

Gerhard Volkwein

**Konzept zur effizienten Bereitstellung
von Steuerungsfunktionalität
für die NC-Simulation**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 202

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-10 3-8316-0668-4
ISBN-13 978-3-8316-0668-9

Printed in Germany

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

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand neben meiner Tätigkeit für die AnySIM Simulationssysteme GmbH und die Tecnomatix GmbH.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. J. Milberg für die wohlwollende Förderung dieser Arbeit, seine wertvollen Hinweise und Anregungen sowie nicht zuletzt für den mit der Betreuung dieser Arbeit verbundenen persönlichen Einsatz.

Weiterhin danken möchte ich Prof. Dr.-Ing B. Denkena, dem Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Universität Hannover, für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und für die Übernahme des Zweitgutachtens. Ebenso zu Dank verpflichtet bin ich Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, dem Inhaber des Lehrstuhls für Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München, für die Übernahme des Drittgutachtens.

Darüber hinaus haben eine Reihe weiterer Personen in Form fachlicher Beiträge, Anregungen und Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen, ihnen sei hierfür ebenfalls herzlich gedankt. Insbesondere möchte ich an dieser Stelle erwähnen: Dipl.-Ing. Kalle Amthor und Dr.-Ing. Stefan Linner (beide Unigraphics Solutions GmbH, Produktbereich Tecnomatix), Dipl.-Ing. Horst Gose und Dr.-Ing. Thomas Menzel (beide Siemens AG A&D MC), Franz Imhof und Dr.-Ing. Karsten Kreuzsch (beide Robert Bosch GmbH, FV/PLE) sowie Dr.-Ing Markus Stulle (ifs Informationstechnik GmbH).

Meiner Frau Jessica schließlich danke ich in ganz besonderem Maß für ihre Unterstützung und Geduld während der Fertigstellung dieser Arbeit. Sie und unsere Tochter Stella waren mir gleichzeitig Rückhalt und Antrieb in dieser entscheidenden Phase.

München, im Oktober 2006

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	vii
1 Motivation und Zielsetzung	1
1.1 Trend zur Komplexität bei spanenden Fertigungssystemen	1
1.2 Fertigungsprozessplanung als Erfolgsfaktor	3
1.3 Hilfsmittel NC-Simulation	4
1.4 Ziel der Arbeit	5
1.5 Vorgehensweise und Inhalte	5
2 Stand der Technik	7
2.1 Realitätsnahe NC-Simulation	7
2.1.1 Definition und Abgrenzung	7
2.1.2 NC-Simulation in der Einzel- und Kleinserienfertigung	10
2.1.3 NC-Simulation in der Serienfertigung	12
2.1.3.1 Lebenszyklus der Produktionsanlage	12
2.1.3.2 Simulationsgestützte NC-Programmoptimierung	14
2.2 Steuerungsmodelle	16
2.2.1 Einordnung und Aufbau	16
2.2.2 Defizite und Grenzen der Steuerungsmodellierung	19
2.2.2.1 Ausgangssituation	19
2.2.2.2 Abbildung der NC-Programmiersprache	19
2.2.2.3 Verschlüsselte Zyklen	22
2.2.2.4 Abbildungsfehler im Bereich des Bewegungsverhaltens	22
3 Formulierung eines Anforderungsprofils	27
3.1 Ausgangssituation	27
3.2 Anforderungsprofil einer steuerungsintegrierten Simulationslösung	27

4 Bekannte Ansätze zur Integration von Simulations- und Steuerungssystemen	33
4.1 Übersicht	33
4.2 Integrationsansätze für die Simulation von Werkzeugmaschinen	33
4.2.1 Testumgebung für Steuerungssoftware („System WZL“)	35
4.2.2 Verifikation numerischer Steuerungen („System BTU“)	36
4.2.3 Vorabinbetriebnahme von Steuerungssoftware („System iwv“)	38
4.2.4 Weitere Arbeiten im Forschungsumfeld	40
4.3 Integrationsansätze für die Robotersimulation	41
4.3.1 Der Industriestandard RRS	41
4.3.1.1 Überblick	41
4.3.1.2 Funktionsweise der RRS-Schnittstelle	41
4.3.1.3 Bewertung des RRS-Ansatzes	44
4.3.2 RRS-II	46
4.3.2.1 Überblick	46
4.3.2.2 Funktionsweise von RRS-II	46
4.3.2.3 Bewertung des RRS-II Ansatzes	52
5 Entwicklung eines Integrationsansatzes für die NC-Simulation	53
5.1 Vorgehensweise	53
5.2 Bestimmung von Systemmerkmalen	53
5.2.1 Anwendungsfallsicht	55
5.2.2 Einsatzsicht	57
5.2.3 Prozesssicht	58
5.2.4 Entwurfssicht	60
5.2.4.1 NC-Programmausführung	60
5.2.4.2 Zeitmanagement	61
5.2.4.3 Semantik des Datenaustausches	62
5.2.4.4 Benutzeroberfläche	63
5.2.5 Implementierungssicht	65
5.3 Analyse und Bewertung alternativer Systemmerkmale	66

5.3.1	Benutzeroberfläche	67
5.3.2	Datenaustausch	68
5.3.3	Einsatzart und Hardwaretopologie	69
5.3.3.1	Vorteile der Migration	69
5.3.3.2	Migration der Simulationssoftware	70
5.3.3.3	Migration der Steuerungssoftware	71
5.3.3.4	Zusammenfassende Bewertung	72
5.3.4	Zeitmanagement und Kommunikation	73
5.3.4.1	Steuerungsgeführtes Zeitmanagement.....	73
5.3.4.2	Simulationsgeführtes Zeitmanagement	79
5.3.4.3	Zusammenfassende Bewertung	84
5.4	Klassifizierung und Bewertung bekannter Integrationsansätze	84
5.4.1	Merkmals- und Bewertungsprofile	85
5.4.2	Kommentare zu den Bewertungsprofilen	90
5.4.2.1	Systeme WZL, BTU und iwB	90
5.4.2.2	RRS-I-Ansatz.....	90
5.4.2.3	RRS-II-Ansatz	91
5.5	Synthese eines Integrationsansatzes.....	91
5.6	Fazit und weiteres Vorgehen.....	94
6	Detaillierung des Ansatzes und Realisierung	95
6.1	Ausgangssituation	95
6.2	Grundlagen des Schnittstellenentwurfs.....	95
6.2.1	Physische Struktur des Gesamtsystems	95
6.2.2	Asynchrone Kommunikation zwischen aktiven Objekten	96
6.2.2.1	Simulations- und Steuerungssystem als aktive Objekte.....	96
6.2.2.2	Operationen und Signale	97
6.2.2.3	Asynchrone Kommunikation über Operationen.....	98
6.2.3	Identifikation erforderlicher Schnittstellen.....	101
6.2.4	Referenz-Bedienungsablauf.....	102
6.3	Kontrolle des Lebenszyklus von VNC-Instanzen	104

6.4	Spezifikation von Schnittstellenoperationen.....	104
6.4.1	Namenskonventionen	104
6.4.2	Initialisieren und Deinitialisieren einer VNC-Instanz.....	105
6.4.3	Übermittlung von Achskonfigurationen.....	106
6.4.4	Einrichten werkstückspezifischer NC-Daten in der VNC.....	108
6.4.4.1	Transfer persistenter Daten.....	108
6.4.4.2	Anwahl von NC-Programmen für die NC- Programmausführung	111
6.4.5	Kontrolle der NC-Programmausführung	111
6.4.5.1	Übersicht.....	111
6.4.5.2	Inaktiver und gestarteter Zustand	112
6.4.5.3	Eingefrorener und aktiver Zustand.....	113
6.4.5.4	Kommunikationsablauf während der NC- Programmausführung	114
6.4.5.5	Rücksetzen.....	115
6.4.6	Simulationsseitiger Informationsbedarf während des Simulationslaufs.....	116
6.4.6.1	Relevante Simulationsfunktionen.....	116
6.4.6.2	Bewegungssimulation.....	117
6.4.6.3	Simulation von Schaltfunktionen	118
6.4.6.4	Materialabtragsimulation.....	120
6.4.6.5	Werkzeugwegsimulation	123
6.4.6.6	Automatische Prozessverifikation	124
6.4.6.7	Anzeige von Steuerungsdaten und -zuständen.....	126
6.4.6.8	3D-Visualisierung und Dokumentation.....	128
6.4.7	Übertragung prozess- und programmbezogener Daten.....	128
6.4.7.1	Simulationsseitiger Informationsbedarf im Überblick...	128
6.4.7.2	Schnittstellenoperationen für den Simulationslauf.....	129
6.4.8	Mehrkanaligkeit.....	133
6.4.9	Parallelkinematikmaschinen (PKM).....	135

7 Diskussion	139
7.1 Realisierungsbeispiel.....	139
7.2 Ergebnisse und Bewertung.....	140
7.2.1 Zielerreichung.....	140
7.2.2 Implementierungsaspekte virtueller NC-Steuerungen.....	141
7.2.3 Steuerungsintegrierte und konventionelle NC-Simulation im Vergleich.....	143
7.2.3.1 Maschinenmodellierung als wesentliches Vergleichskriterium	143
7.2.3.2 Steuerungsspezifische Aspekte der Maschinenmodellierung	145
7.2.3.3 Maschinenspezifische Aspekte der Maschinenmodellierung	147
7.3 Mögliche Einsatzgebiete, Erweiterungen und Grenzen.....	148
7.3.1 Realitätsnahe NC-Simulation als primäres Einsatzgebiet	148
7.3.2 Simulationsgestützte Programmierung von NC-Zyklen	149
7.3.3 Offline-Schulung von Maschinenbedienern.....	149
7.3.4 Steuerungsverifikation als vorrangige Domäne der HIL-Simulation	150
8 Zusammenfassung und Ausblick	151
Literaturverzeichnis	153
Abbildungsverzeichnis	159

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Trend zur Komplexität bei spanenden Fertigungssystemen

Die permanente Nachfrage nach kostenoptimalen Produktionsprozessen veranlasst Hersteller von Fertigungssystemen zur Entwicklung immer leistungsfähigerer Produkte. Vor diesem Hintergrund haben sich spanende Werkzeugmaschinen¹ und Fertigungssysteme zu komplexen mechatronischen Gesamtsystemen entwickelt. Ihre Mechanik erfüllt höchste Ansprüche hinsichtlich Steifigkeit und Schwingungsverhalten, ihre Antriebe realisieren beträchtliche Beschleunigungen und ihre Steuerungen zeichnen sich durch anspruchsvolle Funktionsumfänge auf den Gebieten der Informationsverarbeitung, der Mess- und Regelungstechnik sowie der Bedientechnik aus.

Der Zwang zur wirtschaftlichen Gestaltung von Bearbeitungsprozessen² ist häufig Ausgangspunkt für die Entwicklung komplexer, für eine spezifische Bearbeitungsaufgabe optimierter Fertigungssysteme. Hierfür seien zwei Beispiele aus den Bereichen Luftfahrt (Kleinserie) und Automobilbau (Großserie) aufgeführt:

Fertigung von Flugzeugstrukturteilen

Im Flugzeugbau ist die Gewichtsreduktion von Bauteilen ein zentrales Ziel der Produktentwicklung. Gleichzeitig bestehen in diesem sicherheitskritischen Anwendungsbereich höchste Anforderungen an das Festigkeitsverhalten der Bauteile. In diesem Zusammenhang hat sich in den letzten Jahren der Einsatz von Integralbauteilen aus hochfesten Aluminiumlegierungen etabliert. Diese Bauteile sind filigrane geometrische Gebilde, die in der Regel durch einen 5-achsigen Fräsprozess aus Plattenmaterial hergestellt werden (vgl. Abb. 1-1, links). Der Zerspananteil erreicht dabei Größenordnungen von bis zu 95%. Durch die Entwicklung eines innovativen Maschinenkonzepts mit Tripod-Kinematik (vgl. Detaildarstellung in Abb. 1-1, rechts) konnten im gezeigten Beispiel die Fertigungskosten für diese Bauteile im Vergleich zum Einsatz konventioneller 5-Achs-Maschinen um ca. 50% gesenkt werden [DS Technologie (2004)].

¹ Mit dem Begriff *Werkzeugmaschine* werden nach gängiger Definition *Arbeitsmaschinen zur trennenden oder umformenden Bearbeitung metallischer Werkstoffe* bezeichnet [Milberg (1995)]. In Übereinstimmung mit der Einteilung der Fertigungsverfahren nach [DIN 8580] umfasst die Untergruppe der *spanenden Werkzeugmaschinen* Arbeitsmaschinen zur Durchführung spanbildender Bearbeitungsprozesse wie z.B. Drehen, Bohren, Fräsen oder Schleifen.

² Die Begriffe *spanender Fertigungsverfahren* und *Bearbeitungsprozess* werden in dieser Arbeit synonym verwendet



Integralbauteil in Bearbeitung

Tripod-Kinematik des Spindelkopfes

Abb. 1-1: Beispiel eines Maschinenkonzepts zur hochproduktiven Bearbeitung von Integralbauteilen für den Flugzeugbau [DS Technologie (2003)]

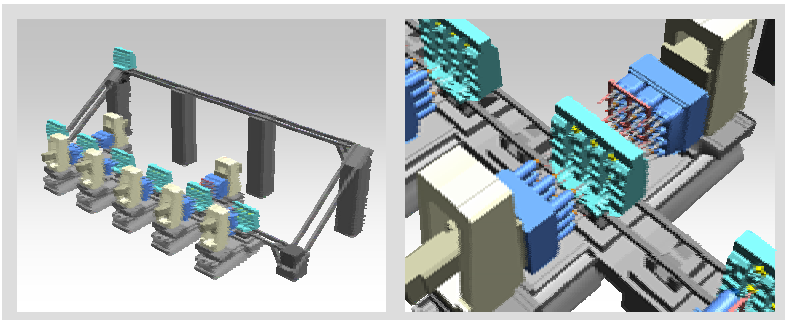


Abb. 1-2: Beispiel eines Fertigungssystems für die mechanische Bearbeitung von Gehäusen für Common Rail Hochdruckpumpen (Quelle: Robert Bosch GmbH)

Fertigung von Komponenten für Diesel-Einspritzsysteme

Anders als in der Einzel- und Kleinserienfertigung werden in der Serienfertigung Produktionssysteme vorwiegend produktspezifisch ausgelegt. Abb. 1-2 zeigt ein Fertigungssystem zur spanenden Bearbeitung von Hochdruckpumpengehäusen aus hochfestem Stahl für die Diesel-Direkteinspritzung. Die Anlage umfasst in der gezeigten Konfiguration fünf simultan arbeitende Bearbeitungsstationen mit ein oder zwei Bearbeitungseinheiten, die jeweils mit Mehrfach-Spindelköpfen ausgerüstet sind. Der Werkstücktransport erfolgt automatisch [Bosch (2002)].

1.2 Fertigungsprozessplanung als Erfolgsfaktor

Die dargestellte Komplexität moderner spanender Fertigungssysteme resultiert in einer entsprechend hohen Kostenintensität dieser Produktionseinrichtungen. Eine besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang der Fertigungsprozessplanung zu. Durch sie werden wesentliche produktivitätsrelevante Größen wie Durchsatz, Qualität, Inbetriebnahme- und Rüstzeiten festgelegt. Abb. 1-3 verdeutlicht dies am Beispiel der Serienfertigung:

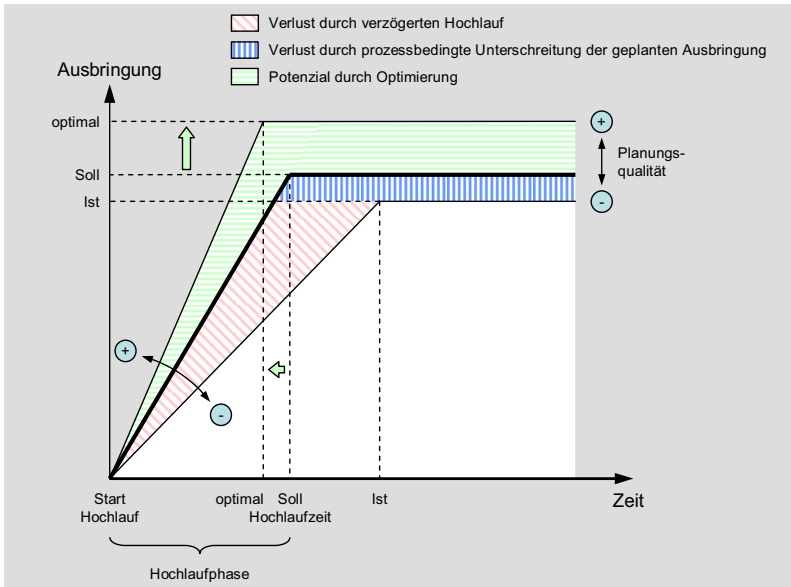


Abb. 1-3: Einfluss der Prozessplanungsqualität auf die Produktivität spanender Fertigungssysteme in der Serienfertigung

- Während der Hochlaufphase wirken sich Planungsfehler insbesondere durch eine verspätete Erreichung geplanter Produktionsmengen aus. Dieser Effekt hat prinzipiell singulären Charakter, d.h. er tritt nur einmalig im Verlauf eines Produktionslebenszyklus auf. Der tatsächliche Schaden einer verzögerten Inbetriebnahme resultiert nicht nur aus der entgangenen Wertschöpfung nicht produzierter Teile, sondern vielmehr auch aus dem entgangenen Umsatz zugehöriger Produkte, die aufgrund fehlender Teile nicht fertig gestellt bzw. abgesetzt werden konnten.

- Weiterhin können Planungsmängel dazu führen, dass die geplante Ausbringung eines Fertigungssystems dauerhaft unterschritten wird. Der entstehende Schaden wächst dabei mit der Produktionsmenge. Verursacht wird dieses Problem häufig durch eine nicht hinreichend genaue Ermittlung bzw. Verifikation von Fertigungszeiten im Planungsstadium. Kostenintensive Lösungsstrategien wie die Ausweitung der Produktionskapazität durch zusätzliche Investitionen oder Fremdvergabe sind hier mitunter unvermeidlich.
- Schließlich besteht die Möglichkeit, dass durch Planungsungenauigkeiten bestehende Produktivitätspotenziale ungenutzt bleiben. Eine verbesserte Planungsqualität kann hier dazu beitragen, die Hochlaufphase zu verkürzen und die Produktionsleistung über den Sollwert hinaus zu erhöhen.

1.3 Hilfsmittel NC-Simulation

Die Methode der *Simulation* ist heute ein weit verbreitetes Hilfsmittel zur Beherrschung komplexer technischer Systeme. VDI-Richtlinie 3633 definiert den Begriff der Simulation im produktionstechnischen Kontext wie folgt: „*Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind*“ [VDI 3633]. Einen Schwerpunkt produktionstechnischer Simulationsanwendungen bildet die Verifikation von Produktionsabläufen auf Basis dreidimensionaler, geometrisch-kinematischer Modelle der beteiligten Komponenten. Zu dieser Kategorie *grafischer* Simulationsverfahren zählt insbesondere auch die NC-Simulation

Hauptanwendungsgebiet der NC-Simulation ist die Verifikation spanender Fertigungsprozesse. Die NC-Simulation wird vorrangig eingesetzt, um Fehler in geplanten Fertigungsprozessen frühzeitig zu ermitteln und dadurch Inbetriebnahme- und Rüstzeiten zu reduzieren [Schrüfer (1992)]. Darüber hinaus bietet die NC-Simulation aber auch die Möglichkeit, Potenziale zur Prozessoptimierung zu identifizieren [Bosch (2002)].

Trotz des nachweislichen Nutzenpotenzials entwickelt sich der Markt für NC-Simulationstechnik nur zögerlich. Als wesentliches Einsatzhemmnis erweist sich der im Vorfeld der NC-Simulation zu erbringende Aufwand für die Modellierung des steuerungs- und antriebstechnischen Verhaltens spanender Fertigungssysteme. Dieser Aufwand resultiert aus den hohen Anforderungen, die hinsichtlich der Modellierungsqualität bestehen: nur wenn die NC-Simulation das Verhalten des realen Fertigungssystems hinreichend genau abbildet, sind die erzielten Simulationsergebnisse aussagekräftig und damit für den Anwender nutzbringend. Es ist davon auszugehen, dass sich durch eine verbesserte Modellierungsmethodik die Verbreitung der NC-Simulation deutlich steigern lässt.