

Methoden der Schweißverzugssimulation für die Anwendung in der Automobilindustrie

Dr. Dmitrij Tikhomirov¹, D-10587 Berlin

Dr. Bert Rietman², D-10587 Berlin

Christopher Schwenk³, D-38436 Wolfsburg

Dr. Thomas Franz⁴, D-38436 Wolfsburg

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird eine Übersicht über die Methoden zur numerischen Berechnung schweißbedingter Bauteilverzüge für industrielle Anwendungen gegeben. Zunächst werden die Anforderungen der Automobilindustrie an die benötigte Software dargestellt. Dabei wird zwischen der industriellen Forschung und der Entwicklung/Produktionsplanung differenziert. Es werden die verschiedenen zurzeit verfügbaren Ansätze zur numerischen Schweißsimulation vorgestellt und deren Möglichkeiten zur Erfüllung der dargestellten Bedürfnisse erläutert. Anhand eines aktuellen Bauteils aus der Automobilindustrie (B-Säule VW Golf) wird beispielhaft die Verzugsoptimierung mit Hilfe einer Berechnungsmethodik aufgezeigt, welche sich durch eine schnelle Modellerstellung, kurze Rechenzeiten und einfache Handhabung auszeichnet. Ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit experimentell ermittelten Daten zeigt sehr gute Übereinstimmungen und verdeutlicht das immense Potential einer numerisch unterstützten Prozessoptimierung.

1. Einleitung und Grundlagen der Schweißsimulation

Die Simulation realer physikalischer Vorgänge mit Hilfe moderner Computertechnik hat heutzutage einen festen Stellenwert im technischen und ingenieurwissenschaftlichen Bereich. Eine ergebnis-, zeit- und kostenoptimierte Konstruktion und Entwicklung eines Bauteils oder Verfahrens ist ohne eine computerunterstützte Berechnung kaum noch denkbar.

Das langfristige Ziel der Simulation in der Automobilindustrie ist die vollständige virtuelle Abbildung der realen Fertigungsschritte vom Rohteil bis zum Endprodukt. Dafür sind eine Kopplung der Einzelergebnisse und deren Übergabe an nachfolgende Berechnungen notwendig. Mit Hilfe der gekoppelten numerischen Abbildung der jeweiligen Prozessschritte sind umfangreiche computerunterstützte Optimierungen, die die Vielzahl zeit- und kostenintensiver Iterationsschleifen verringern können, möglich. Mit der virtuellen Prozesskette kann diese Vorgehensweise durch Simultaneous Engineering deutlich verbessert und die Anzahl notwendiger Iterationsschleifen verringert werden. Diese durchgehende Digitalisierung ist nach Ansicht des Bundesministeriums für Bildung und Forschung BMBF [1] der Schlüssel zur zukünftigen Steigerung der deutschen Wettbewerbsfähigkeit.

Ein zentraler Bestandteil der virtuellen Prozesskette ist die Fügesimulation. Diese umfasst allgemein das thermische Fügen (z.B. Schweißen, Löten), das mechanische Fügen (z.B. Nieten, Clinchen) und das chemische Fügen (z.B. Kleben). Im vorliegenden Artikel liegt der Fokus auf der Simulation des schweißbedingten Bauteilverzugs.

Obwohl andere Fügeverfahren in den letzten Jahren stark aufgeholt haben, bleibt das Schweißen bis heute das am Häufigsten eingesetzte Fügeverfahren im Automobilbau. Es stellt aufgrund ausgeprägter Nichtlinearitäten (u.A. Zeit-, Temperatur- und Phasenabhängigkeit) besondere Anforderungen an die mathematische Beschreibung des Prozesses sowie an die Anwender entsprechender Berechnungssoftware.[2] Eine

¹ INPRO GmbH

² INPRO GmbH

³ Volkswagen AG Konzernforschung

⁴ Volkswagen AG Produktionsplanung

erfolgreiche und aussagekräftige Simulation des Schweißprozesses mit kommerziell verfügbarer Spezialsoftware kann daher zurzeit nur von Experten durchgeführt werden, die eine langjährige Erfahrung auf diesem speziellen Gebiet der Produktionssimulation aufweisen.[3] Dies widerspricht jedoch dem Ansatz, dass die Schweißsimulation in Zukunft als ein alltägliches Hilfsmittel in der industriellen Entwicklung und Produktionsplanung etabliert werden soll. Aus dieser Diskrepanz ergibt sich eine Reihe von Anforderungen an die Schweißsimulation, die im folgenden Abschnitt näher differenziert werden.

2. Industrielle Anforderungen

Abhängig von dem geplanten Einsatzgebiet, den angestrebten Berechnungsergebnissen und nicht zuletzt der zur Verfügung stehenden Zeit sind die Anforderungen der Automobilindustrie an die Schweißsimulation sehr unterschiedlich. Dabei lassen sich hauptsächlich die beiden Bereiche Forschung sowie Entwicklung/Produktionsplanung unterscheiden.

In den Forschungsabteilungen großer Konzerne sind die Anforderungen an die Genauigkeit einer Simulation in der Regel sehr hoch. Da hier vor allem Grundlagenuntersuchungen und die erreichbaren Aussagemöglichkeiten einer Berechnungsmethodik geprüft werden, ist der damit einhergehende benötigte Aufwand hinsichtlich Zeit und Arbeit diesem Ziel meist untergeordnet. Auch werden überwiegend vergleichsweise einfache und kleine Bauteile betrachtet. Die auf diesem Wege erreichbaren Ergebnisse lassen sich schon heute effektiv anwenden und tragen zur Optimierung aktueller Fertigungsprozesse bei, wie beispielsweise in [4] gezeigt.

Ist eine Berechnungsmethodik durch diese ausführliche Analyse grundsätzlich qualifiziert für den produktiven Einsatz, so treten die beiden Aspekte der Zeiteffizienz, vor allem bei der Modellerstellung und der reinen Rechenzeit großer und komplexer Bauteile, und der Erfahrungen des Benutzers in den Vordergrund. Gleichzeitig sind die Anforderungen an die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse meist geringer, häufig bringen schon qualitative Aussagen und A-B-Vergleiche verschiedener Varianten einen erheblichen Erkenntnisgewinn und die Einsparung experimenteller Untersuchungen mit sich. Dies ist im Bereich der Entwicklung und der Produktionsplanung der Fall. Hier müssen häufig schnelle Benchmarks angefertigt werden, wobei eine quantitativ absolut genaue Aussage, z.B. über zu erwartende schweißbedingte Verzüge bei einem gegebenen Schweißplan, nicht zwingend notwendig ist. Vielmehr muss die Frage beantwortet werden, welche Kombinationen generell auszuschließen sind und bei welchen Kombinationen sich eine weitergehende experimentelle Untersuchung lohnt.

Die Basis für eine solche Vorgehensweise bildet eine Berechnungsmethodik, welche es einem Anwender ohne Expertenwissen ermöglicht, schnell und unkompliziert verschiedene Varianten zu modellieren und deren qualitatives Verhalten aufzuzeigen und zu vergleichen. Damit lassen sich mehr Varianten bei gleichzeitig geringerem Zeitbedarf testen als mit einer rein experimentellen Vorgehensweise, so dass für die Betrachtung ausgewählter und viel versprechender Kombinationen mehr Zeit zur Verfügung steht. Diese Methodik muss gleichzeitig auch für große und komplexe Bauteile geeignet sein, welche über die oft akademischen Bauteile der Forschung hinausgehen. In Abbildung 1 sind die grundsätzlichen Anforderungen der verschiedenen Bereiche noch einmal in einer Übersicht zusammengestellt.

Anforderungen	industrielle Forschung	Entwicklung und Produktionsplanung
geforderte Ergebnisgenauigkeit	quantitativ 	qualitativ 
max. zulässige Rechenzeit	Stunden - Tage 	Minuten - Stunden 
vertretbarer Modellierungsaufwand	hoch 	gering 
geforderte abbildbare Bauteilgröße, Komplexität	klein bis mittel 	groß, komplex 
erforderliche Erfahrung des Anwenders	hoch 	gering 

Legende:  gering  mittel  hoch

Comment [FT1]:
Kann von mir aus so bleiben;
aber:

Hinweis: Farben entsprechen hier nicht den bei uns üblichen: grün: alles i.O. keine Probleme gelb: Probleme, aber lösbar; rot: unlösbare Probleme, Projektabschluss in Gefahr

Könnte also von irgendwelchen Chefs missverstanden werden; evtl. anders gestalten

Abbildung 1: Unterschiedliche Anforderungen an die Schweißsimulation aus den Bereichen der industriellen Forschung sowie der Entwicklung/Produktionsplanung

Die Bedürfnisse der industriellen Forschung werden durch die kommerziell verfügbaren Programme, welche speziell für die Schweiß- und Wärmebehandlungssimulation entwickelt wurden, mittlerweile sehr gut erfüllt. Die erzielbaren Ergebnisgenauigkeiten sind exzellent, es verbleibt jedoch ein hoher zeitlicher Aufwand und die Notwendigkeit eines erfahrenen Anwenders zur Erreichung solch hochwertiger Ergebnisse.

Demgegenüber bleiben die Anforderungen an die Schweißsimulation seitens der Entwicklung und der Produktionsplanung bisher größtenteils unerfüllt. Vor Allem aufgrund der hohen Rechenzeiten, der Komplexität bei der Modellerstellung und der notwendigen Erfahrung des Anwenders steht der umfassende produktive Einsatz der Schweißsimulation in diesen Bereichen bisher noch am Anfang. Im folgenden Abschnitt werden die zurzeit verfügbaren verschiedenen Berechnungsmethoden der Schweißsimulation diskutiert. Dabei wird aufgezeigt, mit welchen Ansätzen sich die vorhandene Lücke zwischen den Anforderungen aus der Entwicklung und Produktionsplanung und den Möglichkeiten der Schweißsimulation schließen lässt.

3. Methoden der numerischen Schweißsimulation

Die numerische Simulation des Schweißprozesses kann auf verschiedenen Komplexitätsebenen stattfinden. In Abbildung 2 ist die Modelltiefe in der Form einer Pyramide dargestellt. An ihrer Basis sind die hochgenauen Modelle angeordnet. Mit zunehmender Vereinfachung und teilweiser Vernachlässigung real vorliegender physikalischer Bedingungen lässt sich die Rechenzeit signifikant reduzieren, was jedoch zu entsprechenden Einbußen der Aussagegenauigkeit führt. Jedes der Modelle hat seine Vor- und Nachteile und ist in seiner Auswahl stark von der aktuellen Problemstellung und dem Zeitpunkt des Einsatzes in der Entwicklung abhängig.

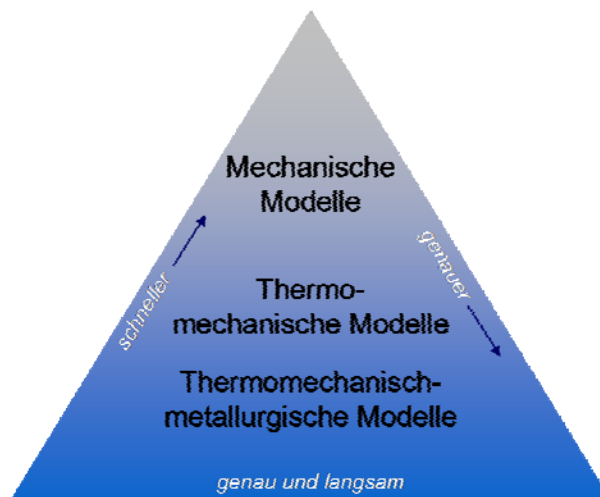


Abbildung 2: Modelle für die Schweißverzugsimulation

Eine genaue Methode (Basis der Pyramide) besteht aus der transienten Modellierung des Schweißprozesses. Hierbei werden sowohl das thermomechanische Verhalten als auch etwaige Phasenumwandlungen berücksichtigt. Die Vorhersagen des Schweißverzugs sind wegen der guten physikalischen Grundlagen im Allgemeinen von hoher Qualität. Zur Erreichung dieser Qualität benötigen diese Modelle jedoch hohe Elementdichten und kleine Zeitschritte und sind dementsprechend rechenzeitintensiv. Der Modellaufbau, meist als Volumenmodell, ist aufwändig und setzt große Kenntnisse sowohl der numerischen Methoden als auch des Prozesses voraus. Die Erfassung der benötigten temperatur- und phasenabhängigen Werkstoffkennwerte, vor allem des Schweiß-ZTU-Diagramms, ist aufwändig und die für das Schweißverfahren geeignete Wärmequelle muss anhand der Abmessungen der experimentellen Schweißbilder des Schmelzbades händisch kalibriert werden.

Durch eine Vernachlässigung der Phasenumwandlung kann der Nachteil der großen Menge benötigter Werkstoffkennwerte nahezu beseitigt werden, womit sich die Rechenzeit jedoch nur geringfügig verkürzen lässt. Eine weitere Vereinfachung, die mit einer deutlichen Verringerung des Rechenaufwands einhergeht, wird durch das simultane Aufheizen der gesamten Nahtlänge erzielt. Die höchste Stufe der Vereinfachung (Spitze der Pyramide) bilden die mechanischen Ersatzmodelle. Mit diesen mechanischen Ersatzmodellen wird in einer geringen Anzahl von Inkrementen der Endzustand des Bauteils bestimmt.

Hierzu werden lokal im Nahtbereich Belastungen eingeleitet, welche aufgrund eines damit hervorgerufenen globalen Ungleichgewichtes zu einem makroskopischen Bauteilverzug führen. Viele unterschiedliche Arten der Belastung wurden bereits untersucht. Hierzu gehören unter anderem Methoden, bei denen Spannungen oder Dehnungen aus einfachen Berechnungen auf dem Nahtbereich projiziert werden. Die in der Software „Schweißplaner“ angewandte Methode basiert auf der Vorgabe thermischer Randbedingungen zur Einleitung der Lasten [5,6]. Durch Einsatz dieser Methodik kann zusätzlich auf die Anwendung komplizierter Stoffgesetze mit entsprechend vielen Parametern sowie auf angepasste feine Vernetzungen verzichtet werden. Es können direkt die bereits in einer frühen Phase der Entwicklung existierenden Strukturnetze mit Schalenelementen verwendet werden. Der Schweißplaner erfüllt damit die Anforderungen, die in den Bereichen Entwicklung und Produktionsplanung gestellt werden, was im nachfolgenden Kapitel demonstriert wird.

Comment [FT2]: Sollte hier nicht auch ein selbstkonsistentes Modell des jeweiligen Schweißprozesses integriert sein?; ggf. einfügen

4. Beispielanwendung der Software „Schweißplaner“

Bei dem Zusammenbau der Seitenteile des Golf A5 wird das Laserstrahlschweißverfahren eingesetzt. Infolge des Energieeintrags während des Schweißprozesses entsteht Verzug, der in der Praxis kompensiert werden muss um die Maßhaltigkeitsanforderungen an die geschweißten Baugruppen zu erfüllen. Für die Abschätzung des entstehenden Schweißverzugs und die Planung wirksamer verzugsmindernder Maßnahmen bereits im frühen Stadium kann die Schweißsimulation wertvolle Zusatzinformationen liefern.

Bei der numerischen Simulation wurden die Werkstoffkennwerte der Blecheinzelteile bei Raumtemperatur sowie der geplante Prozessablauf und die Spannbedingungen der Serienfertigung berücksichtigt. Für die Reduktion des Schweißverzugs wurden, aufgrund der vorhandenen Praxiserfahrung, eine optimierte Schweißfolge und die Vorhaltung der B-Säule auf der Ausschweißstation verwendet. Diese Maßnahmen wurden in der Simulation ebenfalls berücksichtigt.

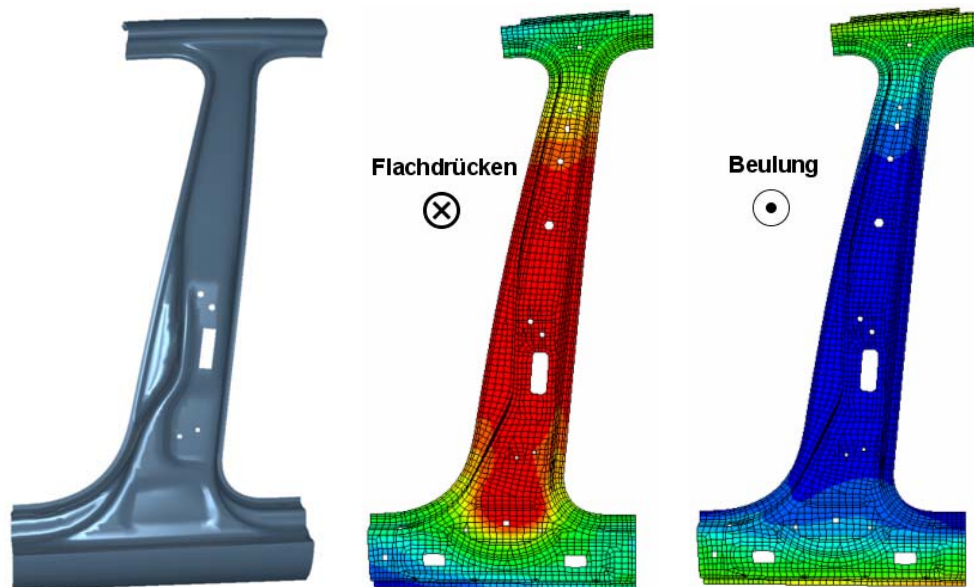


Abbildung 3: Links – Außenansicht der B-Säule in der Seitenwand. Mitte – deformierte Verstärkung der B-Säule vor dem Schweißen mit Vorhaltung (Flachdrücken). Rechts – deformierte Verstärkung der B-Säule nach dem Schweißen und der Ausspannung (Beulung).

Nach einer vorherigen Kalibrierung des Ersatzmodells anhand einfacher Versuche konnte nicht nur die Verzugsrichtung sondern auch die Verzugswerte realitätsnah ermittelt werden, siehe Abbildung 3. Dabei wurde der Schweißverzug mit und ohne Vorhaltung untersucht. Die Simulation hat die Notwendigkeit der Vorhaltung beim Schweißen bestätigt. Die Dauer einer Schweißverzugsberechnung betrug ca. 1,4 Stunden. Dies macht die Simulation mit dem Ersatzmodell besonders geeignet für die Bereiche Entwicklung, Prototypenbau und Produktionsplanung, wo viele Varianten (Schweißfolgen, Spannbedingungen) schnell untersucht und bewertet werden müssen.

5. Folgerungen für die Praxis

Mit der gezeigten Berechnungsmethodik zur schnellen Verzugsberechnung geschweißter Bauteile, die im Softwarepaket „Schweißplaner“ integriert ist, sind

schnelle und qualitativ richtige Aussagen über zu erwartende Schweißverzüge großer und komplexer Bauteile möglich. Die Anwendung der Software ist dabei nicht nur Experten vorbehalten, sondern kann aufgrund ihrer einfachen Handhabbarkeit und schneller Modellerstellung im Einklang mit dem geringen Bedarf an Werkstoffkennwerten sowie der schnellen Rechenzeiten in den verschiedensten Bereichen wie Entwicklung oder Produktionsplanung angewendet werden. Dabei stehen vor Allem die Beurteilung einzelner Schweißpläne (Schweißreihenfolgen, Schweißrichtungen) sowie der Spannstellen (Ort, Umspannung) im Hinblick auf den zu erwartenden Bauteilverzug im Vordergrund.

Mit Hilfe des Schweißplaners lassen sich schnell und zuverlässig die Auswirkungen einzelner Schweiß- und Einspannpläne miteinander vergleichen und so die entsprechend der jeweiligen Anforderungen zielführende Kombination ermitteln. Der frühzeitige Einsatz im Entwicklungsprozess parallel zu anderen Entwicklungstools hilft damit, die Anzahl notwendiger experimenteller Iterationsschleifen zu verringern und so wertvolle Zeit und letztlich Kosten zu sparen.

6. Literaturverzeichnis

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG BMBF. *Leitprojekt integrierte Virtuelle Produktentstehung iViP*. Abschlussbericht. 2002
- [2] RADAJ, D.: Fachbuchreihe Schweißtechnik. Bd. 143: *Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen: Rechen- und Meßverfahren*. DVS-Verlag, Düsseldorf, 2002
- [3] SCHWENK, C.; RETHMEIER, M.; DILGER, K.; MICHAILOV, V.: Schweißsimulation im Fahrzeugbau - Möglichkeiten, Grenzen und Herausforderungen. In: *DVS-Berichte* Bd. 237, DVS Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., Düsseldorf, 2005, S. 353ff
- [4] SCHWENK, C.; DILGER, K.: Verzugsoptimierung durch Schweißsimulation. In: *Tagungsband zum 5th Virtual Materials Processing, Fokus Metalle - Simulation von Verarbeitungsprozessen und prozessgerechter Bauteilgestaltung*, Kompetenzzentrum Neue Materialien Nordbayern GmbH, Bayreuth, 2006
- [5] RIETMAN, B.; KOSE, K.; TIKHOMIROV, D.: Mechanische Schweißersatzmodelle für gekoppelte Simulationen. In: *Fügetechnik im Leichtbau* (Hrsg. M. Zäh), Carl Hanser Verlag Stuttgart 2004.
- [6] TIKHOMIROV, D.; RIETMAN, B.; KOSE, K.; MAKKINK, M.: Computing welding distortion: Comparison of different industrially applicable methods. *Advanced Materials Research* 6-8 (2005) (Proceedings SHEMET 2005), S. 195/202.