur Überprüfung und Justierung der Prozessparameter eingesetzt werden.

Ein Anwendungsfall für SimWeld ist die Überprüfung und Vorausberechnung des Einbrandes. Abbildung 6 zeigt die Schmelzbadausbildung einer Kehlnaht bei zwei unterschiedlichen Schweißparametern. Deutlich erkennbar, die Parameter der rechten Naht liefern einen tieferen Einbrand, die Nahtkehle ist gut erfaßt, die Nahtoberfläche glatter und die Nahtüberhöhung geringer.

Die Auswirkungen der Änderung einzelner Parameter auf die Schmelzbadgeometrie kann mit SimWeld leicht verdeutlicht werden. Damit kann SimWeld unterstützend in der Aus- und Fortbildung von Schweißpersonal und Schweißaufsichtspersonen eingesetzt werden.

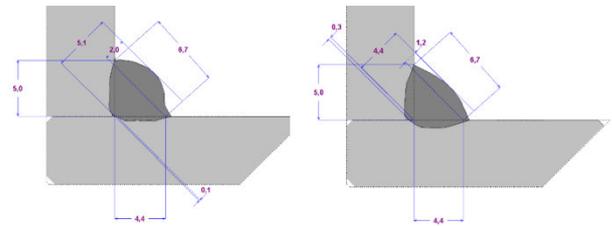


Abbildung 6: Mit SimWeld berechnete Nahtgeometrie einer Kehlnaht bei unterschiedlichen Schweißparametern

## 7 Struktursimulaton – Simufact.welding

Mit der Schweißstruktursimulation wird das Verhalten des gesamten Bauteils beim Schweißen nachvollzogen. Sie liefert im wesentlichen Antworten auf den Schweißverzug und die Eigenspannungen. Die Schweißstruktursimulation basiert auf der Methode der Finiten Elemente und läuft nach dem in Abbildung 7 dargestellten Ablaufplan ab:

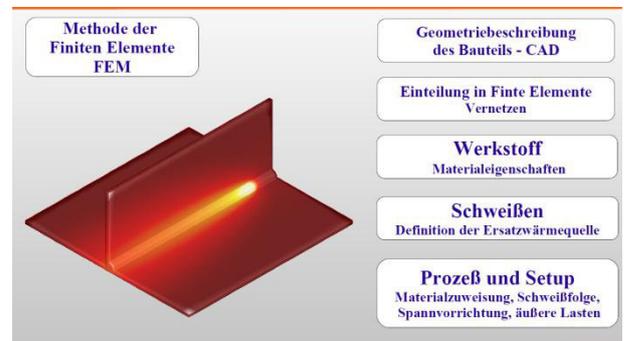


Abbildung 7: Ablaufplan einer Schweißstruktursimulation

Beim Vernetzen werden die Geometrien der Bauteile in Finite-Elemente eingeteilt. Die vernetzten Geometrien finden beim Modellaufbau, dem Setup, Verwendung.

Die Werkstoffbeschreibung für die Schweißstruktursimulation ist sehr komplex. Die Daten werden werkstoffweise in Dateien gespeichert und beim Setup den Bauteilen und Schweißzusätzen zugeordnet. Zu den Werkstoffdaten gehören die thermodynamischen Kennwerte, die mechanischen Kennwerte, sowie Daten oder Modelle die das Umwandlungsverhalten der Werkstoffe berücksichtigen. Bei Stahl die durch Schweiß-ZTU beschriebene Gefügeumwandlung, bei Aluminium Modelle zur Beschreibung der Rekristallisation. Temperaturfeld und Werkstoffumwandlung bedingen, dass die Materialdaten gefüge- und temperaturabhängig hinterlegt sind.

Der Wärmeeintrag ist die eigentliche „Belastung“ bei der Schweißstruktursimulation. Er erfolgt über eine Ersatzwärmequelle. Die Ersatzwärmequelle wird durch eine durch einen Geometriekörper eingegrenzte Verteilungsfunktion der Wärmequellendichte beschrieben. Gängig ist beispielsweise die Verwendung einer Gaußverteilung über ein Ellipsoid, Zylinder oder Konus. Die Wärmeeintragsfunktion lässt sich mit drei Methoden bestimmen:

- aus der Schweißprozesssimulation (z.B. SimWeld)
- Kalibrierung anhand von Makroschliffen
- aus Schweißprozessparametern und geschätzter Schmelzbadgeometrie

Beim Modellaufbau erfolgt die Beschreibung des numerischen Fügens. Hier geschieht die Materialzuordnung, die Zuordnung von Wärmequelle Einschaltzeit, Trajektorie, der Bahnbeschreibung der Wärmequelle, und die Zuordnung der Spanbedingungen.

Ausführliche Beschreibungen zur Schweißstruktursimulation befinden sich in den Dissertationen von Loose, Hilbrand und Brand [LOO2007, HIL2008, BRA2012]. Die Entstehung der Schweißeigenstressungen und des Schweißverzuges folgt aus dem mit dem wandernden Temperaturfeld einhergehendem Wechselspiel zwischen sich ständig ändernden lokalen und globalen Steifigkeiten und Festigkeiten einerseits und Dehnungen und plastischen Stauchungen andererseits. So ist das Rücksetzen der Verfestigung beim Aufschmelzen, die aus der Werkstoffumwandlung entstehenden Dehnungen und Festigkeitsänderungen genauso zu beachten, wie die genaue Beschreibung der Spanvorrichtung, der existierenden Kontakte zwischen Bauteilen sowie Bauteilen und Auflagern, die realitätsgetreue Abbildung der Ergänzung des Schweißzusatzes und das Verschweißen zuvor nur mit Kontakt gestoßener Fügekanten, wie sie bei einem ohne Zusatzwerkstoff geschweißten I-Stoß auftreten.

Mit dem Verständnis, dass der Schweißverzug nicht durch Schrumpfen des Schmelzbades entsteht, sondern dadurch, dass nahtnahe Bereiche sich ausdehnen und durch Verformungsbehinderung den nahtnahen Bereich weichen Materials aufstauen [LEG1981], wird verständlich, dass die richtige Abbildung der Kontaktverhältnisse und Spanbedingung ebenso wichtig sind wie die Mitberechnung des Aufheizens.

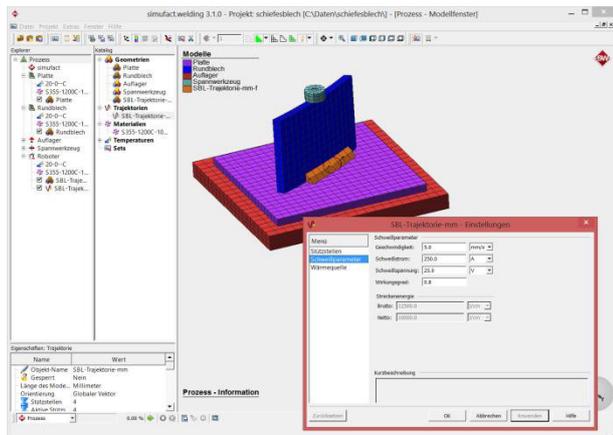


Abbildung 8: Simufact.welding mit der Benutzeroberfläche von Jens Rohbrecht

Aufgrund der Komplexität der Schweißstruktursimulation wird für deren industrielle Anwendung eine intelligente Software benötigt, die den Anwender beim Modellaufbau unterstützt, die notwendigen Aspekte bereitstellt und eine auf die Schweiß- und Prozesstechnischen Daten reduzierte Eingabe erlaubt. Eine Softwarelösung dafür bietet Simufact.welding mit der von Jens Rohbrecht entwickelten Benutzeroberfläche (Abbildung 8). Die Rohbrecht-GUI orientiert sich dabei weitestgehend am tatsächlichen Fertigungsablauf. Dadurch wird dem Anwender die Aufgabe des ingenieurtechnischen Abstrahierens – die Umsetzung von Werkstattbedingung in FEM-Logik – weitestgehend abgenommen.

Simufact.welding behandelt die Bauteile als einzeln zu vernetzende Komponenten, die beim Modellaufbau zusammengefügt werden. An den Grenzflächen der Bauteile und an den Grenzflächen der Bauteile zu den Spann-

und Auflagerkörper wird der Kontakt automatisch gefunden. Reibung wird bei der Kontaktbeschreibung berücksichtigt. Ein Algorithmus zur automatischen Netzverfeinerung ermöglicht die Anpassung existierender Netze an die Anforderungen der Schweißsimulation.

Bei der transienten Methode werden die thermischen und strukturmechanischen Zustandsgrößen in zeitlicher Abfolge der wandernden Wärmequelle berechnet. Die für Schweißsimulation erforderliche feine Netzaufösung im Nahtbereich und die große Anzahl an zu berechnenden Zeitschritten führt zu wesentlich größeren Berechnungszeiten, als man allgemein von Festigkeitsberechnung oder Umformsimulationen gewohnt ist. Im später beschriebenen Beispiel eines Drehgestell-Langträgers beträgt die kumulierte Schweißzeit 9000 s. Bei einer möglichen Berechnungsschrittweite während des Schweißens von 0,5 s ergeben sich 18000 zu berechnende Zustände.

Die Domain-Decomposition-Methode (DDM) ermöglicht es vernünftige Berechnungszeiträume überhaupt zu erreichen. Bei der Methode wird das Modell in n-Submodelle zerlegt, die jeweils einer eigenen CPU zugeordnet werden. Abbildung 9 zeigt die Domäneinteilung am Berechnungsbeispiel Langträger

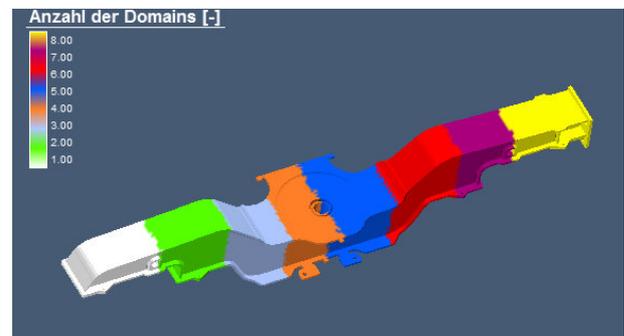


Abbildung 9: Domäneinteilung für die Domain-Decomposition-Methode (DDM)

Bei der metatransienten Methode wird zunächst ein mittlerer Schweißtemperaturzyklus für den Bereich des Schmelzbades bestimmt. Dieser Temperaturzyklus wird auf einen ganzen Nahtabschnitt aufgeprägt. Wie bei der transienten Methode erfolgt auch hier Temperaturfeld- und strukturmechanische Berechnung in zeitlicher Abfolge, jedoch mit der Vereinfachung in Schweißnahtlängsrichtung die Gradienten zu vernachlässigen. Die Zeiterparnis erfolgt durch Verwendung größerer Netze und durch signifikante Verringerung der zu berechnenden Zeitschritte [MRV2011].

Vorteil der Methode ist, dass die schweißtechnischen Randbedingungen wie beispielsweise das Vorwärmen, der Einfluss der Spanvorrichtung bei der Erwärmungsphase und die metallurgischen Transformationen erfasst werden können. Die berechneten Eigenstressungen weichen zwischen transienter und metatransienter Berechnungsmethode nur unwesentlich voneinander ab (Abbildung 10).

Die Vernachlässigung des Gradienten in Längsrichtung und die damit verbundene Unterschätzung der Bauteilsteifigkeit führt zu Unschärfen bei den mit metatransienter Methode berechneten Verzügen.

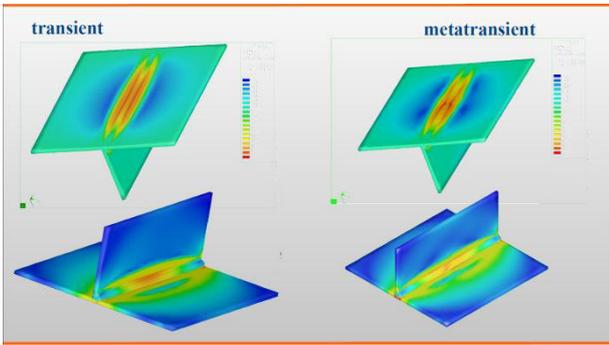


Abbildung 10: Vergleich der Längsspannungen (oben) und der von Mises Spannung (unten) zwischen transienter und meta-transienter Berechnungsmethode

Die metatransiente Methode ermöglicht in Verbindung mit DDM Schweißstruktursimulation an großen Bauteilen in akzeptablen Berechnungszeiten durchführen zu können und damit in der für die Anwendung im Schienenfahrzeugbau interessanten Bauteildimensionen.

## 8 Anwendung der Schweißstruktursimulation im Schienenfahrzeugbau – Herausforderung und Nutzbringung

Der Schienenfahrzeugbau stellt hohe Anforderungen an die Qualität der Ausführung, insbesondere an den üblicherweise geschweißten Rohbau und die Drehgestellrahmen. Die Seriengröße liegt zwischen den beiden Extremen Schiffbau (Einzelfertigung) und Automobilbau (Großserie). Die konstruktiven Forderungen sind ebenfalls hoch: Einerseits soll das Fahrzeug hohe, wechselnde Betriebslasten ertragen, andererseits wird aus technischen und ästhetischen Gründen eine maßgenaue Ausführung der Schweißkonstruktion benötigt. Bei diesen komplexen Schweißkonstruktionen ergibt sich aus dem Schweißen das Problem des Schweißschrumpfes. Lineare Schrumpfung wird über Einzelteil-Zugaben und konstruktives Vorsehen von Schiebesitzen kompensiert. Für nichtlineare Gestaltabweichungen wird üblicherweise Flammrichten als Kompensation verwendet. Hieraus ergibt sich neben den hohen Arbeitskosten für diese korrektiven Maßnahmen am Serienanfang eine Lernkurve bis zum Erreichen des gewünschten Soll-Toleranzbereiches. In Einzelfällen kann es sogar erforderlich, ganze Baugruppen zu verschrotten, weil die ersten Annahmen für die Schrumpfungszugaben unzutreffend waren.

Zur Ermittlung geeigneter Schrumpfungszugaben insbesondere für kleine Baugruppen hoher Komplexität ist die Schweißstruktursimulation heute schon anerkannt, für größere Baugruppen wie die hier vorgestellte existieren bisher nur wenige Erkenntnisse.

Die Schweißsimulation steht hier also im Wettbewerb mit dem physischen Bauteilversuch.

Vorteile liegen 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.

Der wirtschaftliche Nutzen von Schweißsimulation muss im Einzelfall abgewogen werden. Vorteile der Simulation sind die frühe Verfügbarkeit, der vorab genau definierte schweißtechnische Ablauf (unter realen Fertigungsbedingungen besitzt das Schweißen immer einen gewissen Interpretationsspielraum im Arbeitsplan) und die überlegene Auswertemöglichkeit im Rahmen des Post-Processing.

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

Auch die thermische Simulation kann nützlich sein, z.B. für die Abschätzung von Maximaltemperaturen in lackierten oder geklebten Bereichen oder bei der Ermittlung von Abkühlzeiten  $t_{8/5}$ .

Die Schweißprozesssimulation ist aufgrund der sehr gut erforschten Prozesse MIG/MAG und der sehr einheitlichen Werkstoffe für den Stahlbauer von eher untergeordnetem Interesse.

Noch unterschätzt wird das Potenzial 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.

Wichtig ist eine gute Zusammenarbeit zwischen dem Simulierenden und dem Fertigungstechniker, die mitunter aufgrund der verschiedenen Hintergründe nicht die gleiche Sprache sprechen.

Die Erfahrung zeigt jedoch, dass die meisten Kollegen Interesse an Informationen über das Verhalten „ihrer“ Bauteile haben.

## 9 Der Prozessplan – Simulationsgerechte Beschreibung und Dokumentation des Fügeprozesses

Der Prozessplan ist ein simulationsgerecht abgewandelter Arbeitsplan, mit Schwerpunkt auf den Schweißprozessparametern wie Lage, Strom, Spannung, Vorschubgeschwindigkeit. Die benötigten schweißtechnischen Informationen gehen über das übliche nicht hinaus und entsprechen etwa den im Merkblatt [DVS 1610] empfohlenen Angaben. Abbildung 11 zeigt einen Ausschnitt aus dem von Alstom und Ingenieurbüro Loose entwickelten Prozessplan.

Schweißnaht	Naht-typ	Naht-stärke	Schweißraupe					Drahtvorschub in mm/s			laufende Schweißraupe	Zeit für Schweißraupe in Sek.	Traj-Länge mm	v mm/s	Start-Zeit s	End-Zeit s
			1	2	3	4	5	In A	U in V	Draht						
88	HY-Naht	10,0	x					294	29,4	10,1	125	40	210	5,25	18491	18531
				x				281	29,7	10,1	126	38	210	5,53	18541	18579
					x			284	29,1	10,1	131	52	210	4,04	18852	18904
						x		308	28,8	10,1	134	40	210	5,25	19097	19137
90	HY-Naht	10,0	x					286	29,5	10,1	127	40	210	5,25	18590	18630
				x				287	29,3	10,1	128	38	210	5,53	18640	18678
					x			293	29,7	10,1	132	55	210	3,82	18914	18960
						x		304	28,8	10,1	135	36	210	5,83	19147	19183

Abbildung 11: Ausschnitt aus dem Prozessplan

In Zeichnungen und Positionsplänen taucht eine Schweißnaht als eine Position auf, unabhängig von der Anzahl der Raupen und unabhängig davon, in wievielen

Teilabschnitten diese Naht gefertigt wird. Im Prozessplan muss die Detaillierung wesentlich feiner vorgenommen werden: jede Schweißbraupe, von Zünden bis Abhub, muss einzeln erfasst werden.

Die Einspannbedingungen durch Spanner in Vorrichtungen, in Abbildung 11 der Übersicht wegen ausgeblendet, werden ebenfalls mit berücksichtigt, denn sie fließen auch in die Simulation ein.

Im vorliegenden Falle war ein Referenzbauteil für die Datenaufnahme vorhanden, so dass Schweißparameter während der Fertigung aufgezeichnet werden konnten. Steht diese Methode nicht zur Verfügung, so muss auf vorliegende Daten aus allgemeinen WPSen / WPQRen zurückgegriffen werden. Grundsätzlich ist es auch möglich, den Schweißprozess lokal vollständig zu simulieren, dies wird jedoch nur in wenigen Fällen sinnvoll sein.

Der Aufwand für die Erstellung entspricht etwa dem eines detaillierten Arbeitsplanes und kann mit kleinen Abwandlungen auch als Fertigungsdokument weiterverwendet werden.

### 10 Anwendungsbeispiel - Schweißverzugsimulation an einem Drehgestell Langträger

Alstom Transport beobachtet schon länger das Thema Schweißsimulation. Kleinere Aufgabenstellungen aus der Praxis des Schienenfahrzeugbaus wurden bereits in der Vergangenheit im Rahmen von Forschungsprojekten bearbeitet, bisher fehlte jedoch eine Evaluierung an einem größeren Bauteil zur vertrauensbildenden Abschätzung der Vorhersagegenauigkeit.

Hierzu wurde ein Drehgestell-Langträger eines Dieseltriebwagens ausgewählt. Dieses ist in Abbildung 12 dargestellt.



Abbildung 12: Drehgestell-Langträger

Die Vorhersage des Schweißverzuges bei diesem Bauteil ist aufgrund seiner mehrdimensional im Raum verlaufenden Schweißnähte nicht einfach, andererseits liegen durch die Größe der Serie schon einige interne Erfahrungen zum Schrumpfverhalten vor. Außerdem ist eine geeignete Infrastruktur zur Vermessung im Hause vorhanden, die mit geringem Aufwand zur Begleitung der Versuche verwendet werden kann.

An das Ingenieurbüro Loose wurde von Alstom ein Prozessplan mit Schweiß- und Spannparametern im Excel-Format, einer Sammlung erläuternder Screenshots aus dem CAD-System übergeben, außerdem wurde das CAD-Modell von Träger und Spannvorrichtung zur FE-Modellableitung zur Verfügung gestellt.

Nicht übergeben wurden die parallel zur Prozessaufnahme erstellten Messprotokolle an Realbauteilen.

Loose, T. ; Boese, B. : Leistungsfähigkeit und Einsatzmöglichkeiten der Schweißsimulation im Schienenfahrzeugbau

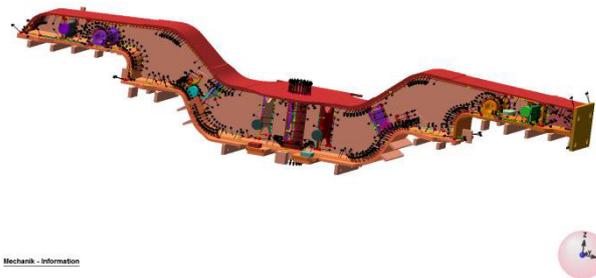


Abbildung 13: Schweißstruktursimulationsmodell des Drehgestellangträgers

Abbildung 13 zeigt das Simulationsmodell des ca. 2,80 m langen Langträgers mit geöffneter Seitenwand. Dargestellt sind alle Einbauteile und die als Quader oder Zylinder dargestellten Andruckteile der Spannvorrichtung.

Der Langträger enthält 69 Heftnähte und 118 Schweißnähte. Daraus ergeben sich 233 Schweißbraupen. Vereinfachend wurden die Heftnähte in der Simulation gleichzeitig geschweißt. Die Gesamtprozesszeit beträgt 30000 s, davon sind 9138 s reine Schweißzeit und der Rest Abkühlzeiten. Abbildung 14 zeigt die Spitzentemperatur nach dem Heften der Innensteifen.



Abbildung 14: Spitzentemperatur nach dem Heften

Abbildung 15 zeigt den Normalenvektor des Schweißverzuges nach dem Heften der Innensteifen. Die Berechnung dauert zur Drucklegung dieser Veröffentlichung noch an

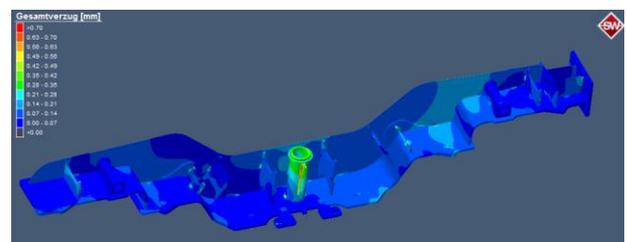


Abbildung 15: Normale des Verzugsvektors nach dem Heften

## 11 Zukünftige Maßnahmen zur Leistungssteigerung der Schweißstruktursimulation

Aus Sicht des Endanwenders Alstom können folgende Maßnahmen zur Leistungssteigerung dienen:

Die für das Aufsetzen der Schweißstruktursimulation erforderlichen MAG-Schweißprozessdaten sind vor Fertigungsbeginn meist noch nicht vollständig bekannt. Hier sollten im Rahmen des Pre-Prozessing intelligente Vorauswahlen getroffen werden können, analog zur werkstoff- und blechdickenabhängigen Parametervorwahl bei den besseren MAG-Stromquellen. Dabei sollten mehrlagige Schweißverbindungen nicht außer Acht gelassen werden. Auch für Simulation gilt, dass das Versuchsergebnis immer nur so gut sein kann wie die Eingangswerte.

Aus Sicht des Ingenieurdienstleisters Loose sollten noch folgende Funktionalitäten ergänzt werden:

Bei der Fertigung werden oft einzelne Komponenten vorab verschweißt und anschließend zum Gesamtbauteil gefügt. Dieser Produktionsschritt sollte auch in der Simulation nachvollzogen werden: Schweißsimulation von n Unterkomponenten. Die Ergebnisse bestehend aus Geometrie, Eigenspannungs- und Verzugfeld werden jeweils gespeichert, so dass in einer weiteren Simulation diese Komponenten, jedoch mit Vorgeschichte, geladen, positioniert und weiter verschweißt werden können.

Der Prozessplan enthält schon alle simulationstechnisch notwendigen Informationen zum Modellaufbau. Eine wesentliche Arbeiterleichterung kann erzielt werden, wenn der Prozessplan in das Simulationsprogramm eingelesen werden kann und ausgewertet wird.

Viel Zeit wird in der Schweißsimulation derzeit mit der Vernetzung insbesondere der Ergänzung der Schweißzusatzelemente verbraucht. Der Fillet-Generator von Simufact.welding ermöglicht jetzt schon das zeitsparende automatische Vernetzen einlagiger Kehlnähte. Dieses effektive Werkzeug sollte unbedingt auf Mehrlagennähte erweitert werden.

## 12 Zusammenfassung

Die numerische Simulation ist ein modernes Hilfsmittel, das in vielen Bereichen zur Auslegung von Bauteilen und zur Auslegung von Fertigungsprozessen genutzt wird. Im Bereich des Schweißens steht die industrielle Nutzung noch am Anbeginn.

In diesem Aufsatz werden die verschiedenen Schweißsimulationsarten, deren Leistungsfähigkeit und gewinnbringende Einsatzmöglichkeit erläutert und an Beispielen für den Schienenfahrzeugbau aufgezeigt:

- Die Werkstoffsimulation zur Vorausabschätzung der Schweißnahtgüte oder der Notwendigkeit des Vorwärmens,
- die Prozesssimulation zur Vorausabschätzung der Schmelzbadabmessung und -überwachung der Schweißparameter
- die Struktursimulation zur Vorausabschätzung des Schweißverzuges.

Mit der Anwendung der transienten Schweißstruktursimulation an einem Langträger eines Drehgestelles konnte dargelegt werden, daß die Simulation mittlerweile in

der Lage ist große Bauteile zu bewältigen und damit auf Baugruppen anwendbar für die eine Simulation ein signifikantes Kosteneinsparpotential bietet.

Schlussendlich eröffnet die Schweißsimulation ein neues Kapitel in der Qualitätssicherung und -überwachung: direkt als Überwachungsinstrument eingesetzt oder indirekt in dem für die Simulation einer akkuratere Beschreibung des Fügeprozesses notwendig wird, als bisher praktiziert.

## 13 Schrifttum

[BRA2012] BRAND, M.: Weiterentwicklung von Methoden in der numerischen Schweißsimulation. KIT, Diss. 2012

[HIL2008] HILDEBRAND, J.: Numerische Schweißsimulation Bestimmung von Temperatur, Gefüge und Eigenspannung an Schweißverbindungen aus Stahl- und Glaswerkstoffen. Bauhausuniversität Weimar, Diss. 2008

[LEG1981] LEGGATT, R. H.: Distortion in welded steel plates. University of Cambridge, Diss. 1981

[LOO2007] LOOSE, T.: Einfluß des transienten Schweißvorganges auf Verzug, Eigenspannungen und Stabilitätsverhalten axial gedrückter Kreiszyinderschalen aus Stahl, Universität Karlsruhe (TH), Diss. 2007

[MRV2011] MRVAR, P. ; MEDVED, J. ; KASTELIC, S.: Welding Sequence Definition Using Numerical Calculation, in: Welding Research, 90 (2011), S. 148 - 151

[RAD2002] RADAJ, D.: Fachbuchreihe Schweißtechnik. Bd. 143: Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen: Rechen- und Messverfahren. Düsseldorf: Verl. für Schweißen und verwandte Verfahren, 2002.

[SEY1992] SEYFFARTH, P.; MEYER, B.; SCHARFF, A.: DVS-Berichte. Bd. 110: Großer Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, 1992.

[DVS1610] M 1610 - Schweißtechnische Planung im Schienenfahrzeugbau (3/2012), DVS-Regelwerk, Schweißen im Schienenfahrzeugbau