Entwicklung eines automatisierten CNC-Prozessketten-Generators für spanende Werkzeugmaschinen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.- Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Master of Science

Ralf Kretzschmann

geboren am 12.03.1980
in Cottbus, Deutschland

Vorsitzender:	**Prof. Dr.-Ing. Gerhard Lappus**
Gutachter:	**Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger**
Gutachter:	**Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Peter Arnold**
Tag der mündlichen Prüfung:	**25.11.2009**

Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik
BTU Cottbus
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger

Ralf Kretzschmann

Entwicklung eines automatisierten CNC-Prozessketten-Generators für spanende Werkzeugmaschinen

Shaker Verlag
Aachen 2010

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.: Cottbus, BTU, Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2010
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9097-9
ISSN 1864-5789

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

Die Automatisierungstechnik bildet eine Schlüsseltechnologie für die Steigerung der Produktinnovation und die Verbesserung von Wertschöpfungsprozessen. Als Konsequenz einer globalen Wirtschaftsstruktur müssen alle Unternehmensbereiche wie Entwicklung, Produktion und Güterverkehr in einen übergreifenden Kontext gestellt und behandelt werden. Dabei steht die informationstechnische Verknüpfung verbundener Unternehmen und Unternehmensbereiche bei stetig veränderlichen Aufgabenstellungen und Randbedingungen eine besondere Herausforderung dar. Die Automatisierung des betrieblichen und betriebsübergreifenden Informationsflusses sowie die Einbindung des Menschen in allen Phasen des Entwicklungs- und Leistungsprozesses bildet daher die vordringliche Aufgabenstellung für Forschung und Entwicklung. Durch den zielgerichteten, systematischen Einsatz und die ständig aktualisierte Beurteilung und Bewertung automatisierungstechnischer Lösungen wird die schnelle Umsetzung und Einführung hochwertiger und zukunftsweisender Innovationen gesichert.

Ziel der Forschungsarbeiten am Lehrstuhl Automatisierungstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus (BTU) ist die kontinuierliche Verbesserung der automatisierungstechnischen Methoden und Verfahren im Hinblick auf fortgeschrittene Produktionsstrukturen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung integrierter Fertigungs- und Montagesysteme unter Einsatz neuartiger Steuerungstechnik. Dazu werden leistungsfähige Entwurfswerkzeuge der *Digitalen Fabrik* erprobt und weiterentwickelt. Durch die Bereitstellung modernster Laborausstattung und die Zusammenarbeit mit industriellen und institutionellen Technologieführern wird der Stand der Technik in Wissenschaft und Forschung aktualisiert abgebildet. Nationale und internationale Forschungsarbeiten zu ganzheitlichen Automatisierungskonzepten, den *Industrial Life Cycle Automation*, runden das Aufgaben- und Leistungsspektrum des Lehrstuhls ab.

Die in dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen aus den Forschungsarbeiten des Lehrstuhls Automatisierungstechnik der BTU Cottbus. In diesen Bänden werden neue Resultate und Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung veröffentlicht. Die Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik sollen Forschung, Entwicklung und Anwendung zu automatisierungstechnischen Fragestellungen enger verknüpfen und daraus Potential für zukünftige Innovationen erzeugen.

Ulrich Berger

Kurzfassung

Der Schlüssel zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von individuellen, komplexen und hochwertigen Endprodukten liegt in der erfolgreichen Gestaltung der Fertigung von einzelnen Komponenten bzw. von zur Fertigung genutzten Werkzeugen und Betriebsmitteln. Die Zerspanungstechnologie ist dabei eine Schlüsseltechnologie. Mit dieser Fertigungstechnologie werden, ausgehend von in den Arbeitsvorbereitung erstellten Arbeitsanweisungen mit den jeweilig zu verwendenden Bearbeitungsoperationen durch deren Abarbeitung auf CNC (Computerized Numerical Control)-gesteuerten Werkzeugmaschinen, entscheidend die Fertigungszeit sowie die Fertigungs- und damit Produktkosten bei festgesetzter Produktqualität festgelegt. Besonders die Erstellung der Arbeitsanweisungen, die als CNC-Prozessketten (CNC-PK) im weiteren Verlauf der Ausarbeitung bezeichnet werden, stellt sich als komplexe und wissensintensive Planungsaufgabe dar. Einerseits stehen hochgradig technologisierte Fertigungsressourcen sowie leistungsfähige CAM (Computer Aided Manufacturing)-Systeme zur Prozessplanung zur Verfügung, anderseits müssen mehrstufig verknüpfte Entscheidungen während der Prozessplanung getroffen werden, um die Überführung von den Gestalt beschreibenden Elementen der Produktbeschreibung in die entsprechende wirtschaftlichste Reihenfolge der Bearbeitungsoperationen als CNC-PK zu erwirken. Folglich stellt die Unterstützung des Prozessplaners bei der Handhabung dieser Planungskomplexitäten mit dem Ziel der Reduktion des manuellen Planungsaufwands und der Generierung von wirtschaftlicheren CNC-PK einen entscheidenden Schritt dar, um die Wettbewerbsfähigkeit von hochwertigen Produkten gegenüber weiteren Marktteilnehmern zu halten bzw. zu steigern.

Das hier vorgestellte Konzept der automatisierten CNC-PK-Generierung bedient diese Anforderungen durch die Verknüpfung der Entscheidungsfunktionen zu einem Gesamtoptimierungsproblem, zu dessen Lösung Methoden der Graphentheorie angewendet werden. Das darauf aufbauende System zur automatisierten CNC-PK-Generierung basiert auf den folgenden Kernpunkten:

- Einführung einer zu minimalisierenden Gesamtaufwandfunktion zur Bewertung von CNC-PK mit dem Ziel wirtschaftliche CNC-PK zu bestimmen und zu generieren
- Aufbau einer zentralen, feature-basierten Wissensbasis zur strukturierten Sicherung und Wiederverwendung von Mitarbeitererfahrungen zur Entscheidungsfindung innerhalb der wissensintensiven Planungsprozesse der Vorgangsbestimmung und der Auswahl von Fertigungsressourcen sowie deren Technologie- bzw. Strategieparameter

- Einführung einer drei-stufigen Vorgehensweise zur Lösung der Gesamtaufwandfunktion mit dem Ziel, diese wissensintensiven Planungsprozesse unter der Verwendung von partiell heuristischen Graphenalgorithmen zu automatisieren und damit die automatisierte CNC-PK-Generierung zu ermöglichen
- Einführung von verschiedenen, graphischen und textuellen Repräsentationen zur Darstellung des Planungsfortschritts und -hergangs innerhalb der CNC-PK-Generierung

Die Validierung des Systems mittels eines implementierten und vollfunktionstüchtigen Demonstrators zeigt, dass das System für typische Anwendungsszenarios der CNC-Prozessplanung anwendbar ist. Im Detail sind repräsentative Prüfgeometrien aus den Zielgruppen des Werkzeug- und Formenbaus sowie aus der Luft- und Raumfahrt verarbeitet worden. Die Ergebnisse zeigen, dass der CNC-Prozessketten-Generator maßgeblich wirtschaftlichere CNC-PK generiert und den manuellen Planungsaufwand deutlich reduziert.

Das vorgestellte System des CNC-Prozessketten-Generators eröffnet die Möglichkeit das System auf weitere Anwendungsgebiete erfolgreich zu übertragen sowie durch den Einsatz weiterer Methoden aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz konzeptionell auszubauen, um einen besseren Funktionsumfang zu erreichen. So wäre der Einsatz dieser Methoden zur Bestimmung von Korrelationen zwischen den Technologie- bzw. Strategieparametern möglich. Die Kopplung des Systems mit produktionsnahen Systemen erscheint ebenfalls als Ansatzpunkt zur Weiterentwicklung des Systems zur Feinplanung in der Werkstatt-Steuerung geeignet.

Abstract

The key fact in boosting competitiveness of manufacturers in launching their individualized, complex and high quality products is the optimal manufacturing of the components, semi-manufactured products and the employed manufacturing resources. The CNC machining of these parts is one of the key manufacturing technologies. This manufacturing process is applied to machine complex parts based on work plans that were prepared in the process planning. Thus, these work plans are called CNC process chains in the following thesis. Furthermore, a CNC process chain is a sequence of machining operations that are machined by CNC machine tools. These machining operations determines the machining time, the machining as well as the manufacturing cost while keeping the intended part quality of the machining process. Especially, the development of the CNC process chain is a complex and knowledge intensive planning task. This is due to the applicability of high grade manufacturing resource technologies and the usage of innovative and highly capable CAM systems in the process planning. Thus, all the resources must be defined in multi-stage decision making of the process planning in order to map the design features of the considered part into the corresponding efficient sequences of machining operations. Therefore, the support and the guidance of the process planner in handling and managing these complexities is necessary for minimizing the effort involved in the non-automated planning as well as to realize the generation of the efficient CNC process chains. Finally, efficient CNC process chains are affecting the competitiveness of manufacturers selling the high quality products in comparison to the other market participants in a positive way.

The presented concept for the automated generation of CNC process chain is focusing these requirements by mapping the particular multi-stage decision problems to a unique optimization problem in order to compute the most efficient CNC process chain. For solving the optimization problem, the methods and algorithms known from the graph theory are utilized. The developed system for the automated generation of CNC process chains is now predicated on the following main issues:

- Development of a total effort benchmarking function of CNC process chains for computing efficient CNC process chains
- Setting up of a feature based knowledge base in order to store and re-used process planner knowledge and experiences for decision making in knowledge intensive process planning tasks like determination of machining operations, allocation of manufacturing resources as well as assigning the suitable technology and strategy parameter settings

- Development of a three-stage methodology for the generation of CNC process chains by solving the unique optimization problem with partial heuristic algorithms in order to automate the decision making of the knowledge intensive planning tasks
- Development of several graphical and textual representations to comprehend the progress as well as the intermediate results of CNC process chain generation

The validation of the introduced system is performed with an implemented and fully functional demonstrator. The results are showing that the system is capable to compute CNC process chains for typical tasks and scenarios in the CNC process planning. Furthermore, two representative test work pieces that are summarizing the requirements of the target applications of die and mould maker as well as the aerospace industry were used. The results are confirming that the introduced CNC process chain generator computes efficient CNC process chains and decreases the non-automated planning effort.

The introduced system for the automated generation of CNC process chain raises the possibility to transfer the system to the new application areas like micro-machining or assembly planning. Furthermore, the implementation of methods known from artificial intelligence extends the functionality of the CNC process chain generator in determining parameter setting and identifying correlations between them. Finally, the interfacing of the system with manufacturing execution systems offers further developments in order to enable the detailed planning in the shop floor scheduling.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Automatisierungstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.

Meinem Doktorvater und Lehrstuhlinhaber, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger, danke ich herzlich für die hilfreichen Anregungen und wertvollen Hinweise, die entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Peter Arnold möchte ich ebenfalls meinen Dank aussprechen. Durch seine motivierende Unterstützung und seinem Interesse an der Arbeit konnte ich diese erfolgreich gestalten.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Lappus für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei Herrn Dr.-Ing. Matthias Aner. Seine Ratschläge und Impulse besonders bei der Themensuche haben mich entscheidend unterstützt.

Meinen Dank möchte ich ebenso Herrn Dr.-Ing. Rudolf Schulze, Herrn Dipl.-Ing. Udo Steffen, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Kai Henning, Herrn Rainer Leege, Herrn M.Sc. Sarfraz Minhas, Frau M.Sc. Veronica Vargas, Frau M.Sc. Yulia Lebedynska und Herrn M.Sc. Jan Noack sowie Frau Angelika Stahr und Frau Jennifer Jung aussprechen. Die vielen wertvollen Diskussionen und Hilfestellungen während unserer langjährigen Zusammenarbeit, nicht nur im Zusammenhang mit dieser Arbeit, haben mir sehr geholfen. Ganz besonders möchte ich Herrn Marcel Halbauer und Herrn Michel Bretschneider hervorheben, die mich in der technischen Realisierung des CNC-Prozessketten-Generators unterstützt haben.

Stolz bin ich auf meine Familie, durch die ich während dieser Zeit besondere Unterstützung und persönlichen Rückhalt erfahren habe.

Ralf Kretzschmann

Cottbus, im Mai 2010

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation und Zielsetzung 1

1.1 Darlegung der Motivation 1

1.2 Ableitung der Zielsetzung 9

1.3 Struktur der Arbeit 11

2 Untersuchung des Stands der Technik und der Forschung 13

2.1 NC-Verfahrenskette als Teil der Wertschöpfungskette 13

2.2 Planungsebenen in der NC-Verfahrenskette 15

2.3 Vorgehensweise und Methoden zur CNC-PK-Generierung 17

2.3.1 Vorgehensweise zur manuellen CNC-PK-Generierung 17

2.3.2 Verfahren zur automatisierten CNC-PK-Generierung 19

2.3.2.1 Methoden des ersten Planungshorizonts 19

2.3.2.1.1 Anwendung der direkten Regelprogrammierung 23

2.3.2.1.2 Anwendung der HS 24

2.3.2.1.3 Anwendung der Genetischen Optimierung 26

2.3.2.1.4 Anwendung der KNN 27

2.3.2.1.5 Zusammenfassung der Methoden des ersten Planungshorizonts 28

2.3.2.2 Methoden des zweiten Planungshorizonts 29

2.4 Technische Umsetzung der CNC-PK-Generierung 30

2.4.1 Feature-Technologie in der NC-Verfahrenskette 30

2.4.2 Bewertung der NC-Verfahrenskette zur CNC-PK-Generierung 32

2.4.3 Automatisierte CNC-PK-Generierung durch CAM-Systeme 36

2.5 Bewertung ausgewählter Konzepte und Verfahren zur CNC-PK-Generierung 37

2.5.1 Grundlagen für die CNC-PK-Generierung 37

2.5.2 Konzepte und Planungsverfahren für die CNC-PK-Generierung 39

2.5.3 Konzepte und Planungsverfahren für das Einplanen der CNC-PK 43

2.6 Ableitung von Defiziten des Stands der Technik und der Forschung 44

3 Ableitung des Forschungsbedarfs und Konzepterstellung.....48

3.1 Ableitung von Handlungsbedarf und Forschungsbedarf 48

3.2 Rahmenbedingungen und Zielsetzungen der Generierung von CNC-PK 51

3.3 Mathematische Modellierung der CNC-PK-Generierung 52

3.4 Herleitung des Konzepts zur Generierung von CNC-PK 55

3.4.1 Ausarbeitung der geltenden Voraussetzungen der CNC-PK-Generierung.....56

3.4.2 Darstellung des Problemlösungsansatzes des Konzepts 57

3.4.3 Darstellung der verwendeten Methodik 61

3.4.4 Identifikation der Konzeptbausteine zur Systementwicklung 62

4 Entwicklung eines Systems zur automatisierten Generierung von CNC-PK 63

4.1 Methodische Vorgehensweise.....63

4.2 Anwendungsbereich und Funktionsprinzip.....64

4.2.1 Zielgruppen und Anwendungsfälle 64

4.2.2 Allgemeines Funktionsprinzip 66

4.3 Architektur und Module des Systems 68

4.4 Auswahl der Wissensrepräsentation und Modellierung der Wissensbasis 69

4.4.1 Auswahl der Wissensrepräsentation 69

4.4.2 Aufbau der Wissensbasis und der feature-basierten CNC-PK.....72

4.4.3 Bewertung von feature-basierten CNC-PK.....76

4.5 Auswahl und Anpassung der Wissensverarbeitung 79

4.5.1 Darstellung und Bewertung der Methoden zur Wissensverarbeitung 79

4.5.2 Übertragung der CNC-PK in einen gerichteten Graphen 82

4.5.3 Berechnung der Bewertung von CNC-PK 85

4.5.4 Anwendung der Algorithmen und Methoden zur Wissensverarbeitung.....87

4.5.4.1 Teilfunktion der (I) Reihenfolgefestlegung der DF's 88

4.5.4.2 Teilfunktion der (II) Operationsauswahl.....88

4.5.4.3 Teilfunktion der (III) Reihenfolgeumordnung 90

4.5.5 Komplexitätsbetrachtungen der Algorithmen und Methoden.....92

4.5.5.1 Komplexitätsbewertung der Algorithmen und Methoden 92

4.5.5.2 Untersuchung der AV'n der Algorithmen.....96

4.5.5.3 Untersuchung der AV'n der TSP-Algorithmen 99

4.5.6 Auswahl und Anpassung der Algorithmen 102

4.6 Festlegung des Ablaufs der CNC-PK-Erstellung.....104

4.6.1 Darstellung des Gesamtablaufs 104

4.6.2 Vorbereitung und Festlegung der Planungskriterien 107
4.6.3 Analyse und Überführung der DF's in das Werkstück-Bearbeitungs-Modell. 108
4.6.4 Reduktion des Werkstück-Bearbeitungs-Modells zur Generierung der CNC-PK 110
4.6.5 Auswertung der CNC-PK 111

4.7 Einbettung des Systems in die NC-Verfahrenskette 112

4.8 Zusammenfassung und Diskussion des Konzepts und des entwickelten Systems .. 114

5 Technische Realisierung als Demonstrator 118

5.1 Rahmenbedingungen zur Umsetzung des entwickelten Konzepts 118

5.2 Architektur des Demonstrators 120
5.2.1 Wissensbasis und Administration 121
5.2.2 CNC-Prozessketten-Generator 122
5.2.3 Visualisierung 124

5.3 Gesamtablauf der Anwendung des Demonstrators 126
5.3.1 Festlegung der Planungskriterien 126
5.3.2 Durchführung und Auswertung der CNC-PK-Generierung 128

6 Validierung: Experimentelle Untersuchungen von Fallbeispielen 130

6.1 Festlegung der Validierungsziele 130

6.2 Festlegung des experimentellen Umfeldes 131

6.3 Vorbereitung der Validierung 133
6.3.1 Definition der Fallstudien und Auswahl der Prüfgeometrien 133
6.3.2 Auswahl der Referenz-DF's als Bearbeitungsbereiche 134
6.3.3 Auswahl der FF's und BO'en 135
6.3.4 Festlegung der Bearbeitungsreihenfolgen für die Fallstudien 137
6.3.5 Festlegung der Anwendungszenarien 138

6.4 Durchführung der VZ'e 139
6.4.1 Berechnung des Gesamtaufwands einer CNC-PK 140
6.4.2 Findung der optimalen CNC-PK für eine Planungsaufgabe 141
6.4.2.1 Berechnung von optimalen CNC-PK 141
6.4.2.2 Detail-Darstellung einer Operationsauswahl 144
6.4.3 Aufwandsreduktion in der CNC-PK-Generierung 146

6.5 Auswertung und Schlussfolgerung 147

7 Zusammenfassung und Ausblick 150

7.1 Zusammenfassung 150

7.2 Ausblick 154

8 Literaturverzeichnis 157

9 Verzeichnis der Anlagen 172

9.1 Komplexitäten in der CNC-Fertigung 172

9.2 Verfahren der NC-Programmierung 174

9.3 Wissen und Erfahrungen in der NC-Verfahrenskette 176

9.3.1 Modellierung von Wissen und Erfahrungen 176

9.3.2 Wissen und Erfahrungen in der CNC-PK-Generierung 179

9.4 Untersuchungen der NC-Verfahrenskette 181

9.4.1 Untersuchungen der Organisation in der NC-Verfahrenskette 181

9.4.2 Untersuchungen der Konstruktionsphase 182

9.4.3 Untersuchungen der Arbeitsvorbereitung und der Schnittstellen 183

9.4.4 Untersuchungen der Fertigung 186

9.5 Entwurf eines Expertensystems bzw. wissensbasierten Systems 187

9.6 Beschreibung der verwendeten Algorithmen der Graphentheorie 188

9.6.1 Beschreibung des verwendeten FW-Algorithmus 188

9.6.2 Beschreibung des verwendeten ANN-Algorithmus 190

9.7 Richtlinien und Normen zur Beurteilung von CNC-Maschinen 192

9.8 Verwendete Features und Parametersätze in der Validierung 193

9.8.1 Verwendete DF's 193

9.8.2 Verwendete FF's und BO'en 194

9.8.3 Verwendete Gewichtungsfestlegungen BK 196

9.8.4 Ergebnisse der Untersuchungen und Planungen der Testfälle 197

9.9 Datenbank-Modell des Demonstrators 201

9.10 Anwendung des Demonstrators 202

9.11 Einführung in UML 209

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1-1: Aktuelle Trends in der Zerspanungsindustrie [Börs09,VDW09] 2
Abbildung 1-2: Allgemeine Trends in der Zerspanungsindustrie [Weck98,CIMD09] 3
Abbildung 1-3: Einflussparameter der CNC-PK-Generierung 4
Abbildung 1-4: Reduzierung der nicht genutzten Potentiale in der CNC-PK-Generierung 5
Abbildung 1-5: Identifizierte Zielgruppen und deren angestrebter Nutzen 8
Abbildung 1-6: Thematische Einordnung der Ausarbeitung 10
Abbildung 1-7: Aufbau, Vorgehensweise und Methodenanwendung der Ausarbeitung 11
Abbildung 2-1: NC-Verfahrenskette nach Eversheim [Ever94] 13
Abbildung 2-2: Einordnung von ausgewählten NC-Programmierverfahren in die Planungsebenen der NC-Verfahrenskette [Weck95, Gerk00, Stor02] 16
Abbildung 2-3: Feature-basierte NC-Planung und -Programmierung nach Eversheim [Ever96] 17
Abbildung 2-4: Begriffsdefinitionen der Arbeitsvorgangsfolge nach Gerken [Gerk00] mit Erweiterungen von Chryssolouris [Chry06] 18
Abbildung 2-5: Planungsverfahren für die Reihenfolgeplanung nach [Trac01] mit Erweiterungen 22
Abbildung 2-6: Drei-schichtiges Modell zur AVF-Erzeugung nach Hellberg [Hell93] 24
Abbildung 2-7: Beispiel der Anwendung der Feature-Technologie nach Gerken [Ger00] ... 31
Abbildung 2-8: Defizite und Handlungsbedarf in den Bausteinen des Wissensmanagements 33
Abbildung 3-1: Funktionsweise des Lösungsansatzes 57
Abbildung 3-2: Funktionen des CNC-Prozessketten-Generators 59
Abbildung 3-3: Ablaufdiagramm der CNC-PK-Generierung 61
Abbildung 4-1: Vorgehensweise zur Entwicklung des Systems 63
Abbildung 4-2: UML-Use-Case-Diagramm der Anwendungsfälle 65
Abbildung 4-3: Allgemeine Vorgehensweise zur CNC-PK-Generierung 67
Abbildung 4-4: Modulare Architektur des Systems 68
Abbildung 4-5: Modellierung der Wissensbasis in „look-ahead“-Notation als Klassendiagramm 73
Abbildung 4-6: Bewertung der CNC-PK 78
Abbildung 4-7: Aufbau des gerichteten Graphen 83
Abbildung 4-8: Alternativen in einer exemplarischen CNC-PK und deren Reduktion 84
Abbildung 4-9: Automatisierte Berechnung der Aufwandsfunktionen h und n 86
Abbildung 4-10: Hamiltonkreis im gerichteten Graphen 91
Abbildung 4-11: Berechnungsaufwand für ausgewählte AV’n 98

Abbildung 4-12: Berechnungsaufwand für ausgewählte AV'n mit heuristischen ANN.....101
Abbildung 4-13: Gesamtablauf zur CNC-PK-Generierung.....105
Abbildung 4-14: Diskutiertes Anwendungsbeispiel 106
Abbildung 4-15: Überführung der DF's in FF's 109
Abbildung 4-16: ZK-Diagramm der FF's des diskutierten Anwendungsbeispiels.....110
Abbildung 4-17: Einbettung des Systems in die feature-basierte NC-Verfahrenskette.....112
Abbildung 5-1: Architektur und Einbettung des Demonstrators 120
Abbildung 5-2: Exemplarische Administration der Wissensbasis mittels Formularen 121
Abbildung 5-3: Automatisierte CNC-PK-Generierung 122
Abbildung 5-4: CNC-PK als Gantt-Diagramm.....124
Abbildung 5-5: CNC-PK als Netz im Schritt der (II) Operationsauswahl 125
Abbildung 5-6: ZK-Diagramm eines DF zur Überführung in ein FF.....125
Abbildung 5-7: Festlegung der Ressourcen und Gewichtungen.....127
Abbildung 5-8: Gesamtablauf des Demonstrators zur CNC-PK-Generierung.....128
Abbildung 6-1 (a): DMU 50 eVo; (b): DELCAM „PowerMill 9.0“ 132
Abbildung 6-2: Ausgewählte Prüfgeometrien (a): NCG; (b): NISAFORM.....135
Abbildung 6-3: Verwendete Fräswegstrategien aus PM.....136
Abbildung 6-4: Durchführung der Validierung der VZ'e.....139
Abbildung 6-5 (a): Gesamtaufwandsreduktion; (b): Verkürzung der Hauptzeit 142
Abbildung 6-6: Aufwandsreduktion in der (a): Hauptzeit und (b): Nebenzeit 143
Abbildung 6-7: ZK-Diagramm des FF „Freiformfläche“ 144
Abbildung 6-8: Detail zur Operationsauswahl des FF „Freiformfläche“ 145
Abbildung 6-9: Generierte CNC-PK der NCG.1 vor / nach der (III) Reihenfolgeumordnung 145
Abbildung 6-10: Morphologischer Kasten (Ausschnitt) beim Testfall NCG.1 146
Abbildung 6-11 (a): NCG.1 (b): NCG.2; (c): NISAFORM.1; (d): NISAFORM.2 147
Abbildung 7-1: Innovationen und erreichte wirtschaftliche Ziele 153
Abbildung 7-2: Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung 154
Abbildung 9-1: Trends in der CNC-Fertigung [Ber09] 172
Abbildung 9-2: Wissenstreppe nach Wegner [Wegn02] 177
Abbildung 9-3: Bausteine des Wissensmanagements nach Probst, Raub und Romhardt [Prob06] 179
Abbildung 9-4: Informationszunahme entlang der NC-Verfahrenskette.....179
Abbildung 9-5: Verlust von Informationen an den Schnittstellen der NC-Verfahrenskette184
Abbildung 9-6: Quellcode des genutzten FW-Algorithmus 189
Abbildung 9-7: Quellcode des genutzten ANN-Algorithmus.....190
Abbildung 9-8: Datenbank-Modell des Demonstrators 201
Abbildung 9-9: Karteikarte „CAD-Import“ 202

Abbildung 9-10: Karteikarte „Konfiguration“ 203
Abbildung 9-11: Karteikarte „Reihenfolgefestlegung“ 204
Abbildung 9-12: Karteikarte „Operationsauswahl“ 205
Abbildung 9-13: Karteikarte „Reihenfolgeumordnung“.....206
Abbildung 9-14: Karteikarte „Automatische Auswahl“ 207
Abbildung 9-15: Karteikarte „CAM-Export“ 208

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2-1: Planungskriterien nach Cai [Cai06] 19
Tabelle 2-2: Auswahl von AVF-Bestimmung [Hell93, Rudo93, Hame96] 28
Tabelle 2-3: Beispiel unterschiedlicher Strategieparametersätzen bei FF's 32
Tabelle 2-4: Trends bzw. Anforderungen an die CNC-PK-Generierung und Defizite des Stands der Technik und der Forschung 47
Tabelle 3-1: Handlungsbedarf und Forschungsbedarf in der CNC-PK-Generierung 49
Tabelle 4-1: Beteiligte Mitarbeiterprofile 64
Tabelle 4-2: Kriterien zur Bewertung der Wissensrepräsentationen 70
Tabelle 4-3: Wissensrepräsentation und deren Bewertung 71
Tabelle 4-4: Menge KN der Kriterien zur Bewertung der BO'en-Wechseleigenschaften 77
Tabelle 4-5: Menge KH der Kriterien zur Bewertung der BO'en-Bearbeitungseigenschaften 77
Tabelle 4-6: KO-Kriterien zur Bewertung von Methoden zur Wissensverarbeitung 80
Tabelle 4-7: Methoden zur Wissensverarbeitung und deren Bewertung 81
Tabelle 4-8: Laufzeit von ausgewählten Algorithmus-Beispielen [Jung90, Sedg92] 93
Tabelle 4-9: Vorstellung verwendbarer Algorithmen bzw. Abbildungen mit deren Berechnungsaufwand 94
Tabelle 4-10: Laufzeit charakterisierende Parameter mit exemplarischen Werten 95
Tabelle 4-11: Zusammenstellung der AV'n in den Teilfunktionen (I)-(III) 96
Tabelle 4-12: Darstellung der relevanten AV'n 97
Tabelle 4-13: Auswahl von Heuristiken und Approximationsalgorithmen 100
Tabelle 4-14: Weiter betrachtete AV-Fälle unter Nutzung der ANN-Heuristik 102
Tabelle 4-15: Zusammenfassung der Funktionsweise des vorgestellten Verfahrens als Ergänzung zum Stand der Technik und Forschung 115
Tabelle 5-1: Analysierte Eigenschaften der generierten CNC-PK 123
Tabelle 6-1: Festlegung der VZ'e und deren Nachweis 130
Tabelle 6-2: Fertigungstechnische Rahmenbedingungen der Experimente 132
Tabelle 6-3: Richtlinien und Normen nach [NCG04,05,07] und [HYMO08] 133
Tabelle 6-4: Auswahl von sechs repräsentativen DF's aus NCG-2004 und NISAFORM-2008 135
Tabelle 6-5: Verwendete Werkzeuge mit Technologieparametern [Hoff08] für Werkstoff AlMgSi 136
Tabelle 6-6: Anzahl der theoretisch zu berechneten CNC-PK pro Fallstudie 137
Tabelle 6-7: Referenz-Bearbeitungsreihenfolge (Referenz-CNC-PK) mit verwendeten Fräswegstrategien, Werkzeugen und Technologienparametern beider Fallstudien 138

Tabelle 6-8: Anforderungen FA und Gewichtungsparameter bk für die Anwendungszenarien 139
Tabelle 6-9: Betrachtete Testfälle 139
Tabelle 6-10: Vergleich des berechneten und des realen Aufwands 140
Tabelle 6-11: Aufwandsreduktion bei der Demonstrator-Anwendung auf die Testfälle in [%] 141
Tabelle 6-12: Vergleich des manuellen Aufwands zur Operationsauswahl (II) 147
Tabelle 6-13: Zusammenfassung der Ergebnisse der Validierung 148
Tabelle 9-1: Wissensdimension in Anlehnung an Wegner [Wegn02] 177
Tabelle 9-2: Erfahrungswissen in der NC-Verfahrenskette nach Glockner [Gloc99] 180
Tabelle 9-3: Richtlinien und Normen zur Beurteilung von CNC-Maschinen [NCG04] 192
Tabelle 9-4: Verwendete Prüfgeometrien 192
Tabelle 9-5: Verwendete DF's und deren Charakteristika 193
Tabelle 9-6: Verwendete FF's und deren Charakteristika der BO'en 194
Tabelle 9-7: Anforderungen und Gewichtungsparameter für die Anwendungszenarien 196
Tabelle 9-8: Vergleich der berechneten und realen Messwerte des NCG.1 - Schlichtens ..197
Tabelle 9-9: Vergleich der berechneten und realen Messwerte 197
Tabelle 9-10: NCG.1, NCG.2; Referenzplan und generierte CNC-PK 198
Tabelle 9-11: NISAFORM.1, NISAFORM.2; Referenzplan und generierte CNC-PK 198
Tabelle 9-12: Aufwandsreduktion bei der Demonstrator-Anwendung auf die Testfälle in [%] 198
Tabelle 9-13: NCG.1; Vergleich der Referenz-CNC-PK zur generierten CNC-PK 199
Tabelle 9-14: NCG.2; Vergleich der Referenz-CNC-PK zur generierten CNC-PK 199
Tabelle 9-15: NISAFORM.1; Vergleich der Referenz-CNC-PK zur generierten CNC-PK 200
Tabelle 9-16: NISAFORM.2; Vergleich der Referenz-CNC-PK zur generierten CNC-PK 200
Tabelle 9-17: Vorteile von UML [Kech05] 209
Tabelle 9-18: Verfügbare UML-Diagramme [Kech05] 210

Verzeichnis der Abkürzungen

ANN	All Nearest Neighbors
AP	Application Protocol
APT	Automatically Programmed Tools
AV	Anwendungsvariante
AVF	Arbeitsgangsfolge(n) bzw. Arbeitsvorgangsfolge(n)
Ax	Annahme mit der Nummer x
BDE	Betriebsdatenerfassung
BO	Bearbeitungsoperation
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAP(P)	Computer Aided Process Planning
CAx	Computer Aided x, x ist ein Platzhalter zur Repräsentation verschiedener computer-unterstützter Techniken
CBR	Case-Based-Reasoning, zu Deutsch: Fallbasiertes Schließen
CLDATA	Cutter-Location Data
CNC	Computerized Numerical Control
CNC-PK	CNC-Prozesskette(n)
DAG	Directed acyclic graph
DNC	Distributed Numerical Control
DF	Design-Feature
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLL	Direct Library Link
EU	Europäische Union
ERP	Enterprise Resource Planning
FF	Fertigungs-Feature
FS	Fräswegstrategie
FW	Floyd-Warshall bzw. Floyd-Warshall-Algorithmus
GA	Genetische Algorithmen
HP	Hamilitonpath (deutsch Hamiltonweg)
HS	Heuristische Suche
HSC	High Speed Cutting
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
ISO	International Organization for Standardization
IWP	Instituts für Werkstoffe und Produktionsforschung
JSP	Job Scheduling Problem

KADS	Knowledge Acquisition und Documentation System
KI	Künstliche Intelligenz
KMM	Koordinatenmessmaschinen
KNN	Künstliches Neuronales Netz; Synonym zu Neuronales Netz
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
NC	Numerical Control
NP	nichtdeterministisch polynomielle Zeit
PLM	Product Lifecycle Management
PM	DELCAM „PowerMill 9.0”
PP	Post-Prozessor
PPS	Produktionsplanung und -Steuerung
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
STEP-NC	Standard for the Exchange of Product Model Data Numerical Control
SQL	Structured Query Language
T	Tool (Werkzeug)
TCO	Total Cost of Ownership
TSP	Traveling-Salesman-Problem, zu Deutsch: Problem des Handlungsreisenden
UML	Unified Modeling Language
VB	Visual Basic
VDAFS	Verband der Automobilindustrie - Flächenschnittstelle
VZ.x	Validierungsziel mit der Nummer x
WB	Wissensbasis
WOP	Werkstattorientierte Programmierung
XML	Extensible Markup Language

Formelzeichen und Symbole[1]

A	Orientierung im Raum, Drehung um die X-Achse
akh	Menge der Anzahl der Kriterien in der jeweiligen Kategorie in der Hauptzeit
akn	Menge der Anzahl der Kriterien in der jeweiligen Kategorie in der Nebenzeit
AUFS	Menge der Aufspannungen
B	Orientierung im Raum, Drehung um die Y-Achse
b	Abbildung zur Berechnung des Gesamtaufwandes einer *PK*
BE	Menge der Bearbeitungseigenschaften
BK	Menge der Bewertungskonfigurationen
BO	Menge der Bearbeitungsoperationen
C	Orientierung im Raum, Drehung um die Z-Achse
card	Cardinality (deutsch: Kardinalität)
CNCM	Menge der CNC-Maschinen
d	Durchmesser d eines Werkzeuges
DFA	Relation zur Zuordnung der Abhängigkeiten zwischen DF's
DF	Menge der Design-Features
DG	Directed Graph (deutsch: Gerichteter Graph)
ECK	Menge der Ecken
F	Menge der Gewichtungen (f_{Zeit}, f_{Kosten}, $f_{Qualität}$)
FF	Menge der Fertigungs-Features
FA	Menge der Fertigungsanforderungen
FAZ	Relation zur Zuordnung von $\Re$ zu *K*
fz	Vorschub
f_{Zeit}	Faktor zur Gewichtung der Zeit
f_{Kosten}	Faktor zur Gewichtung der Kosten
$f_{Qualität}$	Faktor zur Gewichtung der Qualität
G	Menge der Gewichtungen von Kriterien
h	Abbildung zur Bewertung von einzelnen BO'en
K	Menge der Kriterien
KAN	Menge der Kanten

[1] Verwendete Laufvariablen werden nicht extra aufgeführt. Bezeichner, bestehend aus kleinen Buchstaben, kennzeichnen weiterhin die jeweiligen Elemente der Menge, die mit Großbuchstaben gekennzeichnet ist. Im Unterabschnitt 4.5.5 „Komplexitätsbetrachtungen der Algorithmen und Methoden zur Wissensverarbeitung" werden teilweise weiterführende Variablen zur Kennzeichnung der Laufzeiten der Algorithmen genutzt.

KH	Menge der Kriterien zur Bewertung von Bearbeitungseigenschaften von BO'en
KN	Menge der Kriterien zur Bewertung der Wechseleigenschaften von BO'en
$\aleph$	Menge der natürlichen Zahlen
n	Abbildung zur Bewertung des Wechseln zwischen zwei BO'en
nf	Abbildung zur Berechnung der Normierung
p	Abbildung zur Prozessketten-Generierung
PK	Menge der Prozessketten
r	Kantenradius eines Torusfräsers
$\Re$	Menge der reellen Zahlen
R	Relation zur Reihenfolgedarstellung der BO'en in PK
$STRAT$	Menge der Strategieparameter
$TECHN$	Menge der Technologieparameter
tf_1	Funktion der Reihenfolgefestlegung
tf_2	Funktion der Operationsauswahl
tf_3	Funktion der Reihenfolgeumordnung
vc	Schnittgeschwindigkeit
VR	Menge der verfügbaren Ressourcen
W	Werkstückbeschreibung
WKZ	Menge der Werkzeuge
X	Position im Raum, X-Achse
Y	Position im Raum, Y-Achse
z	Zähneanzahl eines Werkzeuges
Z	Relation zur Zuordnung von G zu K
Z	Position im Raum, Z-Achse
(+)	Additive Verknüpfung zur Bestimmung von Berechnungsaufwänden
(*)	Multiplikative Verknüpfung zur Bestimmung von Berechnungsaufwänden
$f : X \rightarrow Y$	Abbildung f, die jedem Wert aus X einen Wert aus Y zuordnet
$n!$	Fakultät von n
$O(f(n))$	Laufzeit O der Funktion f
$X \subseteq Y$	X ist Teilmenge von Y