

# Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur  
Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **15274 N / 1**

***Effiziente numerische Schweißsimulation***

***großer Strukturen***

(Bewilligungszeitraum: 01.07.2007 - 30.04.2010)

der AiF-Forschungsvereinigung

DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.

Freiburg, 30.09.2010

Ort, Datum

Dr.-Ing. Michael Luke

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)  
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben Nr.: 15274 N/ 1 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht für das Forschungs-Vorhaben  
Nr.: 15274 N / 1

## **Effiziente numerische Schweißsimulation großer Strukturen**

Laufzeit: 01.07.2007 – 30.04.2010

Teilprojekt des über die Forschungsvereinigungen DVS, FOSTA und  
GFAI beantragten Paketantrags  
„Anwendungsnahe Schweißsimulation komplexer Strukturen“

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM  
Wöhlerstraße 11  
79108 Freiburg

verfasst von

Marcus Brand, Frank Schweizer, Michael Luke

## Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Kurzzusammenfassung</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>Stand der Technik</b>   | <b>6</b>  |
| <b>4</b> | <b>Methodische Vorgehensweise / Arbeitspakete</b>  | <b>9</b>  |
| <b>5</b> | <b>Durchführung</b>  | <b>10</b> |
| 5.1      | Ableitung optimaler Vernetzungsstrategien  | 10        |
| 5.1.1    | Ausgangssituation und Motivation   | 10        |
| 5.1.2    | Vorgehensweise   | 10        |
| 5.1.3    | Erzielte Ergebnisse  | 11        |
| 5.2      | Ableitung optimaler Rechenalgorithmen  | 14        |
| 5.2.1    | Ausgangssituation und Motivation   | 14        |
| 5.2.2    | Vorgehensweise   | 15        |
| 5.2.3    | Erzielte Ergebnisse  | 15        |
| 5.3      | Entwicklung einer Routine zum automatisierten Temperaturabgleich   | 17        |
| 5.3.1    | Ausgangssituation und Motivation   | 17        |
| 5.3.2    | Vorgehensweise   | 19        |
| 5.3.3    | Erzielte Ergebnisse  | 19        |
| 5.4      | Entwicklung einer neuen Rechenmethode für Verzugs- und<br>Eigenspannungsberechnungen unter Ausnutzung quasi-stationärer<br>Bedingungen | 24        |
| 5.4.1    | Ausgangssituation und Motivation   | 24        |
| 5.4.2    | Vorgehensweise   | 25        |
| 5.4.3    | Erzielte Ergebnisse  | 25        |
| 5.5      | Berücksichtigung eines vorgelagerten Umformprozesses in der<br>Schweiß-Simulation  | 29        |
| 5.5.1    | Ausgangssituation und Motivation   | 29        |
| 5.5.2    | Vorgehensweise   | 29        |
| 5.5.3    | Erzielte Ergebnisse  | 29        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse und deren<br/>Anwendungsmöglichkeiten</b>  | <b>31</b> |
| <b>7</b> | <b>Literatur</b>   | <b>33</b> |

## 1 Kurzzusammenfassung

Die Ergebnisse des Teilprojektes, die am IWM erarbeitet wurden, tragen dazu bei die benötigten Rechenzeiten für die numerische Schweißsimulation und den Aufwand für die Modellierung einer Berechnung zu reduzieren. Hierdurch wird erreicht, dass die Schweißsimulation effizienter gestaltet werden kann.

Durch die Ableitung optimaler Vernetzungsstrategien und die Anwendung einer Kopplung von Solid- und Shell-Elementen kann die benötigte Arbeitszeit bei der Modellierung der Schweißverbindung reduziert und die benötigte Rechenzeit für die Aufgabenstellung auf ein Mindestmaß reduziert werden.

Ein effizienter Einsatz der Rechenalgorithmen durch Überprüfung verschiedener Solver-Einstellungen zu verschiedenen Zeiten des Schweißprozesses (Ein-/Auslauf der Wärmequelle, quasi-stationäre Bereiche) ermöglicht es eine optimale Konfiguration zur weiteren Reduzierung der Berechnungszeiten abzuleiten.

Die Entwicklung einer in ein FE-Programm implementierten Routine ermöglicht dem Anwender die Durchführung eines automatisierten Temperaturfeld-Abgleichs und reduziert deutlich den sonst durch manuelle Iterationsrechnungen gekennzeichneten Zeitaufwand. Durch eine grafische Benutzeroberfläche kann der automatisierte Temperaturabgleich auch von Anwendern ohne Expertenwissen genutzt werden.

Durch die Entwicklung und Umsetzung einer neuen Rechenmethode für Verzugs- und Eigenspannungsberechnungen unter Ausnutzung des Wechsels von instationären zu quasi-stationären Temperaturfeldern wird es ermöglicht, die quasi-stationären Bereiche in einer Schweißnaht auszunutzen, um mittels einer Ersatzmethode Mechanik-Berechnungen deutlich schneller durchzuführen.

Der große Vorteil der neuen Methode ist, dass bei einer Vorgabe des in gewissen Bereichen bekannten Spannungs-/Dehnungs-Zustands Eigenspannungen und Verzüge auch ohne zeitintensive Berechnung und gleichbleibender Ergebnistreue berechnet werden können.

Schließlich ermöglicht es die durchgeführte Übertragung des Eigenspannungs- und Dehnungszustand eines vorgelagerten Umformprozesses in die numerische Schweiß-Simulation den Werkstoff-Zustand aus direkt vorhergehenden Prozess-Schritten als Anfangszustand für die Schweißsimulation zu übernehmen.

## 2 Einleitung

Das Schweißen gehört zu den wichtigsten und am häufigsten eingesetzten Fügeverfahren. Beim Schmelzschweißen wird eine Wärmequelle über das Werkstück geführt und der Werkstoff lokal aufgeschmolzen. Die Wärmewirkung des Schweißens verursacht dabei unerwünschten Verzug und Eigenspannungen, die auch nach vollständiger Abkühlung im Bauteil enthalten bleiben und die Funktion des Bauteils in Bezug auf die spätere Verwendung nachteilig beeinflussen können [Rad88, Rad98, Rad99a, Krü00, Ven01]. Aufwändige experimentelle Versuchsreihen und das Erproben unterschiedlichster Varianten an komplexen Bauteilen zur Minimierung von Verzug und Eigenspannungen werden aus wirtschaftlicher Sicht für Unternehmen zunehmend unvertretbarer [And03].

Das Projekt „Effiziente numerische Schweißsimulation großer Strukturen“ ist als eines von vier Projekten in das Verbundprojekt „Anwendungsnahe Schweißsimulation komplexer Strukturen“ eingebunden. Die Vernetzung ergibt sich im Wesentlichen dadurch, dass einerseits an verschiedenen Stellen parallel Methoden zur Schweißsimulation erarbeitet und andererseits diese Methoden im weiteren Projektverlauf an gemeinsamen Demonstratoren validiert wurden. Diese Vorgehensweise hatte den Vorteil, dass die an unterschiedlichen Forschungsstellen entwickelten Methoden unmittelbar miteinander verglichen und einheitlich hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit klassifiziert werden konnten. Abbildung 1 zeigt die Vernetzung der einzelnen Teilprojekte untereinander.

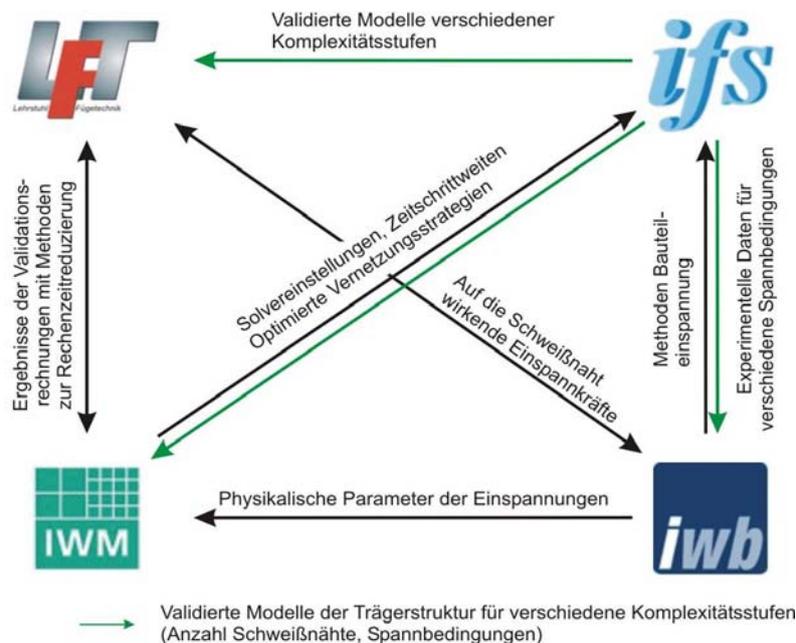


Abbildung 1: Vernetzung der Teilprojekte der einzelnen Forschungsstellen

Weitere beteiligte Forschungsstellen waren das Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig, der Lehrstuhl Fügetechnik der BTU Cottbus und das Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU München. Im Sinne der Minimierung der Herstellungskosten und der Verkürzung der Entwicklungszeiten bieten sich alternativ zum experimentellen Vorgehen numerische Methoden an. Für die Verzugs- und Eigenspannungsberechnung hat sich die Methode der Finiten-Elemente (FE) durchgesetzt. Der Einsatz moderner numerischer Simulationsmethoden zur Beschreibung schweißtechnischer Fertigungsschritte ermöglicht heute prinzipiell die Berechnung von Gefügeentwicklung, Verzug und Eigenspannungen in Abhängigkeit der Schweißprozesse und -parameter (Streckenenergie, Schweißgeschwindigkeit, Schweißfolge, Einspannbedingungen, usw.). Die beim Schweißen ablaufenden transienten thermomechanischen Vorgänge sind jedoch äußerst komplex und beinhalten nahezu alle Teilgebiete der klassischen Physik wie elektrodynamische Vorgänge, Gaskinetik, Stoff- und Wärmetransport, elastisches und plastisches Verhalten der Werkstoffe mit und ohne Umwandlungen, irreversible Thermodynamik u.v.m. [Rad02, Kar93, Leb84, Car88, Abb85]. Die aus der numerischen Simulation resultierenden Ergebnisse hängen von den Werkstoffeigenschaften und der Modellbildung ab. Der Anwender muss in der Lage sein, die Modellierung der physikalischen Teilprozesse im Hinblick auf deren Einfluss auf das jeweils zu bestimmende Ergebnis physikalisch und werkstoffwissenschaftlich begründet einschätzen zu können [Bla02, Fur99, Sud96, Sud98, Gri00, Voß01]. Zur realitätsnahen Abbildung der thermophysikalischen Prozesse muss der Bereich der Schweißnaht wegen der lokal starken Temperaturgradienten relativ fein vernetzt werden, was insgesamt zu großen Modellen und hohen Rechenzeiten führen kann. Bei komplexen Bauteilen mit mehreren Schweißnähten kann bei einer physikalisch begründeten Diskretisierung des Modells die Rechenzeit Wochen bis Monate betragen, wodurch der Vorteil der numerischen Simulation in Frage gestellt wird.

Diese Komplexität der Simulation schweißtechnischer Fertigungsschritte, die Schwierigkeiten der Modellierung und der Verifizierung der Ergebnisse und schließlich die erforderliche hohe Rechnerkapazität und hohe Rechenzeiten sind insbesondere für KMU trotz der prinzipiellen Vorteile der numerischen Simulation ein großes Hindernis für die breite Anwendung.

Die zu erarbeitenden Ergebnisse sollen diesen Nachteilen durch eine Effizienzsteigerung bei der Modellierung und Einsparungen in den Berechnungszeiten entgegenwirken. Im Folgenden wird ausschließlich über die im vorliegenden Projekt durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse berichtet. Entsprechende Informationen über die anderen Projekte des Verbundprojektes sind den Einzelberichten der Projekte IGF 15 273 N, IGF 15 275 N und IGF 15 276 BR bzw. dem gemeinsamen Abschlussbericht [Aas10] zu entnehmen.

### 3 Stand der Technik

Die numerische Schweißsimulation ist heute ein akzeptiertes Werkzeug zur Berechnung von Gefüge, Verzug und Eigenspannungen. Es existieren mehrere kommerzielle FE-Programmsysteme wie SYSWELD, ANSYS, ABAQUS und MARC, die mit unterschiedlichen Leistungsspektren den Schweißprozess und die resultierende Werkstoffreaktion behandeln können. Die numerische Simulation größerer Strukturen mit hinreichender Genauigkeit auf das Verzugsergebnis war bis vor einigen Jahren undenkbar, weil allein schon die Rechenkapazitäten nicht ausreichend waren. Heute sind größere Strukturen mit bis über 500.000 Freiheitsgraden rechenbar. Dies belegen u.a. auch Berechnungen von Verzug und Eigenspannungen für industrierelevante Bauteile, die am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM mit Erfolg durchgeführt worden sind [Bra02, Bra03, Bra04, Si05, Ven06]. Eine verlässliche numerische Schweißsimulation ist aber heute noch mit großem Modellierungsaufwand, erheblichen Rechenzeiten und umfangreichen Messungen von Werkstoffeigenschaften und Temperaturfeldern verbunden [Häu97, Pas01, Hac04, Rad99b]. Die hohen Rechenzeiten sind im Wesentlichen durch die erforderliche feine Modellierung im Schweißnahtbereich, die Größe und Komplexität der zu berechnenden Strukturen und die zur Lösung der transienten Prozesse erforderlichen Anzahl der Zeitschritte bedingt, die sich aus der Länge und Anzahl der Schweißnähte ergibt. Bei mehreren Schweißnähten und großen Finite-Elemente-Modellen können für die numerische Simulation auf einer 64-bit Workstation mehrere Wochen bis Monate benötigt werden. Dieser Zeitaufwand ist im Rahmen der immer kürzer werden Entwicklungsintervalle nicht zu rechtfertigen. Trotz der guten Berechnungsergebnisse kann deshalb die Schweißsimulation in der industriellen Praxis nur dann eingesetzt werden, wenn es gelingt, bei akzeptabler Qualität des Ergebnisses die Rechenzeiten drastisch zu verkürzen.

Zur Reduktion der Rechenzeiten werden in den kommerziellen Softwarepaketen teilweise Näherungsmethoden angeboten. Diese vorhandenen Ansätze (Local-Global, Macro-Bead, Shell/Shell-Solid Ansätze) führen durch Vereinfachung der realen Randbedingungen zu kürzeren Rechenzeiten. Diese Vereinfachungen beschreiben den realen Schweißprozess und das resultierende Bauteilverhalten jedoch nur näherungsweise, weshalb sie sinnvoll nur für Spezialfälle anwendbar sind. Die bestehenden Ersatzmethoden werden im Folgenden kurz erläutert. Im Rahmen des vorliegenden Projektes (AiF 15274 N / 1) wird die Wirkung von Shell-Solid Vernetzungen auf die Rechenzeitverkürzung von großen Strukturen untersucht.

#### **Local-Global Methode**

Bei dieser Technik wird von mehreren gleichartigen Schweißnähten ausgegangen. Es wird zunächst für eine Naht eine thermomechanische Berechnung des Tempera-

turfelds und der Verformungs- und Eigenspannungsgeschichte durchgeführt. Der letzte Lastschritt nach Abkühlung der Naht repräsentiert den Verformungs- und Eigenspannungszustand, der auf die übrigen Nähte übertragen wird. Bei diesem sogenannten Mapping werden die plastischen Dehnungen der ersten Naht auf die weiteren Nähte übertragen und eine Ausgleichsrechnung durchgeführt, damit sich ein Gleichgewichtszustand einstellen kann. Diese Vorgehensweise erfordert die Einhaltung folgender Randbedingungen: Das Mapping der Ergebnisse auf die nachfolgenden Nähte impliziert ein für alle nachfolgenden Nähte gleiches Temperaturfeld sowie gleiche Abkühl- und Aufheizgeschwindigkeiten (Schweißparameter, Ausbringung, Nahtvorbereitung und  $t_{8/5}$ -Zeiten). Weiter dürfen sich die Einspannverhältnisse von der ersten Naht zu den nachfolgenden Nähten nicht wesentlich unterscheiden, weil auch die Einspannungen einen zusätzlichen Beitrag zu den plastischen Dehnungen liefern. Beim Mapping der plastischen Dehnungen wird zwischen den plastischen Dehnungen infolge von Einspannungen und denen infolge der Wärmewirkung des Schweißens nicht unterschieden. Daraus geht hervor, dass sich diese Technik nicht für Schweißungen anwenden lässt, bei denen die Naht mit mehreren Raupen gefüllt werden muss. Auch ist diese Technik nicht anwendbar, wenn sich die Schweißnahtgeometrie (Nahtlänge, -breite, -vorbereitung usw.) ändert. Die Local-Global Methode, die im Programmpaket Sysweld als Advisor Methode bezeichnet wird, findet Anwendung in gleich gearteten Steppnähten, deren Abstand voneinander so groß ist, dass sich Spannungen und Dehnungen der benachbarten Nähte nur sehr schwach beeinflussen.

### **Macro-Bead Methode**

Bei dieser Methode wird die Naht in Teilabschnitte unterteilt, die entsprechend der Streckenenergie aufgeheizt und abgekühlt werden. Die Naht kann bei dieser Methode als ein Segment oder in mehrere Segmente unterteilt thermomechanisch betrachtet werden. Dabei kann die Streckenenergie über Temperatur-Zeit-Verläufe iterativ über Fit-Funktionen vom Anwender an gemessene Thermozyklen angepasst werden. Diese Anpassung ist in der Regel erforderlich, da andernfalls durch das große aufgeheizte Volumen unrealistische Schmelzbadgeometrien modelliert werden. Bei einer korrekten Anpassung des Energieeintrags an Messwerte wird die Schmelzbadbreite bzw. die Spitzentemperatur richtig wiedergeben. Von der Spitzentemperatur sind hauptsächlich die Längsverzüge und die Quereigenspannungen abhängig. Die zu erwartenden Querverzüge und Längseigenspannungen hängen jedoch von der Schmelzbadlänge und damit von der Segmentierung ab. Mit zunehmender Segmentierung konvergiert die Lösung gegen die transiente Lösung, womit sich aber auch der Zeitgewinn verringert.

### **Shell-Solid Ansatz**

Ein weiterer Ansatz zur Verringerung der Rechenzeiten liegt in der Verringerung der Anzahl der Freiheitsgrade. Hierzu bieten sich Shell-Solid Vernetzungen an. Der Übergang zwischen den Volumen- und den Schalenelementen wird über entsprechende Verschiebungsansätze realisiert. Beim Übergang von der Solid zur Shell Struktur gilt als praktikabler Ansatz, dass die zu erwartende Verformung in den Shell-Elementen mit linearen Verschiebungsansätzen beschrieben werden können. Andernfalls müssen Ansätze höherer Ordnung gewählt werden, die den Rechenvorteil aber schmälern.

## 4 Methodische Vorgehensweise / Arbeitspakete

Die Ergebnisse des Projektes, die am IWM erarbeitet wurden, sollen dazu beitragen die benötigten Rechenzeiten für die numerische Schweißsimulation und den Aufwand für die Modellierung einer Berechnung zu reduzieren. Hierdurch soll erreicht werden, dass die Schweißsimulation effizienter gestaltet werden kann. Die hohen Rechenzeiten und der hohe Aufwand sind derzeit noch ein Hindernisgrund für einen stärkeren Einsatz der numerischen Schweißsimulation in der Industrie.

Aus diesen Anforderungen ergeben sich folgende Punkte, die eine Reduzierung der Rechenzeit und des Aufwands ermöglichen:

- Ableiten optimaler Vernetzungsstrategien in Bezug auf die Verwendungen von Volumen- und Shell-Elementen für die Schweißsimulation. Hierdurch kann die Anzahl der Freiheitsgrade und damit die Rechenzeit deutlich reduziert werden.
- Nutzung optimaler Rechenalgorithmen durch Untersuchung verschiedener Solvereinstellungen zu verschiedenen Zeiten des Schweißprozesses (Einlauf der Ersatzwärmequelle, quasi-stationärer Bereich, Auslauf der Ersatzwärmequelle).
- Entwicklung einer in das FE-Programm implementierten Routine, welche eine automatisierte Temperaturfeldberechnung mit reduziertem Aufwand der Modellierung durch den Anwender ermöglicht.
- Entwicklung und Umsetzung einer neuen Rechenmethode für Verzugs- und Eigenspannungsberechnungen unter Ausnutzung des Wechsels von instationären zu quasi-stationären Temperaturfeldern.

Des Weiteren soll es durch neue Möglichkeiten des automatisierten Ergebnistransfers verschiedener Simulationsschritte ermöglicht werden Fortschritte in der Simulation einer gesamten Prozesskette zu erreichen. Hierzu wurde in diesem Projekt die Möglichkeit geschaffen, Eigenspannungs- und Dehnungszustand eines vorgelagerten Umformprozesses numerisch als Ausgangszustand für die numerische Schweißsimulation abzubilden und den Einfluss dieser Vorverformungen auf Verzug und Eigenspannungen zu quantifizieren.

## 5 Durchführung

### 5.1 Ableitung optimaler Vernetzungsstrategien

#### 5.1.1 Ausgangssituation und Motivation

Der entscheidende Faktor, der die Berechnungszeiten und die Genauigkeit der Ergebnisse bestimmt, ist die Vernetzung des Bauteils für die Finite-Element-Simulation. Die Modellierung schweißtechnischer Vorgänge gestaltet sich aufgrund der sehr hohen Temperaturgradienten und hiermit zusammenhängender Prozesse sehr schwierig. Auch die Anwendung automatischer Vernetzungsmethoden ist für diese Art der Vernetzung nicht einfach anwendbar, da diese meist zu einer sehr hohen Anzahl von Elementen führen. Zur Verwendung optimaler Vernetzungsstrategien ist ein großer Erfahrungsschatz notwendig.

Es müssen deshalb allgemeingültige Regeln abgeleitet werden, die eine Vernetzung schweißtechnischer Probleme auch für große Strukturen möglich machen. Eine Ableitung der Vernetzungsstrategie soll es vor allem in der Modellierung ungeübten Personen ermöglichen schneller ein gutes FE-Netz bei kleiner Elementzahl zu erstellen.

Um die Anzahl der Freiheitsgrade in der numerischen Simulation weiter zu reduzieren, bieten sich Vernetzungsstrategie mit verschiedenen Element-Typen an. Hierbei werden in Bereichen die eine genaue Modellierung benötigen Solid-Elemente verwendet, die an Elemente aus Shell-Elementen in den weiteren verbleibenden Bereichen gekoppelt werden. Für die Vernetzung mit der Kopplung von Shell- und Solid-Elementen sollten ebenfalls allgemeingültige Regeln zur Vernetzung abgeleitet werden, um deren korrekte Verwendung zu ermöglichen.

#### 5.1.2 Vorgehensweise

Auf Erfahrungen des IWM auf dem Gebiet der numerischen Schweißsimulation basierend wurden am ausgewählten Demonstrator (Abbildung 2)

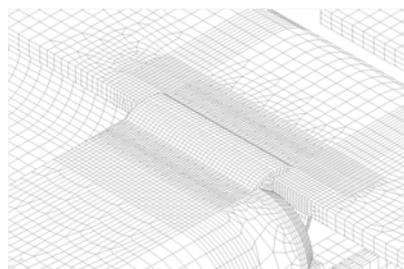


Abbildung 2: Ausschnitt der Vernetzung des Demonstratorbauteils

verschiedene Vernetzungsstrategien angewandt und deren Einfluss auf Anzahl der Elemente / Freiheitsgrade und somit auf die Rechenzeit der numerischen Schweißsimulation überprüft. Um die benötigte Ergebnistreue insbesondere für die Berechnung des Verzugs und der Eigenspannungen einzuhalten werden besondere Vernetzungsstrategien notwendig.

Im Folgenden sind die Ergebnisse für eine optimale Vernetzung von Schweißnähten beschrieben, die auf das Demonstratorbauteil letztlich angewandt wurden.

### 5.1.3 Erzielte Ergebnisse

Die Anzahl der Elemente für die numerische Schweißsimulation sollte mit weniger als 200.000 Elementen zeitlich angemessen gehalten werden. Der Ansatztyp sollte für die benötigten Anforderungen (siehe unten) linear sein.

- Die Vernetzung sollte immer von den Schweißnähten aus begonnen werden. Nur so lässt sich gewährleisten, dass die Element-Geometrie auf die Verkürzung der Rechenzeiten abgestimmt ist und diese nicht durch sich ergebende Zwänge bei der Vernetzung hin zur Schweißnaht unnötig erhöht wird.

- Nach 2,5facher Nahtbreite sollte das FE-Netz stark vergrößert werden. Hintergrund ist die Reduzierung des Temperaturgradienten mit steigendem Abstand zur Schweißnaht und einer in diesem Abstand weniger benötigten Dichte an Integrationspunkten.

Um eine schnelle Reduzierung der Elementanzahl bei vorteilhaft bleibender Geometrie der Elemente zu erhalten sollte diese im Schweißnahtbereich durch 3 teilbar sein, um eine 3-fache Elementreduzierung (siehe Abbildung 3) anwenden zu können.

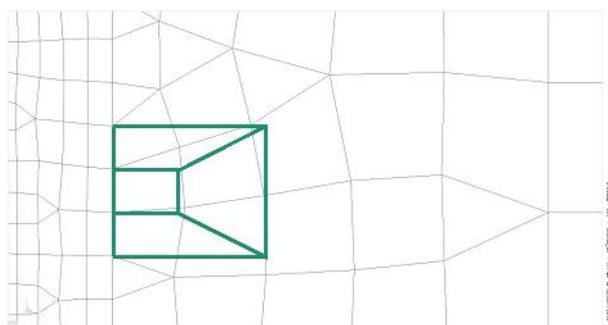


Abbildung 3: Vernetzungsstrategie zur schnellen Vergrößerung im Vergleich zu automatischer Vernetzung

In Abbildung 3 wird der Unterschied zwischen einer automatischen Vernetzung und der 3-fachen Elementreduzierung deutlich. Um von den drei Elementen der Schweißnaht-Vernetzung auf eine gröbere Vernetzung nur eines Elementes der gleichen Kantenlänge zu kommen, sind mit 3fach-Vernetzung 4 Elemente, mit automati-

scher Vernetzung meist mehr (und teilweise verschiedene) Elemente notwendig, wobei auch deren Geometrie nicht immer optimal ist.

- Zur Vermeidung von „Shear-Locking“ sollten bei reiner Vernetzung mit Solid-Elementen mindestens 3 Elemente über der Dicke verwendet werden. Shear-Locking kann bei voll-integrierten Elementen auftreten, da diese bei reiner Biegung über die Integrationspunkte abscheren müssen, um mit einem angemessenen kinematischen Verhalten zu antworten, was zu einer Sperrung (Locking) und damit zu einer zu steifen Antwort des Elements führt. Abhilfe können Elemente mit reduzierter Integration oder die Verwendung von quadratischen Element-Ansätzen bringen, die der oben genannten Forderung nach ausreichender Elementzahl und Verringerung der Freiheitsgrade aber nicht entsprechen. Durch die Vernetzung mit mindestens 3 Elementen über der Dicke, kann das Shear Locking jedoch ebenfalls so stark verringert werden, dass es für die numerische Schweißsimulation keine Rolle mehr spielt.

- Mit genügend großem Abstand von der Schweißnaht (Temperaturgradienten) können zur Verzugs- und Eigenspannungsberechnung Shell-Elemente verwendet werden, um einerseits die Rechenzeiten zu verkürzen und andererseits auch die Vernetzung zu vereinfachen. Abbildung 4 zeigt die Vernetzung des Demonstratormodells mit Solid-Elementen und die Kopplung des rechten Arms, der mit Shell-Elementen vernetzt wurde.

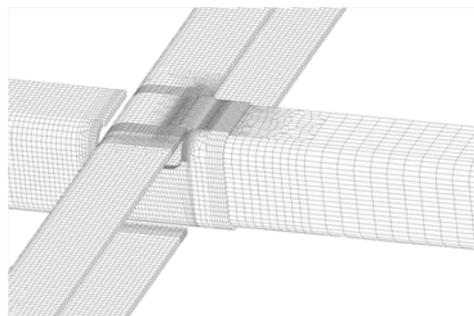


Abbildung 4: Shell-Solid-Kopplung des rechten Arms am Demonstratorbauteil

- Da die Shell-Elemente auf halber Blechdicke erzeugt werden, ist bei der Kopplung zwischen Solid- und Shell-Elementen zu beachten, dass bei den Volumen-Elementen eine gerade Anzahl an Elementen gewählt wird, um bei Angabe der Shell-Dicke in beiden Richtungen die Dicke der mit Volumen-Elementen vernetzten Bereiche genau zu treffen.

Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt des Übergangs vom Bereich mit Solid- und mit Shell-Solid-Vernetzung.

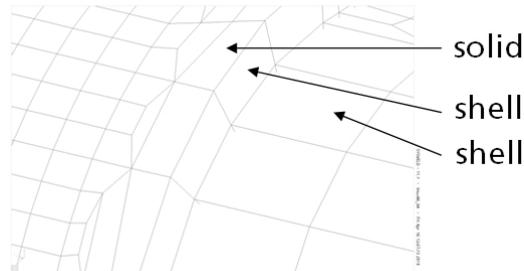


Abbildung 5: Vergrößerter Ausschnitt der Shell-Solid-Kopplung des Demonstratorbauteils

Tabelle 1 zeigt die Vorteile der oben gezeigten Vernetzung mit Shell-Solid-Kopplung zur reinen Vernetzung mit Solid-Elementen für die Temperaturfeld-Berechnung:

|  | Knoten  | Elemente | Freiheitsgrade |
|--|---------|----------|----------------|
| Temperaturfeld<br>Solid-Vernetzung           | 194.336 | 239.193  | 194.336        |
| Temperaturfeld<br>Shell-Solid-<br>Vernetzung | 166.013 | 202.838  | 166.013        |

Tabelle 1: Unterschied zwischen Knoten, Elementen und Freiheitsgraden bei Solid- und Shell-Solid-Vernetzung

Bei der Anwendung auf das Demonstratorbauteil ist somit eine Reduzierung um ca. 37.000 Elemente und ca. 34.000 Freiheitsgrade möglich. Abbildung 6 zeigt die Genauigkeit in der Verschiebung in Z-Richtung des rechten Arms des bei beiden Vernetzungen (rote und grüne Linie) im Vergleich zu den Messergebnissen (schwarze Linie). Man erkennt dieselbe, sehr geringe Abweichung der beiden Simulationsergebnisse vom Messergebnis. Der berechnete Verzug mit Solid- und Shell-Solid-Vernetzung weicht kaum von einander ab.

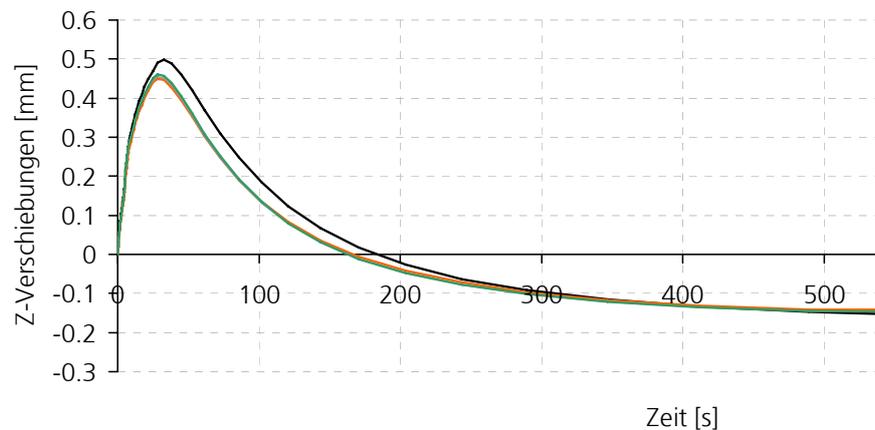


Abbildung 6: Genauigkeitsbetrachtung von Solid und Shell-Solid-Berechnungen

Zusammenfassung der Vernetzungsstrategien für die Berechnung großer Strukturen:

- Vernetzung von den Schweißnähten aus beginnen,
- Die Elementzahlen im Schweißnahtbereich sollten durch 3 teilbar sein,
- nach 2,5facher Nahtbreite Netze vergrößern,
- bei reiner Solid-Vernetzung mit mindestens 3 Elemente über der Dicke (Vermeidung von „Shear-Locking“),
- bei Shell-Solid-Vernetzung gradzahlige Anzahl von Elementen über der Dicke verwenden,
- Anzahl der Elemente für Schweißsimulationen annehmbar halten (<200.000 Elemente, Ansatztyp linear).

## 5.2 Ableitung optimaler Rechenalgorithmen

### 5.2.1 Ausgangssituation und Motivation

In heutigen FE-Systemen, die für die numerische Schweiß-Simulation eingesetzt werden können, gibt es eine Vielzahl an verfügbaren Solvern, die sich in Bezug auf Rechengeschwindigkeiten und Rechengenauigkeit unterscheiden. Die optimale Verwendung dieser Solver setzt die Kenntnis von deren Einstellungen auf die Berechnungszeiten voraus. Eine Besonderheit in der numerischen Schweiß-Simulation ist das Vorhandensein verschiedener Bereiche, die sich numerisch unterscheiden. Am deutlichsten unterscheiden sich die Bereiche Schweißen und Abkühlen, da hier eine deutliche Differenz der Temperaturgradienten existiert und die hiermit zusammen-

hängenden Prozesse wie die Entstehung von Eigenspannungen direkt in Zusammenhang hiermit stehen.

### 5.2.2 Vorgehensweise

Um den Einfluss verschiedener Berechnungsverfahren zu testen, wurde mit dem ausgewählten FE-Code Sysweld eine Temperaturfeldberechnung an einem Demonstratorbauteil mit verschiedenen Einstellungen des Solvers durchgeführt und die benötigte Rechenzeit aus den Ergebnis-Dateien herausgelesen und verglichen.

Die Ergebnisse sind nicht systemspezifisch und können direkt in anderen FE-Solvern angewandt werden.

### 5.2.3 Erzielte Ergebnisse

Die optimalen Rechenalgorithmen wurden anhand der benötigten Rechenzeit zum Erzielen der Lösung quantifiziert.

Zur Berechnung wurden verschiedene Einstellungen des Solvers getestet. Als effektivste Variante zeigt sich die Verwendung des in Sysweld implementierten optimierten Sparse-Solvers (OPTIMIZED). Der iterative Solver sollte nur verwendet werden, wenn das System sehr stabil ist, was bei der nicht-linearen Schweiß-Simulation meist nicht der Fall ist. Die Berechnungen wurden unter Verwendung unterschiedlicher Integrations-Schemata mit dem Newton- und dem Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno- (BFGS-)Sekanten-Verfahren, bei konstanter (vom Nutzer vorgegebener) und bei automatisch angepasster Zeitschrittweite durchgeführt. Bei der vom Nutzer vorgegebenen Zeitschrittweite wird beim Schweißen der Ursprung der Wärmequellendefinition in Schweißrichtung von Knoten zu Knoten geführt.

Die Integrationsschemata werden über den Parameter  $n$  eingegeben. Hierbei bedeutet  $n=0$  ein reines Vorwärts-Differenzen-Verfahren (explizit) und  $n=1$  ein reines Rückwärts-Differenzen-Verfahren (implizit). Geprüft wurden die Verfahren „voll implizit  $n=0$ “, Zentrales Differenzenverfahren „Crank-Nicholson  $n=0,5$ “, und einem mittleren Verfahren  $n$ -Methode mit  $\Theta=0,66$ . Abbildung 7 zeigt als Beispiel die Berechnung der Mechanik mit verschiedenen Integrations-Verfahren und der hieraus resultierenden Änderung der benötigten Rechenzeit.

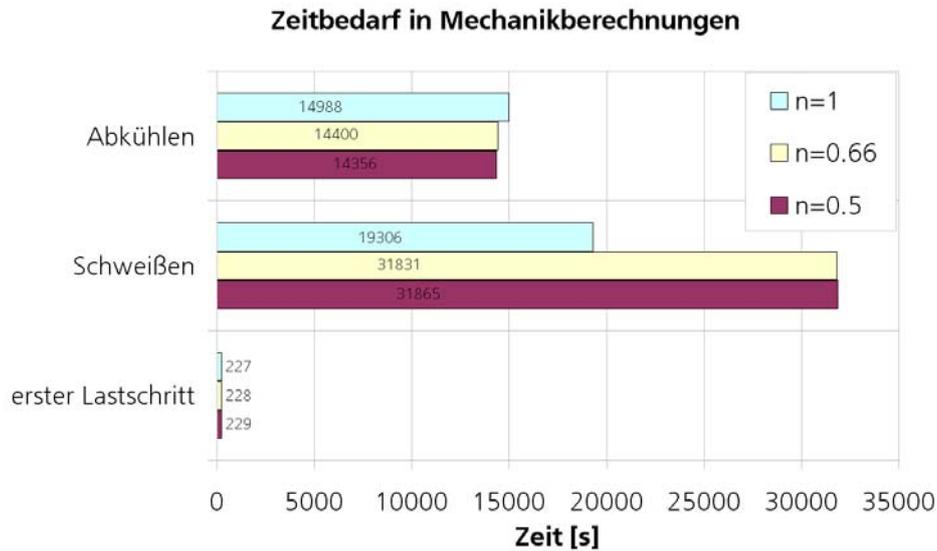


Abbildung 7: Beispiel verschiedener Solvereinstellungen und resultierende Rechenzeiten

Abbildung 8 zeigt die Zeitdifferenz von Temperaturfeld- und Mechanikberechnung des Demonstratorbauteils.

Die einzelnen Berechnungsschritte wurden mit allen oben genannten Verfahren durchgeführt. Die schnellste Berechnung der einzelnen Schritte konnte mit folgendem Schema erhalten werden:

- Schweißen Temperaturfeld: BFGS-Verfahren, Parameter  $n=0,5$ , automatische Schrittweite,
- Abkühlen Temperaturfeld: BFGS-Verfahren, Parameter  $n=1$ , automatische Schrittweite,
- Erster Lastschritt Mechanik: BFGS-Verfahren, Parameter  $n=1$ , konstante Schrittweite,
- Schweißen Mechanik: BFGS-Verfahren, Parameter  $n=1$ , automatische Schrittweite,
- Abkühlung Mechanik: Newton-Verfahren, Parameter  $n=0,5$ , automatische Zeitschrittweite.

Der Unterschied zwischen der langsamsten (blau) und der schnellsten (grün) Konfiguration beträgt ca. 7 Stunden.

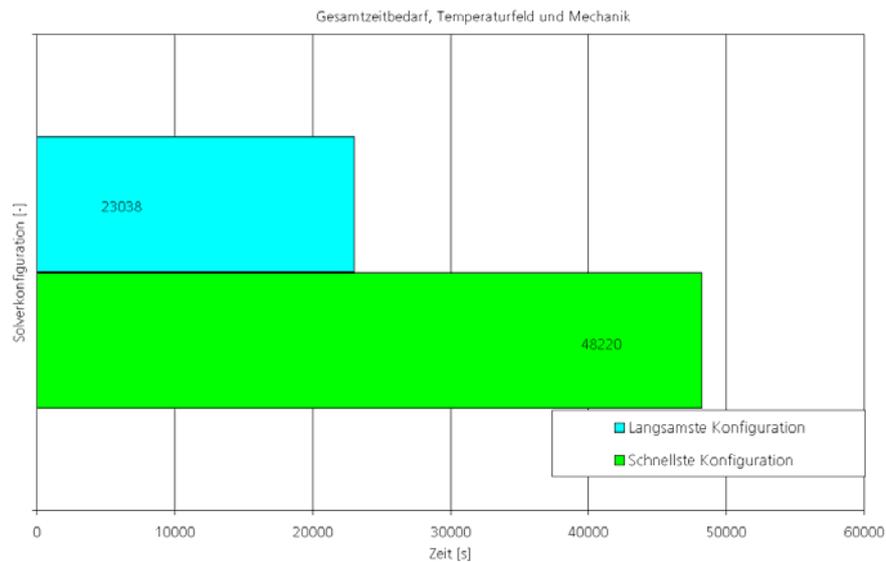


Abbildung 8: Zeitbedarf der Berechnung mit unterschiedlichen Solver-Einstellungen

### 5.3 Entwicklung einer Routine zum automatisierten Temperaturabgleich

#### 5.3.1 Ausgangssituation und Motivation

Neben der reinen Rechenzeit der transienten thermomechanischen FE-Analyse ist die Anpassung der Ersatzwärmequelle an gemessene Temperatur-Zeit-Verläufe eine weitere zeitintensive Vorgehensweise. Im Gegensatz zum realen Schweißprozess, in dem das Temperaturfeld die Mechanik unmittelbar beeinflusst, wird in der numerischen Simulation das Temperaturfeld entkoppelt von der mechanischen Berechnung betrachtet. Für eine Temperaturfeldberechnung beim Schweißen wird als Ersatzwärmequelle innerhalb eines gewählten Volumens eine Intensitätsverteilung derart angenommen, dass sich die berechneten und gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufe nicht oder nur geringfügig unterscheiden. Die genaue Anpassung der Geometrie und Intensität der Ersatzwärmequelle an die gemessenen Temperaturzyklen ist in der Regel ein sehr aufwändiger Prozess, der mehrere Wochen oder Monate in Anspruch nehmen kann. Ein weiteres Problem ist, dass bei Aluminiumschweißungen die Schmelzbadlänge, bzw. die gemessenen Temperaturen bei längeren Zeiten, nur über einen anisotropen Wärmeleitansatz im Schmelzbad ausreichend genau angepasst werden kann [Bra04]. Hier besteht bezüglich der Anwendbarkeit der Schweißsimulation in der industriellen Praxis ebenfalls ein großer Bedarf im Hinblick auf eine schnelle, effiziente Methodik zur Modellierung einer dem jeweiligen Problem angepassten Ersatzwärmequelle.

Die Ersatz-Wärmequellen bilden die geometrische Form der sich beim realen Schweißprozess ergebenden Wärmeverteilung ab. Abbildung 9 zeigt eine entspre-

chende Ersatzwärmequelle (für das Laserstrahlschweißen) und deren Parameter zur geometrischen Definition.

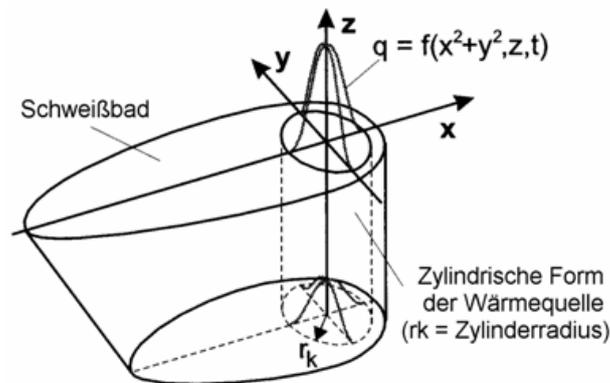


Abbildung 9: Schematische Darstellung einer Ersatzwärmequelle

Eine Validierung des Energieeintrags muss durch die Anpassung der Geometrieparameter der numerischen Ersatzwärmequelle durch Messungen am realen Prozess erfolgen. Die Geometrieparameter werden bisher meist von Hand durch Anpassung an einen Makroschliff der Schweißnaht und durch Anpassung an gemessene Temperatur-Zeit-Verläufe von auf der Oberfläche quer zur Schweißnaht angebrachte Thermoelemente abgeleitet. Abbildung 10 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer solchen Thermoelement-Messung anhand von zwei aufgenommenen Temperatur-Zeit-Verläufen mit verschiedenen Abständen zur Schweißnaht und das Ergebnis einer Simulation des Schweißprozesses (Temperatur-Zeit-Verlauf an den gleichen Positionen im Modell, wie in der Messung). Die Form der Kurven ergibt sich durch einen schnellen Anstieg der Temperatur beim „Vorbeilaufen“ der Wärme am Thermoelement beim Schweißen und einer langsamen Abkühlung durch Abgabe der Wärme in das Bauteil und die Umgebung.

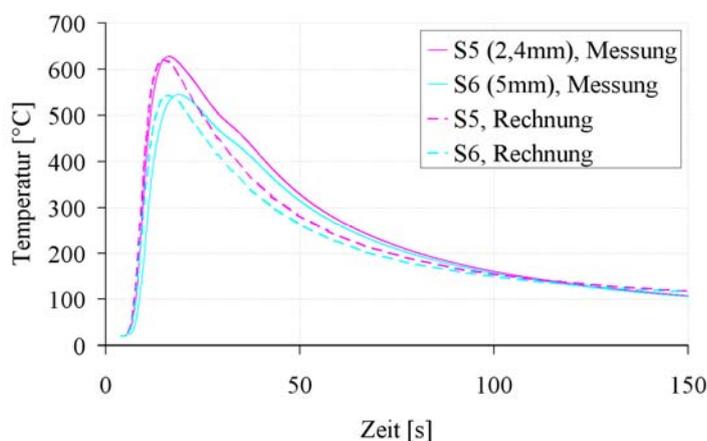


Abbildung 10: Gemessene und simulierte Temperatur-Zeit-Verläufe

Die Anpassung der Ersatzwärmequelle erfolgt dann über folgende Schritte:

- Definition der Wärmequelle (Schweißprozess),
- Definition der thermophysikalischen Materialdaten (verwendete Werkstoffe),
- Anpassung der Wärmestromdichte.

Die Anpassung der Wärmestromdichte erfolgt hierbei iterativ per Hand durch mehrfache Berechnung und jeweils erneute Anpassung der Wärmestromdichte. Dieser iterative Prozess benötigt sehr viel Zeit und personelle Ressourcen.

### **5.3.2 Vorgehensweise**

Um dies zu umgehen, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens eine Methode entwickelt, die es erlaubt den Wärmeeintrag in das Modell automatisch anzupassen, um einen Abgleich zwischen Thermo-Element-Messungen und Simulation zu erhalten.

Die Methode wird in die im FE-Code Sysweld implementierte Programmiersprache SIL umgesetzt, um eine direkte Anwendung auf das Demonstrator-Bauteil zu gewährleisten.

Die Programmierung einer grafischen Benutzer-Schnittstelle soll im Besonderen dazu dienen, künftigen Nutzern der numerischen Schweiß-Simulation die erarbeitete Methode nutzbar zu machen, ohne die genaue Funktionsweise kennen zu müssen.

Um die Vorbereitungszeiten einer Berechnung weiter zu verringern werden zudem die Randbedingungen erarbeitet, den Abgleich des Temperaturfelds durch die Reduktion eines Modells auf die relevanten Teile durchzuführen.

### **5.3.3 Erzielte Ergebnisse**

Am IWM wurde eine Methode entwickelt und in das FE-Programm Sysweld implementiert, die diesen Prozess automatisiert, d.h. die Wärmestromdichte automatisch an den im realen Prozess gemessenen Temperatur-Zeit-Verlauf ohne weitere benötigte Eingabe anpasst. Die Abfrage der grundsätzlich benötigten Parameter erfolgt über eine in die Software implementierte grafische Benutzeroberfläche.

Die Benutzer-Abfrage gliedert sich in mehrere Schritte:

1. Auswahl des FE-Netzes,
2. Abfrage der Spitztemperatur des anzupassenden Thermoelements,

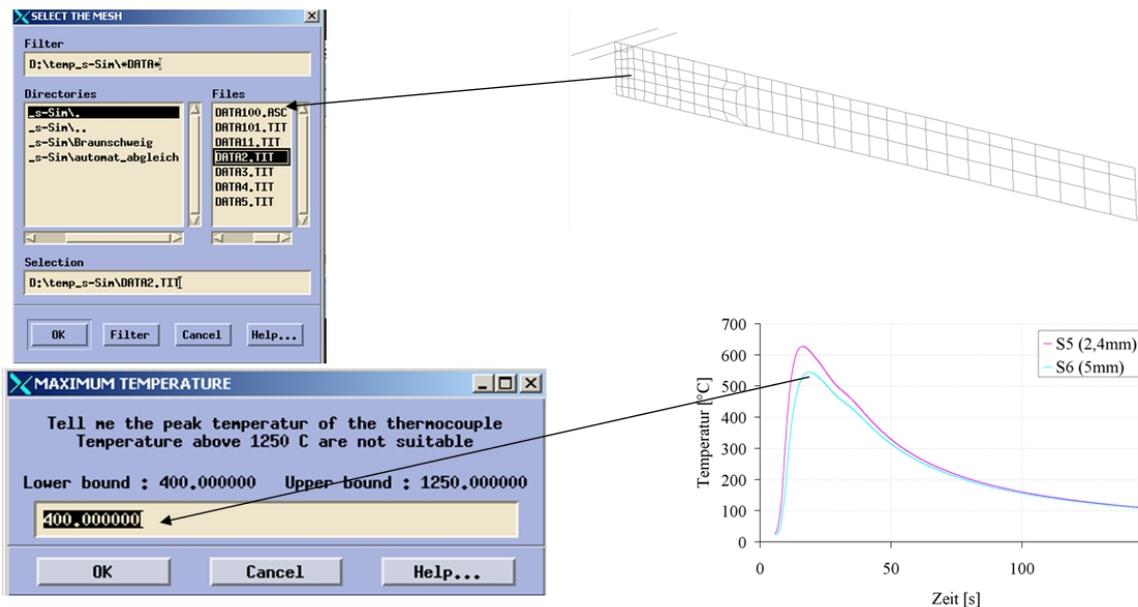


Abbildung 11: Auswahl des FE-Netzes und Eingabe der Spitztemperatur

3. Eingabe der Position des Thermoelements zur Schmelzlinie,

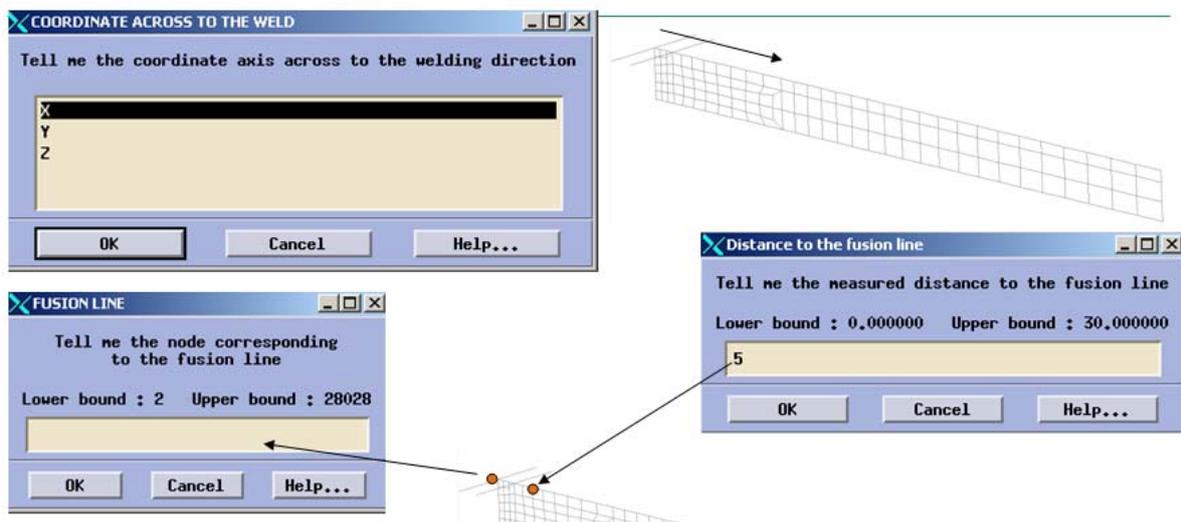


Abbildung 12: Benutzerabfrage des Schmelzlinienstandes

4. Wenn benötigt, Interpolation der Position zwischen zwei Knoten, wenn Knoten und Thermoelementposition geometrisch nicht übereinander liegen,

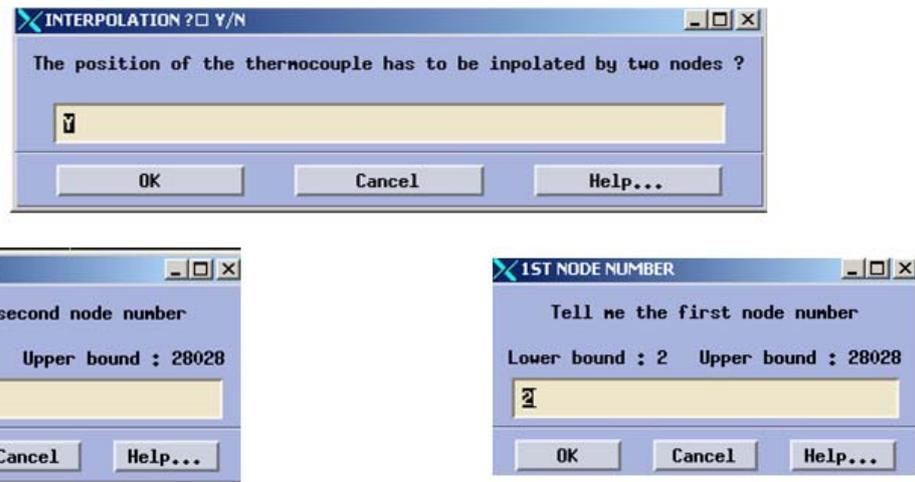


Abbildung 13: Abfrage für die Interpolation zwischen zwei Knoten

- Erstellung eines Parameterfiles, mit welchem Sysweld den Energieeintrag automatisch abgleicht.

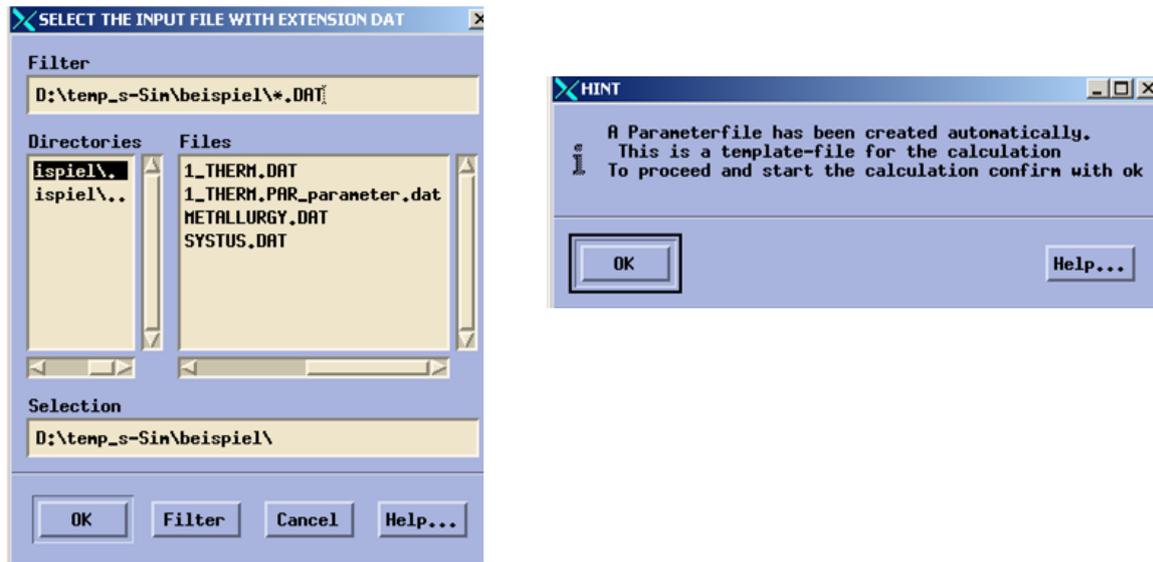


Abbildung 14: Automatische Erstellung einer Parameterdatei

Abbildung 15 zeigt den internen Ablauf des Programms, das den Energieeintrag über ein Näherungsverfahren abgleicht. Nach Eingabe eines anfänglichen Schätzwerts für den bei der Anpassung von Temperatur-Zeit-Verläufen wichtigsten Parameter „Energieeintrag  $q_i$ “ wird das Temperaturfeld berechnet. Die erhaltene Spitzentemperatur am ausgewählten Knoten (oder der interpolierten Position) wird mit dem eingegebenen Maximalwert der Messung verglichen und ein neuer Wert des Energieeintrags

an das Programm zur erneuten Berechnung übergeben. Ist ein entsprechendes Kriterium der Abweichung zwischen Experiment und Simulation (z.B. 1 Kelvin) erreicht ist der Energieeintrag erfolgreich abgeschlossen und das Programm wird beendet.

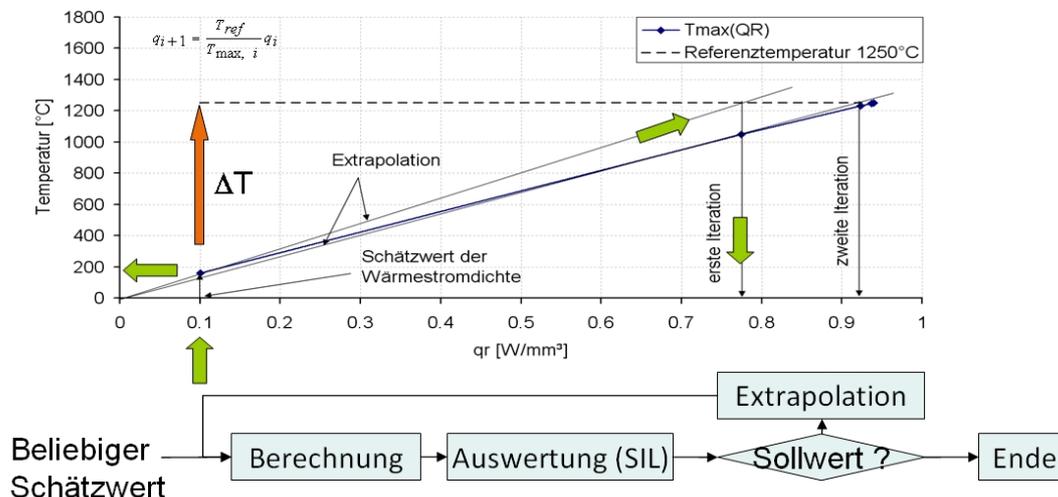


Abbildung 15: Näherungsschema zur automatischen Anpassung des Energieeintrags

Tabelle 2 zeigt die benötigten Iterationen zur Anpassung des Energieeintrags über den Parameter  $q_i$  einer Beispielrechnung. Es mussten acht Berechnungen durchgeführt werden, um die eingegebene Maximaltemperatur von 1250°C mit einer Genauigkeit von über 0,01 Kelvin zu erreichen. Mit besseren Schätzwerten lässt sich die Berechnung zudem weiter verkürzen.

| Iteration | Energieeintrag $q_i$ (aktueller Zeitschritt) | Berechnete Maximaltemperatur in [°C] | Energieeintrag $q_{i+1}$ (nächster Zeitschritt) | Differenz zur vorherigen Lösung in [°C] |
|-----------|--|--------------------------------------|---|---|
| 0         | 0,1  | 161,42                               | 0,77438   | 1088,58                                 |
| 1         | 0,77438                                      | 1048,66                              | 0,92306   | 201,34                                  |
| 2         | 0,92306                                      | 1232,04                              | 0,93651   | 17,96                                   |
| 3         | 0,93651                                      | 1246,00                              | 0,93951   | 3,99                                    |
| 4         | 0,93951                                      | 1249,00                              | 0,94026   | 0,99                                    |
| 5         | 0,94026                                      | 1250,09                              | 0,94019   | -0,09                                   |
| 6         | 0,94019                                      | 1249,99                              | 0,94020   | 0,01                                    |
| 7         | 0,94020                                      | 1250,0                               | 0,94020   | 0                                       |

Tabelle 2: Benötigte Iterationen und berechnete Ergebnisse beim automatischen Abgleich des Energieeintrags

Während der Anpassung der Ersatzwärmequelle ist keine weitere Benutzereingabe notwendig.

Da die Anpassung der Ersatzwärmequelle und weiterer Parameter, wie Wärmeableitung meist iterativ erfolgt, sollte für eine weitere Reduzierung der Durchführungszeiten von numerischen Schweißsimulationen an großen Strukturen bei der Anpassung immer nur ein notwendiger Teil betrachtet werden. Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen beispielhaft die gesamte Struktur des Demonstrator-Bauteils und einen entsprechenden Ausschnitt hiervon.



Abbildung 16: Gesamtes FE-Netz des Demonstratorbauteils

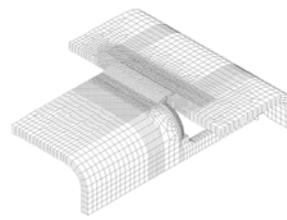


Abbildung 17: Ausschnitt des Demonstrator-Bauteils zur Wärmequellen-Anpassung

Der Ausschnitt muss so groß gewählt werden, dass die Spitzentemperaturen und Phasenumwandlungen bis ca. 500°C richtig wiedergegeben werden, eine verlangsamte Wärmeabgabe durch das verkleinerte Modell (siehe Abbildung 18) kann hierbei während der Wärmequellen-Anpassung vernachlässigt werden.

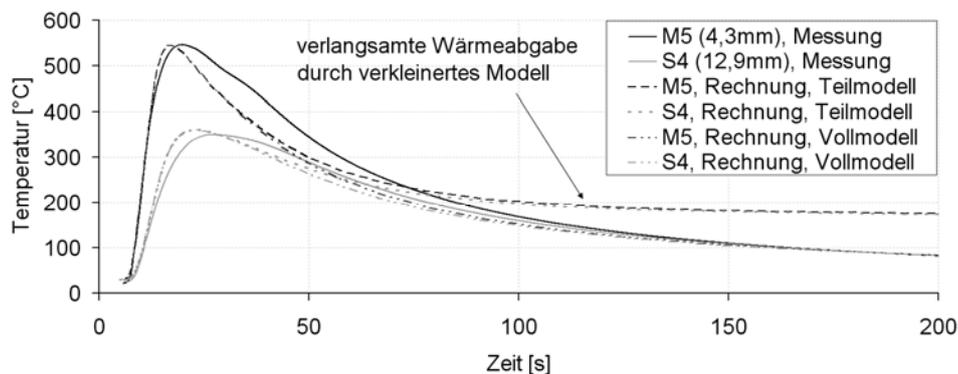


Abbildung 18: Vergleich der Temperatur-Zeit-Verläufe von Messungen, Gesamt- und Teilmodell

Ein Temperaturfeldabgleich mit der erstellten Routine sollte demnach über folgende Schritte erfolgen:

1. Materialdaten implementieren,
2. Wärmequelle definieren,
3. Ausrichtung der Wärmequelle am Schliffbild mit Hilfe von Hilfslinien,
4. Trajektorien und Referenzen erstellen,
5. Eingabedatei am Original-Modell definieren,
6. Original-Modell verkleinern,
7. Verkleinertes Modell in der Eingabedatei verwenden,
8. Temperatur-Zeit-Verläufe mit Position und Spitztemperatur in der Routine zur automatisierten Temperaturfeldanpassung verwenden,
9. Eingabedatei mit Original-Modell starten und auswerten.

#### **5.4 Entwicklung einer neuen Rechenmethode für Verzugs- und Eigenspannungsberechnungen unter Ausnutzung quasi-stationärer Bedingungen**

##### **5.4.1 Ausgangssituation und Motivation**

Neben der Anpassung der Ersatzwärmequelle stellt die Berechnung der Mechanik der simulierten Schweißung auch im Vergleich zu Temperaturfeldberechnungen den größten Anspruch an die Rechenzeiten bei der numerischen Schweißsimulation. Am IWM wurde deshalb eine Methode entwickelt, die es erlaubt quasistationäre Bereiche der Schweißnaht auszunutzen, um diese aufwändige Berechnung deutlich zu verkürzen. Am Beispiel eines Demonstrators (B-Säule eines PKW, siehe Abbildung 19) wird das Potenzial der Methode deutlich.

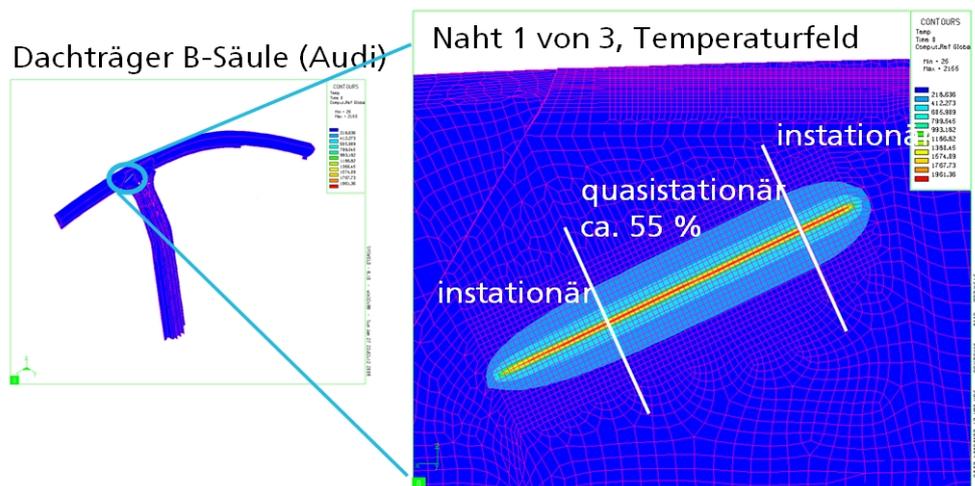


Abbildung 19: Instationäre und quasi-stationäre Bereiche der Schweißnaht an einem Demonstrator

Ca. 55% der Schweißnaht sind quasi-stationär, d.h. die im Folgenden beschriebene Methode kann auf diesen Bereich angewandt werden und verspricht somit eine deutliche Rechenzeit-Reduzierung.

In der derzeitigen Durchführung der numerischen Schweiß-Simulation wird die Temperatur in der Schweißnaht als instationärer Zustand angenommen. Die Berechnung erfolgt über gängige Näherungsverfahren, die im Besonderen für die Berechnung der Mechanik äußerst zeitaufwändig sind.

#### 5.4.2 Vorgehensweise

Es soll eine Methode entwickelt werden, die es ermöglicht die quasi-stationären Bereiche einer Schweißnaht für eine schnellere Berechnung der Spannungen und Dehnungen in einer Schweißnaht zu verwenden.

#### 5.4.3 Erzielte Ergebnisse

Der neue methodische Ansatz liegt darin begründet, dass insbesondere bei langen Nähten und konstanter Streckenenergie entlang der Schweißnaht in einem großen Bereich der Schweißnahtlänge (quasi-stationärer Bereich) Aufheizgeschwindigkeit, Spitzentemperatur und Abkühlgeschwindigkeiten Bereich keine Funktion der Temperatur mehr sind, was sich direkt auf die Ausbildung der Dehnungen im Schmelzbadbereich auswirkt (siehe Abbildung 20).

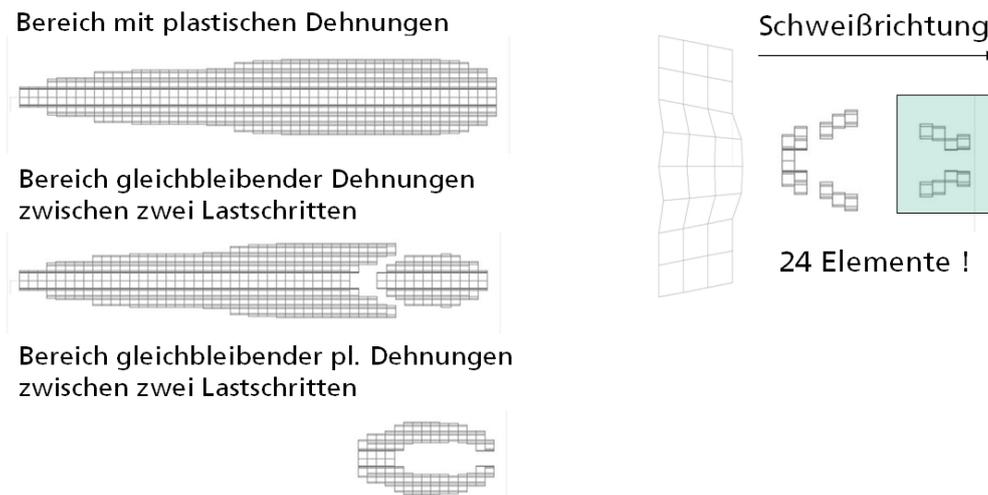


Abbildung 20: Bereiche plastischer Dehnung und gleichbleibender Dehnungen

Dies gilt allerdings nur solange dieser Zustand nicht von weiteren Wärmequellen- oder -senken beeinflusst wird. Hierzu zählen z. B. Wärmen von bereits geschweißten Nähten oder Querschnittsänderungen im Profil. Für die Verzüge und Eigenspannungen jedes Lastschritts werden die plastischen Dehnungen über die hinterlegte Fließfunktion (i. d. R. von Mises) entsprechend

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}^{pl}}{\partial t} = d\lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1)$$

berechnet, wobei der Lagrange-Parameter  $d\lambda$  aus der Konsistenzbedingung folgt. Im nächsten Lastschritt werden die plastischen Dehnungen des nachfolgenden Temperaturlastschritts akkumuliert. Ändern sich zwischen zwei Temperaturlastschritten die Temperaturen im mitbewegten System nicht, so ändert sich auch der Gradient der plastischen Dehnungen nicht. Daher kann für stationäre Temperaturfelder Gl. 1, wie in Gl. 2 beschrieben, dargestellt werden:

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}^{pl}}{\partial t} = -v \frac{\partial \varepsilon_{ij}^{pl}}{\partial x_k} \approx -v \frac{\Delta \varepsilon_{ij}^{pl}}{\Delta x_k} \quad (2)$$

Gl. 2 beschreibt die Änderung der plastischen Dehnungen entlang der Schweißrichtung. Die Zeit ist in der Schweißgeschwindigkeit  $v$  enthalten:

$$v = \frac{\partial x_k}{\partial t} = const \Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} = -v \frac{\partial}{\partial x_k} \quad (3)$$

Die Zeiteinsparung liegt darin, dass mit diesem Ansatz weder die Steifigkeitsmatrix aufgebaut werden muss, noch Iterationsschritte erforderlich sind. Bei großen Model-

len liegt der Zeitbedarf zum Aufbau der Matrix mit anschließender Berechnung selbst bei 64-bit Workstations der neusten Generation bei 20 Minuten und mehr. Eine entsprechend feine und verfahrensabhängige Vernetzung im Millimeterbereich und darunter ist nötig, um den Verzug und die Eigenspannungen möglichst realitätsnah abbilden zu können. Dafür sind je nach Verfahren, Schweißgeschwindigkeit und Schweißnahtlänge bis zu hundert und mehr Lastschritte nötig.

Sind die Verzüge und Eigenspannungen für diesen Lastschritt von Interesse, so kann eine linear-elastische Analyse im Anschluss nachgeschaltet werden. I. d. R. interessiert jedoch nur der letzte Lastschritt nach dem Schweißen. Die Verformungsgeschichte bleibt in jedem Fall für jeden Lastschritt erhalten.

Abbildung 21, Abbildung 22, Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen die Ergebnistreue der transienten Berechnung und der Anwendung der neu entwickelten Methode an einer einfachen Plattenschweißung. Es tritt nur eine geringe Abweichung der berechneten Eigenspannungen von weniger als 1MPa auf.



Abbildung 21: Transient berechnete Quereigenspannungen (Min. -104,4 MPa, Max. 83,5 MPa)

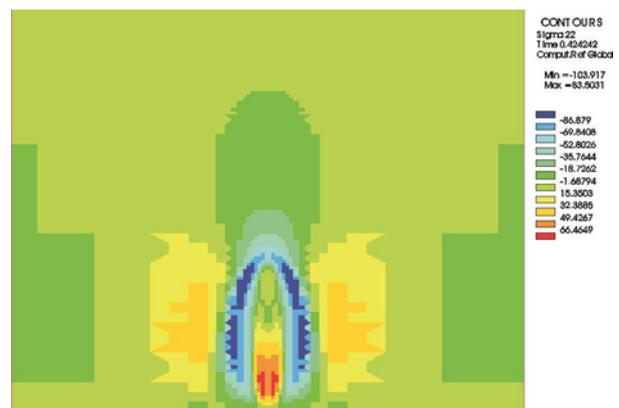


Abbildung 22: Mit Ersatzmethode berechnete Quereigenspannungen (Min. -103,9 MPa, Max. 83,5 MPa)



Abbildung 23: Transient berechnete Längseigenspannungen (Min. -118,9 MPa, Max. 43,9 MPa)



Abbildung 24: Mit Ersatzmethode berechnete Längseigenspannungen (Min. -119,2 MPa, Max. 43,9 MPa)

Der quasistationäre Bereich für die Anwendung der Ersatzmethode kann aus der Temperaturfeldberechnung abgeschätzt werden. Trägt man die Spitzentemperaturen verschiedener Knoten über der Zeit auf, lässt sich bei linearem Verlauf der quasistationäre Bereich aufzeigen. Beim Beispiel einer weiteren Naht der B-Säule (siehe Abbildung 25) sind 66 Prozent der Schweißnaht quasistationär und die Methode kann zur Reduzierung der Rechenzeiten angewandt werden. Es ist zu beachten, dass auch andere Ersatzmethoden wie Schrumpfkraftmodell und Local-Global-Ansatz für eine solche Schweißnaht sinnvoll anwendbar sind.

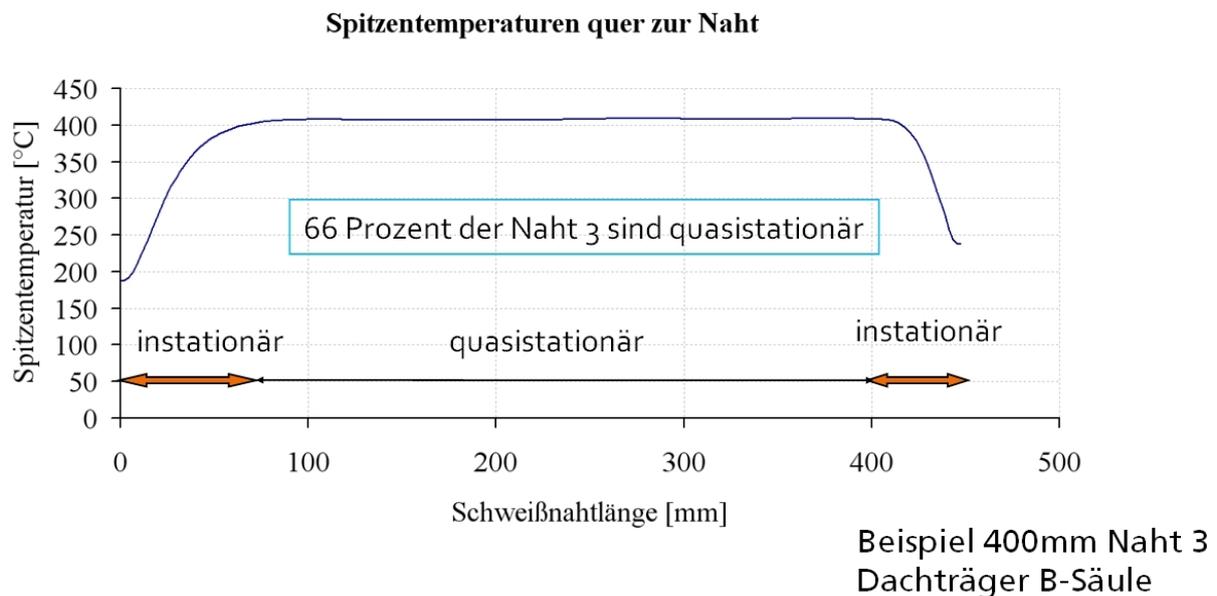


Abbildung 25: Quasistationärer Bereich einer Schweißnaht am Demonstrator B-Säule

Abbildung 26 zeigt, dass die entwickelte Ersatzmethode nach einer Überprüfung des Demonstrator-Bauteils des Projekts nicht sinnvoll angewandt werden kann, da diese Schweißnaht sehr kurz ist und nur einen minimalen quasi-stationären Bereich aufweist. Auch die Anwendung weiterer Ersatzmethoden ist bei einer solchen Schweißnaht nicht sinnvoll. Die Naht muss daher transient berechnet werden.

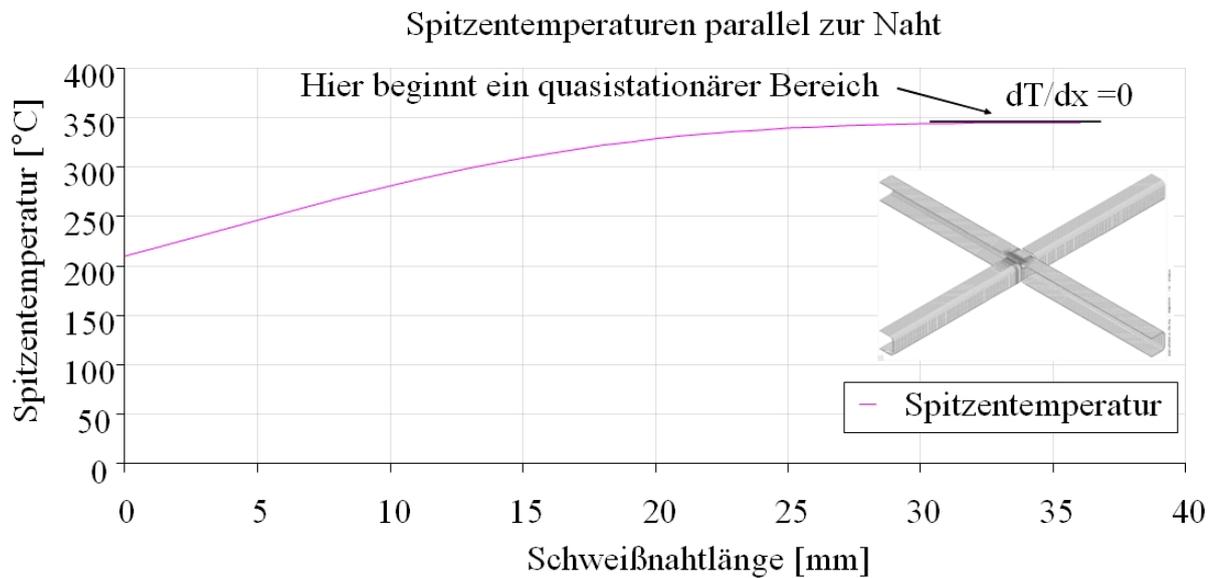


Abbildung 26: Quasistationärer Bereich einer berechneten Schweißnaht am Demonstrator

## 5.5 Berücksichtigung eines vorgelagerten Umformprozesses in der Schweiß-Simulation

### 5.5.1 Ausgangssituation und Motivation

Die durch vorhergehende Prozessschritte wie Umformen und hierbei eingebrachte Eigenspannungen und plastische Dehnungen werden in der numerischen Schweißsimulation bisher in der Regel nicht berücksichtigt, obwohl diese für die Simulationsergebnisse von erheblicher Bedeutung sein können.

### 5.5.2 Vorgehensweise

Die wird eine Methode entwickelt und angewandt, die es erlaubt den Spannungs-Dehnungs-Zustand aus dem letzten Lastschritt einer vorhergehenden Simulation, z.B. Umformsimulation zu übernehmen und für die numerische Schweißsimulation als Ausgangszustand zu übergeben.

### 5.5.3 Erzielte Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungs-Vorhabens wurde eine Routine entwickelt, die es erlaubt, den Spannungs-Dehnungszustand aus vorhergehenden Prozess-Schritten als Anfangszustand des Simulationsmodells vorzugeben. Abbildung 27 zeigt den Dach-

träger des aus der Schweißgruppe Dachträger/B-Säule bestehenden Demonstrators, welchem als Ausgangszustand für die numerische Schweiß-Simulation die plastischen Dehnungen und Eigenspannungen eines vorherigen Umformprozesses übergeben wurden. Dargestellt sind die Eigenspannungen in Längsrichtung.

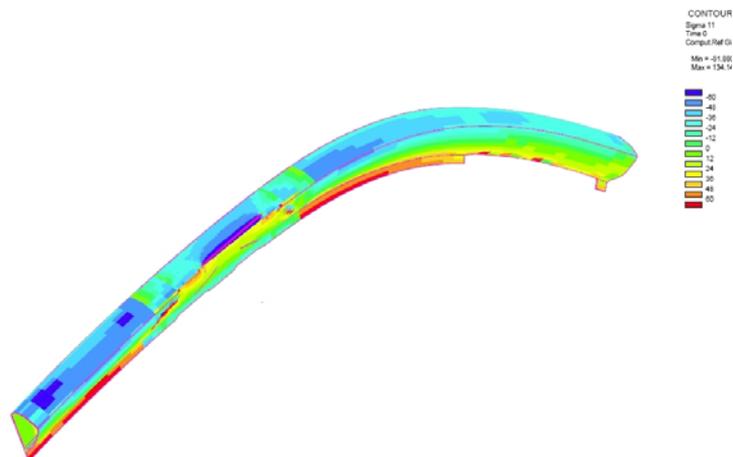


Abbildung 27: Aufgebrachte Eigenspannungen aus Umformsimulation auf den Dachträger des Demonstrator-Bauteils

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit ist hier nur die Längsspannungsverteilung im Dachträger gezeigt. Auf die Darstellung B-Säule wurde verzichtet.

Durch die neu geschaffene Möglichkeit der Übernahme von Ergebnissen aus vorhergehenden Prozessen ist es grundsätzlich möglich, Fortschritte in der simulatorischen Betrachtung einer gesamten Prozesskette zu erreichen.

## 6 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten

Die Ergebnisse des Projektes, die am IWM erarbeitet wurden, tragen dazu bei die benötigten Rechenzeiten für die numerische Schweißsimulation und den Aufwand für die Modellierung einer Berechnung zu reduzieren. Hierdurch wird erreicht, dass die Schweißsimulation effizienter gestaltet werden kann.

Folgende Punkte wurden vom IWM erarbeitet, um dieses Ziel zu erreichen:

Arbeitspunkt 1 - Ableiten optimaler Vernetzungsstrategien in Bezug auf die Verwendungen von Volumen- und Shell-Elementen

Verwertbares Ergebnis:

Beschreibung einer Vernetzungs-Strategie der Schweißnähte zur Minimierung der Anzahl von Elementen und somit von Freiheitsgraden. Darstellung wirksamer Möglichkeiten zur Vernetzung der Schweißnähte mit der Kopplung von Shell- und Solid-Elementen.

Arbeitspunkt 2 - Ableiten optimaler Rechenalgorithmen durch Überprüfung verschiedener Solver-Einstellungen zu verschiedenen Zeiten des Schweißprozesses

Verwertbares Ergebnis:

Untersuchung verschiedener zur Verfügung stehender Rechenalgorithmen, die für die numerische Schweiß-Simulation für unterschiedliche Berechnungsschritte eingesetzt werden und Bewertung von deren Einfluss auf die Rechenzeiten.

Arbeitspunkt 3 - Entwicklung einer in das FE-Programm implementierten Routine, welche eine automatisierte Temperaturfeld-Berechnung mit reduziertem Aufwand der Modellierung durch den Anwender ermöglicht.

Verwertbares Ergebnis:

Es wurde eine Routine entwickelt und in den FE-Code Sysweld implementiert, die es ermöglicht, den Energieeintrag einer numerischen Ersatzwärmequelle automatisch an Thermoelementmessungen anzugleichen.

Über die Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche wird es dadurch Anwendern ohne langjährige Erfahrung ermöglicht, Temperaturfeldberechnungen zeitnah durchzuführen.

Darüber hinaus wurden Randbedingungen der Rechenzeitverkürzung durch Modellverkleinerung ohne Verlust der Ergebnisqualität erarbeitet.

Arbeitspunkt 4: - Entwicklung und Umsetzung einer neuen Rechenmethode für Verzugs- und Eigenspannungsberechnungen unter Ausnutzung des Wechsels von instationären zu quasi-stationären Temperaturfeldern.

Verwertbares Ergebnis:

Es wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht den Wechsel von instationären zu quasi-stationären Bereichen in einer Schweißnaht auszunutzen, um mittels einer Ersatzmethode Mechanik-Berechnungen deutlich schneller durchzuführen. Hierbei werden aus vorangegangenen Lastschritten bekannten plastischen Dehnungen auf die folgenden Lastschritte im entsprechenden Bereich aufaddiert. Der große Vorteil ist, dass durch die Vorgabe der Spannungs-Dehnungs-Zustand für diese Lastschritte nicht immer aufwändig neu berechnet werden muss, sondern die Berechnung bei gleichbleibend hoher Ergebnismgüte deutlich schneller durchgeführt werden kann.

Arbeitspunkt 5 – Übertragung des Eigenspannungs- und Dehnungszustand eines vorgelagerten Umformprozesses in die numerische Schweiß-Simulation

Verwertbares Ergebnis:

In der numerischen Schweiß-Simulation werden vorgelagerte Prozesse wie das Umformen bisher in der Regel nicht berücksichtigt, obwohl diese für die Simulationsergebnisse von erheblicher Bedeutung sein können. Am IWM wurde eine Routine entwickelt, mit welcher der Spannungs-Dehnungszustand aus vorhergehenden Prozess-Schritten als Anfangszustand des Simulationsmodells vorgegeben werden kann.

## 7 Literatur

- [Aas10] Gemeinsamer Abschlussbericht des Verbundprojektes „Anwendungsnahe Schweißsimulation komplexer Strukturen“, September 2010
- [Abb85] Abbasi, F., Fletcher A. J., Effect of transformation plasticity on generation of thermal stress and strain in quenched steel plates, *Materials Science and Technology*, Vol. 1 (1985), S. 830-837
- [And03] Andrieux, F., Riedel, H., Coube, O., Sun, D.-Z., Verbesserte konstitutive Modelle zur Beschreibung von Umformprozessen - Numerische Implementierung und Experimente -, IWM-Bericht, V139/03, Freiburg Juli 2003
- [Bla02] Blauel J.G., Mayville R.A., Sommer S., Nahme H., Crashtests and Numerical Simulation of Welded Aluminium Components with Defects, 3rd International Symposium on Passive Safety of Rail Vehicles, March 2002, Berlin
- [Bra02] Brand, M., Petz, M., Tutsch, R., Wohlfahrt, H., Michailov, V., FE-welding simulation and distortion measurement during welding using optical object grating method, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 7*, Graz 2005, ISBN 3-901351-99-X, Technische Universität Graz
- [Bra03] Brand, M., Optimisation of welding distortions by means of numerical welding simulation, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Jahresbericht 2003
- [Bra04] Brand, M., Genauere Schweißverzugssimulation durch verbesserte Temperaturfeldberechnung, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Jahresbericht 2004
- [Car88] Carmet, A., Debiez, S., Deveaux, J., Pont, D., Leblond, J. B., Experimental and Numerical Study of Residual Stresses and Strains in an Elektron-Beam-Welded Joint, *International Conference on Residual Stresses*, Note N° SIM/CF 88.1027, Nancy 1988
- [Fur99] Furrer, P., Aluminium und Automobil, Herausforderung Aluminium-Industrie, Euroforum- Konferenz, Frankfurt am Main, 11.-12. März 1999
- [Gri00] Grieb, J., Michailov, V., Wohlfahrt, H., Göhler, K. u. Voß, O., Einfluß verschiedener Parameter auf die numerische Schweißsimulation der Fertigung von Tailored Blanks, 18. CAD-FEM Users' Meeting 2000. Internationale FEM – Technologietage, 20-22 September 2000, Friedrichshafen. Vol. 2, 2.15.4
- [Hac04] Hackmair, C., Messung und Simulation von Schweißverzügen an Aluminium-Fahrzeugkomponenten, Dissertation, TU München, Shaker-Verlag, 2004
- [Häu97] Häuser, H., Braun, S., Reitsam, R., Finite Element Simulation of Welding Processes with 5xxx and 6xxx Aluminum Alloys by Taking into Account Effects of Recrystallisation, Precipitation Reversing and Natural Aging, 4<sup>th</sup> Int. Seminar on Numerical Analysis of Weldability, 29. Sept.-1.Oct. 1997, Graz-Seggau, Austria
- [Kar93] Karlsson, L., Thermomechanical finite element models for calculation of residual stresses due to welding, V. Hauk, H.P. Hougardy, E. Macherauch, H.-D. Tietz (Ed.), *Residual Stresses*, DGM Informationsgesellschaft mbH 1993, S. 33-48
- [Krü00] Krüger, U., Untersuchung des Einflusses von Fertigungstoleranzen und Verzug auf die Festigkeitseigenschaften laser-hybrid- und reibrührgeschweißter Verbindungen an hochfesten Al-Legierungen der 5000er und 7000er Serie bis 20mm, Fachausschuss Konstruktion und Berechnung, DVS Düsseldorf, 24. Oktober 2000

- [Leb84] Leblond, J. B., Devaux, J., A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size, *Acta Met.*, 1984, 32, S. 137 - 146
- [Pas01] Pasquale, P., Numerische Simulation schweißtechnischer Fertigungsschritte, Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe, 2001
- [Rad88] Radaj, D., *Wärmewirkungen des Schweißens: Temperaturfeld, Eigenspannungen, Verzug*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1988
- [Rad98] Radaj, D., Häuser, H., Braun, S., Numerische Simulation von Eigenspannungen und Verzug bei Schweißverbindungen aus AlMgSi-Legierungen, *Konstruktion*, 50 (1998) H.7/8
- [Rad99a] Radaj, D., *Schweißprozesssimulation: Grundlagen und Anwendungen*, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 141, Verlag für Schweißen und Verwandte Verfahren, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1999
- [Rad99b] Radaj, D., *Schweißprozesssimulation, Grundlagen und Anwendungen*, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 141, Verlag für Schweißen und Verwandte Verfahren, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1999
- [Rad02] Radaj, D., *Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen: Rechen- und Messverfahren*, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 143, DVS-Verlag, Düsseldorf 2002
- [Si05] Siegele, D., Brand, M., Veneziano, C., Numerische Simulation schweißtechnischer Fertigungsschritte, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Jahresbericht 2005
- [Sud96] Sudnik, W.; Radaj, D.; Erofeew, W., Computerized simulation of laser beam welding, modelling and verification, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 29 (1996), 2811-2817
- [Sud98] Sudnik, W.; Radaj, D.; Erofeew, W., Validation of computerised simulation of welding processes, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 4*, S. 477-493 IOM Communications, London 1998
- [Ven01] Veneziano, C., Burget, W., Sporer, L., Baumann, B., Henn, S., Numerical Simulation Weld Fabrication for a Suspension Component, to be published at 6<sup>th</sup> International Seminar Numerical Analysis of Weldability, October 1-3, 2001, Graz-Seggau, Austria
- [Voß01] Voß, O., *Untersuchung relevanter Einflußgrößen auf die numerische Schweißsimulation*, Dissertation TU Braunschweig, 2001
- [Ven06] Veneziano, C., et al., Numerische Simulation von Verzug und Eigenspannungen geschweißter Komponenten aus Al-Guss und Strangpressprofilen, Schlussbericht zum AiF-Vorhaben 13.716, IWM-Bericht S 6/2006