

Virtuelle Fertigungsprozessabsicherung und -optimierung Einsatzpotentiale numerischer Berechnungsmethoden im Rahmen der Digitalen Fabrik

Dissertation

zur Erlangung des Grades
eines Doktor-Ingenieurs
vorgelegt von

Dipl.-Ing. Oliver Kurz
aus Stuttgart

genehmigt von der
Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

2006

Fakultätsdekan: Prof. Dr.-Ing. Norbert Müller

Hauptberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Karl Roll

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Mai 2006

Innovationen der Fabrikplanung und -organisation

Band 14

Oliver Kurz

**Virtuelle Fertigungsprozessabsicherung und -optimierung
Einsatzpotentiale numerischer Berechnungsmethoden im
Rahmen der Digitalen Fabrik**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 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.

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

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5340-8

ISBN-13: 978-3-8322-5340-0

ISSN 1615-5211

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Nur die erfolgreiche Gestaltung und Weiterentwicklung industrieller Wertschöpfung kann auf Dauer unseren Lebensstandard und die Errungenschaften der sozialen Marktwirtschaft absichern. Die Produktion bildet nach wie vor das Rückgrat einer modernen, im globalen Wettbewerb stehenden Industrie-, Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft. Umfassendes Wissen und stetig neue Erkenntnisse auf den Gebieten der Fabrikplanung und Produktionsorganisation sind existentiell notwendig.

Die unternehmerische Bedeutung der Produktionsplanung ist im gleichen Maße gestiegen, wie sich die Innovationszyklen von Produkten, Fertigungs- und Logistiksystemen sowie der Arbeitsorganisation verkürzt haben. Um die vorhandene Marktposition zu festigen oder um Wettbewerbsvorteile zu erlangen, muß jede Unternehmensleitung neben dem Produkt und der Technologie auch die Produktionsstrukturen ständig analysieren, sie rechtzeitig an die zu erwartenden Marktentwicklungen anpassen und gegebenenfalls erneuern.

Die erhöhten Ansprüche an die Gestaltung und Wandlungsfähigkeit von Produktionsstrukturen im turbulenten Umfeld erfordern ein effizientes Projektmanagement und eine durchgehende rechnergestützte Planungsunterstützung. In der vorliegenden Reihe – Innovationen der Fabrikplanung und -organisation – sollen neue Methoden und Instrumente zur Planung und Optimierung von Produktionssystemen und -abläufen einer breiten Leserschaft in verständlicher Form vorgestellt werden. Es sind Forschungsergebnisse die häufig in enger Zusammenarbeit mit der Industrie am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der Technischen Universität Clausthal im Bereich Anlagenprojektierung und Materialflußlogistik entstanden sind.

Ein gemeinsamer systemtechnischer Ansatz kennzeichnet die Fachgebiete Anlagenplanung und Logistik, deren technische, informationstechnische, organisatorische und wirtschaftliche Fragestellungen ganzheitlich und zukunftsweisend zu beantworten sind. Die angestrebten Lösungsstrategien sind im Rahmen des gesamten Produkt- und Produktionsentstehungsprozesses zu sehen und beinhalten sowohl eine theoretische, planerische und simulierende Seite als auch die konkrete Ausgestaltung von Prozessketten, Organisationsformen und Abläufen.

In der Vergangenheit wurden Produktionsstrategien, Programme und Teilebedarfe nicht selten aufgrund persönlicher Einschätzung und Erfahrung festgelegt. Heute sind mit Hilfe mathematischer, wissensbasierter Modelle hinreichende Prognosen und Szenarien zu entwickeln und das Komplexitätsmanagement muß bereits bei der Entwicklung variantenreicher Serienprodukte einsetzen. So können z.B. Agentensysteme schon vorausschauend bei der Analyse von Verbindungen möglicher Module helfen.

Früher wurden die darauf aufbauenden Produktionsstrukturen in der Regel nur statisch geplant und für dynamische Betrachtungen allenfalls Mittelwerte herangezogen. Um in Zukunft falsche oder überhöhte Investitionen und unnötige Folgekosten zu vermeiden, sind bestehende und zu planende Anlagen umfassend dynamisch zu analysieren und optimieren. Hierfür bietet sich die inzwischen bis zur Virtuellen Realität entwickelte Simulationstechnik an. Mit ihr kann der Planungsprozess entscheidend beschleunigt und verbessert sowie die Planungsqualität und -sicherheit erheblich erhöht werden.

Nicht zuletzt gilt es, die in den Produktions- und Logistiksystemen arbeitenden Menschen wieder stärker in den Mittelpunkt zu stellen, ihre Bedürfnisse zu respektieren und ihnen genügend Raum für Engagement und Verantwortung mit effizienten Formen der Arbeitsorganisation zu geben, die Verschwendung vermeiden und eine stetige Steigerung des Produktionsflusses ermöglichen.

Clausthal, im Juni 2006

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand im Center Produktions- und Werkstofftechnik der Direktion Produktionsplanung der Mercedes Car Group der DaimlerChrysler AG im Werk Sindelfingen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht, dem Inhaber des Lehrstuhls für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, Abteilung Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik, der Technischen Universität Clausthal-Zellerfeld, für die wissenschaftliche Betreuung und die hilfreiche Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit. Die fachlichen Diskussionen am Lehrstuhl für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit haben einen großen Anteil am Erfolg dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing Karl Roll, dem Leiter des Teams Simulation Ur- und Umformen der Produktionsplanung der Mercedes Car Group, danke ich für die Übernahme der Mitberichterstattung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Paul Steinmann, dem Inhaber des Lehrstuhls für Technische Mechanik der Technischen Universität Kaiserslautern und Herrn Dipl.-tec. Math. Gunnar Possart danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit und die vielen interessanten Diskussionen, die zum Erfolg der Implementierung der konstitutiven Materialmodelle beigetragen haben.

Herrn Dipl. Phys. Frank Pfluger, dem Leiter des Teams Simulationstechnik Produktionsprozesse der Produktionsplanung der Mercedes Car Group der DaimlerChrysler AG, danke ich ganz herzlich für das entgegengebrachte Vertrauen, die persönliche Förderung und die intensive Unterstützung.

Mein Dank gilt ferner den hilfsbereiten Mitarbeitern des Teams Simulationstechnik Produktionsprozesse, die immer mit Rat und Tat zur Seite standen. Besonders erwähnen möchte ich Herrn Dr.-Ing. Matthias Schmidt, der mich bei allen fachlichen Fragen unterstützt und immer ein offenes Ohr für auftretende Probleme hatte. Danken möchte ich auch Herrn Dipl. Ing. Thomas Hielscher und Herrn Dipl. Ing. (FH) Michael Rauscher für die versuchstechnische Unterstützung und die anregenden Diskussionen.

Nicht zuletzt danke ich meinen Freunden, meiner Freundin, die mich bei der Durchführung dieser Arbeit bestärkt haben.

Übersicht

Digitale Fabrik, Fertigungsprozesssimulation, Numerische Berechnungsmethoden, Kleben, Elektrotauchlackierung

Virtuelle Fertigungsprozessabsicherung und -optimierung - Einsatzpotentiale numerischer Berechnungsmethoden im Rahmen der Digitalen Fabrik

In vorliegender Arbeit wurden zwei Berechnungsmethoden zur Simulation von Fertigungsprozessen im Produktentstehungsprozess von Fahrzeugen entwickelt und validiert. Diese können einen weiteren Beitrag zur Umsetzung des Ansatzes der Digitalen Fabrik in der Produktionsplanung liefern. Die Anwendung digitaler Methoden und Modelle auf alle Bereiche der Produkt- und Fertigungsprozessentwicklung rückt damit einen Schritt näher.

Beim ersten untersuchten Fertigungsprozess handelte es sich um das Fügeverhalten von PUR-Klebstoffen bei der Montage von Großmodulen. Beim Zweiten um die Berechnung der Schichtdickenverteilung auf einer Rohkarosserie bei der Elektrotauchlackierung.

In beiden Fällen wurden Versuchsreihen definiert, um ein grundlegendes Verständnis des physikalischen Verhaltens der am Fertigungsprozess beteiligten Materialien zu erhalten. Darauf aufbauend wurden Materialgesetze formuliert, in ein kommerzielles FE-Programm implementiert und die Berechnungsergebnisse anhand der Versuchsdaten validiert.

Die beiden Berechnungsmethoden können bei deren Integration in den Produktentstehungsprozess in ihrem gegenwärtigen Entwicklungsstand bereits einen wesentlichen Beitrag bei der Gestaltung und Optimierung des jeweiligen Fertigungsprozesses liefern. Dadurch wird eine neue Planungsmethodik umsetzbar. In Zukunft wird es mit Hilfe dieser und anderer numerischer Berechnungsmethoden möglich sein, eine Vielzahl an Fertigungstechnologien zu einem sehr frühen Zeitpunkt in der Planungsphase abzusichern und zu optimieren. Die daraus entstehenden positiven Effekte wie zum Beispiel der Bewältigung einer größeren Variantenvielfalt bei gleichzeitig verkürzter Planungszeit wurden aufgezeigt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
1 Einleitung	1
2 Stand der Digitalen Fabrik und der Fertigungsprozesssimulation	4
2.1 Problemstellung.....	4
2.2 Definitionen und Ziele der Digitalen Fabrik.....	6
2.3 Simulationsmethoden der Digitalen Fabrik.....	8
2.4 Fertigungsprozesssimulation am Beispiel der Blechumformung.....	8
2.5 Programme zur numerischen Berechnung von Fertigungsprozessen	10
2.6 Vorgehensweise bei der Fertigungsprozesssimulation mit numerischen Berechnungsmethoden	12
3 Ziel der Arbeit	13
3.1 Prozesssimulation in der Endmontage - Kleben Dachmodul.....	13
3.2 Prozesssimulation in der Lackierung - Elektrotauchlackierung.....	14
4 Grundlagen numerischer Berechnungsmethoden	16
4.1 Überblick über die numerischen Berechnungsmethoden	16
4.2 Finite Element Methode (FEM)	18
4.2.1 Mechanische Grundgleichungen.....	18
4.2.2 Thermische Grundgleichungen.....	20
4.2.3 Anwendung der FE-Methode am Beispiel der eindimensionalen Laplace- Gleichung.....	20
4.3 Randelementmethode (REM).....	25
4.3.1 Anwendung der RE-Methode am Beispiel der eindimensionalen Laplace- Gleichung.....	26

5	Kleben in der Automobilindustrie	31
5.1	Kleben als Fügetechnik der Zukunft	31
5.2	Lebensabschnitte eines Polyurethanklebstoffs während der Produktentstehung.....	31
5.3	Beschreibung der Fließeigenschaften.....	33
5.4	Beschreibung des Versuchs zur Bestimmung des Fügeverhaltens	36
5.5	Methoden zur Bestimmung der Materialparameter	37
5.5.1	Direkte Bestimmung der Materialparameter.....	37
5.5.2	Bestimmung der Materialparameter innerhalb eines Optimierungsprozesses.....	38
5.5.3	Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse des Versuchs zur Bestimmung des Fügeverhaltens	39
5.6	Berechnung eines komplexen Fügevorgangs in der Automobilmontage – Kleben Dachmodul	40
5.6.1	Beschreibung des Montagevorgangs	40
5.6.2	Berechnungsmodelle und Simulationsdurchführung.....	40
5.6.3	Berechnungsergebnisse.....	41
5.6.3.1	Vergleich der Ergebnisse mit und ohne zusätzliche Abstützung am hinteren Querträger.....	41
5.6.3.2	Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse am vorderen Querträger.....	42
5.7	Fazit aus der Fertigungsprozesssimulation PUR-Kleben	43
6	Elektrotauchlackierung	45
6.1	Anodische/Kathodische Elektrotauchlackierung	45
6.1.1	Lackkomponenten	46
6.1.2	Funktionsweise des Abscheidemechanismus	47
6.1.3	Transportvorgänge in der Diffusionsgrenzschicht.....	49
6.1.4	Bildungsmechanismus einer alkalischen Grenzschicht.....	50
6.1.5	Neutralisation und Koagulation der gelösten Harze in der Grenzschicht	52

6.2	Mathematische Modelle zur Beschreibung des Schichtwachstums	54
6.2.1	Schichtwachstum bei konstantem Strom	54
6.2.2	Schichtwachstum bei konstanter Spannung.....	56
6.2.3	Schichtwachstum bei konstanter Spannung unter Ausbildung einer maximalen Schichtdicke	58
6.3	Nichtohmsche Leitung der Schicht	60
6.4	Charakterisierung der Umgriffseigenschaften	60
6.5	Implementierung eines Schichtbildungsmodells	61
6.5.1	Grundlagen der Potentialtheorie	61
6.5.2	Numerischer Ansatz zur Lösung des Randwertproblems	63
6.6	Versuche zur Bestimmung der konstitutiven Zusammenhänge	67
6.6.1	Versuchsaufbau	67
6.6.2	Materialien und Versuchsdurchführung	68
6.6.3	Strategie zur Auswertung der experimentell ermittelten Ergebnisse	69
6.6.4	Experimentelle Ergebnisse der Einzelblechversuche.....	72
6.6.5	Experimentelle Ergebnisse der Testboxversuche	78
6.7	Bestimmung der konstitutiven Zusammenhänge.....	81
6.7.1	Konstitutiver Zusammenhang für das Schichtwachstum	81
6.7.2	Konstitutive Zusammenhänge für das Widerstandswachstum	82
6.7.2.1	Ansatz I.....	83
6.7.2.2	Ansatz II.....	85
6.7.2.3	Ansatz III.....	86
6.8	Vergleich der Ergebnisse aus Versuch und Berechnung.....	90
6.8.1	Beispiel 1: Einzelblechversuch	90
6.8.2	Vergleichsrechnung mit der REM.....	94
6.8.3	Beispiel 2: Testboxversuch	96
6.9	Berechnung einer komplexen Karosseriekomponente	99

6.9.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus	99
6.9.2	Berechnungsmodell und Simulationsdurchführung.....	101
6.9.3	Vergleich des experimentellen und numerischen Ergebnis.....	102
6.10	Berechnung einer Fahrzeugkarosserie	108
6.10.1	Beschreibung des Fertigungsprozesses	108
6.10.2	Berechnungsmodell und Simulationsdurchführung.....	108
6.10.3	Berechnungsergebnisse.....	110
6.10.3.1	Vergleich des experimentellen und numerischen Ergebnis	110
6.10.3.2	Vergleich der Berechnungsergebnisse bei Variation des Spannungsprogramms.....	111
6.11	Fazit aus der Fertigungsprozesssimulation Elektrotauchlackierung	113
7	Numerische Berechnungsmethoden als Baustein der Digitalen Fabrik..	115
7.1	Ausgangssituation	115
7.2	Vorgehensweise bei der Methodenentwicklung	115
7.3	Potentiale numerischer Berechnungsmethoden im Produkt- entstehungsprozess	117
8	Zusammenfassung und Ausblick	120
	Literaturverzeichnis	123
	Anhang	131