

Entwicklung einer Gesamtmethodik zur
virtuellen Planung und Bewertung von Prozessketten
am Beispiel des Walzprofilierverfahrens

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Daniel Enge
aus Bramsche

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

Tag der mündlichen Prüfung
07.02.2007

Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr.-Ing. N. Müller
Hauptberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. U. Bracht
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Roll

Innovationen der Fabrikplanung und -organisation

Band 17

Daniel Enge

**Entwicklung einer Gesamtmethodik
zur virtuellen Planung und Bewertung
von Prozessketten am Beispiel des
Walzprofilierverfahrens**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2007

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6019-4

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 Februar 2007

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

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Team Umformtechnik am Forschungszentrum Ulm der DaimlerChrysler AG.

Die wissenschaftliche Betreuung erfolgte durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht, dem Leiter des Instituts für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB) der Technischen Universität Clausthal. Ihm gilt mein besonderer Dank für die Betreuung und für die Unterstützung bei der Entstehung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Roll von der DaimlerChrysler AG danke ich für die Übernahme des Koreferats und das entgegengebrachte Vertrauen.

Für die freundliche und konstruktive Zusammenarbeit danke ich meinen Kollegen der Abteilung RBP/MM sowie den Kollegen des Instituts. Mein besonderer Dank gilt meinen Vorgesetzten Herrn Dr. Tilman Haug, der mir in seiner Abteilung die Möglichkeit zur Anfertigung der Arbeit gab, sowie Herrn Dr. Karl-Heinz Füller für die Themenstellung. Wertvolle Diskussionen und kritische Anregungen zur Aufgabenstellung inspirierten mich bei der Vorgehensweise und animierten mich zum Fortkommen in meiner Arbeit. Weiterhin gilt mein Dank meinen Kollegen Alexander Egidi, Albrecht Krüger-Eppstein, Gazi Askar, Günter Rostek, Oliver Röcker sowie Dr. Khaldoun Alasafi, die mir mit spannenden Fragestellungen als kompetente Diskussionspartner zur Verfügung standen. Aus der Kooperation mit industriellen Partnern konnte ich eine Vielzahl von wichtigen Informationen und Anregungen gewinnen.

Auch den vielen studentischen Hilfskräften und Diplomanden, wie Thomas Ulm, Antonio Suarez, Ewgeni Zagalski, Susanne Nordbruch, Victor Pina Grau, Stefan Möller, Rocío Lobatón Sánchez, Evelyn Herman sowie Minzalya Khalimova gilt mein aufrichtiger Dank. Jeder von ihnen hat einen Teil zum Erfolg dieser Arbeit geleistet.

Danken möchte ich all den Menschen, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit motiviert, in verschiedenster Weise unterstützt und mich durch die Höhen und Tiefen dieser Arbeit begleitet haben. Ich danke ganz besonders meiner Freundin Ulrike Staaden für ihre Geduld und Unterstützung, die sie mir entgegengebracht hat, sowie für ihre Hilfe bei der Durchsicht des Manuskripts. Mein Dank gilt meinen Eltern, die mich auf dem langen Weg bis zur Dissertation begleitet haben. Sie haben die Voraussetzung für meinen bisherigen Lebensweg geschaffen. Ebenso danke ich meinem Freundes- und Familienkreis, der gelegentlich auf meine Anwesenheit verzichten musste.

Kurzfassung

Der Zwang zur Kostenreduktion veranlasst Automobilhersteller, über den Einsatz innovativer Fertigungsverfahren nachzudenken. Das **Walzprofilieren** bietet als kontinuierliches Biegeumformverfahren den Vorteil einer kontinuierlichen Produktionsweise entlang der Bauteillängsachse – ähnlich der natürlichen Fließproduktion in der chemischen Industrie. Die Profiliereinheit kann mit weiteren, auch technologisch neuen Arbeitsstationen, wie z.B. Füge- bzw. Biegestation, als zusammenhängende **Prozesskette** zu einer Profiliereinie aufgebaut werden. Die verfahrensspezifische Anlagen- und Werkzeugflexibilität in Verbindung mit geringen Investitionskosten bildet die Grundlage für eine wirtschaftliche Herstellung von unterschiedlichen Profilquerschnitten und Teilevarianten. Im Gegensatz zum nahezu technisch ausgeschöpften **Tiefziehprozess** besitzt das Walzprofilierverfahren für die Herstellung von Strukturbauteilen der Fahrzeugkarosserie somit erhebliche, bisher noch ungenutzte Rationalisierungspotentiale. Im Rahmen der Arbeit werden diese anhand der Analyse der Prozesskette technologisch und wirtschaftlich untersucht.

In den Prozesskettengedanken integriert werden Ansätze neuer **Produktions- und Logistikkonzepte** zur Herstellung von Baugruppen: Im Mittelpunkt stehen hierbei die gegenseitige Durchdringung und Verkettung von Prozessen der Blechteil- und Rohbaufertigung. Dabei spielt einerseits die Zusammenfassung von Pressen und Profilianlagen innerhalb eines umfassenden Produktionsverbundes zur Erstellung technologieübergreifender Baugruppen, andererseits die Integrationsmöglichkeit von bisher ausgelagerten Prozessen in den Produktionsbereich – wie beispielsweise die Fügetechnik – eine besondere Rolle. Für die **Erfassung der Komplexität** von Prozessketten des Profiliervfahrens und deren Auswertung im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, wird daher eine umfassende, computergestützte Methodik benötigt.

Basierend auf den aus der Literatur bekannten, wissenschaftlichen Studien zur Profilmtechnik wird in der Arbeit eine modular aufgebaute **Gesamtmethodik** entwickelt, mit der Fragestellungen zum Aufbau und Betrieb von Profilianlagen sowie Bauteilstrukturen unter Kostengesichtspunkten analysiert werden können. Als Werkzeug der Digitalen Fabrik umfasst die Methodik vier softwarebasierte Planungs- und Bewertungsmodule, mit deren Hilfe Prozessketten virtuell am Rechner geplant sowie Profilbauteile bewertet werden können. Der Aufbau der erstellten **Programmmodule** orientiert sich an relevanten Themen zum Walzprofilieren wie die Flexibilität von Anlagen und Werkzeugen, die Rüstzeiten bei Produktwechseln, die Integration von Arbeitsstationen, die Konfiguration von Profilianlinien sowie die wirtschaftliche Fertigung von Teilefamilien und Baugruppen. Somit ermöglichen die Module rechnergestützt die Analyse von Prozessparametern und Kosteneinflüssen (ApProx⁺), die Generierung und Konfiguration von Prozessketten (LCProx⁺), die Materialflusssimulation von kompletten Produktionsbereichen (SimProx⁺) sowie die Visualisierung von Produktionsabläufen in Profilianlinien (VisProx⁺).

*„Das Problem zu erkennen ist wichtiger, als die Lösung zu finden.
Denn die genaue Darstellung des Problems
führt fast automatisch zur richtigen Lösung.“*

Albert Einstein

(1879-1955)

Deutscher Physiker und Nobelpreisträger

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Problematik.....	1
1.2. Zielsetzung und Aufgabe	3
1.3. Abgrenzung der Themenstellung.....	5
1.4. Einordnung der Arbeit in den Gesamtkontext	7
2. Ausgangssituation und Themenstellung.....	9
2.1. Entwicklungstendenzen in der Automobilindustrie.....	9
2.2. Marktauswirkungen auf Produkte und Produktionssysteme	11
2.3. Anforderungen an Profilierprozessketten.....	13
2.3.1. Themenstellung der Arbeit	14
2.3.2. Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise	16
3. Virtuelle Planung und Bewertung von Produktionssystemen	18
3.1. Aufgaben von Produktionssystemen	18
3.2. Systemtheoretische Betrachtung von Produktionssystemen	19
3.3. Bewertung von Produktionssystemen.....	21
3.3.1. Bewertungskriterien von Produktionssystemen.....	22
3.3.2. Definitionen von Bewertungskriterien	22
3.4. Planung von Produktionssystemen im Rahmen der Digitalen Fabrik	28
3.5. Virtuelle Planung und Bewertung von Produktionssystemen.....	30
3.6. Handlungsbedarf bei Kosten- und Investitionsrechnung.....	33
3.6.1. Konventionelle Verfahren der Kosten- und Investitionsrechnung	34
3.6.2. Verbesserungspotential: Erweiterter Bewertungsansatz	37
4. Umformtechnische Produktionssysteme für Karosseriestrukturbauteile	40
4.1. Situationsanalyse	41
4.1.1. Einsatz hoch- und höchstfester Stähle	41
4.1.2. Analyse des Produktionsablaufs im Presswerk	42
4.2. Umformverfahren Tiefziehen	44
4.2.1. Einordnung des Tiefziehprozesses als Produktionstyp	45
4.2.2. Pressteile aus höherfesten Stählen	48
4.2.3. Investitionskosten für Anlage und Werkzeuge.....	48
4.3. Umformverfahren Walzprofilieren	49
4.3.1. Bedeutung für den Karosseriebau	50
4.3.2. Einordnung des Walzprofilierprozesses	51

4.3.3.	Eigenschaften von Profilbauteilen.....	60
4.3.4.	Investitionskosten für Anlagen und Werkzeuge	61
4.4.	Gegenüberstellung der Umformverfahren.....	62
4.4.1.	Forderungen an die Umformverfahren.....	62
4.4.2.	Vergleich der Umformverfahren.....	64
4.4.3.	Notwendige Bedingung für den Vergleich der Umformverfahren.....	66
5.	Modellierung von Prozessketten beim Walzprofilieren	74
5.1.	Von der Profilgeometrie zur Konfiguration einer Prozesskette.....	74
5.1.1.	Profilgeometrie als gedanklicher Ansatz.....	75
5.1.2.	Prozesskette zur Erstellung einer Profilieranlage	80
5.1.3.	Alternativen beim Produktionsablauf in Prozessketten	82
5.1.4.	Aufbau geometriespezifischer Profilierlinien	83
5.2.	Grundlage der Bewertung von Bauteilen und Planung von Prozessketten..	86
5.2.1.	Ansatz.....	86
5.2.2.	Bewertungsgrundlage.....	87
5.3.	Digitale Abbildung und Modellierung von Prozessketten	93
5.4.	Aufbau der Modelle (Programmmodule)	95
5.4.1.	Modellbildung: Aufbau der Module	96
5.4.2.	Parametrisierung der Prozesskette durch Prozessparameter	99
5.4.3.	Lösungsprozess.....	102
5.4.4.	Modellergebnis und Auswertung in den Modulen	106
5.4.5.	Handlungsempfehlungen und Systemoptimierung	107
5.5.	Fazit.....	108
6.	Konzeption einer Gesamtmethodik zur Planung und Bewertung von Prozessketten	109
6.1.	Ansatz und Vorgehensweise	110
6.1.1.	Forderungen an die Gesamtmethodik	110
6.1.2.	Ansatz.....	111
6.1.3.	Vorgehensweise	112
6.2.	Struktur der Gesamtmethodik	113
6.3.	Beschreibung der erstellten Planungs- und Bewertungsmodule.....	115
6.3.1.	Programmmodul ApProx ⁺	115
6.3.2.	Programmmodul LCProx ⁺	122
6.3.3.	Programmmodul SimProx ⁺	135
6.3.4.	Programmmodul VisProx ⁺	140
6.4.	Modularer Einsatz der Gesamtmethodik.....	145
6.5.	Einordnung der Module in die Planung von Produktionssystemen	147

6.5.1.	Analyse der Produktionsaufgabe	149
6.5.2.	Betriebsmittelplanung	150
6.5.3.	Technologieplanung	151
6.5.4.	Strukturplanung	153
6.5.5.	Auslegungsplanung	153
6.6.	Zusammenfassende Darstellung der Gesamtmethodik	155
7.	Anwendung und Validierung der Gesamtmethodik.....	156
7.1.	Anwendungsbeispiel 1: Verfahrensvergleich der Umformverfahren Tiefziehen und Walzprofilieren	157
7.1.1.	Ausgangssituation	157
7.1.2.	Aufgabenstellung	158
7.1.3.	Ergebnisdarstellung	158
7.1.4.	Handlungsempfehlung	162
7.1.5.	Anmerkung: Isokostenkurve	165
7.2.	Anwendungsbeispiel 2: Herstellung einer Bauteilfamilie unter Verwendung verschiedener Rollenwerkzeugtechnologien	165
7.2.1.	Ausgangssituation	166
7.2.2.	Aufgabenstellung	167
7.2.3.	Ergebnisdarstellung	168
7.2.4.	Handlungsempfehlung	172
7.3.	Anwendungsbeispiel 3: Planung der optimalen Auftragsreihenfolge und Losgröße von Profilbauteilen	173
7.3.1.	Ausgangssituation	173
7.3.2.	Aufgabenstellung	174
7.3.3.	Ergebnisdarstellung	175
7.3.4.	Handlungsempfehlung	176
7.4.	Anwendungsbeispiel 4: Planung und Bewertung unterschiedlicher Produktionskonzepte einer Profilieranlage	177
7.4.1.	Ausgangssituation	178
7.4.2.	Aufgabenstellung 1	180
7.4.3.	Aufgabenstellung 2	181
7.4.4.	Ergebnisdarstellung	182
7.4.5.	Handlungsempfehlung	184
7.5.	Anwendungsbeispiel 5: Planung und Bewertung des Fertigungsablauf einer technologieübergreifenden Baugruppe	190
7.5.1.	Ausgangssituation	190
7.5.2.	Aufgabenstellung	191
7.5.3.	Ergebnisdarstellung	192

7.5.4. Handlungsempfehlung	196
7.6. Fazit der Anwendungsbeispiele	198
8. Zusammenfassung und Ausblick	199
8.1. Zusammenfassung.....	199
8.2. Ausblick.....	203
Abbildungsverzeichnis	205
Tabellenverzeichnis	210
Literaturverzeichnis	211
Anhang – Abbildungen	223
Anhang – Erläuterungen zum Programmcode	224
Anhang – Technische Erläuterungen	233
Anhang – Glossar.....	250

Abkürzungsverzeichnis

ApProx ⁺	Programmmodul zur Kostenabschätzung von Profilbauteilen
Ausl.	Auslastungsgrad Anlage
Av.	Average
BG	Baugruppe
BK	Bearbeitungskosten
BR	Baureihe
BT	Bauteil
BZ	Bellzahl
CSR	Common Station Rate: Rate der Nutzung gemeinsamer Arbeitsstationen bei der Fertigung verschiedener Profile
Eff	Efficiency, Auslastungsgrad
EPA/EZA	Einproduktanlage/Einzweckanlage
FK	Fertigungskosten
FK	Kumulierte Bearbeitungs- (BK) und Rüstkosten (RK)
FügK	Fügekosten
GE	Geldeinheiten
Halbflex.	Halbflex. Rollenwerkzeuge
HF	Homogenitätsfaktor
HK	Herstellkosten
Inv	Investition
Konv.	Konventionelle Rollenwerkzeuge
LCProx ⁺	Programmmodul zur Erstellung optimaler Prozessketten
LT	Längsträger
min	Minuten
MK	Materialkosten
MMS	Maschinenminutensatz
MPA	Mega-Pascal
MPA/MZA	Mehrproduktanlage/Mehrweckanlage
NCS	Non Common Station: Anzahl nicht gemeinsam genutzter Arbeitsstationen bei der Fertigung verschiedener Profile
NLines	Anzahl an Profilerlinien
p/line	Anzahl der gefertigten Bauteile auf einer Profilerlinie
PK	Prozesskette
PK	Pufferkosten
ProdC	Fertigungskosten/Stück
RGS	Restricted Growth String
RK	Rüstkosten

SimProx ⁺	Programmmodul zur Simulation komplexer Fertigungsabläufe
Stck.	Stück bzw. Stückzahl
SWG	Schnellwechselgerüste
TEB	Ausbringungsrate [min/Stck]
ToolC	Werkzeugumlage/Stück
TotalC	Kumulierte Werkzeugumlage und Fertigungskosten/Stück
TRB	Rüstzeit
TZ	Tiefziehen
v	Vorschub bzw. Bearbeitungsgeschwindigkeit
VisProx ⁺	Programmmodul zur Visualisierung von Produktionsabläufen
VR	Virtual Reality
VS	Verechnungssatz
WP	Walzprofilieren
WZK	Werkzeugkosten
WZN	Werkzeugsatz Vor- und Nachbearbeitung
WZR	Werkzeugsatz Profilrollen
DummyBT	Dummy-Bauteile: zusätzlich zu produzierende Stückzahl zur Vollauslastung der Profilieranlage