

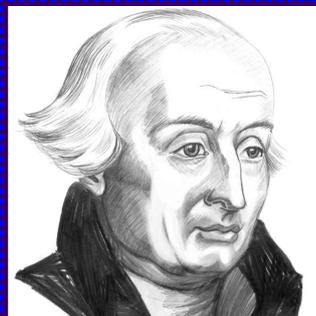
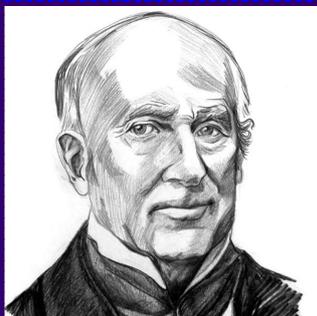
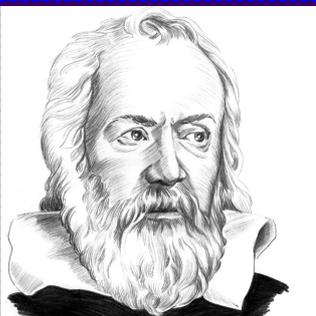
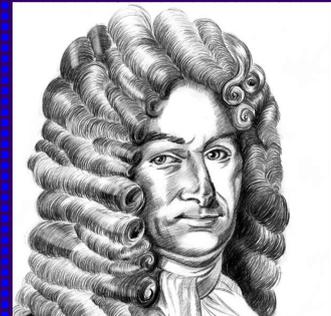
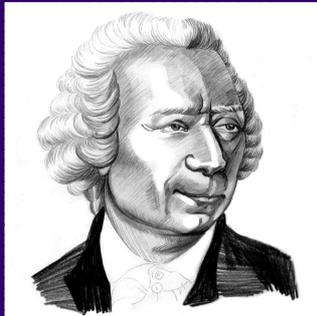
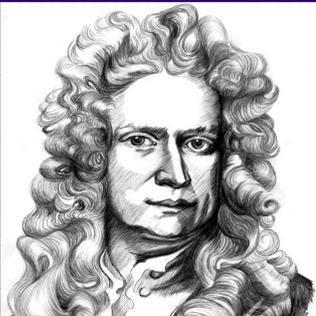
Simulation of Manufacturing Sequences of Functionally Graded Structures

Tobias Gleim

2016 - 4



Publication Series
Institute of Mechanics and Dynamics
Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Kuhl
University of Kassel



Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag behandelt die numerische Simulation von Mehrfeldproblemen im Kontext von funktional gradierten Werkstoffen. Im Rahmen des SFB/TR TRR30 wurden funktional gradierte Werkstoffe untersucht, die in einer integrierten Prozesskette hergestellt worden sind. Diese Prozesskette untergliedert sich in die induktive Erwärmung, die Umformung und die gleichzeitige Kühlung einer Stahlwelle sowie das gezielte Abkühlen in lokal definierten Bereichen mit einem Hochdruckluftstrom. Das gezielte lokale Aufheizen und Abkühlen in festdefinierten Zeitintervallen kontrolliert dabei die räumliche Gitterstruktur und führt folglich dabei zu speziellen anwendungsorientierten Eigenschaften im Stahl. Diese Eigenschaften werden funktionsabhängig entschieden und können sehr genau lokal zugeführt werden.

Um diese gezielten Eigenschaften nicht immer wieder erneut experimentell untersuchen zu müssen, sollen im Vorlauf diese Eigenschaften in einer Simulation untersucht werden. An dieser Stelle ist es von entscheidender Bedeutung, dass hochgenaue Simulationen im Raum und in der Zeit durchgeführt werden. Um dabei auch wirtschaftlich effizient und weiterhin hochgenau zu bleiben, müssen verschiedene Techniken untersucht werden. In dieser Arbeit werden dahingegen für den ersten Schritt, die induktive Erwärmung, und für den dritten Schritt der Prozesskette, die Abkühlung, entsprechende Modelle und Methoden entwickelt, welche im Detail studiert und untersucht werden.

Durch die nichtlinearen Materialeigenschaften der Stahlwelle müssen entsprechende phänomenologische Materialmodelle herangezogen werden. Im Kontext der induktiven Erwärmung führen diese nichtlinearen Materialeigenschaften zu einer starken Kopplung des elektromagnetischen Feldes mit dem thermischen Feld. Mit Hilfe einer allgemeinen Herleitung der MAXWELL Gleichungen und der thermischen Gleichung kann das Mehrfeld-Anfangsrandwertproblem formuliert werden, sodass sämtliche Interaktionen der beteiligten Felder in den Bilanzgleichungen und den konstitutiven Gesetzen berücksichtigt werden können. In Vorbereitung auf die numerische Lösung des Mehrfeld-Anfangsrandwertproblems werden die Bilanzen der starken Form in eine räumlich schwache Form überführt sowie aufgrund der Nichtlinearität bezüglich der Feldvariablen linearisiert. Die numerische Lösung dieser Problemstellung wird mit der Finite-Elemente-Methode, verschiedenen Zeitintegrationsverfahren und der NEWTON-RAPHSON-Iteration bewerkstelligt. Die Finite-Elemente-Diskretisierung in Tensornotation erlaubt die standardisierte Elementformulierung für ein-, zwei- und dreidimensionaler Kontinua. Mittels einer p -Version der Finite-Elemente-Methode können unter der Berücksichtigung klassischer LAGRANGE-Ansatzfunktionen beliebig dimensionale und unterschiedliche Polynomgrade der einzelnen Bilanzgleichungen des allgemeinen Mehrfeldproblems gewählt werden. Im Rahmen der Zeitintegration des nichtlinearen Anfangsrandwertproblems erster und zweiter Ordnung werden dabei das generalisierte NEWMARK- α Verfahren, die Familie der RUNGE-KUTTA Verfahren sowie das diskontinuierliche und kontinuierliche GALERKIN Zeitintegrationsverfahren vorgestellt. Alle Zeitintegrationsverfahren haben dabei verschiedene Stärken, welche an den jeweiligen Beispielen analysiert und unter-

sucht werden. Für die Abschätzung des Fehlers werden entsprechende allgemeine Fehlerschätzer und spezielle Fehlerschätzer der einzelnen Verfahrensklassen vorgestellt und untersucht. Diese Fehlerschätzer bilden die Grundlage, entsprechend der RUNGE-KUTTA und GALERKIN Zeitintegrationsverfahren, hochgenaue Simulationsergebnisse zu erzielen. Zusätzlich kann unter Verwendung verschiedener adaptiver Techniken die Zeitschrittweite angepasst werden, um neben der hohen Genauigkeit auch effizient zu bleiben. Durch die sequentielle Umsetzung der räumlichen und zeitlichen Integration können die numerischen Verfahren modular abgerufen werden. Dafür werden Algorithmenschemen vorgestellt, die eine große Bandbreite von Element-, Modell- und Materialroutinen sowie unterschiedliche Zeitintegrationsverfahren zulassen.

Im Zuge der induktiven Erwärmung werden ein monolithischer Ansatz und verschiedene partitionierte Ansätze mit einem linearen, wie auch einem nichtlinearen Modell vorgestellt und untersucht. Der Vorteil hierbei ist die Vergleichbarkeit in Bezug auf Robustheit, Genauigkeit und Effizienz. Alle Parameter müssen im Einklang stehen, um realitätsnahe Simulationen durchführen zu können. Im Rahmen der Abkühlung wird ein rein partitionierter Ansatz gewählt. Dabei wird zusätzlich zum thermischen Feld auch das Fluid-Feld, welches in zwei unterschiedlichen Programmen gelöst wird und in zwei verschiedenen Programmiersprachen mit unterschiedlichen räumlichen Diskretisierungsmethoden erstellt wurde, mittels einer zusätzlichen Bibliothek (CTL - Component Template Library) und einem Masterprogramm gekoppelt. Die Wärmeleitungsgleichung wird mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode gelöst und das Finite-Volumen-Verfahren wird für die kompressiblen NAVIER-STOKES-Gleichungen angewendet. Diese Bibliothek bietet den Vorteil, die verschiedenen Programme auf verschiedenen Computern ausführen zu lassen. Durch den Einsatz des Masterprogramms können die zwei verschiedenen Programmecodes unter der Verwendung verschiedener Kopplungsstrategien und deren unterschiedlicher Eigenschaften miteinander verbunden werden. Abhängig von den gewünschten Eigenschaften und Zielen kann dafür ein Block-JACOBI-Verfahren oder ein Block-GAUSS-SEIDEL-Verfahren herangezogen werden. Während bei der induktiven Erwärmung das Temperaturfeld sowie die elektromagnetischen Felder in einem volumengekoppelten Verfahren gelöst werden, wird hingegen bei der thermischen Fluid-Struktur-Interaktion eine Randkopplung zwischen dem thermischen Feld und dem Fluid-Feld durchgeführt.

Wie bereits in der Literatur bekannt, benötigen gerade Fluid-Struktur-Interaktionsprobleme, die partitioniert untersucht werden, sehr viele Fixpunktiterationen pro Zeitschritt. Dies führt dazu, dass außergewöhnlich viel Rechenzeit benötigt wird. Hierfür werden verschiedene Relaxationsverfahren, wie auch Extrapolationsverfahren im Rahmen einer reinen thermischen Fluid-Struktur-Interaktion zur Reduzierung der Fixpunktiterationen pro Zeitschritt untersucht. Die Effekte beider Techniken werden sowohl separat als auch gekoppelt analysiert. Um gleichzeitig hochgenau und adaptiv in der Zeit zu rechnen, werden alle vorgestellten Extrapolationsverfahren in einer adaptiven Variante hergeleitet, vorgestellt und untersucht. Diese allgemeine Formulierung bietet die Möglichkeit, die verschiedenen Extrapolationsverfahren unabhängig von einem Zeitintegrationsverfahren in einen bestehenden Code zu implementieren.

Anhand verschiedener Beispiele werden die eingeführten numerischen Verfahren jeweils für die Einzelfelder (elektrisch, magnetisch und thermisch), wie auch für das Mehrfeldproblem der induktiven Erwärmung untersucht und analysiert. Kopplungsstrategien für die induktive Erwärmung sowie für die thermische Fluid-Struktur-Interaktion werden im De-

tail studiert. In beiden Teilen der Prozesskette steht dabei die hohe Genauigkeit im Raum mit Hilfe der p -Finite-Elemente-Methode und in der Zeit mit Hilfe der RUNGE-KUTTA und der GALERKIN Zeitintegrationsverfahren sowie die effiziente Lösung unter Berücksichtigung spezieller Fehlerschätzer und adaptiver Zeitschrittsteuerungen im Vordergrund.