

Sven Roeren

**Komplexitätsvariable Einflussgrößen
für die bauteilbezogene Struktursimulation
thermischer Fertigungsprozesse**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 203

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2006

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die
der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von
Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem
oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Daten-
verarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugs-
weiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2007

ISBN 978-3-8316-0680-1

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utz.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München.

Mein Dank gilt zunächst den Mitgliedern der Prüfungskommission:

- Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Vorsitzenden der Kommission. Leider beschränkte sich unser gemeinsamer Tätigkeitsbereich am Institut auf einige wenige, jedoch nicht minder angenehme Berührungspunkte.
- Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, meinem Erstprüfer und Doktorvater. Hier ergaben sich in den letzten vier Jahren äußerst viele Berührungspunkte und ich konnte dabei sehr viel von seiner systematischen Herangehensweise an technische Problemstellungen und seiner akribischen Arbeitsmethodik lernen.
- Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Wolfgang Schulz von der Rheinisch-westfälischen Technischen Hochschule in Aachen, meinem Zweitprüfer. Durch unsere äußerst interessant gestaltete gemeinsame Projektarbeit und durch die Übernahme des Koreferats hatte ich die einzigartige Gelegenheit, neben der „ingenieursmäßigen“ Arbeitstechnik Einblicke in die Vorgehensweisen der Physikwissenschaft zu erhalten.

Darüber hinaus möchte ich meinen Dank richten an alle diejenigen, welche es mir (neben den drei bislang namentlich Erwähnten) ermöglicht haben, in den letzten Jahren eine gewisse wissenschaftliche Kreativität zu entwickeln – nichts Anderes ist nach meinem Verständnis die Basis für erfolgreiche Forschungsarbeit. Wissenschaftliche Kreativität entsteht durch Diskussionen, Disput, eigene und fremde Fehler und vor allem die Analyse und die immer wiederkehrende Aufbereitung und Verarbeitung der drei genannten Medien. Ein dabei äußerst wertvoller Mitstreiter war mir über drei Jahre hinweg Dipl.-Ing. Loucas Papadakis, dessen humorvollen Beiträge und grundlagenbasierten (oft sehr ausgereiften) wissenschaftlichen Ansätze ich stets in angenehmer Erinnerung behalten werde.

München, im Januar 2007

Sven Roeren

Simulation ist die Magie der Ingenieure – Möge sie stets der Hellsicht, nie aber als Blendwerk dienen! Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	xi
Verzeichnis der Formelzeichen.....	xiii
Große lateinische Buchstaben	xiii
Kleine lateinische Buchstaben.....	xvi
Große griechische Buchstaben	xviii
Kleine griechische Buchstaben	xix
Abkürzungsverzeichnis.....	xxi
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation der Arbeit	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Stand der Forschung	5
1.3.1 Allgemeines	5
1.3.2 Grundlagen der thermischen Struktursimulation.....	7
1.3.2.1 Wärmetransportphänomene bei kontinuierlichen Körpern.....	7
1.3.2.2 Thermisch induzierte strukturelle Effekte	15
1.3.2.3 FEM-Berechnung thermischer und thermomechanischer Effekte	20
1.3.3 Bauteilbezogene Simulation thermischer Fertigungsprozesse	25
1.3.3.1 Allgemeines	25

1.3.3.2	Simulation des Schweißverzugs und der -eigenspannungen.....	26
1.3.3.3	Simulation der thermischen Beeinträchtigung bei spanenden Fertigungsprozessen	31
1.3.4	Ansätze zur integrativen Betrachtung der thermischen Struktursimulation	34
1.3.5	Zusammenfassung und Bewertung des aktuellen Forschungsstands.....	37
1.4	Vorgehensweise.....	39
2	Einflussgrößen für die Simulation	41
2.1	Allgemeines.....	41
2.2	Das geometrische System.....	42
2.2.1	Allgemeines.....	42
2.2.2	FEM-Bauteilbeschreibung.....	43
2.2.3	Verhalten des FEM-Modells	45
2.3	Das mechanische System	47
2.3.1	Allgemeines.....	47
2.3.2	Entwicklung von Reaktionskräften	47
2.3.3	Mechanisches Werkstoffverhalten	49
2.4	Das thermomechanische System	52
2.4.1	Allgemeines.....	52
2.4.2	Temperaturabhängige mechanische Einflussgrößen	52
2.4.3	Thermisch induzierte Strukturantwort.....	53
2.5	Das Wärme-Struktureigenschafts-System.....	58
2.5.1	Allgemeines.....	58

2.5.2	Bewegte Wärmequellen.....	59
2.5.3	Modellierung des Wärmehaushalts innerhalb des Bauteils	61
2.6	Das Prozess-Struktureigenschafts-System	63
2.6.1	Allgemeines	63
2.6.2	Prozess-Struktur-Wechselwirkungen	64
2.6.3	Prozessimmanente Instabilitäten	66
2.7	Nutzen der systematischen Untergliederung von Einflussgrößen	68
3	Differenzierung von Einflussgrößen.....	71
3.1	Allgemeines	71
3.2	Abbildung des instationären Verhaltens thermischer Fertigungsprozesse	74
3.3	Flexibilisierung mechanischer und thermischer Randbedingungen	79
3.4	Modellierung des metallurgischen Werkstoffverhaltens bei Stahlwerkstoffen.....	84
3.5	Integration von Vorbelastungen	97
3.6	Systematische Einordnung der Differenzierungsmaßnahmen.....	100
4	Reduktion von Einflussgrößen.....	103
4.1	Allgemeines	103
4.2	Parametrisierung von Wärmequellenmodellen	106
4.3	Alternative Modelle zur Implementierung der Belastung.....	117
4.4	Vereinfachung der mechanischen und der thermischen Randbedingungen	122
4.5	Geometrische und numerische Reduktionsmaßnahmen.....	124
4.6	Systematische Einordnung der Reduktionsmaßnahmen	131

5	Anwendungsbeispiele.....	133
5.1	Allgemeines.....	133
5.2	Schweißverbindung zweier Stahlbleche im Überlapstoß.....	134
5.3	Energieeintrag in eine komplexe geschlossene Blechprofilstruktur	139
5.4	Vergleichende Struktureigenschaftsanalyse für zwei Schweißprozesse an Aluminium-Hohlprofilen	143
5.5	Härteberechnungen an Stahlbauteilen	147
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	152
7	Literaturverzeichnis	157
	Anhang.....	177

1 Einleitung

1.1 Motivation der Arbeit

Der Unterschied zwischen einer Invention und einer Innovation liegt einzig darin, dass letztgenannte die Umsetzung einer neuartigen Idee (Invention) zum Erzielen eines wirtschaftlichen Nutzens beinhaltet (SCHUMPETER 1912). Warum diese sprachliche Unterscheidung durch den gegen Ende des vierten nachchristlichen Jahrhunderts von Augustinus eingeführten Begriff „innovatio“ (lat.: Erneuerung) erforderlich ist, zeigt beispielsweise die Divergenz zwischen der Anzahl der in Deutschland angemeldeten Patente und deren industrieller Umsetzung. Während die Zahl der Patentanmeldungen seit Jahren steigt, kann nur in den seltensten Fällen durch eine daraus hervorgehende Innovation der Ertrag eines Unternehmens gesteigert werden (DPMA 2006, BERGER 2006). Auf eine Diskussion über die politisch und gesellschaftlich weit reichenden Ursachen der beschriebenen Diskrepanz wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet. Dem Leser soll allerdings durch diese Begriffstrennung die immense Bedeutung einer Übertragbarkeit von Inventionen im technischen Bereich auf einen industriellen Einsatz nahe gebracht werden. Auf dem Gebiet der produktionstechnischen Forschung besteht vor diesem Hintergrund eine wesentliche Zielsetzung darin, Grundlagen- und Anwendungsforschung zu verzahnen, um die erarbeiteten Ergebnisse in die industrielle Praxis umzusetzen (ZÄH ET AL. 2006).

Rechnergestützte Modellbildungen und Simulationen existieren seit den frühen 80er Jahren des letzten Jahrhunderts und werden als innovative Methoden im Bereich des Ingenieurwesens angesehen. Durch eine Verkürzung der Produktentstehungsphase und durch eine Verringerung der Anzahl aufwändiger Versuchsreihen können somit wirtschaftliche Vorteile geschaffen werden (ZIENKIEWICZ 1984). Gemäß der oben dargestellten Begriffsdefinition ist dieser wirtschaftliche Vorteil die Voraussetzung für eine Innovation. Bei der Anwendung von Simulationen ist die Grenze zwischen den Bereichen Invention und Innovation allerdings nicht eindeutig definierbar. Meist läuft einem langfristigen wirtschaftlichen Vorteil auf der Basis der dargestellten Aspekte ein erheblicher Investitionsaufwand voraus. Dieser umfasst neben den Kosten für Rechner- und Softwarekomponenten vor allem die Bereitstellung qualifizierter Mitarbeiter zur Umsetzung der Simulationsaufgaben. Überdies muss die Gültigkeit der eingesetzten Methoden vorausgesetzt werden können, um die Berechnungsergebnisse in die

Auslegung von Produkten und Prozessen einfließen zu lassen. Daher ist es notwendig, systematische Untersuchungen hinsichtlich der Einflussgrößen und der Wirkzusammenhänge von Simulationsmodellen durchzuführen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse müssen dann im Hinblick auf Ergebnisgenauigkeit und Anwendbarkeit eingeordnet werden.

Die Anwendungsreife der Methoden auf dem Gebiet der bauteilbezogenen Simulation (d.h. das Bauteil ist das betrachtete System, seine Oberfläche die Systemgrenze) von Fertigungsprozessen ist nach dem derzeitigen Stand der Forschung und Technik differenziert zu betrachten. So existieren beispielsweise im Bereich der Umformsimulation Vorgehensweisen, welche als feste Bestandteile in der industriellen Anwendung zur frühzeitigen Auslegung von Umformprozessen etabliert sind (LUBESEDER 2002). Die Schweißsimulation dagegen ist von einem wirtschaftlichen industriellen Einsatz derzeit weit entfernt (DAVÉ ET AL. 2004). Durch die komplexen physikalischen Phänomene beim Schweißen ist die rechnergestützte Beschreibung entweder nur physikalisch stark reduziert sowie mathematisch abstrahiert umsetzbar oder die Effizienz der Anwendung leidet unter überproportionalem Modellierungsaufwand und sehr langen Berechnungszeiten. In der produzierenden Industrie ist das Interesse an rechnergestützten Werkzeugen zur Vorhersage von Schweißphänomenen bzw. zur Absicherung des Prozessergebnisses bei der Herstellung von Bauteilen und -gruppen dennoch sehr hoch. Dies ist begründet durch die sich dadurch ergebenden Möglichkeiten wie etwa eine optimierte Prozessauslegung, eine frühe Beschreibung der Nahtstruktur und die Kenntnis über das Verzugsverhalten. Doch das beschriebene Dilemma zwischen Effizienz in der Anwendung und Darstellungstiefe der physikalischen Phänomene verhindert bislang einen produktiven Einsatz (ZAEH ET AL. 2004 A). Es existieren allerdings bereits einige Softwarelösungen, welche eine industrielle Anwendung prinzipiell ermöglichen. Die Gültigkeit der implementierten Modelle ist jedoch auf spezifische Anwendungsfälle begrenzt. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist darüber hinaus aufgrund starker Abstraktionen und restriktiver Annahmen zur Vereinfachung der modellierten Szenarien zumindest zu hinterfragen.

Die Motivation der vorliegenden Arbeit ergibt sich aus der Diskrepanz zwischen der Vielfalt an Lösungsmöglichkeiten zur bauteilbezogenen Simulation thermischer Fertigungsprozesse und dem Ausbleiben der wirtschaftlichen Umsetzung derselben für wesentliche Bereiche, etwa der Schweißsimulation. Die im Folgenden dargestellten wissenschaftlichen Inhalte sollen Impulse für einen innovativen Einsatz der thermischen Struktursimulation im Sinne der zuvor erläuterten Be-

deutung geben. Diese Inhalte wurden im Rahmen des Teilprojekts B4 „Simulation des hybriden, bifokalen Laserstrahlschweißens“ des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG geförderten Sonderforschungsbereiches SFB TRANSREGIO 10 sowie im Projekt P 567 „Simulationsgestützte Optimierung der Prozesskette Umformen – Laserstrahlschweißen“ der Forschungsvereinigung Stahlanwendungen e.V. FOSTA erarbeitet. Weitere Aspekte gründen auf der Vorbereitung des von der DFG finanzierten Projekts „Untersuchungen zur numerischen Simulation des Schleifhärteprozesses zur Berechnung von Temperaturverteilung, Gefügeumwandlung und Bauteilverzug“ und des von der FOSTA geförderten Projekts „Untersuchung der strukturellen Stabilität von Modellen zur Schweißverzugssimulation von Stahlwerkstoffen“.

1.2 Zielsetzung

Als Ziel der vorliegenden Arbeit soll die Anwendbarkeit der bauteilbezogenen Simulation thermischer Fertigungsprozesse verbessert werden. Zum einen wird dieses Ziel durch die Entwicklung neuer Vorgehensweisen, zum anderen durch die systematische Einordnung und Bewertung bestehender Methoden erreicht. Dabei werden gemäß der Erwartung an die Aussagekraft der Simulationsergebnisse unterschiedliche Komplexitätsgrade der Berechnungen untersucht. Neben Strategien zur Reduktion von Modellen im Hinblick auf eine Erhöhung der Effizienz werden auch Möglichkeiten für eine differenzierte Betrachtung einzelner, für den Einzelfall eventuell charakteristischer Phänomene dargestellt. Somit umfasst der Terminus „Anwendbarkeit“ in diesem Zusammenhang nicht nur eine Verbesserung der Modellierungs- und Berechnungseffizienz, sondern auch eine Erhöhung der Ergebnisgenauigkeit. Ein Mangel an Letztgenannter ist ein wesentliches und nachvollziehbares Argument der Skeptiker im Hinblick auf einen wirtschaftlichen Einsatz der Simulation. Kann dagegen eine effiziente, auf eine spezifische Simulationsaufgabe abgestimmte Vorgehensweise umgesetzt werden, überwiegt langfristig der wirtschaftliche Vorteil. Die Zielsetzung der Struktursimulation von Fertigungsprozessen ist es, die makroskopischen Auswirkungen der Fertigungsprozesse auf dem bearbeiteten Werkstück zu ermitteln. Im Rahmen der bauteilbezogenen Struktursimulation werden die Einwirkmechanismen auf das Werkstück unabhängig vom betrachteten Fertigungsprozess modelliert und zumeist abstrahiert als Eingangsgröße in die Berechnung der zu ermittelnden Zielgröße implementiert. Um die für den Anwender notwendige Effizienz der Berechnungen auch bei einer hohen Komplexität der Bauteilmodelle gewährleisten zu können, werden hierfür physikalisch reduzierte Berechnungsmodelle auf

der Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) verwendet. Die thermische Struktursimulation erlaubt es, mit Hilfe definierter Wärmeprofile als Eingangsgröße und unter gegebenen Randbedingungen die Auswirkungen thermischer Beanspruchung auf Werkstücke zu berechnen.

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und der systematischen Bewertung allgemein gültiger Methoden zur bauteilbezogenen Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse. Potenzielle Anwendungsgebiete umfassen sämtliche Verfahren, welche thermische Belastungen auf der bearbeiteten Struktur hervorrufen. Wesentliches Augenmerk ist auf die systematische Einordnung sämtlicher Einflussgrößen der thermischen Struktursimulation gelegt. Nur eine möglichst genaue Kenntnis der unterschiedlichen Einflussfaktoren erlaubt es, spezifisch ausgerichtete Modellierungsmethoden anzuwenden. Die Auswahl dieser Methoden wird vor allem durch die Anforderungen an die Simulationsergebnisse bezüglich Aussagekraft sowie an die Modellierungs- und die Berechnungseffizienz beeinflusst. Es sollen daher unterschiedliche Modellierungsmethoden zur thermischen Struktursimulation untersucht und abschließend anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele exemplarisch eingesetzt werden. Dabei wird die *Struktursimulation* als Mittel gesehen, um das zeitliche Verhalten einer beanspruchten Struktur abzubilden. *Thermische Struktursimulation* bezieht sich dabei auf Wärmebelastungen. Die *thermische Simulation* dient der Ermittlung des instationären Temperaturfelds in einem kontinuierlichen Festkörper als Konsequenz eines Wärmeeintrags. *Thermische Fertigungsprozesse* werden im Weiteren als Verfahren zur Bearbeitung von Bauteilen, bei welchen als Haupt- oder Nebeneffekt Energie in Form von Wärme in die bearbeitete Struktur eingeleitet wird, angesehen. Der Terminus *bauteilbezogene Struktursimulation* umfasst gleichermaßen die Modellierung der Bearbeitung von Werkstücken und Halbzeugen. Es soll mit der durchgängigen Bezeichnung „Bauteil“ vor allem ein Bezug zum fertigen Produkt nach der Herstellungsphase geschaffen werden.

Die Industrie hat bereits das große wirtschaftliche Potenzial dieser Zielsetzung erkannt. Daher konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf die kurz- und mittelfristige Anwendbarkeit der erarbeiteten Vorgehensweisen im Bereich der thermischen Struktursimulation. Dies wird anhand industriell relevanter Beispiele gezeigt.